

ЯДЕРНО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА НЕЙТРОНАХ РЕАКТОРА

Ю.Г.Косяк, Е.З.Ахметов, М.М.Кадыкенов

Институт ядерной физики НЯЦ РК

Лаборатория радиоактивных излучений (ЛРИ) - старейшая лаборатория института ядерной физики была создана фактически за год до официального рождения ИЯФ АН Каз ССР в начале 1956 г. в стенах физико-технического института. Называлась она тогда лабораторией меченых атомов и, соответственно, предполагалось, что сотрудники ЛМА будут заниматься прикладными вопросами ядерной физики. Заведующим лабораторией был назначен к.ф.-м.н. Каипов Д.К. - впоследствии д.ф.-м.н., чл.-корр. АН Каз ССР.

Молодой заведующий скрупулезно подбирал научные кадры лаборатории, способные ставить и решать серьезные задачи в области физики атомного ядра. В основном это были выпускники физических факультетов университетов городов Алма-Аты, Воронежа и Ленинграда. Этот фактор, а также главные направления фундаментальных исследований института ядерной физики определили перепрофилирование исследований лаборатории и те крупные задачи, которые были решены в ЛРИ за 40 лет ее деятельности, относятся в основном к фундаментальным исследованиям свойств атомного ядра и элементарных частиц, с использованием нейтронов реактора. При этом нельзя не отметить, что в выборе научных тем, в их развитии и решении лаборатория всегда оставалась на передовых рубежах мирового научного прогресса.

Первая половина 60-х годов ознаменовалась в научном мире в области ядерной физики экспериментальным подтверждением явления резонансного рассеяния гамма-квантов на ядрах (ЯРР), предсказанным В.Куном еще в 1929 году.

Феномен ЯРР основан на способности ядер поглощать и высвечивать гамма-кванты с энергиями, соответствующими энергиям ядерных возбужденных состояний с обязательным условием компенсации потерь энергии гамма-квантом на отдачу. Работы Муна П.В., Metzгера Ф.Р. и Малемфорса К. (1951 - 1955 гг.) показали, какие широкие возможности открываются в ЯРР - экспериментах в плане информации о временах жизни возбужденных состояний ядер (τ) - этой уникальной характеристики структуры ядра, позволяющей судить о внутриядерном движении.

В 1957 г. на Всесоюзном Совещании по ядерной спектроскопии учеными Москвы Н. Делягиным и В. Шпинелем был представлен доклад об успешном измерении времени жизни 1,37 МэВ уровня 24-Mg методом ЯРР с использованием газообразного источника, а в 1959 г. успехов в этом новом направлении добились и мы - сотрудники ЛРИ ИЯФ АН Каз ССР под руководством Каипова Д.К. Теоретическая часть работы была выполнена А.Ф. Аккерманом и Ю.Г. Косяк (ныне доктора ф.-м.наук); эксперимент возглавлял молодой специалист, талантливый экспериментатор Ю.К. Шубный. Работали с энтузиазмом и добились высоких результатов, несмотря на смехотворную с нынешней точки зрения техническую оснащенность: обработка микроспектров гамма-лучей для газообразных источников проводилась на "Rein Metall", а измерения резонансно-

го эффекта - на одноканальном и стокаанальном (АН - 100) анализаторах, привезенным Ю.К.Шубным из Воронежа. В те далекие времена наш реактор еще не был запущен и Д.К. Каипов предложил научное сотрудничество лаборатории Р.Б.Бегжанова в институте ядерной физики Узбекистана с целью получения короткоживущих изотопов в реакции (n, γ) на реакторе ВВР-С УзССР. Предложение было принято.

За 1960 - 65 годы в совместных работах измерены времена жизни уровней 1.38 МэВ $^{24}\text{-Mg}$; 0.89 МэВ $^{46}\text{-Ti}$; 0.845 МэВ $^{56}\text{-Fe}$; 1.33 МэВ $^{60}\text{-Ni}$; 1.29 МэВ $^{116}\text{-Sn}$ и др. Эксперименты проводились с газообразными источниками, использование которых обеспечивало компенсацию энергетических потерь резонансного гамма-излучения за счет отдачи от предшествующих бета и гамма-распадов. Результаты этих исследований докладывались на Всесоюзных Совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра и публиковались в журналах международного значения: ЖЭТФ и Ядерная физика.

