

## Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка

Тридцать два года Лабораторией нейтронной физики руководил академик Илья Михайлович Франк. За несколько лет до смерти, находясь в больнице, Илья Михайлович написал Б.М.Понтекорво: «... в своих научных утверждениях я никого умышленно не вводил в заблуждение, т. е. не говорил чего-либо, в чем сомневался. Но ошибаться я, конечно, мог и, несомненно, иногда ошибался. В научных дискуссиях я также не всегда был прав. Думаю, очень плохо, если ученый уверовал в свою непогрешимость. Однако... мне всегда хотелось быть надежным, и я к этому стремился». Это кредо Ильи Михайловича и определило, наверно, особую ауру научного общения в лаборатории.

У каждой лаборатории Института своя предыстория и своя судьба. Если ЛЯП и ЛВЭ прошли заметный путь до образования ОИЯИ и послужили базой при его создании, то Лаборатория нейтронной физики родилась как строка в решении об учреждении ОИЯИ странами-участницами.

А вначале было слово...

В конце 1955 года в ФЭИ (г. Обнинск) проходил семинар, на котором обсуждалась работа американцев по исследованию зависимости сечения деления урана-235 от энергии нейтронов. В этом эксперименте использовался вращающийся синхронно с прерывателем пучка диск, с нанесенным на него слоем урана, и измерялась возникшая радиоактивность урана на ободу колеса. «Вдруг ДИ (Д.И.Блохинцев, в то время директор ФЭИ) поднимает руку и вещает: а что, если часть активной зоны реактора закрепить на ободу такого диска, да так, чтобы при каждом обороте эта часть проходила вблизи неподвижной зоны и создавала бы кратковременно сверхкритическую массу?»

Так вспоминает начало работы над проектом импульсного быстрого (вернее, на быстрых нейтронах) реактора — ИБРа один из разработчиков теории этого реактора Ю.Я.Стависский. Другим участником проектирования ИБРа стал И.И.Бондаренко — талантливый физик, заместитель директора ФЭИ.

Преимущества импульсного реактора в сравнении с механическими селекторами, применяемыми в то время на стационарных реакторах, были ясны с самого начала: намного экономичнее заставить пульсировать мощность реактора вместо отсекаания нейтронного пучка прерывателем. Именно так позже Д.И.Блохинцев пояснил намерение разработчиков ИБРа.



Директор ЛНФ (1957—1990 гг.) лауреат  
Нобелевской премии академик  
АН СССР И.М.Франк



Заместитель директора ЛНФ  
(1959–1972 гг.) член-корреспондент  
АН СССР Ф.А.Шапиро

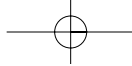
В середине 1956 года Д.И.Блохинцеву предложили возглавить организуемый в Дубне международный институт, и он поставил перед министром Е.П.Славским, отвечающим за создание ОИЯИ, условие: принять решение о сооружении в Дубне новой установки — ИБР. Для развертывания физических исследований на этом реакторе была образована Лаборатория нейтронной физики, а ее директором был избран И.М.Франк... «Колесо» закрутилось.

В 1957–1958 годах ЛНФ было выделено около десятка комнат в корпусе № 3 ЛЯП, штат формировался с нуля. Кроме директора сразу был назначен главный инженер — С.К.Николаев. Среди первых сотрудников лаборатории были: Ю.С.Язвичкий, В.П.Алфименков, В.Н.Ефимов, И.И.Шелонцев, Б.И.Воронов, Н.А.Мацуев, Г.Н.Забякин, В.Д.Шибяев, А.К.Попов, М.С.Лисицына, Т.В.Ануфриева, В.Христов, Ким Хен Бон. К концу 1958 года число сотрудников возросло до 75 человек.

В ноябре 1960 года И.М.Франк выступил с докладом на IX сессии Ученого совета ОИЯИ, посвященным итогам пусковых работ на первом импульсном ре-

акторе ЛНФ. Теперь удивляет свершившееся: от слова до дела — воплощения идеи в «материю» потребовалось всего три года. В работе по проектированию ИБРа участвовали также другие сотрудники ФЭИ: Ю.А.Блюмкина, В.П.Зиновьев, Н.В.Красноярков, Ф.И.Украинцев под научным руководством О.Д.Казачковского. Строительство реактора потребовало решения многих инженерных задач, в том числе создания машины, обеспечивающей быстрые повторяющиеся изменения реактивности. Такая машина была сконструирована, изготовлена и испытана за три месяца в Центральном институте авиамоторостроения. Реактор оснащался различными оригинально сконструированными устройствами, обеспечивающими плавную регулировку реактивности реактора. Впервые была разработана аппаратура, позволяющая контролировать мощность реактора в импульсном режиме. Во всей этой работе принимали участие многие проектные учреждения и институты. Основными участниками этих работ были Г.Е.Блохин, В.А.Бочковский, И.С.Головнин, Б.В.Крутиков, П.М.Назаров, В.М.Лебедев, В.А.Малых, В.И.Орлов, А.С.Займовский.

К концу 1959 года завершилось строительство здания реактора, корпуса управления, измерительных павильонов с нейтронноводами от 100 до 1000 метров. Прорабом



на стройке был В.Л.Карповский – будущий административный директор ОИЯИ. К этому времени были проведены критсборки и экспериментально оценены основные параметры ИБРа: критмасса, зависимость реактивности от положения подвижной части зоны относительно неподвижной, и тем самым уточнена ожидаемая ширина нейтронного импульса.

Большой объем работ по подготовке реактора к пуску был выполнен и сотрудниками ЛНФ под руководством главного инженера С.К.Николаева. Значительный вклад внесен инженерами Б.Н.Дерягиным, Б.Н.Буниным, А.К.Поповым, Б.Е.Лощилковым, С.А.Квасниковым, В.М.Назаровым, В.Д.Ананьевым. Вклад в уточнение теории реактора и выполнение пусковых работ внес Ким Хен Бон (КНДР), необходимые расчеты были выполнены В.Н.Ефимовым и Е.П.Шабалиным. В пусковых работах участвовали китайские инженеры Ван Ши-ди, Чень Те-юн, Цзен Най-гун.

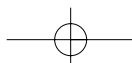
Пуск ИБРа состоялся 23 июня 1960 года. Этот день, без сомнения, ярко живет в памяти всех его участников. Руководитель пуска Ю.Я.Стависский часто прибегал из пультовой на второй этаж к временному анализатору, чтобы глазами увидеть, что происходит с формой нейтронного импульса. Ширина импульса волнующе сокращалась по мере повышения реактивности. На пульте находился Д.И.Блохинцев, болея за свое детище. Вечером реактор достиг критического состояния в импульсном режиме – пуск состоялся!

В испытаниях реактора под руководством Ф.Л.Шапиро участвовали Ю.С.Язвический, В.И.Лушиков, Г.С.Самосват, А.Б.Попов. В июле реактор был выведен на проектную мощность 1 кВт, ширина нейтронного импульса составила 36 мкс и была близкой к значению, оцененному после критсборок.

## 1. Основные научные направления, развиваемые в ЛНФ

С овладением ядерной энергией нейтронная физика, казалось бы, завершила главную задачу своего развития. В действительности – научная основа атомной энергетики только одно из направлений нейтронной физики. Параллельно с развитием техники реакторов стало возможным детально изучать свойства самого нейтрона, применять нейтроны для изучения свойств ядер – нейтронных резонансов, свойств ядерной материи при высоких энергиях возбуждения. Нет иной возможности возбуждать состояния ядер, имеющие ширину десятые доли электронвольта и лежащие при энергиях возбуждения несколько миллионов электронвольт. Развитие импульсных источников нейтронов привело к возникновению новой области ядерной физики – нейтронной спектроскопии ядер. Использование импульсных реакторов типа ИБР оказалось весьма перспективным для работ с медленными нейтронами в изучении редких реакций. Использование режима бустера (сочленения реактора ИБР с ускорителем электронов), позволило продвинуться в спектроскопических исследованиях до энергий нейтронов в десятки кэВ и выполнить важные исследования свойств атомных ядер.

В ЛНФ впервые в мире был развит метод поляризации нейтронов пропусканием их через поляризованную протонную мишень, позволивший получать поляризованные нейтроны в широком интервале энергий вплоть до нескольких десятков кило-



электронвольт. На пучке поляризованных нейтронов проведен обширный цикл исследований зависимости свойств нейтронных резонансов от их спина.

С момента открытия деления изучение этого явления активно продолжалось все последующие годы. Несмотря на огромный материал и выяснение множества закономерностей, механизм деления настолько сложен, что до сих пор продолжается развитие количественной теории этого удивительного явления, проводятся новые эксперименты.

Методы нейтронной спектроскопии были использованы для обнаружения необычайно тонких эффектов в свойствах ядер и в особенностях взаимодействия с ними нейтронов: определение магнитных моментов высоковозбужденных состояний ядер, величин химических сдвигов нейтронных резонансов и эффектов несохранения пространственной четности в нейтронных резонансах, — именно в Лаборатории нейтронной физики выполнены эти пионерские исследования.

Открытие сотрудниками ЛНФ ультрахолодных нейтронов (УХН) создало не только активно разрабатываемое во всем мире направление по изучению их свойств, но и привело к постановке уникальных экспериментов по измерению времени жизни нейтрона и по оценке его электрического дипольного момента.

На реакторах ИБР успешно развивались исследования конденсированных сред. Наблюдение неупругого рассеяния нейтронов является эффективным методом изучения свойств жидкостей и твердых тел. Особенно эффективным в сочетании с импульсными источниками нейтронов оказался метод обратной геометрии, по сути, впервые примененный в ЛНФ.

Нейтроннографические методы исследования свойств вещества опираются на свойства нейтрона как элементарной частицы, из которых наиболее важными являются отсутствие электрического заряда, наличие массы покоя, достаточно сильное взаимодействие с атомными ядрами и его зависимость от типа изотопа одного и того же элемента, наличие большого магнитного момента. Совокупность этих свойств делает нейтроны сильно проникающим видом излучения, волновые свойства которого могут быть выбраны адекватными размерам изучаемых объектов.

Все прошедшие годы развивались исследования по нейтронно-структурному анализу с использованием метода дифракции нейтронов. Уделялось внимание исследованиям магнитных свойств разных материалов, интенсивно продолжается изучение высокотемпературных сверхпроводников и других систем с сильными электронными корреляциями. В ЛНФ успешно развивались пионерские исследования методом малоуглового рассеяния структуры конденсированных сред, особенно биологических объектов, по изучению самоорганизующихся систем и микроскопических термодинамических характеристик.

Методы нейтроннографии позволяют изучать динамические процессы в биологических системах (диффузию молекул, сегментную подвижность, продольные и поперечные колебания полипептидных цепей и т.п.).

## 2. Первые эксперименты на ИБРе

Эксперименты в области ядерной физики были начаты в 1961 году группами Ю.С.Язвического и Л.Б.Пикельнера с изучения параметров нейтронных резонансов ядер родия, празеодима и тербия, данные для которых в то время отсутствовали, с использованием времяпролетной методики. Большие поисковые работы были проведены по созданию жидкостных сцинтилляционных детекторов. Здесь все требовало поиска: лучших сцинтиллирующих добавок, лучших отражателей для покрытия поверхностей контейнеров и их связующей основы, которая не портила бы сцинтиллирующие способности жидкости, лучших фотоумножителей как по временным и шумовым характеристикам, так и по площади фотокатодов, лучших резин для уплотнений и лучших клеев. В то удивительное время достаточно было приехать на любой завод или в любой институт с письмом на имя директора или главного инженера, в котором содержалась стандартная фраза «дирекция ЛНФ в порядке научно-технического сотрудничества просит оказать содействие такому-то в получении консультации по такому-то вопросу», — и тебе открывались все двери не только для консультации, но и для получения новейших образцов ФЭУ, фторопластовых резин, эпоксидных клеев, соединений для отражателей...

Были созданы детектор нейтронов для измерений пропускания рекордной для того времени площади ( $500\text{--}800\text{ см}^2$ , с борным наполнителем), 400-литровый детектор для регистрации гамма-квантов, 400-литровый детектор (с кадмиевым наполнителем) для регистрации актов деления, детектор для регистрации упруго рассеянных нейтронов. С момента пуска реактора ИБР начались интенсивные исследования с этими детекторами на 1000-метровой пролетной базе. В этих исследованиях участвовал интернациональный коллектив в составе: Т.Стадников, И.Визи, Ван Най-янь, Яо Чу-чуань, Н.Илиеску, Ким Хи Сан, Ван Ши-ди, Со Дон Сик, Н.Янева, Ю.В.Рябов, Э.Дерменджиев, Э.И.Шарапов, Х.Малэцки, М.Пшитула, А.Б.Попов, Э.Н.Каржавина. Большую работу проделали И.И.Шелонцев и Н.Ю.Ширикова по созданию программ обработки экспериментальных данных на вычислительных машинах.

Одной из первых работ по спектроскопии захватного  $\gamma$ -излучения (Д.Дорчоман, Б.Кардон, Д.Киш, Г.С.Самосват, 1962–1963 гг.) были поиски интерференции резонансного захвата нейтронов с потенциальным в окрестности резонанса  $4,9\text{ ЭВ}$  золота. Такой эффект мог иметь



Вид на здание управления ИБР-30 и 1000-метровую пролетную базу

место согласно модели прямого захвата. В результате измерений с кристаллом йодистого натрия на пролетной базе 100 м была впервые установлена верхняя оценка величины сечения потенциальной части прямого захвата  $\sim 0,5$  миллибарна при условии, что большинство  $\gamma$ -линий жесткой части спектра излучаются в прямом процессе.

Первые эксперименты по физике конденсированных сред были проведены В.В.Голиковым, И.Жуковской, Ф.Л.Шапиро, А.Шкатулой и Е.Яником. Они изучали неупругое рассеяние нейтронов на воде и льде при разных температурах, а также на некоторых органических жидкостях. Метод обратной геометрии был впервые использован в 1962 году в работе Т.А.Мачехиной, З.И.Огжевальского и Ф.Л.Шапиро для исследований спектров нейтронов, рассеянных поликристаллическим  $\text{NH}_4\text{Cl}$ .

