

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

621.384.611(09)

**ЦИКЛОТРОН ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
им. А. Ф. ИОФФЕ АН СССР
(К 40-летию со дня пуска)**

И. Х. Лемберг, В. О. Найденов, В. Я. Френкель

1. ИСТОРИЯ СООРУЖЕНИЯ. ПЕРВЫЕ РАБОТЫ

Вряд ли И. В. Курчатов и А. И. Алиханов, по чьей инициативе, поддержанной А. Ф. Иоффе, был построен циклотрон ФТИ, могли предвидеть конкретное содержание и даже направление работ, выполненных на нем. Но они не сомневались в необходимости такого нового по замыслу, целям и возможностям прибора, связывали с ним большие надежды и всемерно способствовали вводу его в строй. И в самом деле, вот уже 40 лет, как циклотрон ФТИ функционирует, не старея и находя себе совершенно новые области применения. Поэтому нам представляется уместным рассказать об этом циклотроне, вопрос о сооружении которого был поставлен около полувека тому назад, а строительство начато еще до Великой Отечественной войны. К лету 1941 г. соответствующие работы вышли, если можно так выразиться, на финишную прямую, но были прерваны войной.

Работы по достройке и запуску циклотрона возобновились еще до ее окончания и завершились в 1946 г., так что 1986 г. является дважды юбилейным для циклотрона ФТИ, единственного в стране, имеющего столь долгий и непрерывный стаж работы (рис. 1). Ниже будет прослежена история проектирования, сооружения и запуска циклотрона и изложены основные научные и прикладные результаты, полученные на нем в процессе исследований — от сравнительно давних до самых последних.

В обзоре по истории ускорителей ¹ его автор справедливо замечает, что идею об искусственно ускоренных заряженных частицах (в отличие от естественно ускоренных, «генерируемых» радиоактивными элементами), несмотря на ее простоту и очевидность, не следует считать само собой разумеющейся, а забвение автора идеи полагает неоправданным. С этой точки зрения укажем, что в отчете о задачах и деятельности Государственного рентгенологического и радиологического института (из которого в 1921 г. выделились в качестве самостоятельных научных учреждений Физико-технический и Радиевый институты) Л. В. Мысовский писал: «Государственный рентгенологический институт, занимающийся излучением от внутренних электронных колец, естественно, обратил внимание и на самое ядро. Академиком А. Ф. Иоффе было высказано предположение, что недалеко то время, когда центральным вопросом физики будут явления, происходящие в ядре атома,— явления радиоактивности, причем тогда же (в 1918 г.) он указал на вероятность близкого получения явлений радиоактивности искусственным путем» ² (с. 11). В печати эта идея впервые была опубликована в статье Л. В. Мысовского и В. Н. Рукавишникова, увидевшей свет в 1923 г. ³.

Интересно отметить (см., например, ¹ (с. 339)), что, начиная с 1924 г., Дж. Чэдвик в течение ряда лет безрезультатно уговаривал Резерфорда работать с искусственно ускоренными частицами.

В 20-е годы в ФТИ проблемами ускорения частиц занимались Л. С. Термен ⁴ и А. А. Чернышев ⁵; в конце десятилетия эти работы, как и исследования по технике высоких напряжений (А. К. Вальтер, К. Д. Синельников), переместились в Харьков, куда во вновь организованный институт, возглавленный И. В. Обреимовым, переехала большая группа физтеховцев из Ленинграда (см., например, ^{6,7}).

Новый и сильнейший импульс для исследований по ускорителям дал 1932 г., год чудес в ядерной физике (*Annus mirabilis*). В нашей стране эти