К этому времени наш коллектив значительно пополнился новыми сотрудниками - весьма незаурядными экспериментаторами и теоретиками. Существенно улучшилось оснащение лаборатории экспериментальным оборудованием. Появилась возможность подключиться к решению новых проблем, волновавших научный мир.

ЯРР на ВВР-К ИЯФ АН КазССР

В 1967 году в ИЯФ АН КазССР был запущен реактор ВВР-К, который по мощности (10 МВт) и по условиям проведения физических экспериментов значительно превосходил другие научно-исследовательские реакторы как в СССР так и за рубежом. Это определило тематику наших дальнейших исследований. Лабораторией радиоактивных излучений было освоено 2 горизонтальных и один касательный канал ВВР-К, на которых в фантастически короткие сроки, благодаря успешному руководству Д.К.Каипова и энтузиазму сотрудников, были созданы стационарные экспериментальные установки.

На 1-ом горизонтальном канале - пневмопочта и экспериментальная установка для ЯРР-исследований короткоживущих изотопов в виде конденсированных источников. Главным ее создателем был Л.Н.Смирин (ныне к.ф.и.н.). Мишень для получения источника гамма-излучения облучалась в зоне реактора (реакция (n, γ)), а затем подавалась пневмопочтой на место измерения в соседнее с залом реактора помещение. Рассеянное гамма-излучение от резонансного и нерезонансного рассеивателей, закрепленных на полуавтоматическом сменнике, детектировалось спектрометром с кристаллом NaI(Tl) (100X100 мм) либо Ge(Li) детектором ($V=23 \text{ CM}^3$) и АИ 1024. К этому времени Ю.Г. Косяк была разработана теория расчета микроспектров гамма-излучений по моделям дискретных и непрерывных взаимодействий атомов отдачи в конденсированных средах. Расчеты проводились на первых в Казахстане ЭВМ: Минск-1 (политехнический институт), Минск-2 и Урал-1 (КазГУ).

Исследования велись в 2-х направлениях:

1 - определение времен жизни возбужденных состояний ядер, в результате были измерены времена жизни 20 уровней ядер и

2 - изучение процессов атомных взаимодействий в конденсированных средах при низких энергиях (от десятка до нескольких сот электронвольт). Знание

законов взаимодействия атомных систем в твердых и жидких веществах помогает понять такие важные процессы, как динамика радиационных нарушений в твердых телах, поведение "горячих" атомов в различных средах, а также некоторые особенности физики молекулярных процессов. Однако именно в указанной области энергий экспериментальные сведения практически отсутствовали, что обусловило важность поставленной в то время задачи.

В экспериментах по ядерному гамма-резонансному рассеянию с использованием конденсированных источников было обнаружено влияние столкновений атомов отдачи с атомами окружающей среды на выход ЯРР. Последовательный теоретический анализ результатов ЯРР-экспериментов позволил сделать ряд выводов о характере торможения медленных атомов отдачи в жидких и твердых веществах. Установлена закономерность изменения эффективных радиусов взаимодействия атомов от их заряда в водной среде, которая удовлетворительно согласуется с выводами модели атома Томаса-Ферми (потенциал Фирсова); найдена функция зависимости параметра торможения атомов отдачи (Лэфф) от межъядерных расстояний в металлах; обнаружена строгая корреляция периодичности изменения величины Лэфф с периодичностью грамматомных объемов металлов в зависимости от заряда (Z). Последнее указывает на то, что процесс торможения в металлической среде не может быть описан только парными взаимодействиями - необходим учет дальнедействующих сил.

УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ И ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ

Параллельно ЯРР-исследованиям в лаборатории радиоактивных излучений в 1969г. по инициативе член - корр. АН КазССР Д.К.Каипова были начаты работы по проведению исследований с использованием нейтронов очень низких энергий (10^{-7} эВ) - ультрахолодных нейтронов (УХН). В сотрудничестве с лабораторией нейтронной физики ОИЯИ (г. Дубна) в 1971г. под руководством СНС В.А. Конокса и при участии ответственного исполнителя Е.З. Ахметова (ныне к.ф.м.-н.) была запущена экспериментальная установка для получения УХН на касательном канале реактора ВВР - К, не имевшая аналогов ни в СССР, ни за рубежом. На этой установке были измерены выходы УХН из ряда конверторов - замедлителей: алюминия, магния, гидрида циркония, воды; здесь же были определены оптимальные детекторы УХН, коэффициенты диффузии УХН в транспортном нейтроноводе и решен ряд других методических задач. Расположение установки в касательном канале, позволяло сравнительно просто производить манипуляции с газовыми и конденсированными конверторами, охлаждаемыми проточной водой и жидким азотом.