Для обеспечения уже первых перечисленных экспериментов потребовалась разработка многоканальных анализаторов и электронных блоков для детектирующей аппаратуры. Лаборатория пошла по пути разработок своих стандартных блоков (сначала на лампах, затем на полупроводниковых элементах), которые были выполнены Г.П.Жуковым, В.И.Чивкиным, Б.Н.Соловьевым, К.Г.Родионовым и др. Исключительно важным оказалось создание лабораторного измерительного центра с парком многоканальных и двумерных анализаторов (В.Д.Шибаетов, Б.Е.Журавлев, Г.П.Жуков, В.Г.Тишин) и цифровой аппаратурой, обеспечившей вывод информации с анализаторов по кабелю на устройства вычислительного центра ОИЯИ (В.Н.Замрий). Большая заслуга в создании детекторной аппаратуры и измерительного центра ЛНФ принадлежит начальнику сектора электроники Г.Н.Забиякину. В дальнейшем лабораторный измерительный центр был оснащен собственной ЭВМ БЭСМ-4, обеспечившей не только сбор всей экспериментальной информации, но и ее экспресс-обработку с помощью осциллографа со световым карандашом, существенно обновились анализаторные устройства с внедрением микросхем. В развитие измерительного центра внесли вклад Г.Н.Зимин, В.А.Владимиров, В.А.Вагов, В.А.Ермаков, Г.А.Сухомлинов.

При проведении нейтронно-спектрометрических исследований стало ясно, что прекрасная по интенсивности установка ИБР может быстро потерять свое преимущество в сравнении со спектрометрами на базе ускорителей, имевшими более короткие длительности нейтронных импульсов. Поэтому уже в начале 60-х годов было принято решение дополнить ИБР электронным ускорителем и использовать его зону как размножитель нейтронов, рождаемых в вольфрамовой мишени короткими импульсами электронов. Такой бустерный режим был реализован в 1965 году с помощью микротрона, запущенного усилиями С.П.Капицы, И.М.Маторы, П.С.Анцупова и Р.В.Харьюзова. К 1969 году ИБР был реконструирован (его мощность была повышена в  $\sim 30$  раз), а микротрон был заменен на более сильноточный линейный ускоритель, — так родилась действовавшая до июня 2001 года установка ИБР-30+ЛУЭ-40. Основным создателям этой установки в 1971 году была присуждена Государственная премия.

### 3. К истории импульсных исследовательских реакторов в ЛНФ

После пуска и успешной эксплуатации первого ИБРа все последующие импульсные реакторы создавались только в Дубне, если не принимать во внимание японский реактор YAYOI и серийные реакторы типа TRIGA, которые могут работать только в режиме редко повторяющихся импульсов (не чаще одного раза за несколько минут).

С целью упрощения конструкции уникального, впервые сооружаемого реактора, средняя мощность ИБРа была выбрана небольшой – 1 кВт (при этом мгновенная мощность в импульсе достигала 5 МВт). В дальнейшем В.Д.Ананьевым была обоснована возможность при повышении расхода охлаждающего воздуха повысить среднюю мощность реактора до 6 кВт, и с 1964 года реактор работал на мощности от 2 до 6 кВт.

Вообще довольно длинный импульс реактора (50 мкс) был более адекватен задачам физики конденсированных сред. Для сокращения импульса первый ИБР, по предложению Ф.Л.Шапира, с 1965 года начал использоваться в режиме размножения нейтронных импульсов нейтроно-производящей мишени электронного ускорителя-микротрона. С пуском импульсного бустера (так назвали тандем ускорителя и ИБРа) длительность нейтронного импульса сократилась до трех мкс, а фактор качества импульсного источника нейтронов  $N/\theta^2$ , введенный Ф.Л.Шапиро ( $N$  – интенсивность источника, или поток нейтронов, с поверхности замедлителя, а  $\theta$  – длительность нейтронной вспышки), увеличился почти на два порядка.

В 1966 году на ИБРе был осуществлен режим импульсов с переменной амплитудой, а также режим редких импульсов с периодом повторения 5 секунд. Для создания такого режима понадобился модулятор реактивности с тремя подвижными элементами, синхронизированными между собой. Два более быстрых модулятора были те же, что и в обычном режиме 5–10 Гц, а именно: вращающиеся стальные диски с запрессованными в них урановыми вкладышами. Третьим элементом модулятора реактивности был качающийся (вверх-вниз) стержень из вольфрама. В режиме редких импульсов пиковая мощность была 1 ГВт.

Первый ИБР завершил работу в августе 1968 года. Примечательно, что последним экспериментом на этом реакторе был знаменитый опыт по первому наблюдению ультрахолодных нейтронов, осуществленный как раз в режиме редких импульсов. 10 июня 1969 года был введен в работу усовершенствованный аналог ИБРа – ИБР-30 («30», потому что проектная средняя мощность его



Ф.Л.Шапира, А.И.Бабаев, В.Т.Руденко  
и И.М.Франк у зоны реактора ИБР-30  
(1969 г.)

была 30 кВт, но работал реактор на мощности 20–25 кВт). Увеличение мощности достигнуто изменением конструкции плутониевых твэлов и введением в стальной диск двух урановых вкладышей (модуляторов реактивности) вместо одного. Был сохранен режим редких импульсов с периодом пульсации до 13 секунд. неполадки в механической системе привода вольфрамового стержня послужили причиной аварии на ИБР-30 в 1972 году. После этого события режим редких периодических импульсов был аннулирован.

Бустерный режим (а ИБР-30 использовался попеременно в режиме реактора и в режиме бустера до 1986 года, когда была отменена работа в режиме реактора) осуществлялся с линейным резонансным ускорителем ЛУЭ-40 в качестве инжектора с энергией ускоренных электронов 44 МэВ и током в импульсе 0,2 А. Средняя мощность в режиме бустера была 10 кВт при полуширине вспышки быстрых нейтронов 4 мкс. Высокая светосила спектрометра на ИБР-30 позволила открыть ряд совершенно новых направлений в исследовании ядра и физике конденсированных сред.

Бустер ИБР-30 выведен из эксплуатации в 2001 году с тем, чтобы в дальнейшем заменить его бустером с существенно более коротким импульсом, более адекватным исследованиям по фундаментальной и прикладной ядерной физике. Работу по проекту нового бустера возглавили и активно продвигали В.Л.Аксенов, Ю.П.Попов и В.Т.Руденко. Объявленный конкурс на создание нового линейного ускорителя для бустера с напряженными исходными параметрами – 10 кВт мощность пучка при продолжительности импульса не более 250 нс и частоте повторения 100–150 Гц при длине ускорителя не более 8 м – выиграла группа Института ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН. В 1992 году при активном участии В.Л.Ломидзе, А.К.Красных и В.И.Фурмана была окончательно сформулирована концепция нового источника, получившего имя ИРЕН (Источник Резонансных Нейтронов). Официальный статус проекта новой базовой установки ОИЯИ ИРЕН получил на 75-й сессии Ученого совета в мае 1994 года. Тогда же руководителем проекта был назначен В.И.Фурман, главным инженером В.Д.Ананьев и ответственным за ускорительную часть ИРЕН А.К.Красных, НИКИЭТ выступил разработчиком проекта мишенной части. Вследствие недостаточного финансирования проекта ИРЕН к настоящему времени завершено лишь изготовление ускорительных секций и начат монтаж ускорителя в здании 43, а также изготовлены плутониевые твэлы на комбинате «Маяк». Дирекция ОИЯИ делает все возможное, чтобы изыскать средства, необходимые для успешного завершения проекта с тем, чтобы новый современный источник нейтронов ИРЕН работал на ядерную физику в обозримом будущем.

Как результат успешного начала программы изучения структуры и динамики конденсированных сред на первом реакторе ИБР, уже в 1963 году начались предварительные расчетные работы по обоснованию возможности создания значительно более мощного ИБРа, по своим нейтронным характеристикам для исследований методами рассеяния медленных нейтронов не уступающего 50–100 мегаваттным стационарным реакторам (HFR в ИЛЛ, Гренобль, SM-2 в НИИАР, Димитровград, ПИК в ПИЯФ, Гатчина) и имеющимся тогда на уровне концепций источникам на основе протонных ускорителей (spallation neutron sources, SNS). В начале 1966 года было принято решение о начале проектных работ по новому реактору ИБР и курирование этих работ от дирекции ЛНФ было возложено на Ю.С.Язвницкого.





**Начало работ по проектированию реактора ИБР-2**  
Слева направо: Е.П.Шабалин, А.Навроцки, В.М.Назаров, Ю.С.Язвицкий,  
Б.И.Куприн, В.Д.Ананьев

Интенсивная работа над созданием импульсного реактора средней мощностью 5–10 МВт под названием ИРМ началась в 1967 году, после того как были опубликованы проекты мощных реакторов типа ИБР в Европе (SORA) и в США, Брукхейвенская лаборатория. Ни один из этих зарубежных проектов, однако, не был реализован. Между прочим, в этих проектах имелись принципиальные, фатальные погрешности, которые не позволили бы иметь декларируемые параметры (мощность и длительность импульса). Например, реактор по Брукхейвенскому проекту вместо 30 МВт средней мощности смог бы работать только на мощности не выше нескольких мегаватт вследствие так называемой «импульсной» неустойчивости, которая принципиально присуща импульсным реакторам периодического действия и была открыта в ЛНФ. В Дубне же новый реактор с проектной мощностью 4 МВт под названием ИБР-2 был построен к 1977 году с участием НИКИЭТ, ГСПИ, ВНИИНМ и других институтов и организаций СССР и стран-участниц ОИЯИ. Физический пуск был завершён в 1978 году, а начало официальной эксплуатации пришлось на апрель 1984 года. Продолжительный период пуска реактора объясняется новизной проблемы и стремлением снизить до минимума риск предаварийных ситуаций. Среднюю мощность решили ограничить двумя мегаваттами для обеспечения предельно возможной ядерной безопасности и надёжности установки, а длительность импульса оказалась равной 216 мкс вместо проектного значения 90 мкс. Но и с этими параметрами ИБР-2 стал и остаётся одним из наиболее эффективных импульсных источников медленных нейтронов для исследования конденсированных сред.



Р.Мёссбауэр, Т.Ф.Дмитриева и И.М.Франк обсуждают проект ИБР-2

Конструкция активной зоны ИБР-2 определялась в первую очередь требованиями получения высоких нейтронных потоков порядка  $10^{16} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  в импульсе при малой длительности импульсов. Это возможно только на реакторе, имеющем мощность несколько мегаватт. Поэтому пришлось отступить от принципиальной схемы первых ИБР, т. к. при ней нельзя обеспечить необходимый теплосъем с подвижных элементов модулятора реактивности, содержащих делящиеся элементы. Для ИБР-2 была принята схема, при которой модуляция реактивности осуществляется за счет перемещения основного и дополнительного отражателей нейтронов около активной зоны. Поскольку материал отражателя не содержит делящихся элементов, теплосъем с него легко обеспечивается потоком газообразного гелия. Подвижный отражатель — модулятор реактивности выполнен в виде двух лопастей сложной конфигурации, имеющих радиус 1,2 м и массу несколько сот килограммов каждая. Лопать основного отражателя вращается со скоростью до 1500 об/мин в плоскости, параллельной касательной к поверхности зоны. Импульс мощности возникает при одновременном прохождении обеих лопастей около зоны. Для гарантий безопасности и постоянства амплитуд импульсов мощности механизм вращения лопастей выполнен с очень высокой точностью. Так, флуктуации положения конца лопасти в момент прохождения около активной зоны не превышают нескольких десятков микрометров. Специальная электронная система контролирует стабильность работы отражателя.

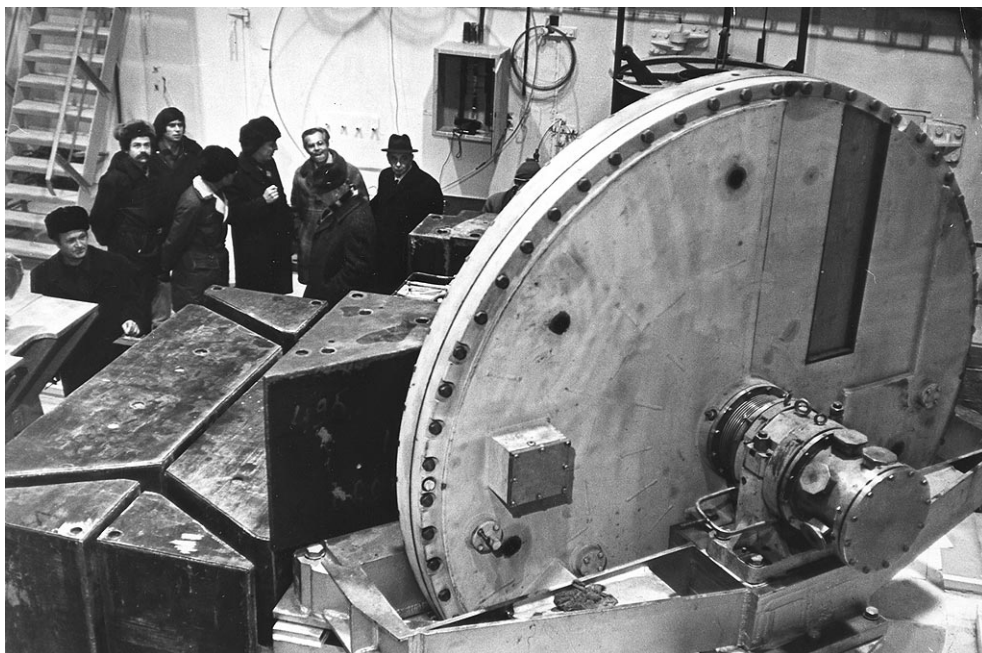
Требование получения высоких нейтронных потоков при малой длительности импульсов привело также к необходимости создания компактной зоны с большим



Сборка подвижного отражателя ИБР-2 на стенде

удельным тепловыделением и малым временем жизни нейтронов. Была выбрана активная зона из окиси плутония с натриевым охлаждением, аналогичная активной зоне реактора БР-5, построенного в Физико-энергетическом институте в 60-х годах. Это решение позволило, с одной стороны, удовлетворить достаточно полно требования к реактору как к источнику нейтронов, а с другой – использовать уже испытанные технические решения и хорошо разработанную промышленную технологию как при изготовлении активной зоны ИБР-2, так и при изготовлении, наладке и эксплуатации натриевой системы ее охлаждения. Система натриевого охлаждения функционирует с момента ее запуска в 1981 году до настоящего времени успешно и непрерывно и во время работы реактора, и в остальное время.