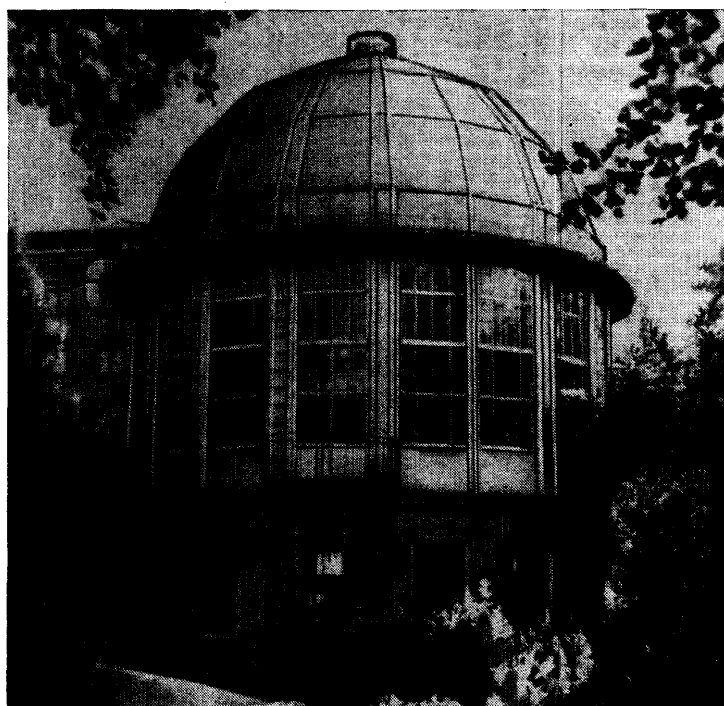


Рис. 1. Здание циклотрона ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР

исследования начали параллельно развиваться в физическом отделе Радиового института (РИ) — этим отделом заведовал еще с 1922 г. Л. В. Мысовский — и в «особой группе по ядру», позднее — отделе ядерной физики в ФТИ (зав. отделом с 1933 г. — И. В. Курчатов). 1932 г. замечателен еще и тем, что в этом году в США начал работать первый большой циклотрон Лоуренса (диаметр полюсов электромагнита 114 см, магнитное поле 15 кЭ), на котором ионы H_2^+ были ускорены до энергии 3,6 МэВ.

Уже в 1933 г. ближайший сотрудник И. В. Курчатова — М. А. Еремеев рассчитал, сконструировал и запустил небольшой макет циклотрона — бэби-циклотрон, как его называли в ФТИ, который оказался первым циклическим ускорителем на европейском континенте. Бэби-циклотрон представлял собой прибор высотой 1,7 м с диаметром полюсов электромагнита 28 см; вес электромагнита составлял около 2 т ⁸. В 1934 г. он был еще и единственным действующим за пределами лаборатории Лоуренса (Калифорнийский университет) циклическим ускорителем. Ток пучка протонов в нем с энергией 500 кэВ был порядка 10^{-10} А.

Бэби-циклотрон оказался, однако, только не очень долго действовавшей моделью — с его помощью не было проведено каких-либо физических:

экспериментов. Это объясняется несколькими причинами и прежде всего тем, что в 1934 г. в лаборатории Курчатова начал работать линейный ускоритель (по типу ускорителя, использованного в известной работе Кокрофта и Уолтона), дававший протоны примерно такой же энергии, что и бэби-циклотрон, но более компактный и, видимо, устойчивый в работе. Именно на нем И. В. Курчатовым и его сотрудниками по ФТИ были выполнены первые исследования ядерных реакций. Кроме того, в годовом отчете ФТИ за 1934 г. указано, что средства на усовершенствование циклотрона решили не выделять в связи с проведением работ РИ по сооружению гораздо большей установки с проектной выходной энергией дейтронов ~ 10 МэВ.

Однако значение бэби-циклотрона нельзя преуменьшать: работа на нем оказалась для физтеховцев той школой, которая помогла им в дальнейшем и налаживать циклотрон РИ, и конструировать и рассчитывать циклотрон ЛФТИ.

История сооружения циклотрона РИ детально изложена в работах⁹ и связана прежде всего с инициативой Л. В. Мысовского*), проявленной им еще в 1932 г. Непосредственно монтаж и наладка циклотрона РИ заняли около двух лет: 1935 и 1936 гг.⁹ (ч. 1, с. 20). Исключительно большую роль в этих работах играли (помимо Мысовского) Д. Г. Алхазов и В. Н. Рукавишников. Из материалов личного дела Мысовского, хранящихся в РИ, следует, что, приступая к работе по проектированию и строительству циклотрона, он обратился с письмом к Лоуренсу и получил от него подробную информацию о тех экспериментальных приемах, которые использовались при изготовлении камер циклотронов. Осенью 1934 г. Лоуренс написал Мысовскому, что на Сольвеевском конгрессе в Брюсселе виделся с А. Ф. Иоффе, узнал о прогрессе со строительством циклотрона в СССР и даже видел фотографию его магнита. Лоуренс приглашал Мысовского в Беркли для ознакомления с проводившимися в его лаборатории работами по циклическим ускорителям. Интересно отметить, что, как вспоминает довоенный сотрудник ЛФТИ проф. С. Я. Никитин, уже после начала Великой Отечественной войны, в эвакуации в Казани он обнаружил схемы вакуумной камеры одного из циклотронов Лоуренса. Видимо, это были как раз чертежи, полученные Мысовским. В свое время они помогли ускорить работу по проектированию камеры циклотрона в ЛФТИ (этой работой занимался Л. М. Неменов). С. Я. Никитин найденные чертежи передал главному инженеру циклотрона ЛФТИ А. Ф. Жигулеву, к тому времени перешедшему на работу в Москву, к И. В. Курчатову.