В 1975 г. на радиальном канале ВВР - К была создана другая установка для получения УХН (рис.1), с плотностью потока на порядок превышающей плотность потока в касательном канале, что позволило приступить к измерениям пропускания УХН через различные среды и определению полных сечений взаимодействия УХН, исследованию энергетической и температурной зависимости сечений, провести спектрометрические измерения в области энергий 10^{-7} эВ. При проведении цикла нейтронно-физических исследований были рассмотрены физические основы получения УХН, включающие вопросы образования УХН в замедлителях-конверторах, распространения по нейтроноводам, регистрации и хранения в сосудах. Также были проанализированы особенности

взаимодействия УХН со средой, обусловленные относительно большой длиной волны нейтрона, имеющей порядок межатомных расстояний, когда взаимодействие сильно зависит от атомной структуры изучаемого объекта, тепловое движение атомов и имеющихся между ними химических связей. Так процесс поглощения УХН определяется только абсолютной скоростью нейтрона и не зависит от температуры среды; сечения рассеяния УХН на атомах газа определяются потоком атомов среды на почти неподвижный нейтрон и зависят от температуры среды; а рассеяние УХН на молекулах газа должно рассматриваться с учетом обмена энергией между нейтроном и различными степенями свободы молекул: поступательными, вращательными и колебательными.

Ниже приводятся наиболее существенные результаты исследований ЛРИ в области УХН.

Измерены выходы УХН из алюминия, магния, гидрида циркония и воды, которые показали, что наибольшим значением выхода УХН (в 8 раз превышающим выход из алюминия) обладает гидрид циркония.

Определены параметры выхода УХН при температуре 80°K из воды, тяжелой воды и спиртов. Насыщение выходов достигалось при толщинах конденсированных слоев: 0.06 г/см для воды, 0.04 г/см для спиртов и 0.02 г/см для тяжелой воды. Выход УХН из замороженной воды превысил выход УХН из алюминия в 23 раза.

Изучены выходы (эмиссия) УХН из газовых водородных, дейтериевых и параводородных конверторов в диапазоне температур от 80°K до 300°K получены рекордные интенсивности УХН из параводорода при 80°K - более 100 нейтронов в секунду на площадь детектора, что с учетом поглощения УХН, образованных на окнах газовой ампулы превышает выход из алюминия более чем в 40 раз. Показана экспериментальная зависимость реконверсии параводорода от времени в условиях воздействия интенсивного реакторного излучения. Таким образом были подтверждены теоретические расчеты о существенном влиянии спинового состояния молекул водорода на процесс неупругого рассеяния тепловых нейтронов, т.е. на образование УХН.

Проведены расчеты выходов УХН из водорода, параводорода, ортоводорода, дейтерия и замороженных водородосодержащих жидкостей в зависимости от их температуры при облучении конверторов изотропным потоком тепловых нейтронов с максвелловским спектром по модели твердого ротора с учетом спиновых корреляций между атомами молекулы. Выход УХН для этих газов при фиксированной температуре нейтронного спектра заметно растет при охлаждении конвертора.

Для молибдена и ниобия определение полного сечения взаимодействия УХН было проведено с учетом эффекта многократного отражения УХН от границ мишени. Получено качественное и количественное согласие экспериментальных и расчетных значений полных сечений, которые подчиняются закону $1/V$.

Исследованы температурные зависимости сечений взаимодействия УХН с веществами, представляющими интерес, как с точки зрения исследования динамики вещества, так и измерения чисто ядерных характеристик среды: сечения захвата и рассеяния на свободном покоящемся ядре. Наиболее наглядно температурная зависимость полных сечений проявилась для свинца и магния, когда с уменьшением температуры уменьшается сечение рассеяния УХН.