Подвижный отражатель – один из наиболее ответственных и технически самых оригинальных узлов ИБР-2. Он не имеет аналогов не только в реакторостроении, но и в других областях техники. Именно подвижный отражатель определяет длительность импульса мощности ИБР – его важнейший параметр, от которого зависит разрешение нейтронного спектрометра на пучке реактора как в дифракционных экспериментах, так и в исследованиях методом неупругого рассеяния нейтронов. Пробная частица для изучения структуры и динамики вещества – это тепловой нейтрон, время диффузии которого в водородосодержащих веществах внешнего замедлителя составляет 100–200 мкс. Поэтому желательная длительность импульса быстрых ней-



**Р.Мёссбауэр и И.М.Франк с группой сотрудников  
на испытательном стенде подвижного отражателя ИБР-2**

тронов реактора – порядка 100 мкс. Первый вариант подвижного отражателя, с которым осуществлялся физический пуск реактора в 1978 году, не мог обеспечить импульс короче 300 мкс в рабочем режиме. Дело в том, что «дополнительный подвижный отражатель» (ДПО) целесообразно размещать за основным отражателем, расположенным ближе к активной зоне (ОПО); это увеличивает угол обзора реактора экспериментальными устройствами. В то же время такое расположение отражателей приводит к возникновению «теневого» эффекта реактивности, причиной которого является экранировка одного блока отражателя другим. Этот эффект снижает скорость изменения реактивности при формировании импульса мощности и приводит к увеличению его длительности. В результате проведенных в ЛНФ расчетных и экспериментальных исследований на стендах ЭПОС была найдена конфигурация ДПО (так называемый «трезубец»), для которой «теновой» эффект реактивности незначителен. Три модулятора реактивности с ДПО в виде трезубца работали на ИБР-2 с момента пуска до 2003 года, по 6–7 лет каждый.

Вредный теневой эффект реактивности превращается в полезный при «зубчатой», или «решетчатой», структуре обоих ПО. Идея такого модулятора реактивности была предложена сотрудниками ЛНФ еще в 1971 году. Суть состоит в том, что при решетчатой структуре оба ПО – и основной и дополнительный – двигаются в противоположных направлениях. При этом реактивность изменяется на значительную величину уже за малое время, равное времени взаимного перекрытия «зубьев», обеспечивая короткую длительность импульса. Для реактора ИБР-2 был разработан модулятор



В.Д.Ананьев, Э.И.Витальев и И.М.Франк в момент монтажных работ на ИБР-2

этого типа для работы на больших скоростях ОПО и ДПО (1500 и 1200 об/мин), что обеспечило бы полуширину импульса мощности реактора  $110 \pm 5$  мкс вместо 216 мкс для ПО с «трезубцем» ДПО при той же скорости вращения. Однако финансовые трудности 90-х годов заставили отказаться от реализации этого проекта (пришлось бы изготавливать сложную и дорогую машину каждые 5 лет). Вместо этого был создан решетчатый отражатель из никелевого сплава на медленную скорость вращения при сохранении длительности импульса мощности. Он успешно прошел пуск на реакторе в 2004 году, показав 220 мкс при скорости ОПО только 600 об/мин. Работа на медленных скоростях вращения позволяет продлить ресурс безопасной эксплуатации ПО до 20 лет. Этот же отражатель будет работать и на модернизированном реакторе ИБР-2М (о нем будет сказано ниже).

Ведущие научные центры мира, использующие нейтронные методы, развивают сейчас базу источников на основе сильноточных протонных ускорителей на энергию 1–1,5 ГэВ, так называемых spallation neutron source (SNS). Однако низкая частота повторения импульсов реактора ИБР-2 и высокая пиковая плотность потока нейтронов на поверхности замедлителя ( $5 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>/с для широких пучков и  $10^{16}$  н/см<sup>2</sup>/с для коллимированных пучков) рассматриваются как преимущество реакторных источников нейтронов, так как это позволяет исследовать широкую область передачи импульсов, изучать слабо рассеивающие образцы, использовать узкую коллимацию для улучшения пространственного разрешения. Большая длительность импульса (320 мкс по тепловым нейтронам) считалась ранее естественным недостатком ИБР-2

из-за ограничения временного разрешения спектрометров при использовании традиционных методик. Однако внедрение техники Фурье-дифрактометрии и других современных методик в корне изменило ситуацию. Показательно, что некоторые мишени проектируемых SNS ориентированы на длинный импульс нейтронов – порядка миллисекунд. Возможности для нейтронных исследований на лучшем сейчас SNS ISIS в Англии (Резерфордская лаборатория), пущенном позднее ИБР-2, не выше возможностей ИБР-2. Лишь в следующем году, то есть через 20 лет после пуска ИБР-2, вступит в строй мощный SNS в США (Ок-Ридж), параметры которого превзойдут в несколько раз нынешние параметры ИБР-2.

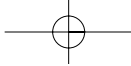
Традиционные источники нейтронов – стационарные исследовательские реакторы – также продолжают использоваться для экспериментов с помощью медленных нейтронов. Реакторы с большим потоком нейтронов имеют, как правило, многоцелевое назначение и более универсальны. Однако сооружение и эксплуатация такого реактора на порядок дороже, чем ИБР-2. К тому же для широкого класса исследований, в которых используется метод времени пролета нейтронов, ИБР-2 имеет преимущества перед стационарными реакторами. Еще более дороги упоминавшиеся ранее источники на основе протонных ускорителей.

Работа по созданию импульсного исследовательского реактора ИБР-2 была удостоена премии Правительства РФ в 1996 году, а научные работы по освоению метода дифракции нейтронов по времени пролета на импульсных источниках ЛНФ – Государственной премии РФ в 2000 году.



Физический пуск реактора ИБР-2 состоялся!

Дата	Время	Содержание записей за смену, заданий, распоряжений выполненных работ, подписи о сдаче и приемке смены	Примечание
1	2	3	4
30.11.72	17 <sup>45</sup>	Спрос МАЗ на скорость света (2 из 3-х ПКУ)	
	17 <sup>15</sup>	Все органы СВЗ вводу. Силу защиты: Олу	
		30 ноября 1972.	
		в 16 <sup>20</sup> реактор ИБР-2	
		достиг критического	
		состояния.	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	
		И.И. Троицкий	



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.

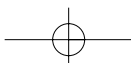
Исследовательский импульсный реактор ЛНФ ОИЯИ ИБР-2 пока остается самым эффективным в мире источником для исследований на выведенных пучках медленных нейтронов, а после модернизации он еще в течение 20 лет будет в первой пятерке мировых лидеров в этой области ядерной науки.

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.

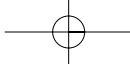
## 4. Нейтронно-ядерные исследования

### *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  $\gamma$ -квантов спины нейтронных резонансов для группы ядер.

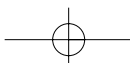
В результате выполненных многолетних исследований в мировой банк данных о параметрах нейтронных резонансов включены результаты, полученные в ЛНФ примерно для 100 изотопов. Полученная в ЛНФ информация позволила уточнить и целый ряд физических аспектов, связанных со свойствами ядер при энергиях возбуждения,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

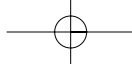
- Изучена систематика плотности нейтронных резонансов и установлено влияние на плотность уровней деформации ядра-мишени.
- Уточнена систематика полных радиационных ширин в зависимости от атомного веса, что позволило сопоставить ее с существующими теоретическими моделями и выделить среди них те, которые 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  $20\text{ см}^3$  делают это вещество хорошим объектом для использования в качестве поляризованной протонной мишени.

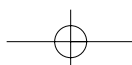
Одним из важных достоинств поляризованной протонной мишени как поляризатора нейтронов является очень широкий диапазон энергии поляризованных нейтронов — от тепловых до нескольких десятков кэВ, что связано с отмеченным выше различием взаимодействия нейтронов с протонами в синглетном и триплетном состояниях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

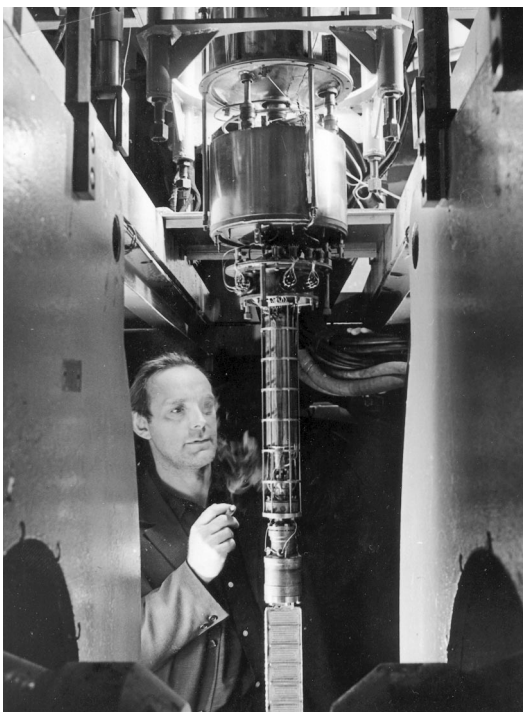
Следующий шаг в развитии методики поляризации нейтронов и ядер был сделан в 1968–1970 годах. В этот период проведена существенная модернизация поляризованной протонной мишени, разработан и изготовлен рефрижератор с растворением  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ . Эти работы велись группой В.П.Алфименкова, 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  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ . Поляризация ядер существенно зависит от температуры образца и для приемлемой поляризации нужна температура ниже 100 мК. Такую температуру мог обеспечить рефрижератор с растворением  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$ , 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.

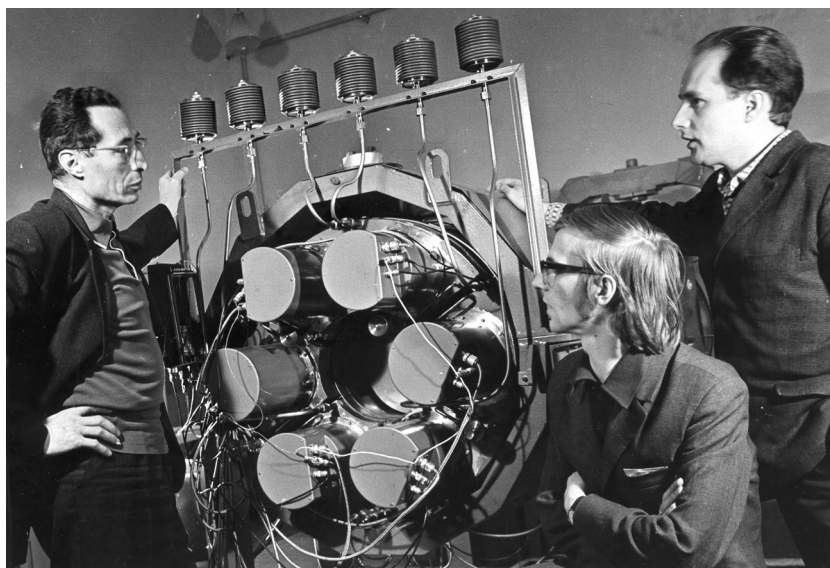
Помимо низкой температуры для поляризации ядер методом «грубой силы», то есть без применения специальных методов типа описанной выше динамической поляризации, требуются высокие магнитные поля. Удобным исключением являются ядра редкоземельных элементов. При отмеченной низкой температуре такие ядра, как 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  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{167}\text{Er}$  и  $^{169}\text{Tm}$ . 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  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$



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  $\alpha$  в области усредненных сечений. С 80-х годов измерения в резонансной области и области усредненных сечений для  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  проводились на спектрометрах множественности  $\gamma$ -квантов «Ромашка» (из 16 больших кристаллов NaI) и «Парус» (16-секционным жидкостным сцинтилляционным ( $n, \gamma$ )-детектором). При этом определялись групповые константы для величины  $\alpha$ , 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  $^{234}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{243}\text{Am}$ . На зеркальном нейтроноводе реактора ИБР-2 с механическим прерывателем проведены исследования выхода запаздывающих нейтронов при делении  $^{233,235}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$  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  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  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  $^{235}\text{U}$  резонансными нейтронами, полученные на пучке бустера ИБР-30+ЛУЭ-40 с применением рефрижератора с растворением  $^3\text{He}$  в  $^4\text{He}$  и монокристаллических образцов с содержанием  $^{235}\text{U}$  (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  $^{235}\text{U}$ .

Новая информация о процессе деления ядер при взаимодействии нейтронов с изотопами  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  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  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  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  $\alpha_n$ , 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  $\omega_1$  на ядрах свинца при энергиях 0,5–7,5 кэВ. Было показано, что вышеупомянутую оценку  $\alpha_n$  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  $\omega_1$  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  $\alpha_n$ . 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  $\gamma$ -квантов в отдельных резонансах и исследовать флуктуации первичных  $\gamma$ -переходов на основной и низколежащие уровни компаунд-ядра. На некоторых ядрах различие в  $\gamma$ -спектрах для разных резонансов трудно было объяснить статистическими флуктуациями и возникал вопрос, какие особенности резонанса влияют на парциальные  $\gamma$ -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 $(n, \alpha)$ 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  $(n, \alpha)$ . Задача оказалась весьма сложной из-за малой величины сечения этой реакции, обусловленной кулоновским барьером, и необходимости использовать очень тонкие мишени, менее пробега  $\alpha$ -частицы. На реакторах ИБР и ИБР-30 были впервые экспериментально исследованы  $\alpha$ -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 ( $n, \alpha$ ) 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 ( $n, \alpha$ ), а также определить параметры потенциала взаимодействия  $\alpha$ -частиц с ядрами. Амплитудный анализ испускаемых  $\alpha$ -частиц позволил проанализировать статистические закономерности парциальных  $\alpha$ -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 ( $n, \alpha$ ) 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  $\gamma$ -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 ( $n, \alpha$ )- 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  $^{35}\text{Cl}$ . Это позволило, с учетом полученных ранее данных на тепловых нейтронах, оценить величину матричного элемента слабого взаимодействия для  $^{35}\text{Cl}$ .