Уже в это время ядерщиками ФТИ вынашивались планы строительства своего большого циклотрона. Первое официальное упоминание о необходимости соответствующих работ мы находим в материалах Ученого совета ФТИ, где в протоколе заседания, состоявшегося 26 сентября 1936 г., читаем: «Слушали: Заявление ядерной группы о необходимости установки Лоуренса. Постановили: Включить в план работ Института на 1937 г. постройку установки Лоуренса на 10 000 000 В и обеспечить работу средствами и фондами»¹⁰. С 1 января 1937 г. А. И. Алиханов и И. В. Курчатов становятся консультантами физического отдела РИ, причем в августе 1937 г. именно И. В. Курчатов возглавил циклотронную лабораторию этого Института — одну из четырех, на которые был разделен физический отдел его. Оказывая содействие своим коллегам по РИ, физтеховцы очень многое от них получали: накапливали опыт, который был им необходим для дальнейшей работы по проектированию и строительству ускорителя ФТИ, пользовались циклотроном РИ (начав-

*) Имя Мысовского уже упоминалось в этой статье. Профессор Л. В. Мысовский (1888—1939) — выдающийся физик, с которым связан не только пуск первого циклического ускорителя в нашей стране (если не говорить о физтеховском бэби-циклотроне), но и важные исследования по космическим лучам, толстослойным пластинкам, γ -дефектоскопии. Представляется удивительным, что до сих пор не написана подробная биография этого большого ученого.

шим нормальную работу с июля 1937 г.) для проведения экспериментальных исследований по ядерным реакциям и нейтронной физике.

И. В. Курчатов с присущей ему энергией и опираясь на опыт организационной работы в РИ, сразу связался с ленинградскими заводами, которые выполняли заказы для циклотрона РИ («Электросила», «Красный Выборжец», «Светлана» и др.). Помимо этого, он вошел в тесный контакт с сотрудниками различных кафедр Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина и договорился с ними о проведении расчетов электромагнита для циклотрона ФТИ, а также исследовании вопросов, связанных с обеспечением однородного магнитного поля в зазоре электромагнита и расчетом траекторий ускоряемых частиц — с учетом релятивистской поправки к их массе и корректировки формы поля, обеспечивающей в этих условиях синхронизацию. Программа соответствующих работ была сформулирована еще в апреле 1936 г., т. е. до приведенного выше решения Ученого совета, которое в какой-то мере подытоживало уже проделанную предварительную работу *).

Важным этапом работ было официальное письмо А. Ф. Иоффе, несомненно, подготовленное сотрудниками отдела ядерной физики, к Наркому Г. К. Орджоникидзе (январь 1937 г.) — с обоснованием необходимости строительства циклотрона ФТИ² (с. 14—17). В письме кратко излагалась ситуация, складывающаяся в мире с исследованиями по физике ядра и с техническими средствами, призванными обеспечить прогресс этих исследований. Интересна таблица, приведенная в письме, о функционировавших ко времени его написания (или только еще строящихся) циклотронах. Мы приведем эту таблицу, добавив в нее последний столбец.

Страна	Число построенных циклотронов	Число строящихся циклотронов	Количество радия в лабораториях, г	Годы пуска циклотронов
США	3	5	5	—
Англия	—	1	5	1939
Франция	—	1	7	1938
Дания	—	1	2	1938

После обоснования важности намечаемых работ в письме говорится о конкретных мероприятиях, которые обеспечат их успешное проведение. Они включали выделение значительных по тем временам денежных средств (650 тыс. рублей), включение в работу ленинградских заводов и промышленных предприятий других городов и т. д.