Изучено отражение УХН от ряда плоских поверхностей с целью поиска "черного тела", обладающего малым рассеянием и большим поглощением УХН. В качестве образцов исследовались материалы, которые в нейтронной физике используются как хорошие поглотители, а также материалы, используемые для транспортировки УХН: медь, калий, борированный полиэтилен, полиэтилен, нержавеющая сталь, фторопласт-4, кварц, синтетический мех. Наиболее подходящим материалом для "черного тела" оказался полиэтилен, отражательная способность которого составила 6 % от отражательной способности меди, условно принятой за единицу.

Измерены полные сечения взаимодействия УХН с атомарными и молекулярными газами усредненные по спектру УХН в интервале скоростей от 3,2 до 5,7 м/с и сравнены с расчетными как по модели идеального газа, так и в борновском приближении для таких газов, как водород, параводород, гелий - 3, гелий - 4, азот, кислород, неон, аргон, ксенон и воздух при температурах 80° и 300° К. Исследование взаимодействия УХН с газообразной средой представляется актуальным по ряду причин: проверка следования полного сечения взаимодействия закону $1/V$; определение степени влияния остаточного газа в стенках сосудов на время хранения УХН в сосудах, а главное - отсутствие в атласах нейтронных сечений данных для области энергий нейтронов 10^{-5} - 10^{-7} эВ. В УХН-экспериментах контроль потока ультрахолодных нейтронов осуществлялся мониторингом потока тепловых нейтронов, падающих на конвертор. Была разработана и создана система автоматики, выполняющая всю последовательность операций по набору, записи, сбросу информации и управлению сервоприводами механизмов затворного устройства.

Одновременно в лаборатории проводились теоретические работы с целью интерпретации сечений взаимодействия ультра ($10^{-9} < E < 10^{-7}$ эВ) и очень холодных ($10^{-7} < E < 10^{-4}$ эВ) нейтронов (УХН и ОХН) с веществом. На основе квантовомеханических расчетов, проведенных М.М. Кадыкеновым под руководством Д.К. Каипова, были установлены закономерности изменения сечений рассеяния упругих и неупругих процессов взаимодействия нейтронов с газами. Показаны возможности экспериментальной проверки предельных выводов квантовой теории рассеяния для частиц экстремально малой скорости, а также использования отражения УХН от поверхности твердых образцов для определения важной в ядерной физике величины - амплитуды когерентного рассеяния нейтрона на ядре. Теоретически рассмотрено образование УХН в газовых конверторах, где расчетно показаны выгодные условия получения наибольшего количества УХН на двухатомных газах: водород, дейтерий, тритий, азот и кислород.

К середине 80-х годов была создана установка, смонтированная на радиальном канале N 1 ВВР-К, предназначенная для измерения интегральных коэффициентов отражения УХН от поверхностей тонких слоев. Сравнение экспериментальных и расчетных коэффициентов указывало на существенную зависимость коэффициентов отражения УХН от состояния поверхности (качества обработки, загрязнений, примесей и т.д.), что открывало перспективы исследования размеров, концентраций и объемных долей неоднородностей, сравнимых по величине с длиной волны УХН, в промышленных кристаллах кремния и других материалах.

Полученные результаты стимулировали продвижение в область еще более низких энергий нейтронов - очень холодных нейтронов (10^{-7} - 10^{-4} эВ) (ОХН).

В связи с остановкой ВВР-К ИЯФ исследования в области энергий ОХН были продолжены на реакторе МИФИ в 1989 году в сотрудничестве с сотрудниками ФИРАН им. П.Н. Лебедева во главе с к.ф.-м.н. А.Д.Перекрестенко. Предполагалось использование ОХН для получения информации о структуре исследуемых объектов. Были исследованы высокотемпературные сверхпроводники - иттриевые и висмутовые керамики, литотропные жидкие кристаллы - бензопурпурин - 4б и дисульфоиндаторон, геологический образец CaCO_3 . Из анализа поведения полных, упругих и неупругих, когерентных и некогерентных сечений рассеяния ОХН на исследуемых объектах получены сведения о размерах, концентрациях, объемной доле и спектрах размеров неоднородностей изучаемой среды, а для CaCO_3 и об элементном составе с точностью определения микропримеси методом лазерной масс-спектрометрии до 10-5%.