Можно отметить, что только в последние годы в Ок-Ридже (ORNL), четверть века спустя, продолжены в более широком диапазоне энергий нейтронов измерения полных  $\alpha$ -ширин, но пока без амплитудного анализа  $\alpha$ -частиц. Характерно, что к постановке этих экспериментов были привлечены сотрудники ОИЯИ, участвовавшие в измерениях реакции  $(n, \alpha)$  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  $\alpha$ -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  $^{117}\text{Sn}$  и  $^{139}\text{La}$ . Нарушение четности проявлялось в зависимости нейтронного сечения от спиральности нейтронов. Наиболее впечатляющим оказался результат, полученный при измерении в области  $p$ -волнового резонанса  $^{139}\text{La}$ . 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  $^{113}\text{Cd}$ . 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.

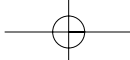
Результат, полученный в ЛНФ, стимулировал начало подобных измерений в США, Японии, а также в российских исследовательских центрах.

#### *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/см<sup>3</sup>, что в значительной мере определялось сравнительно малой мощностью реактора ИБР  $\sim 6$  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.

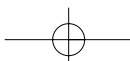


С 1973 года сотрудники ЛНФ совместно с группой исследователей из НИИАР при содействии Ю.С.Замятнина начали совместные исследования с УХН на самом мощном исследовательском реакторе СМ-2 мощностью 110 МВт в НИИАР (г. Димитровград). В этих исследованиях впервые был наблюден процесс разогрева УХН (в диапазоне энергий тепловых нейтронов), как причины аномального ограничения времени хранения УХН в замкнутых сосудах, и был измерен спектр нагретых нейтронов. На этом же реакторе был выполнен эксперимент с динамически чистым сосудом, стенки которого во время хранения УХН постоянно возобновлялись напылением на них атомов алюминия. Аналогичные измерения были проделаны и с напылением на стенки сосуда меди, цинка, свинца и бериллия. В сосуде с напыленным на стенки бериллием получено время хранения 650 с. В бериллиевых обезгаженных сосудах наблюдалась утечка УХН, очень слабо зависящая от температуры в интервале (20–800)К и практически не зависящая от процессов дейтерирования и покрытия стенок конденсированным  $\text{CO}_2$  и  $\text{D}_2\text{O}$ . Проточным способом было измерено парциальное время хранения УХН до нагрева и захвата на поверхности бериллиевого сосуда и измерены спектры нагретых нейтронов в зависимости от степени обезгаживания стенок сосуда.

В 1987 году в ЛНФ была создана оригинальная установка «КОВШ» для изучения длительности хранения УХН разных энергий при температурах вплоть до гелиевых. УХН хранились в шароподобном открытом сверху сосуде, наполнение и опорожнение которого достигалось переворотом сосуда вокруг горизонтальной оси. Эта установка была перевезена в Гатчину на реактор ВВРМ ЛИЯФ, где совместно с группой А.П.Сереброва было измерено время жизни свободного нейтрона ( $888,4 \pm 2,9$  с) в сосуде со стенками из конденсированного кислорода. Этот результат по точности значительно превзошел аналогичный результат, полученный ранее методикой регистрации радиоактивности нейтронного пучка.

В конце 70-х годов в ЛНФ выдвигается идея динамического конвертора УХН, работоспособность которого была проверена на изготовленной в ЛНФ установке, в дальнейшем смонтированной на мощном импульсном реакторе БИГР во ВНИИЭФ (Саров). Исследования проводились совместно с группой М.И.Кувшинова из ВНИИЭФ. Конвертор и сосуд для УХН взрывом ускорялись до скоростей  $\sim 100$  м/с, синхронизированным с импульсом реактора. После торможения сосуд с УХН доставлялся в соседнее с залом реактора помещение. При этом плотность УХН в таких сосудах составила  $\sim 25$  УХН/см<sup>3</sup>.

В последнее время фронт исследований с УХН значительно снизился. В настоящее время во всем мире остался один работающий источник УХН на высокопоточном реакторе ИЛЛ в Гренобле, на который выстроилась большая очередь с предлагаемыми экспериментами. При исследовании причин аномальной утечки УХН из сосудов в совместных исследованиях ЛНФ ОИЯИ–ИЛЛ, Гренобль (В.В.Несвижевский), был обнаружен процесс малых передач энергии УХН, в результате которого энергия УХН в процессе хранения при отражении от стенок увеличивается почти вдвое. Реже наблюдались процессы уменьшения энергии УХН. В принципе малые передачи энергии УХН возможны, однако наблюдаемая вероятность таких процессов оказалась на 5–6 порядков превосходящей теоретические значения этих величин. Также наблюдалось, что вероятность малых передач на 3–5 порядков возрастает при взаимодействии УХН с порошком наночастиц, нанесенным на поверхность сосуда.



В 1976 году В.И.Лушиков предложил эксперимент по наблюдению квантовых состояний в гравитационном поле Земли. В 1999 году в Гренобле на реакторе ИЛЛ интернациональной группой исследователей из Франции, Германии и России (Гатчина, ПИЯФ и Дубна, ЛНФ ОИЯИ) такой эффект был наблюден.

В последнее время на установке КОВШ в Гренобле на реакторе ИЛЛ был получен минимально достигнутый коэффициент поглощения УХН в стенках сосуда, на которые был нанесен слой низкотемпературного безводородного масла. В экспериментах был получен коэффициент поглощения  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  при  $T \sim 100$  К.

В ЛНФ проводились и теоретические исследования по тематике УХН, написан ряд обзоров по УХН. В.К.Игнатовичем написана книга «Физика ультрахолодных нейтронов», которая стала широко известной, была переведена на английский язык и издана в Оксфорде.

#### *Нейтронная оптика и другие приложения*

Обнаружение УХН и исследования с ними побудили обсуждение возможности создания нейтронного микроскопа (А.И.Франк и другие авторы) и проведение исследований по волновой оптике, которые проводятся в Гренобле группой А.И.Франка. Были исследованы особенности прецессии нейтрона в магнитном поле в условиях его взаимодействия со средой и показана возможность использования ларморовской прецессии для оценки времени взаимодействия нейтрона с квантовыми объектами. Изучен также закон дисперсии УХН на гравитационном спектрометре с использованием интерференционных фильтров. На этом же спектрометре исследована применимость нейтронной оптики к сильно поглощающим средам на примере прохождения УХН через гадолиниевые пленки.

Ю.Н.Покотиловский предложил проверку принципа эквивалентности прямым измерением гравитационного ускорения нейтрона в эксперименте по времени пролета с хорошей монохроматизацией с применением интерференционного фильтра и быстрого прерывателя пучка с помощью электромагнитной заслонки.

## **6. Физика конденсированных сред**

Практически сразу после создания исследовательских ядерных реакторов было обнаружено, что нейтрон является мощнейшим инструментом изучения вещества в конденсированном состоянии. По сравнению с другими видами излучений, используемых для получения информации о структурной организации и динамике атомов и молекул в конденсированных средах (твердых телах и жидкостях), нейтроны имеют ряд преимуществ, поэтому нейтронография, то есть использование различных видов рассеяния нейтронов в конденсированных средах с целью изучения их строения, стала совершенно необходимым инструментом современного естествознания.

Для проведения экспериментов по рассеянию нейтронов конденсированными средами имеется две возможности. На источнике нейтронов с непрерывным потоком выделяют моноэнергетический пучок и измеряют зависимость интенсивности рассеянных в образце нейтронов от изменения их энергии при неупругом процессе или от угла рассеяния при упругом процессе. На импульсном источнике на образец падает

сплошной («белый») спектр нейтронов и измеряется зависимость интенсивности рассеянных в образце нейтронов от полного времени их пролета от источника до детектора. При анализе неупругого процесса дополнительно измеряется энергия нейтронов, регистрируемых детектором.

Исследования по физике конденсированных сред на первом пульсирующем реакторе в Дубне, как дополняющие работы по ядерной физике, были инициированы физиками из Польши — Е.Яником и другими, и были поддержаны активно Ф.Л.Шапиро. В результате нейтронная физика в ЛНФ начала развиваться широким фронтом.

### *Спектроскопия тепловых нейтронов*

Метод времени пролета был хорошо известен в нейтронной ядерной спектроскопии, поэтому разработки методик экспериментов по неупругому рассеянию тепловых нейтронов конденсированными средами начались одновременно с пусковыми работами на реакторе ИБР в 1960 году. Уже через два года В.В.Голиковым, И.Жуковской, Ф.Л.Шапиро, А.Шкатулой и Е.Яником были получены первые результаты по динамике воды и динамике водорода в гидриде циркония. В 1965 году по инициативе физиков из Кракова был создан первый вариант спектрометра «обратной геометрии» для анализа неупругих процессов, в котором фиксируется энергия рассеянных нейтронов. Дальнейшие модификации этого спектрометра привели к созданию уникального Краковско-Дубненского спектрометра обратной геометрии (КДСОГ) на реакторе ИБР-30 и затем спектрометров КДСОГ-М и НЕРА-ПР на реакторе ИБР-2.

На спектрометрах КДСОГ был выполнен целый ряд пионерских исследований динамики молекулярных кристаллов и эффектов кристаллического электрического поля в редкоземельных сплавах и соединениях (И.Натканец, А.В.Белушкин, Е.Л.Горемычкин, Я.Майер и др. совместно с Институтом физики твердого тела РАН). Эта же группа в 80-х годах изучала также фазовые переходы и спектры колебаний решетки в суперионных проводниках, температурную зависимость динамики и структуры сверхпроводящих керамик, эффекты кристаллического поля в редкоземельных интерметаллидах (совместно с Институтом металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова). Были исследованы динамические свойства водорода в металлах (совместно с РНЦ КИ и ФЭИ). Начатое А.В.Белушкиным, И.Натканцем, Н.М.Плакидой и др. изучение вибрационных спектров и структурных переходов в суперионных проводниках вошло в широкий цикл исследований систем с разупорядоченными водородными связями, выполненный в 90-х годах в Лаборатории Резерфорда—Эпплетона (Англия) под руководством и при участии А.В.Белушкина.

Другие спектрометры неупругого рассеяния — спектрометры типа ДИН, в которых фиксируется энергия падающих на образец нейтронов, — были созданы физиками ФЭИ. Наиболее яркие результаты, полученные с помощью этих спектрометров, связаны с изучением спектра элементарных возбуждений и поиском бозе-конденсата в сверхтекучем гелии (Ж.И.Козлов, А.В.Пучков и др.).

Исследования с помощью неупругого рассеяния нейтронов на реакторах ИБР направлены главным образом на измерения плотности состояний и, следовательно, связаны только с некогерентным движением атомов в кристалле. Для изучения когерентного движения атомов в твердых телах эффективно используются реакторы не-



А.И.Куклин (слева) и Г.А.Вареник за наладкой экспериментальной аппаратуры

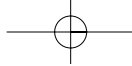
прерывного действия. Более универсальными для реакторов ИБР оказались исследования упругого рассеяния нейтронов.

#### *Исследования на дифрактометрах*

Дифракционные эксперименты с использованием метода времени пролета на реакторе ИБР были начаты в 1962 году и, по существу, явились первыми реальными экспериментами в этой области, показавшими работоспособность метода. Первые результаты были представлены в докладе Б.Бураса, Е.Лециевича, Е.Сосновского, И.Сосновской и Ф.Л.Шапиро на III Международной конференции по мирному использованию атомной энергии в 1964 году. В это же время возможность постановки дифракционного эксперимента по времени пролета на реакторе непрерывного действия была показана группой Б.Бураса в Сверке (Польша), однако мощности реактора явно не хватало для полноценной реализации метода.

Вскоре после экспериментов в Дубне и Сверке времяпролетная дифрактометрия начала быстро распространяться в мире. В 1964 году под руководством Б.Бураса дифрактометр по времени пролета был установлен на реакторе с прерывателем Ферми в Ризо (Дания). Их начали использовать на импульсных источниках нейтронов на базе электронных ускорителей: в 1966 году в США, в 1968 году в Японии, в 1969 году в Великобритании. Дифрактометры на этих импульсных источниках, так же как и первый дифрактометр на пульсирующем реакторе ИБР, были значительным продвижением по сравнению с комбинацией реактор непрерывного действия – прерыватель Ферми.

Уже в первых исследованиях, выполненных в ЛНФ, были подтверждены многие из предсказывавшихся достоинств дифрактометров по времени пролета и, прежде всего, большая скорость набора информации и возможность измерения трехмерных дифракционных спектров. Особенно привлекательным является импульсный характер облучения образца пучком нейтронов, что позволяет включать и внешние воздействия на образец в импульсном режиме и достигать гораздо больших значений параметров этого воздействия, нежели в стационарном режиме.



А.М.Балагуров и А.И.Бескровный за наладкой экспериментальной аппаратуры на пучках реактора ИБР-2

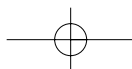


История развития метода времени пролета в ЛНФ в 60-х и 70-х годах содержит несколько ярких моментов. В 1966 году, одновременно и независимо в Дубне и Аргоне (США), был открыт принцип временной фокусировки нейтронов, позволивший увеличить светосилу и разрешающую способность дифрактометров. В 1967 году на созданном В.В.Нитцем на реакторе ИБР дифрактометре с импульсным магнитным полем удалось впервые получить данные по изменениям магнитной структуры гематита, происходящим в полях до 12 Тл. В начале 70-х годов на ИБР был построен специализированный дифрактометр ДН-2 для изучения монокристаллов, впервые в мировой практике оборудованный позиционно-чувствительным детектором. На нем А.М.Балагуровым, А.И.Бескровным и Б.Н.Савенко совместно с сотрудниками Института кристаллографии РАН выполнены пионерские работы по изучению доменных структур сегнетоэлектриков-сегнетоэластиков, в которых удалось на микроскопическом уровне проследить за процессами поляризации и переполяризации доменов под действием внешнего электрического поля. Первое уточнение структуры монокристалла на дифрактометре по времени пролета также выполнено на реакторе ИБР, а именно, в молекуле двойного лантан-магниевого нитрата определены позиции всех атомов водорода, входящих в состав гидратационной воды.

Полностью возможности времяпролетной дифрактометрии начали реализовываться в начале 80-х годов, когда появилось новое поколение высокопоточных импульсных источников нейтронов.

Создание мощных источников на базе протонных ускорителей в Японии (Цукубо – 1980 г.), в США (Аргона – 1981 г. и Лос-Аламос – 1985 г.), в Великобритании (Дидкот – 1985 г.), а также пульсирующего реактора ИБР-2 в Дубне (1984 г.) дало второе рождение времяпролетной дифрактометрии. К настоящему времени на каждом из этих источников построено несколько дифрактометров по времени пролета, которые превосходят дифрактометры на реакторах непрерывного действия по целому ряду параметров.

К 1982 году большинство нейтронных спектрометров были с ИБР-30 перенесены на ИБР-2, и начаты первые эксперименты на многоцелевом дифрактометре ДН-2.



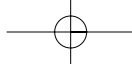


Несколько позже были введены в эксплуатацию дифрактометр с импульсным магнитным полем СНИМ, текстурный дифрактометр НСВР и дифрактометр для исследования идеальных кристаллов ДИФРАН. Существенно больший, чем на ИБР-30, поток нейтронов, улучшенная организация пучков и современные электронные средства управления экспериментом обеспечили качественно новые возможности для структурной нейтронографии, что привело к заметному обновлению тематики исследований.

В частности, на дифрактометре ДН-2 совместно с Институтом физико-химической биологии им. А.Н.Белозерского (МГУ) и Институтом биологической физики РАН была начата программа исследований биологических мембран с помощью дифракции нейтронов по времени пролета с применением позиционно-чувствительного детектора, что позволило, в отличие от обычной постановки эксперимента на реакторах с непрерывным потоком, одновременно получать дифракционные отражения при различных длинах волн нейтрона, соответствующих различным углам дифракции. Особенно успешной темой стали исследования А.М.Балагурова, В.И.Горделия и Л.С.Ягужинского структуры липидных мультислоев, в которых определялись толщины липидного бислоя и водной прослойки, места внедрения малых гидрофобных и гидрофильных молекул, кинетика сорбции и десорбции воды и др.

Большой поток нейтронов на реакторе ИБР-2 позволяет эффективно исследовать необратимые процессы в кристаллах (Г.М.Миронова). Суть созданного метода, который получил название нейтронографии в реальном времени, состоит в том, что дифракционные спектры от исследуемого объекта измеряются за время, заметно меньшее, чем характерное время перестройки его структуры в результате тех или иных процессов. Понятно, что возможности метода во многом зависят от того, насколько малые времена измерения спектров в принципе достижимы. На стационарных источниках нейтронов, в том числе на самом мощном из них – реакторе ИЛЛ, удается набирать необходимую статистику при времени измерения около 1 мин. Первые же эксперименты на ИБР-2 показали, что имеются возможности улучшить временное разрешение до нескольких секунд. За короткое время была проведена серия экспериментов, в которых удалось получить подробную информацию о структурных перестройках в ходе гидратации компонентов цемента, синтезе из исходных компонентов высокотемпературных сверхпроводников, фазовых переходах в закаленном под высоким давлением тяжелом льде (совместно с Институтом физики твердого тела РАН) и многих других процессах. В модельном эксперименте на ДН-2 удалось впервые в мире зарегистрировать дифракционные спектры от одного импульса мощности источника. Как было показано Г.М.Мироновой, ситуация, когда одной вспышки оказывается достаточно для набора статистики, в принципе позволяет работать с временным разрешением, сразу на три порядка лучше, то есть  $\sim 10^{-3}$  с. Эта величина, по-видимому, близка к предельному временному разрешению в нейтронографии необратимых процессов на импульсных источниках нейтронов. Она сравнима с величинами, достигнутыми на сверхъярких источниках синхротронного излучения и существенно лучше, чем пределы, достижимые на стационарных реакторах.

Одно из важнейших и перспективных направлений нейтронной времяпролетной дифрактометрии связано с использованием высоких давлений при структурных исследованиях. В сотрудничестве с физиками из Института физики высоких давлений



им. Л.Ф.Верещагина (ИФВД) РАН и РНЦ «Курчатовский институт» были развиты методы исследования вещества при высоких давлениях на основе сочетания техники монокристалльных наковален и светосильных низкофоновых систем регистрации нейтронов. Использование монокристалльных наковален позволяет проводить исследования очень малого количества вещества (объемом до  $0,01 \text{ мм}^3$ ), что значительно расширяет возможности изучения монокристаллов новых соединений и материалов. Совместно с РНЦ КИ на реакторе ИБР-2 создан уникальный дифрактометр ДН-12 для исследований при давлениях до 20 ГПа (В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, С.Л.Платонов, Б.Н.Савенко, В.П.Глазков, И.В.Наумов, В.А.Соменков, Г.Ф.Сырых). В настоящее время это самый светосильный дифрактометр в мире для изучения микрообразцов.

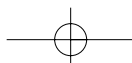
### ***Фурье-дифрактометрия***

Следующим важным этапом стало создание в 1992 году на реакторе ИБР-2 фурье-дифрактометра высокого разрешения (ФДВР). Второй раз Дубна стала местом реализации на импульсном источнике нового метода в нейтронной дифракции – метода нейтронной фурье-дифрактометрии. В отличие от обычной ситуации в нем фиксируется не время пролета каждого зарегистрированного нейтрона, а вероятность, с которой зарегистрированные нейтроны распределены по времени пролета. Технические проблемы восстановления дифракционного спектра в методе с фурье-прерывателем были решены финскими физиками из Центра технических исследований в Хельсинки, разработавшими обратный метод времени пролета и реализовавшими его в макетном варианте в 1975 году. Первый фурье-дифрактометр для структурных исследований на реакторе непрерывного действия был создан в 1984 году в ПИЯФ РАН.

Вскоре стало ясно, что наиболее адекватным для эффективной реализации метода является импульсный источник нейтронов с большой длительностью импульса, то есть источник типа реактора ИБР-2. В 1989 году Лаборатория нейтронной физики им. И.М.Франка совместно с ПИЯФ РАН и Центром технических исследований Финляндии начала создание фурье-дифрактометра высокого разрешения на реакторе ИБР-2. Это стало возможным благодаря финансовой поддержке в рамках соглашения между ОИЯИ и министерством науки ФРГ. С учетом опыта, полученного в предыдущие годы в Хельсинки и Гатчине, удалось успешно завершить проект и 11 июня 1992 года получены первые спектры (В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, В.Г.Симкин, А.П.Булкин, В.А.Кудряшев, В.А.Трунов, О.Антсон, П.Хиисмяки, А.Тиита).

В настоящее время ФДВР – один из лучших в мире нейтронных дифрактометров, обладающий разрешением на уровне одной десятой доли процента и рекордным потоком нейтронов на образце. ФДВР открывает широкие перспективы для структурных исследований в физике, химии, биологии, материаловедении. Конкретные применения ФДВР включают прецизионные исследования структуры поликристаллов, анализ дифракционных спектров от монокристаллов, если необходимо столь высокое разрешение, и эксперименты по анализу внутренних напряжений в объемных изделиях.

Конструкция ФДВР позволяет проводить эксперименты как с порошками, так и с монокристаллами с относительным разрешением по межплоскостному расстоянию лучше, чем  $0,1\%$ . Это обстоятельство было в полной мере использовано при изучении явления разделения фаз в сильнокоррелированных электронных системах, привлекающего в настоящее время пристальное внимание и теоретиков, и экспериментато-



ров. На ФДВР была проведена серия экспериментов с монокристаллами лантанового купрата (А.М.Балагуров, В.Ю.Помякушин, В.Г.Симкин, А.А.Захаров), в которых удалось наблюдать сосуществование двух разных типов фазового расслоения, возникающих при охлаждении кристаллов. При макроскопическом фазовом расслоении, связанном с диффузией сверхстехиометрического кислорода, в объеме кристалла возникают области (с характерным размером около  $1000 \text{ \AA}$ ) с разным содержанием кислорода, что проявляется в небольшом, но четко видимом на ФДВР расщеплении дифракционных пиков. При более низкой температуре в кристаллах возникает дополнительное фазовое расслоение на микроскопическом ( $<30 \text{ \AA}$ ) уровне, связанное с неоднородным распределением носителей заряда. Явление фазового расслоения типично для электронных систем с сильными корреляциями и исследовалось весьма интенсивно в последнее время. Новые результаты получены недавно на ИБР-2 для систем с колоссальным магнитным сопротивлением (В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, В.Ю.Помякушин, Д.В.Шептяков).

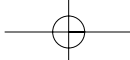
С помощью ФДВР В.Л.Аксеновым, А.М.Балагуровым и другими сотрудниками ЛНФ в сотрудничестве с группой Е.В.Антипова (МГУ) проведены комплексные исследования высокотемпературных сверхпроводников на основе ртути.

В создании ФДВР на ИБР-2 не менее важно еще одно обстоятельство. ФДВР — прибор нового типа для импульсных источников нейтронов. Он открыл совершенно новые возможности для реактора ИБР-2 и фактически вывел его в число лучших источников нейтронов в мире. Его создание повлияло на дальнейшее развитие нейтронных исследований в мире. В нескольких нейтронных центрах открыты проекты создания дифрактометров такого типа. Появился серьезный дополнительный аргумент в пользу источников нейтронов с длинным импульсом (типа ИБР-2). Это направление в настоящее время активно развивается.

В 2000 году сотрудники ЛНФ В.Л.Аксенов, А.М.Балагуров, В.В.Нитц и Ю.М.Останевич были удостоены Государственной премии РФ в области науки и техники за разработку и реализацию методов структурной нейтронографии по времени пролета с использованием импульсных и стационарных реакторов.

### *Малоугловое рассеяние*

Дифрактометры по времени пролета позволяют параллельно с дифракцией получать информацию о рассеянии нейтронов на малые углы. Эта уникальная возможность, также впервые осознанная и реализованная в Дубне в группе Ю.М.Останевича и Л.Чера, позволяет в реальном времени следить за эволюцией крупномасштабных, размером в десятки и сотни ангстрем, неоднородностей, в том числе за возникающими при фазовом переходе или при твердофазном синтезе зародышами новых фаз. Важнейшей особенностью малоуглового рассеяния является возможность анализа структуры разупорядоченных систем. Этот метод, например, часто является единственным способом получения прямой структурной информации о системах с хаотическим и частично упорядоченным расположением неоднородностей плотности с характерными размерами  $10-10\,000 \text{ \AA}$ ; он дает возможность исследовать дисперсную структуру сплавов, порошков, стекол (размер и степень полидисперсности частиц), особенности строения полимеров в различных агрегатных состояниях, весовые и геометрические характеристики биологических макромолекул и их комплексов, био-



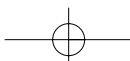
логические надмолекулярные структуры, такие как биологические мембраны и вирусы. Существенное различие длин рассеяния нейтронов для водорода и дейтерия, а также возможность избирательного дейтерирования макромолекул и надмолекулярных структур, делает малоугловое рассеяние нейтронов незаменимым методом исследования биологических и коллоидных объектов, полимеров и жидких кристаллов.

Малоугловое рассеяние нейтронов имеет ряд важнейших особенностей, отличающих его от малоуглового рассеяния рентгеновских лучей. Это, прежде всего, определяется общими особенностями взаимодействия нейтронов с веществом: большой глубиной проникновения, зависимостью рассеяния от изотопного состава вещества и от его магнитных свойств. В ЛНФ ОИЯИ установки малоуглового рассеяния по методу времени пролета были введены в строй сначала на реакторе ИБР-30 в 1975 году, а затем и на высокопоточном импульсном реакторе ИБР-2. Сейчас этот спектрометр называется ЮМО (в честь Ю.М.Останевича) и является практически единственной установкой малоуглового рассеяния нейтронов в России, обеспечивающей широкий круг систематических исследований в различных областях физики конденсированного состояния вещества, физикохимии и биологии на мировом уровне. Более 50% экспериментов на установке выполняются зарубежными исследователями или в тесном сотрудничестве с ними.

Примером применения малоуглового рассеяния нейтронов являются исследования полиэлектролитов (Й.Плештил, Ю.М.Останевич, В.Ю.Беззаботнов, Д.Главата), то есть макромолекул, содержащих группы атомов, которые способны в определенных условиях диссоциировать, образуя заряженный полиион и малые противоионы. Возникающие на макромолекуле заряды меняют как ее конформацию, так и свойства самого растворителя. Интерпретация результатов нейтронных экспериментов оказалась возможной на основе представления о гидратной оболочке, окружающей полиион. Толщина оболочки соответствует мономолекулярному слою воды с плотностью, превышающей плотность нормальной воды на 10%. На спектрометре малоуглового рассеяния нейтронов на ИБР-2 был получен ряд рекордных результатов, в частности по измерению радиусов инерции малых молекул (В.Ю.Беззаботнов, Л.Чер, Т.Гросс, Г.Янго, Ю.М.Останевич). Такие эксперименты нелегко реализовать из-за того, что сечение рассеяния каждой одиночной частицы падает как квадрат объема. Однако применение методики изотопного замещения и специальной процедуры измерения спектров позволили получить уникальные результаты для молекул, имевших радиус инерции всего 3 Å. Например, удалось выяснить, какие структурные изменения происходят в водных растворах тетраметилмочевины.