Такие исследования важны для изучения наноструктуры вещества (размеры от 1 нм до 100 нм в случае ОХН), фазовых переходов в жидких кристаллах, факторов влияющих на микроскопические свойства материалов. Весьма актуальным является применение ОХН для изучения сверхпроводников, полимерных и жидкокристаллических систем, геологических и биологических объектов. По этим работам в 1994 году была защищена кандидатская диссертация Б.М.Ибраевым.

НЕУПРУГОЕ РАССЕЯНИЕ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ РЕАКТОРА

В 1974 году на Всесоюзном Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра всеобщее внимание привлек обзорный доклад д.ф.-м.н. Демидова А.М. (ИАЭ Москва) о результатах исследования возбужденных состояний стабильных изотопов Sn, Pd и ^{182}W в реакции $(n, n' \gamma)$ на пучке быстрых нейтронов реактора ИР-10 исследовательского центра "Тажура" (Ливия).

Поражала информативность проведенных экспериментов. При неупругом рассеянии быстрых нейтронов реактора на ядрах, возбуждаются все его уровни в области энергий < 3.5 МэВ.

Возможность угловых измерений гамма-спектров из $(n, n' \gamma)$ -реакции открывала перспективы одновременной идентификации времен жизни сразу многих возбужденных состояний ядра методом ОДС, при условии строгого учета процессов торможения излучающего ядра, получившего отдачу в результате реакции. Нам (к.ф.-м.н. Л.Н.Смирину, к.ф.-м.н. Ю.Г.Косяк и МНС А.И.Серебrenникову) удалось убедить Д.К.Каипова начать исследования возбужденных состояний ядер в реакции $(n, n' \gamma)$ на пучке быстрых нейтронов ВВР-К ИЯФ.

Практически за один год на 4-ом горизонтальном канале реактора при активной помощи сотрудников ИАЭ Москвы была собрана экспериментальная $(n, n' \gamma)$ -установка и получены первые результаты из гамма-спектров от неупругого рассеяния быстрых нейтронов реактора на четно-четных изотопах Zn. А к концу 1976 г. впервые на пучке быстрых нейтронов реактора были измерены времена жизни ядерных возбужденных состояний по методике, предложенной и разработанной Ю.Г. Косяк; в эксперименте в качестве мишени был использован металлический ^{27}Al .

Чуть позже сотрудниками лаборатории была освоена методика определения спинов возбужденных уровней и смесей мультипольностей гамма-переходов, любезно предоставленная вместе с программами расчетов А.М.Демидовым (ИАЭ, Москва).

Совместное исследование времен жизни и спинов (J) ядерных уровней, а также интенсивностей и угловых распределений гамма-излучений в одном экспериментальном цикле значительно расширило возможности метода неупругого рассеяния быстрых нейтронов и позволило проводить комплексное изучение структуры ядер и анализ изменения свойств возбужденных состояний изотопов в зависимости от числа нейтронов в ядре. Интенсивный поток быстрых нейтронов, отсутствие спектроскопических запретов при возбуждении ядерных уровней и экспоненциальная зависимость потока нейтронов деления от их энергии вместе с характером сечения ($n, n' \gamma$)-реакции обусловили уникальность ($n, n' \gamma$)-экспериментов. На рисунке 2 представлена схема экспериментальной установки.

Экспериментальный поток быстрых нейтронов реактора формируется из нейтронов деления и при $E_n > 1$ МэВ подчиняется закону $f(E_n) \sim \exp(-\beta E_n)$. Величина коэффициента β изменяется от 0.4 до 0.78 в зависимости от устройства активной зоны реактора вблизи используемого канала, а также от материала экспериментальных фильтров. В условиях реакторного эксперимента реализуется область неупругого рассеяния нейтронов от энергии первого возбужденного уровня ядра до ~ 5 МэВ. Для описания механизма ($n, n' \gamma$)-реакции в этой области энергий Хаузером и Фешбахом еще в 1952 году была предложена оптико-статистическая модель компаунд ядра. Справедливость этой теории для сферических и переходных ядер была подтверждена рядом экспериментов, в том числе и нашими ($n, n' \gamma$)-исследованиями.