Целый ряд новых результатов с помощью малоуглового рассеяния нейтронов на реакторе ИБР-2 был получен в биофизических исследованиях. Эти исследования были инициированы в начале 70-х годов И.Н.Сердюком и А.С.Спириным (Институт белка РАН, г. Пушкино) и были поддержаны в ЛНФ И.М.Франком и Ю.М.Останевичем. В сотрудничестве с ИБ РАН был выполнен большой цикл работ по изучению структуры рибосомы.

В последние годы установку ЮМО активно используют физики из Румынии для исследования магнитных жидкостей. Получены новые интересные результаты по идентификации структуры магнитных наночастиц в дисперсных средах (М.В.Авдеев, В.Л.Аксенов, М.Балашоу, Д.Бика, Л.Векаш, Л.Рошта).



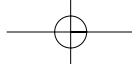
### *Оптика поляризованных нейтронов*

Одной из первых установок, начавших работать на реакторе ИБР-2, был спектрометр с поляризованными нейтронами (СПН). СПН создавался совместно с физиками из университета в Магдебурге. Оригинальной составляющей СПН был спин-флиппер, предложенный Д.А.Корнеевым. Спин-флиппер Корнеева с протяженной рабочей частью в вертикальном направлении для немонахроматических пучков полностью использует сечение пучка и тем самым значительно повышает светосилу. С начала работы реактора ИБР-2 на СПН в группе Д.А.Корнеева развивался метод деполяризации нейтронов. Наиболее интересные научные результаты с помощью этого метода были получены при исследовании смешанного состояния в высокотемпературных сверхпроводниках (В.Л.Аксенов, Е.Б.Докукин, Ю.В.Никитенко, А.В.Петренко). Впоследствии на СПН стала применяться рефлектометрия с поляризованными нейтронами (Д.А.Корнеев, В.Лебнер, Е.Б.Докукин, В.В.Пасюк, А.В.Петренко, Л.П.Черненко).

Если угол падения нейтронов на образец уменьшать, то при достижении некоторого критического значения наблюдается полное (зеркальное) отражение. Измеряя зависимость коэффициента отражения от длины волны, мы получаем информацию о кристаллической и магнитной структуре поверхностей и многослойных структур. В этом состоит нейтронная рефлектометрия. Дубна – единственное место в нашей стране, где уже более 20 лет развивается нейтронная рефлектометрия и в настоящее время имеется два рефлектометра с поляризованными нейтронами.

Нейтронная рефлектометрия – наука молодая, как метод измерений она начала активно развиваться с начала 80-х годов, и физики ЛНФ были среди пионеров. Одним из новых эффектов, обнаруженных при исследовании отражения поляризованных нейтронов от магнитных сред, был эффект расщепления пучка (Д.А.Корнеев, В.И.Боднарчук, В.К.Игнатович). Теоретически этот эффект был предсказан В.К.Игнатовичем при обсуждении проблемы поляризации ультрахолодных нейтронов. На основе эффекта переворота спина в стоячей волне В.Л.Аксеновым и Ю.В.Никитенко был предложен новый метод исследования слоистых магнитных структур. С использованием периодических наноструктур создается резонансное усиление поля стоячих нейтронных волн. Измерение переполаризации нейтронов на границах магнитно-неколлинеарных слоев позволяет с большой точностью измерять профиль намагниченности в слоистых структурах. Недавно физикам ЛНФ совместно с коллегами из ПИЯФ РАН, ИФМ УрО РАН и ИЛЛ удалось учесть эффекты незеркального отражения при отражении поляризованных нейтронов от слоистых структур. В результате впервые экспериментально наблюдался эффект неоднородного скашивания направления спинов в основном состоянии антиферромагнитно связанной многослойной структуры в магнитном поле (В.В.Лаутер-Пасюк, Х.Лаутер, Б.Топерверг, М.Миляев, Л.Ромашев, В.В.Устинов, А.В.Петренко, В.Л.Аксенов).

Спектрометр СПН в последние годы был реконструирован и на его месте в 2002 году создан при активном участии Х.Лаутера (ИЛЛ, Гренобль) новый прибор РЕМУР, на котором можно проводить эксперименты по рефлектометрии и малоугловому рассеянию поляризованных нейтронов. Рефлектометр РЕМУР в настоящее время является одним из лучших в мире, его создание стало возможным благодаря финансовой поддержке в рамках соглашения между ОИЯИ и министерством науки ФРГ. В 2002 году завершён также первый этап создания рефлектометра РЕФЛЕКС. Этот рефлек-



тометр отличается высоким угловым разрешением, что делает возможным измерение детальных особенностей в поведении кривой зеркального отражения в широком спектральном интервале.

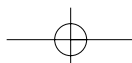
### *Инженерные исследования*

С самого начала работы ИБР-2 на нем проводились эксперименты, имеющие прикладной характер. В 1990-х годах основные усилия были сосредоточены на изучении текстур горных пород и внутренних напряжений в объемных изделиях, а, начиная с 2000 года, акцент в прикладных исследованиях сделан на работы, представляющие интерес для атомной науки и техники. Эти работы связаны с исследованием структуры и свойств конструкций и конструкционных материалов для реакторов, структурными исследованиями материалов, испытавших радиационные повреждения, количественным анализом текстур для моделирования процессов в геоматериалах при высоких давлениях и температурах для выработки оптимальных критериев для проектирования и строительства ядерных объектов и т.д. Такого рода работы ведутся на дифрактометрах высокого разрешения ФДВР (Г.Д.Бокучава, В.В.Сумин, А.В.Тамонов) и ЭПСИЛОН (К.Вальтер, К.Шеффцок) и текстурном дифрактометре СКАТ (К.Уллемайер, А.Н.Никитин). На ФДВР изучаются внутренние напряжения в объемных изделиях, композитных и градиентных материалах. Для этого приобретены или созданы специальные устройства, такие как тензорный сканер на основе гониометра фирмы HUBER, нагрузочная машина, широкоапертурные коллиматоры. Результаты, полученные в нейтронных экспериментах, дополняются данными ультразвуковых и магнитных исследований и расчетами. На СКАТ многие текстурные эксперименты ведутся в специальной камере при одновременном воздействии деформирующего усилия и температуры от 20 до 620 °С.

### *Дальнейшие перспективы*

Более чем за 40 лет работы импульсных реакторов в ОИЯИ сформировалась научная школа нейтронографии по времени пролета, которая определила развитие этой науки в мире по целому ряду направлений. Источники нейтронов ОИЯИ открыты для всех исследователей и с каждым годом привлекают все больше пользователей не только из физических научных центров, но и центров биологии, химии, геологии, материаловедения и других наук. Причем доля экспериментов «нефизического» профиля возрастает. Важную роль в процессе привлечения научных центров к нейтронным исследованиям играет так называемая программа пользователей. Ее суть состоит в том, чтобы дать возможность специалистам сторонних организаций получить возможно более широкий доступ к экспериментальным установкам. Научные комитеты по направлениям исследований проводят отбор поданных предложений по экспериментам. Например, на реакторе ИБР-2 экспериментаторы из почти 30 стран ежегодно выполняют около 150 экспериментов. На долю ЛНФ приходится около 30% пучкового времени. Около 35% пучкового времени используют ученые из более чем 20 научных институтов России.

Такая организация работ привлекает молодежь. ОИЯИ активно сотрудничает с ведущими вузами страны, с 1961 года в Дубне работает филиал физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, в 2000 году в МГУ была открыта кафедра нейтроно-



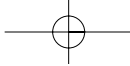
графии (заведующий кафедрой В.Л.Аксенов), которая базируется в ЛНФ, интеграция с высшей школой организуется также через Межфакультетский центр «Строение вещества и новые материалы» МГУ и Учебно-научный центр ОИЯИ. Ежегодно на базе ОИЯИ обучаются десятки студентов. Регулярно проводятся научные школы и конференции.

Все это позволило в полной мере реализовать творческое сотрудничество ведущих научных организаций стран-участниц ОИЯИ в развитии новых методов нейтронографии, которые вывели Институт на передовые рубежи в области нейтронных исследований конденсированного вещества.

## 7. Исследования эффекта Мёссбауэра

Ф.Л.Шапиро, пожалуй, был первым в нашей стране, который осознал значение открытого Р.Мёссбауэром в 1958 году эффекта резонансного поглощения  $\gamma$ -лучей ядрами без отдачи и открывающиеся возможности исследований с использованием этого эффекта. В 1959 году Ф.Л.Шапиро создает классическую теорию эффекта Мёссбауэра и предлагает использовать эффект Мёссбауэра на ядре  $^{67}\text{Zn}$  для наблюдения смещения энергии  $\gamma$ -кванта в поле тяжести Земли, предсказанного теорией относительности. В связи с этим в ЛНФ были развернуты исследования по подготовке такого эксперимента. В 1960 году в лаборатории был обнаружен эффект Мёссбауэра на ядре  $^{67}\text{Zn}$  с разрушением эффекта магнитным полем (Ф.Л.Шапиро, В.П.Алфименков, В.И.Лушиков, Ю.М.Останевич), а в 1962 году для  $\gamma$ -квантов с  $E = 92,7$  кэВ от ядра  $^{67}\text{Zn}$  был впервые измерен скоростной спектр эффекта Мёссбауэра и применен метод частотной модуляции  $\gamma$ -излучения для определения наблюдаемой ширины  $\gamma$ -резонанса, которая составила  $\sim 10^{-10}$  эВ. Впервые получены точности относительных измерений энергии  $\sim 5 \cdot 10^{-16}$  и измерены вероятности испускания ( $\sim 0,8 \cdot 10^{-2}$ ) и поглощения ( $\sim 2 \cdot 10^{-2}$ )  $\gamma$ -квантов без отдачи. Максимум резонансного поглощения  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$  проявился при нулевой относительной скорости источника и поглотителя. Структура наблюдаемого энергетического спектра соответствовала наличию квадрупольного расщепления уровней ядра  $^{67}\text{Zn}$  в гексагональной кристаллической решетке ZnO – матрице источника и поглотителя (исследования выполнены упомянутой выше группой с привлечением А.В.Стрелкова и др.).

Малая величина эффекта на  $^{67}\text{Zn}$  и относительно короткий период полураспада материнского ядра  $^{67}\text{Ga}$  – 72 часа – существенно ограничивали проведение работ. С другой стороны,  $^{67}\text{Zn}$  оставался единственным мёссбауэровским ядром, с которым мог быть поставлен убедительный эксперимент по измерению изменения энергии  $\gamma$ -кванта в поле тяжести Земли. Так, для смещения линии  $^{67}\text{Zn}$  на полуширину достаточно разнести источник и поглотитель по высоте на 4,9 метра. Для такого же смещения линии  $^{57}\text{Fe}$  необходима разность по высоте в 3 км! В 1968 году А.И.Бескровным и Ю.М.Останевичем была разработана методика приготовления сильных источников с излучателем  $^{67}\text{Ga}$  и применен токовый метод регистрации мёссбауэровских спектров. Использование этих методик позволило примерно в 200 раз сократить время измерений по сравнению с традиционным способом регистрации. В качестве матрицы для источника, дающего одиночную линию, была использована окись магния, но ве-



личина эффекта оказалась также малой. С этими результатами и были прекращены работы с  $^{67}\text{Zn}$ .

В 1962 году впервые был обнаружен группой Ф.Л.Шапиро эффект Мёссбауэра на ядре  $^{149}\text{Sm}$  для  $\gamma$ -квантов с энергией 22 кэВ и определены ширина резонансной линии и спин возбужденного состояния.

Преимущественно эффект Мёссбауэра использовался в исследованиях по физике конденсированного состояния. Наиболее часто такие исследования проводились с ядром  $^{57}\text{Fe}$ . В ЛНФ были созданы экспериментальная установка для работы с  $^{57}\text{Fe}$ , криостат и высокотемпературная печь, которые давали возможность проводить исследования от гелиевых температур до 1000 К. Спектры обрабатывались на современных ЭВМ. Это была, пожалуй, лучшая мёссбауэровская установка в странах-участницах ОИЯИ. На этой установке проведен Г.Н.Гончаровым, Ю.М.Останевичем и С.Б.Томиловым цикл исследований щелочных железосодержащих силикатных стекол. В системе  $\text{FeS}(1+x)$  подробно исследована зависимость магнитного поля на ядрах железа, находящихся в различных кристаллографических позициях, от количества избыточной серы, Л.Чером и Ю.М.Останевичем был исследован сплав  $\text{Fe}_3\text{Al}$  и предложена микроскопическая модель магнитной структуры. В проводимых работах постоянно принимали участие сотрудники из стран-участниц.

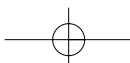
## **8. Исследования на электростатических генераторах и переходное излучение**

### *Ядерные реакции*

Исследования ядерных реакций на легких ядрах проводились еще в Гидротехнической лаборатории до организации ОИЯИ по программе создания ядерного оружия под руководством И.В.Курчатова. После организации ОИЯИ коллектив сотрудников, работавших по этой тематике, вошел в состав Лаборатории ядерных проблем, а после создания ЛНФ он был переведен в новую лабораторию в полном составе. Исследования проводились на двух ускорителях, находящихся в корпусе «У»: каскадном генераторе с энергией до 300 кэВ и ускорителе типа Ван-де-Граафа на энергию до 1,8 МэВ. Оба ускорителя были приспособлены для ускорения радиоактивного изотопа водорода – трития. Измерялись полные и дифференциальные сечения и угловые распределения реакций, вызываемых ускоренными ионами трития при бомбардировке различных мишеней  $\text{D}+\text{T}$ ,  $\text{T}+\text{T}$ ,  $^3\text{He}+\text{T}$ ,  $^{12}\text{C}+\text{T}$ ,  $^{16}\text{O}+\text{T}$ , а также сечения упругого рассеяния ионов трития на легких ядрах.

В 1965 году был введен в строй новый электростатический генератор ЭГ-5, на котором была достигнута максимальная энергия 4,7 МэВ. Ускоритель проектировал и его строительство выполнил НИИЭФА (Ленинград). Курировал эти работы от ЛНФ Г.М.Осетинский. Эксплуатацией нового ускорителя занималась специальная группа во главе с И.А.Чепурченко.