Вся экспериментальная информация о гамма-переходах (энергия, интенсивность, мультипольность, коэффициенты ветвления) и о возбужденных состояниях ядра (энергия, спины, времена жизни, заселяемость) извлекается из гамма-спектров, полученных в результате ($n, n' \gamma$)-реакции и измеренных при наборе углов относительно падающего на ядро-мишень пучка нейтронов.

Перечисленные спектроскопические характеристики, необходимые при изучении природы уровней и структуры ядра, а исследования заселяемости уровней ($R_{\text{экс}}, P_s$) кроме этого дают дополнительные сведения относительно механизма реакции ($n, n' \gamma$) независимо от традиционных исследований дифференциальных сечений рассеянных нейтронов.

Теоретические расчеты по статистической модели ядра в рамках формализма Хаузера-Фешбаха-Молдауэра как заселяемости уровней, так и угловых распределений гамма-излучений весьма трудоемки и требуют высокой квалификации исполнителей - соответственно ($n, n' \gamma$)-группа была пополнена новыми сотрудниками: Арыновым С.А., Чекушиной Л.В., Дуйсебаевой Г.А., которые впоследствии успешно защитили кандидатские диссертации по результатам ($n, n' \gamma$)-исследований возбужденных состояний сферических и переходных ядер.

Значимость вклада наших работ в банк мировых ядерных данных можно проиллюстрировать на примере двух ядер: четно-четного ^{70}Zn и нечетного ^{59}Co . В известную к моменту ($n, n' \gamma$)-исследований схему возбужденных уровней изотопа ^{70}Zn были внесены следующие новые данные: введены 22

гамма-перехода (ранее были зарегистрированы только 4), определены их энергии и относительные интенсивности; исключены 5 уровней, как не подтвержденные гамма-переходами; введен один новый уровень (3222.0 КэВ) по двум гамма-переходам; идентифицированы спины всех наблюдаемых состояний, причем существенно исправлена спиновая последовательность нижних возбужденных уровней; определены неизвестные ранее времена жизни 4-х возбужденных состояний.

Для ^{56}Co по интенсивности обнаруженных 30 новых гамма-переходов и заселенности уровней уточнены и впервые идентифицированы 25 значений спинов возбужденных состояний. А из угловых измерений энергий гамма-линий определены неизвестные ранее времена жизни 17-ти уровней ^{59}Co .

Богатейшие экспериментальные данные, полученные на пучке быстрых нейтронов реактора, позволили провести теоретическую интерпретацию природы возбужденных состояний исследованных ядер в рамках современных ядерных моделей. Так модель взаимодействующих бозонов (МВБ-1) была впервые применена для описания структуры ядер изотопической цепочки $^{54,56,58}\text{Fe}$ с малым числом нуклонов сверх заполненной нейронной оболочки (1f7/2), соответственно был использован вариант частично-дырочных возбуждений остова (^{56}Ni). Получено неплохое согласие между теорией и экспериментом при описании схемы возбужденных уровней и вероятности E2-гамма-переходов за исключением некоторых величин $B(E2)$ в полумагическом ядре ^{54}Fe ($N = 28$), в котором частичные возбуждения ожидаются более сильными нежели в ^{56}Fe и ^{58}Fe .

В случае $^{64,66,68,70}\text{Zn}$ по результатам теоретических исследований рядом авторов был сделан вывод о нецелесообразности использования МВБ-1 и -2 для описания структуры этих ядер. Считая первопричиной описанной неудачи исключительно недостаток экспериментальных сведений о схемах возбужденных уровней этих ядер мы провели расчеты по МВБ-1 с нашими (n, n' γ)-данными. В результате было получено удовлетворительное для ядер $^{66,68,70}\text{Zn}$ описание схемы возбужденных состояний и вероятностей E2-переходов не хуже, а в некоторых случаях лучше (описание поведения 0^+ и 2^+ уровней в зависимости от числа нейтронов), чем дает оболочечная модель. Частичные неудачи в воспроизведении вероятности гамма-переходов в ^{64}Zn естественно объясняются уменьшением полного числа бозонов и снижением степени коллективности уровней этого ядра.