Были продолжены комплексные исследования ядерных реакций на легких ядрах  $^7\text{Li}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{19}\text{F}$ ,  $^{22}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Si}$  на пучках ускоренных дейтронов и ионов с выходом протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц. Измерялись угловые распределения, дифференциальные и полные сечения выхода продуктов ядерных реакций в широком диапазоне





энергий налетающих частиц с целью извлечения спектроскопической информации об уровнях составных ядер.

В 1969 году И.В.Сизов и С.С.Паржицкий совместно с группой Г.Отто из Лейпцигского университета начали исследования реакций  $^{55}\text{Mn}(p, n)^{55}\text{Fe}$ ,  $^{55}\text{Mn}(p, \gamma)^{56}\text{Fe}$  с целью получения информации об изобар-аналоговых состояниях ядра  $^{56}\text{Fe}$ . В дальнейшем эти исследования были продолжены в сотрудничестве с НИИФ ЛГУ. Были выполнены систематические исследования изобар-аналоговых резонансов в реакциях  $(p, \gamma)$  на ядрах  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Ni}$ ,  $^{62}\text{Ni}$ ,  $^{64}\text{Ni}$ .

В последующие годы на ЭГ-5 активно проводились исследования совместно с сотрудниками из стран-участниц и неучастниц ОИЯИ поляризации протонов в реакции  $^{12}\text{C}(^3\text{He}, p)^{14}\text{N}$ , угловой и энергетической зависимости спин-флипа при неупругом рассеянии протонов на ядрах  $^{24}\text{Mg}$ ,  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{S}$ ,  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{58}\text{Ni}$ . Был выполнен большой цикл исследований структуры ядер методом усредненной  $\gamma$ -спектроскопии на атомных ядрах с  $A = 70-90$ . На пучках ускорителя Г.М.Осетинский при участии корейского сотрудника Ли Зен Хо начал развивать различные аналитические методики. Был выполнен большой цикл исследований сечений ионизации K, L, M-оболочек различных атомов легкими ионами в широком энергетическом диапазоне. В работе, кроме А.П.Кобзева, принимала участие группа польских сотрудников (Э.Бразевич, Я.Бразевич, М.Пайек и др.), а также Т.Кауэр, Д.Траутман из Базельского университета (Швейцария) и В.Кретчмер, М.Халлер из Нюрнбергского университета (Германия).

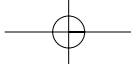
В последние годы электростатический генератор широко используется в качестве источника нейтронов различных энергий. По предложению Ю.П.Попова на первом канале был реализован новый метод спектрометрии нейтронов, генерируемых пучком протонов в реакции  $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$ . Метод основан на измерении сдвига по энергии первичных  $\gamma$ -переходов при изменении энергии захваченных нейтронов. Были измерены парциальные сечения радиационного захвата нейтронов промежуточных энергий ядрами нескольких элементов. В работе участвовали также А.В.Войнов, Н.А.Гундорин, А.П.Кобзев и др.

#### *Переходное и черенковское излучения*

Исследования переходного излучения (ПИ) в ЛНФ начались по инициативе И.М.Франка в самом начале 1966 года. В это время в ОИЯИ из Лодзинского университета (Польша) приехал Станислав Михалек, который ранее, будучи аспирантом А.Е.Чудакова в МГУ, занимался переходным излучением. Первые исследования переходного излучения были выполнены на пучках заряженных частиц на только что введенном в эксплуатацию электростатическом генераторе ЭГ-5.

Сама идея излучения движущегося заряда, пересекающего границу раздела сред с различными диэлектрическими характеристиками, возникла давно. В.Л.Гинзбург и И.М.Франк в 1946 году опубликовали в «Журнале экспериментальной и теоретической физики» статью, в которой рассчитали интенсивность излучения в видимой области спектра. Некоторое время она оставалась без внимания, а затем последовал целый ряд экспериментальных работ по исследованию различных свойств ПИ.

В ходе исследований, выполненных в ЛНФ, получены различные характеристики переходного излучения, возбуждаемого нерелятивистскими протонами и электрона-



ми на поверхности различных металлов (Al, Ag, Ni, W), отличающихся друг от друга оптическими характеристиками (показателем преломления и коэффициентом поглощения). Измерены энергетические зависимости выхода излучения в оптическом диапазоне, угловые распределения и степень поляризации излучения. Характер этих зависимостей неплохо совпадал с теоретическими оценками, и, таким образом, эти результаты наряду с исследованиями, выполненными в других лабораториях, полностью подтвердили не только существование переходного излучения, но и его основные свойства, следующие из классической теории.

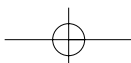
В дальнейшем исследования ПИ получили бурное развитие во всем мире и, в частности, использовались для регистрации частиц высоких энергий. Уже в мае 1977 года в Ереване организован Международный симпозиум по переходному излучению частиц высоких энергий.

В ЛНФ под руководством И.М.Франка исследования также продолжались. Был перестроен для ускорения электронов существующий ускоритель на базе каскадного генератора, что позволило приблизиться к релятивистским скоростям частиц при энергии 300 кэВ. При этом интенсивность оптического излучения возросла настолько, что его можно разлагать в спектр. Создана довольно оригинальная установка, которая позволяла исследовать угловые распределения выделенного участка спектра без перемещения монохроматора. В качестве мишеней стали использовать плоскопараллельные слои слюды толщиной в несколько микрон. Скорость электронов оказалась достаточной, чтобы превысить порог излучения Вавилова–Черенкова в слюде, что дало возможность приступить к исследованию его свойств.

В слюде обнаружился довольно значительный вклад люминесценции, и поэтому для отделения ее от излучения Вавилова–Черенкова ускоритель электронов пришлось перевести в импульсный режим с частотой 10 МГц и длительностью импульсов 2–4 нс. В качестве детекторов использовались фотоумножители, работающие в режиме счета отдельных фотонов. Такая достаточно совершенная методика позволила выполнить детальное исследование излучения Вавилова–Черенкова в слюдяных радиаторах различной толщины.

Были измерены угловые распределения ИВЧ для различных длин волн и удалось экспериментально наблюдать дифракционный характер угловых распределений, несмотря на влияние многократного рассеяния электронов. Исследование зависимости положения максимума угловых распределений от энергии электронов показало, что она отличается от известного соотношения для преломленного угла ИВЧ  $\beta \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta} = 1$ .

Экспериментально было показано, что в районе порога не исчезает ни само излучение, не изменяются его характеристики (угловое распределение, поляризация). Подробный анализ этих результатов позволил сделать вывод, что порог ИВЧ в радиаторах конечной толщины при скорости частицы, равной фазовой скорости света, не существует. Пороговое значение скорости  $\beta = n^{-1}$  является результатом предельной теории для бесконечной траектории частицы. Таким образом, проведенные исследования дали более детальное представление о взаимодействии заряженных частиц с твердым телом.



## 9. Прикладные исследования

### *Активационный анализ и экологические исследования*

Работы по нейтронному активационному анализу (НАА) начались в ЛНФ под руководством В.М.Назарова в конце 60-х годов, в период расцвета интереса к этому методу в реакторных центрах мира. Уже на реакторе ИБР-30 в ЛНФ простая пневмотранспортная установка использовалась для облучения геологических и медико-биологических образцов с целью изучения их элементного состава. Ввод в эксплуатацию реактора ИБР-2 с высокими потоками эпитепловых и быстрых нейтронов способствовал усовершенствованию методики многоэлементного инструментального НАА. Два канала облучения, один из которых снабжен кадмиевым экраном, связанные с современной быстрой пневмотранспортной установкой (ПТУ), обеспечивают оптимальные условия для массового анализа образцов при температуре 60–70 °С, что особенно важно при проведении НАА биологических и экологических материалов. Эпитепловой вариант НАА перспективен именно для такого класса образцов, поскольку позволяет свести к минимуму влияние матричных элементов, обладающих большими сечениями активации на тепловых нейтронах. Установка оборудована четырьмя спектрометрическими трактами с возможностью проведения циклического НАА для определения короткоживущих изотопов секундного диапазона. Автоматизированная система управления, сбора и обработки спектрометрической информации в совокупности с квалификацией персонала, а также участие во многих международных программах послужили основой для аккредитации радиоаналитической лаборатории на базе ПТУ «Регата» Госстандартом РФ.

На начальном этапе развития НАА в ЛНФ изучалась роль отдельных элементов в развитии онкологических опухолей у подопытных животных, а также проблемы нарушения минерального обмена веществ в невесомости, совместно со специалистами Онкологического центра и Института медико-биологических проблем (Москва). Когда в Советском Союзе еще только начинались работы по биотехнологии извлечения металлов из обедненных руд, в группе В.М.Назарова при участии Института биофизики (Одесса) полным ходом шли работы по изучению бактериального способа извлечения мелкодисперсного золота. На основе изотопного калифорниевых источника нейтронов в конце 80-х годов совместно с Всесоюзным институтом зерна был разработан и внедрен в производство прибор для определения азота (белка) в зерне, зернопродуктах и комбикормах. Впервые в Советском Союзе НАА применен для анализа особо чистого алюминия, получаемого методом зонной плавки во ВНИИ алюминиевой, магниевой и электродной промышленности (г. Ленинград). Параллельно шли работы по анализу геологических образцов, арктических льдов, высокотемпературных полупроводников, конструкционных материалов и бетонов биологической защиты ядерных установок (В.М.Назаров, М.В.Фронтасьева, С.С.Павлов, В.Ф.Переседов, Н.А.Гундорин, С.Ф.Гундорица, Т.С.Островная, Л.П.Стрелкова, В.П.Чинаева и др.).

В 90-х годах в секторе формируется устойчивый интерес к экологическим исследованиям. НАА с успехом используется для анализа объектов окружающей среды (почва, вода, растительность, аэрозольные фильтры). Начиная с 1991 года, в тесном сотрудничестве с известным норвежским ученым-экологом профессором Э.Стейн-

несом в секторе стало развиваться новое направление — биомониторинг атмосферных выпадений тяжелых металлов и других элементов с помощью мхов.

Мхи-биомониторы (в основном, *Hylocomium splendens* и *Pleurozium schreberi*), как аналоги аэрозольных фильтров, используются для контроля качества атмосферного воздуха. Тяжелые металлы относятся к наиболее опасным загрязнителям окружающей среды. В большинстве индустриально развитых стран Западной Европы потребность в изучении последствий их воздействия на окружающую среду и здоровье человека привела к созданию национальных и международных программ по биомониторингу атмосферных выпадений тяжелых металлов. Под эгидой Комиссии ООН по трансграничному переносу атмосферных выпадений в Европе (UNECE ICP Vegetation) каждые 5 лет издается «Атлас атмосферных выпадений тяжелых металлов», базирующийся на анализе образцов мха, собранных одновременно на больших территориях по утвержденной методике. С 1995 года сектор НАА принимает участие в Европейской программе «Атмосферные выпадения тяжелых металлов в Европе — оценки на основе анализа мхов». В Атлас 2000 года переданы результаты исследований для некоторых регионов России (Центральная Россия, Южный Урал) и ряда стран Европы (Болгария, Польша, Румыния, Босния и Герцеговина, Сербия и Черногория, Македония, Словакия, Западная Украина). Наряду с Европой, в секторе ведутся работы по биомониторингу в Монголии, Турции, Китае и Южной Корее (М.В.Фронтасьева, Е.В.Ермакова, Л.И.Смирнов, О.А.Куликов-Стан и др.).

Качество пищевых продуктов, производимых в некоторых загрязненных областях России, изучается в рамках координационных программ и технической кооперации с МАГАТЭ.

С 1999 года плодотворно развивается сотрудничество с грузинскими учеными в области биотехнологий. Возможности НАА были продемонстрированы в разработке Se, I, Sr-содержащих фармацевтических препаратов на основе синезеленой микроводоросли *Spirulina Platensis*. НАА эффективно использовался при разработке методики бактериального выщелачивания металлов (включая уран и торий) из бедных руд, пород и отходов производств Грузии.

#### ***Прикладные исследования на ЭГ-5***

В 90-х годах аналитические методики использовались для решения многих прикладных задач, таких как исследование возможности прецизионного измерения глубинных профилей кислорода, используя резонансное рассеяние ионов, изучение глубинных профилей элементов в сверхпроводящих и алмазоподобных пленках (Л.П.Черненко, А.П.Кобзев, Д.А.Корнеев, Д.М.Широков). Каналирование использовалось для исследования кристаллической структуры высокотемпературных сверхпроводников совместно с сотрудниками университета Ростова-на-Дону (А.С.Боровик, А.А.Епифанов, С.Н.Потапов), а также для определения местоположения примесных атомов бора в кристаллической решетке арсенида галлия совместно с Вэй Лунчаном из Китая.

Исследования глубинных профилей элементов в различных конструкционных материалах проводилось в сотрудничестве с физиками из Словакии и Украины. Элементный состав и структура многослойных нейтрон-поляризирующих зеркал были исследованы с помощью ядерно-физических аналитических методик при участии со-

трудников из ИЯФ РАН (г. Гатчина). Предельное разрешение методики резерфордовского обратного рассеяния исследовалось совместно с сотрудниками Института физики металлов Уральского отделения РАН. Исследования имплантированных образцов, а также пористого кремния проводились в сотрудничестве с университетом им. М.Склодовской-Кюри в Люблине.

Быстрые нейтроны из DT-реакции используются для разработки установок, базирующихся на принципе сопутствующих частиц и позволяющих обнаруживать скрытые запрещенные вещества типа взрывчатки и наркотиков. Сотрудники нескольких лабораторий ОИЯИ принимают участие в этой работе: М.Г.Сапожников, В.А.Будилов, Н.И.Замятин, В.А.Никитин, Ю.Рогов (ЛФЧ), В.М.Слепнев (ЛВЭ), В.М.Быстрицкий, В.А.Столупин, В.А.Уткин (ЛЯП), А.П.Кобзев, И.А.Чепурченко и др. (ЛНФ).