Наши экспериментальные данные способствовали также расширению области применимости динамической коллективной модели (ДКМ, Митрошин В.Е. 1980 г.) для описания возбужденных состояний нечетных ядер. В нашей лаборатории впервые были проведены успешные расчеты по ДКМ структуры ядер в области средних атомных весов - ^{51}V , ^{55}Mn , ^{57}Fe , ^{59}Co , ^{67}Zn , ^{73}Ge и ^{77}Se . Значимость этих работ можно проиллюстрировать на примере ядра ^{73}Ge . Теоретическая интерпретация структуры его возбужденных состояний до наших исследований ограничивалась лишь трактовкой природы отдельных уровней, что можно было объяснить прежде всего неполными, а порой неверными экспериментальными сведениями о схеме распада ^{73}Ge . Проведенные расчеты схемы уровней этого ядра в рамках динамической коллективной модели оказались первым успешным теоретическим описанием четырех групп

нижних возбужденных состояний $^{73}\text{-Ge}$ идентифицированных в реакции $(n, n' \gamma)$ на быстрых нейтронах реактора.

Возможность проведения комплексных исследований возбужденных состояний всех стабильных ядер каждого изотопического ряда, даже самых тяжелых, недоступных к исследованию другими методами, обусловило открытие ряда интересных для теории ядра закономерностей в изменении свойств идентичных ядерных уровней в зависимости от числа нейтронов.

Так, например, обнаружена единая для всех четно-четных переходных ядер германия и селена закономерность изменения меры коллективности $(2^+ - 2^+)$ и $(4^+ - 2^+)$ E2-переходов в зависимости от числа нейтронов в ядре с выраженным максимумом фактора ускорения при $N = 40$; а для сферических ядер с $28 < N < 40$ (изотопические ряды Fe, Ni и Zn), в результате исследования квадрупольной фракции полной интенсивности диполь-квадрупольных $(2^+ - 2^+)$ гамма-переходов, установлена единая закономерность изменения коллективных свойств 2 состояний с ростом числа нейтронов с максимумом при $N = 34$, что свидетельствует о замкнутости 2P1/2 подоболочки для этих ядер.

Было бы несправедливо приписывать успехи в науке в 70 - 80-е годы (в частности в ИЯФ АН КазССР) только талантности и работоспособности исследователей. Роль государственной поддержки фундаментальных исследований в этот период - неоспорима. Государство обеспечивало работу реактора и циклотрона в нужных режимах, лаборатории были оснащены необходимой аппаратурой, все обогащенные изотопы Государственного фонда стабильных изотопов ИАЭ (Москва) были в нашем распоряжении.

Измерения гамма-спектров велись предельно интенсивно, т.е. круглосуточно в течение всех 10-ти Мвт-ных циклов работы ВВР-К. Позднее к 1988 году, когда реактор был остановлен на профилактические работы, мы практически закончили $(n, n' \gamma)$ -эксперименты на ядрах-мишенях с $A=46-82$, обработка же экспериментальных данных с целью анализа и систематики структуры сферических и переходных ядер продолжается.

В последние 2 - 3 года внимание сотрудников лаборатории сосредоточено на выяснении механизма $(n, n' \gamma)$ -реакции, по поводу которого в литературе имеются противоречивые сведения, особенно относительно деформированных ядер. С целью решения поставленной задачи были выполнены теоретические расчеты заселяемости уровней ядер в реакции $(n, n' \gamma)$ по оптико-статистической модели компаунд ядра (ОСМ) в рамках формализма Хаузера-Фешбаха-Молдауэра и проведено сравнение с нашими экспериментальными данными для ядер с $A=46-82$ с данными для деформированных ядер, полученными на пучках быстрых нейтронов ИРТ-реакторов другими авторами.

Из результатов исследования заселяемости уровней четно-четных ядер $^{46,48}\text{-Ti}$, $^{52}\text{-Cr}$, $^{54,58}\text{Fe}$, $^{60-64}\text{Ni}$, $^{64-70}\text{Zn}$, $^{70-76}\text{Ge}$, $^{78-82}\text{-Se}$ и $^{100}\text{-Mo}$ следует, что ОСМ-ХФМ без учета связи каналов реакции удовлетворительно описывает механизм $(n, n' \gamma)$ -реакции на сферических и переходных ядрах при использовании быстрых нейтронов реактора.