Различные калибровки детекторов на пучках нейтронов также выполнялись и, в частности, нейтронные детекторы прибора «HEND», направленного к Марсу 7 апреля 2001 года по программе НАСА «2001 MARS ODYSSEY», калибровались на ускорителе ЭГ-5. От ЛНФ в работе участвовали Л.Б.Пикельнер, Ю.П.Попов, В.Н.Швецов, Ю.Д.Мареев, А.П.Кобзев, И.А.Чепурченко.

## 10. Сотрудничество

Первый в мире импульсный реактор ИБР стал центром притяжения физиков из стран-участниц ОИЯИ. Становление и развитие Лаборатории нейтронной физики проходило при активных контактах с институтами стран-участниц, при этом формы международного сотрудничества менялись, но ЛНФ была и остается одной из наиболее интернациональных по составу лабораторий ОИЯИ.

С момента возникновения лаборатории в работах, связанных с подготовкой пучка реактора ИБР и первых экспериментов на нем, деятельное участие принимали сотрудники из стран-участниц ОИЯИ. Среди них были уже опытные физики: Ким Хен Бон, Н.Кашукеев, В.Христов. В разных группах трудились Содном Намсрай, Зыонг Чонг Бай, Ким Хи Сан, М.Пшитула. В старт ядерно-физических исследований значительный вклад внесли венгерские физики Д.Киш, И.Визи, Б.Кардон, чехи Я.Урбанец и И.Квитек, румыны Н.Илиеску, Т.Стадников, Д.Дорчоман, китайские сотрудники Ван Най-янь, Ван Ши-ди, Яо Чу-чуань, Чен Лин-янь, Ван Юн-чан, Чжан Пэ-шу. Развитие экспериментов по физике конденсированных сред обязано польским физикам А. Шкатуле, З.Огжевальскому, И.Жуковской, К.Парлински, А.Байореку, И. Сосновской, Е. Сосновскому, А. Холосу, которых опекали профессора Е.Яник и Б.Бурас. Именно благодаря их участию в постановке первых экспериментов развивалось сотрудничество с научными центрами в Будапеште, Кракове, Сверке, Ржеже.

В какой-то мере формой сотрудничества была подготовка научных кадров в области физики ядра и ядерных методов исследования конденсированных сред. Школу научных исследований на первоклассных установках лаборатории прошли многие физики Болгарии, Венгрии, ДРВ, ГДР, КНДР, Монголии, Польши, Румынии, СССР и Чехословакии. Монгольскому государственному университету ЛНФ поставила электростатический нейтронный генератор и вместе с лабораториями ЛЯП и ЛЯР ока-



Оргкомитет Нейтронной школы за работой. Слева направо: Ю.М.Останевич, В.И.Фурман, А.В.Белушкин, М.В.Фронтасьева, В.А.Аксенов, А.Б.Пикельнер, И.Натканец

зала помощь в проведении на нем первых экспериментов. Физики многих стран выполнили в ЛНФ свои диссертационные работы или использовали полученные в ЛНФ результаты для защиты диссертаций в своих странах. Интересно отметить, что отработавшие свой срок в ОИЯИ сотрудники возвращались домой, присылали на свое место новых сотрудников из своих лабораторий, кафедр и институтов. Таким образом, в ЛНФ работали «династии» из Лодзинского университета Польши (Х.Малэцки, М.Стэмпиньски, М.Пшитула, Л.Ласонь, К.Недведюк, А.Корейво, А.Жак, Ю.Анджеевски, Х.Станчик-Файков, К.Тшецяк); с кафедры атомного ядра Пловдивского университета Болгарии (Н.Балабанов, А.Антонов, С.Маринова, М. и Р.Митриковы). Из Чехословакии работали: М.Флорек, И.Вильгельм, З.Длоугы, Я.Пресперин, Я. Фогелова, Ф. Томикова, Я.Климан, Й.Криштяк, А.Дука-Зайоми; из Вьетнама – Нгуен Нгуен Фонг, Во Ким Тхань и Фунг Ван Зуан; из Монголии – Г.Хуухенхуу и Чадраабал.

С годами в интернациональном коллективе лаборатории возрастает роль физиков различных стран, имеющих значительный опыт работы и возглавлявших те или иные направления исследований. Страны-участницы стали присылать в ОИЯИ целые группы сотрудников с аппаратурой, специально подготовленной для экспериментов в ЛНФ.

Группа профессора Н.Кроо (Венгрия) провела нейтронные исследования некоторых проблем магнетизма с помощью построенного в Венгрии и доставленного в Дубну спектрометра, использующего принцип механического прерывания нейтронного пучка. Вторая установка этого типа была сооружена сотрудниками ФЭИ (СССР). Работой польских физиков, изучающих атомные и молекулярные движения в твердых

телах и жидкостях, на протяжении многих лет бесменно руководит профессор Е.Яник. Этой группой создан нейтронный спектрометр, носящий символическое название КДСОГ, первые две буквы которого: КД – «Краковско-Дубненский» – отражает совместный характер разработок. Чехословацкие физики под руководством Я.Урбанца исследовали гамма-распад нейтронных резонансов на аппаратуре чехословацкого производства. Физики Румынии и Чехословакии под руководством профессора Д.Балли и профессора Ч.Шимане активно участвовали в подготовке и проведении совместных исследований кристаллической структуры сложных, в том числе и биологических, объектов.

В работе ЛНФ принимали участие и физики стран, не входящих в состав Института: Египта, Индии, Франции, ФРГ, Финляндии и др.

Сотрудничество ЛНФ с институтами стран-участниц имело и имеет тенденцию к многосторонним совместным работам по одной большой теме, что дает наиболее интересные результаты.

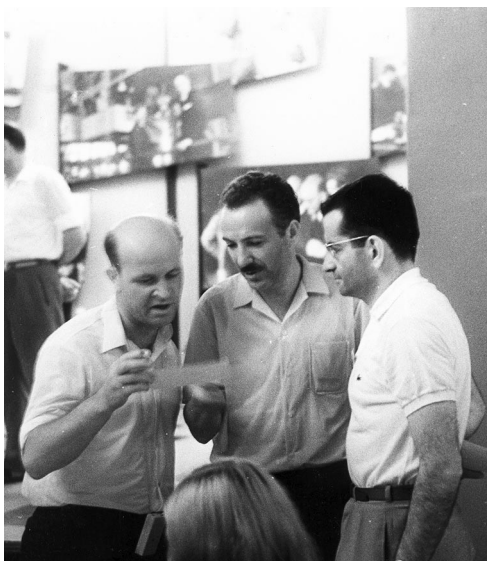
Работы по созданию комплекса ИБР-2 – наиболее разительный пример интернационального сотрудничества. ИБР-2 создавался при участии институтов и предприятий Венгрии, Румынии, Польши, СССР. Крупные физические установки для работ на пучках реактора создавались в Венгрии, Польше, Румынии, Чехословакии, СССР.

Измерительно-вычислительный центр, являющийся составной частью комплекса ИБР-2, спроектирован в тесном сотрудничестве с Венгрией и Лабораторией вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

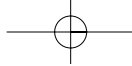
В настоящее время исследования необычных свойств ультрахолодных нейтронов, механизма их поглощения в накопительных сосудах, возможностей использования ультрахолодных нейтронов проводятся в Институте Лауэ–Ланжевена (Франция) большим интернациональным коллективом.

Работы по нейтронно-активационному анализу проводятся на реакторе ИБР-2 в тесном сотрудничестве с Румынией, Польшей, Монголией, Россией, Норвегией и приобретают все большее значение в связи с экологической направленностью данных работ.

Запуск в 1984 году реактора ИБР-2 дал мощный толчок исследованиям по физике конденсированных сред с помощью рассеяния нейтронов. Физики из стран-участниц и неучастниц ОИЯИ (Польша, Чехия, Венгрия, Германия, Россия, Грузия и т.д.) вместе создают новые спектрометры, вместе проводят исследования на них. Получила развитие новая форма сотрудничества – политика пользователей на ИБР-2. Уче-



**Слева направо: В.И.Лущикова,  
Ю.В.Рябов и А.Мишадон  
в перерыве между лекциями в  
Нейтронной школе в Алуште (1974 г.)**



ный из университета или института любой страны может подать предложение о проведении эксперимента на любой действующей установке на реакторе. Соответствующий комитет экспертов рассмотрит это предложение и оценит его. Рекомендации экспертов обязательны к исполнению, и в установленный срок автор эксперимента совместно со специалистами ЛНФ проводит эксперимент. Дальнейшая работа с полученными результатами проводится физиком на своей основной работе в контакте со специалистами ЛНФ при помощи современных средств связи. Таким образом, в экспериментах на реакторе ИБР-2 участвовали и участвуют физики из более чем 20 стран. Значительное число сотрудников лаборатории выезжает на короткие и длинные сроки для работы в зарубежных научных центрах. Такая форма международного сотрудничества является самой перспективной и широко развитой в научном мире в настоящее время. При этом установились постоянные связи не только с институтами и университетами из стран-участниц. По предложениям и с участием сотрудников ЛНФ проводятся эксперименты в Гренобле, Юлихе, Дармштадте, Лос-Аламосе, ЦЕРНе.

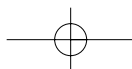
Надо подчеркнуть, что ряд научных направлений, развиваемых в мировой науке, инициированы работами, выполненными впервые в ЛНФ. Упомянем исследования свойств ультрахолодных нейтронов, эффектов нарушения пространственной четности в нейтронных резонансах, влияния импульсных магнитных полей на структуру вещества, использование малоугловой методики.

Большую роль в укреплении международного сотрудничества играют регулярно проводимые и организуемые ЛНФ такие научные форумы, как школы по нейтронной физике (I–VIII, Алушта–Дубна, 1969–1998 гг.), международные семинары по взаимодействиям нейтронов с ядрами (I–XII, Дубна, 1993–2004 гг.).

## 11. Заключение

Отметим, что выполнение научной программы исследований ЛНФ было осуществлено благодаря большому труду всех подразделений лаборатории: работников службы реакторов ИБР, ИБР-30, ИБР-2, конструкторского бюро, электронщиков, программистов, мастерских, работников технологических отделов. Незабываемы энтузиазм, устремленность, доброжелательность и поддержка всех сотрудников лаборатории, действительно бескорыстно работавших «на науку». Ведь очень многие дела и проблемы решались часто и без согласований с начальством. В этом неповторимость прошлой жизни Института.

Мир не стоит на месте, все течет и меняется, кто-то и что-то стареет, уходит навсегда. Постарел и первый ИБР, медленно, но (надемся!) верно реализуется проект создания нового современного источника резонансных нейтронов – ИРЕН. Введение в строй нового источника вместо честно отслужившего свой срок лет ИБРа улучшит разрешающую способность нейтронного спектрометра в 10 раз и в 2 раза повысит интенсивность. Часть актуальных исследований можно будет продолжить в существенно лучших условиях, появятся возможности начать новые эксперименты, которые были невыполнимы при параметрах пучков на ИБР-30. Главное – действует жизнеспособный научный коллектив, имеется поддержка ведущимися исследованиям







Директор ЛНФ (1988–2001 гг.) профессор В.А.Аксенов  
с группой молодых сотрудников

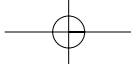
в виде разных грантов и международного сотрудничества, видны перспективы — научные и методические.

В лаборатории постоянно ведется подготовка научных кадров: студентов, аспирантов и молодых сотрудников из стран-участниц и неучастниц ОИЯИ (Университет «Дубна», МГУ, МИФИ, университеты Болгарии, Польши, Румынии, Норвегии, Южной Кореи).

Ряды солидных «мужей науки», начавших работать на первом ИБРе, укрепила талантливая молодежь, готовая нести эстафету дальше, — была бы только дорожка. Дорожка — это модернизированный ИБР-2 и сооружаемая установка ИРЕН плюс неординарные усилия руководства Института, чтобы помочь молодежи не сходить с принятой эстафетой с «дистанции» в поисках средств для нормальной жизни. Прошлое первых ИБРов и нейтронной физики состоялось, наша общая забота — пусть состоится будущее.

## ЛИТЕРАТУРА

- Aksenov V.L., Lauter-Pasyuk V.V., Lauter H., Nikitenko Yu.V., Petrenko A.V.* Polarized neutrons at pulsed sources in Dubna // *Physica B* 335. 2003. P. 147.
- Frontasyeva M.V., Pavlov S.S.* REGATA Experimental Setup for Air Pollution Studies // *Problems of Modern Physics*. Sissakian A.N., Trubetskov D.I. (Eds.). Dubna: JINR, 1999. P. 152–158.
- Аксенов В.Л.* Нейтронная физика на пороге XXI века // *ЭЧАЯ*. 2000. Т. 31. № 6. С. 1304.
- Аксенов В.Л., Балагуров А.М.* Времяпрелетная нейтронная дифрактометрия // *УФН*. 1996. Т. 166. № 9. С. 955.
- Балагуров А.М.* Исследования конденсированных сред на реакторе ИБР-2 ЛНФ ОИЯИ в 90-х годах // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 1997. № 7. С. 123.



- Белушкин А.В.* Исследования систем с разупорядочными водородными связями методом рассеяния нейтронов // Кристаллография. 1997. № 42. С. 549–575.
- Васильева Э.В., Суховой А.М., Хитров В.А.* Влияние структуры возбужденных состояний тяжелых ядер на процесс каскадного  $\gamma$ -распада в диапазоне энергии связи нейтрона // ЭЧАЯ. 2000. Т. 31. С. 350.
- Игнатович В.К.* Ультрахолодные нейтроны – открытие и исследование // УФН. 1996. Т. 166. С. 303.
- Франк И.М.* Развитие и применение в научных исследованиях импульсного реактора ИБР // ЭЧАЯ. 1972. Т. 2. С. 807.
- Шабалин Е.П.* Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976.
- Шапиро Ф.Л.* Эффект Мёссбауэра // УФН. 1960. Т. 72, вып. 4. С. 685.
- Материалы к 45-летию ОИЯИ // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32. С. 204–246.
- Нейтрон. К пятидесятилетию открытия. М.: Наука, 1983.