Существенно, что в этих экспериментах была обнаружена изотопическая зависимость заселения уровней четно-четных ядер Fe и Zn, которую можно объяснить поведением коэффициентов проникаемости нейтронов в зависимости от массового числа, предсказываемую ОСМ.

Сравнительные оценки заселяемости уровней ^{152}Sm , $^{156-158}\text{Gd}$ и ^{170}Er показали, что для деформированных ядер наблюдается систематическое отклонение значений $R_{\text{эксп}}$ от $R_{\text{с}}$, рассчитанных по ОСМ-ХФМ. Однако эти отклонения носят общий закономерный характер для уровней всех орбитальных моментов. Такое поведение сечения реакции можно ожидать, если предположить, что отклонения связаны главным образом с величиной квадратурного момента ядра в основном состоянии.

В перечисленных экспериментальных и теоретических работах, кроме упомянутых выше, активное участие принимали сотрудники ЛРИ: ис Адымов Ж.И., гл. инж. Лысыков Ю.А., ст. инж. Коспанов Н.К., мисс Каипов М.Д. и др. По материалам исследований защищены две докторские и 14 кандидатских диссертаций, а результаты обобщены более чем в 300 публикациях, в том числе 5-ти монографиях.

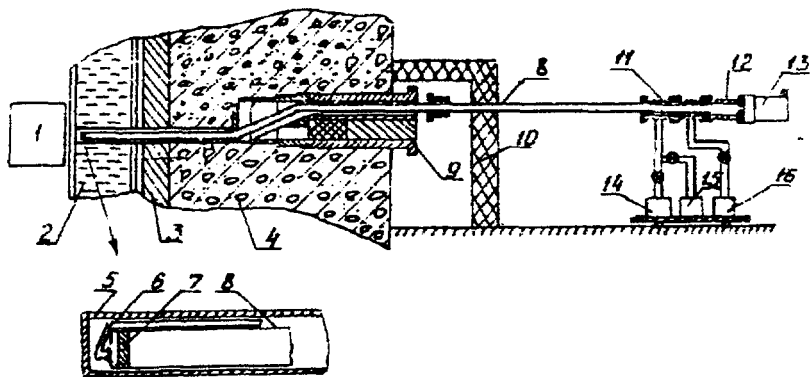


Рис. 1. Схема экспериментальной установки на радиальном канале № 1 реактора ВВР-К:

1-активная зона; 2,3,4 - соответственно водяная, чугунная и бетонная защита реактора; 5- горизонтальный радиальный канал; 6 - трубки водяного охлаждающего конвертора; 7- гидридиркониевый конвертор; 8- нейтронный щит; 9- защитная пробка; 10 - дополнительная защита; 11- алюминиевая фольга толщиной 60 мкм; 12- медная шторка; 13- детектор УХН; 14, 15, 16 - вакуумные магнитно-электроразрядный, цеолитовый и диффузионный насосы.

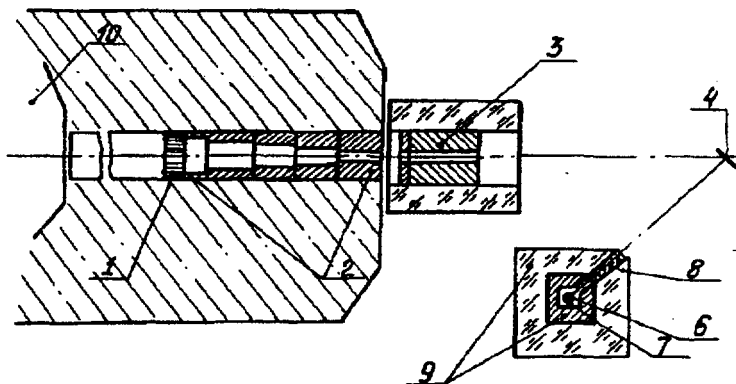


Рис.2. Схема экспериментальной установки на ВВР-К ИЯФ НЯЦ РК :

1-фильтр; 2- коллиматор; 3- парафиновый бак с коллиматорами; 4 - рассеиватель; 5 - ловушка; 6- Ge(Li) - NaI (Tl) детектор ; 7,9 - защита детектора; 8 - угол измерения; 10 - активная зона реактора.