О том, что просьбы физтеховцев были признаны обоснованными, можно судить по тому, что, в развитие их, 4 октября 1937 г. последовала новая мотивированная заявка — уже в Научно-исследовательский сектор по изобретательству Народного Комиссариата тяжелой промышленности с подробным перечнем проводимых работ, указанием их исполнителей и фондов, необходимых для их реализации.

Работы шли широким фронтом: к концу 1937 г. к ним присоединились строители, а в июне 1939 г. было принято правительственное постановление (Экономсовет при СНК) о выделении средств на строительство циклотрона⁸ (с. 92). Основными научными сотрудниками ФТИ, занимавшимися циклотроном, были, помимо И. В. Курчатова и А. И. Алиханова, Л. М. Неменов, П. Я. Глазунов и Я. Л. Хургин. Хургин был очень талантливым физиком, теоретиком (он погиб во время войны), и ему принадлежали важные резуль-

*) О большом объеме работ, выполненных по заказу ЛФТИ сотрудниками инженерно-физического и электро-механического факультетов Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина, подробно рассказано в⁸ (с. 90).

таты, относящиеся к расчетам фокусировки и динамики движения частиц в циклотроне.

К организационным вопросам строительства циклотрона примыкала и важная проблема фондов. Тут старые физтеховцы припоминают, что необходимое для циклотрона количество цветных металлов было получено в обмен на сданный цветной металлолом. Откуда же он брался? Оказывается, он был закуплен в комиссионных магазинах Вторцветмета на личные средства А. И. Алиханова, Л. А. Арцимовича и И. В. Курчатова! Большую помощь в получении других материалов оказал необычайно энергичный заведующий отделом снабжения довоенного ЛФТИ — М. Л. Готсбан.



Рис. 2. Слева направо: А. Ф. Иоффе, А. И. Алиханов, И. В. Курчатов. Ленинград, 1938 г.

Торжественная закладка здания циклотрона состоялась 22 сентября 1939 г. К этому времени был уже вырыт котлован под его здание. Первый кирпич в его основание был положен А. Ф. Иоффе, следующий — И. В. Курчатовым. Оба они выступили на митинге, состоявшемся тут же, на строительной площадке. Для придания всей процедуре еще большей торжественности в фундамент был замурован небольшой контейнер (трубка) с пластинкой из нержавеющей стали, на которой выгравировали следующий текст:

«Во исполнение постановления Экономсовета при Совете Народных Комиссаров Союза ССР от 7 июня 1939 г., Циклотрон Ленинградского физико-технического института Академии наук заложен 22 сентября 1939 г. по проекту профессора А. И. Алиханова и профессора И. В. Курчатова при директоре института академике А. Ф. Иоффе». И на обороте: «Проект здания выполнен Отделом капитального строительства Института. Начальник ОКСа Лапковский Я. И., гл. инж. Жигулев А. Ф., инж.-электрик Глазунов П. Я., архитектор Гликман Я. Д., научный сотрудник Неменов Л. М., инж.-конструктор Ожегов Б. И. ...» *) (рис. 2).

Надо признаться, что об этом послании в будущее довольно быстро забыли. Однако удивительным образом этот текст оказался все же известен.

*) Этот текст позволил позднее найти в архивах соответствующее постановление Экономсовета.

В 50-х годах в ФТИ проводилось строительство нового корпуса. С этой целью часть фундамента здания циклотрона была разрушена и вывезена из Института. А позднее, уже в ноябре 1964 г., площадку, куда был свезен строительный мусор, начали готовить под строительство новых жилых массивов. Разравнивая ее, бульдозерист увидел, как под ударом ножа его машины из кирпичной кладки выпала железная трубка. Открыв ее, он обнаружил табличку и вложенные в контейнер «за компанию» десяток мелких монет. Все это было передано в ФТИ и ныне хранится в циклотронной лаборатории.

С осени 1940 г. И. В. Курчатов, уйдя из РИ, где он к тому времени уже заведовал физическим отделом, целиком сосредоточил свои силы на работе по циклотрону ФТИ. К этому времени она была сравнительно близка к завершению. Весной 1941 г. здание под циклотрон было практически закончено, был готов и ВЧ генератор (изготовленный в ЛПИ) мощностью 20 кВт, и электромагнит (з-д «Электросила»), сделанный из специального железа типа «Армко» (з-д «Большевик» *), и мотор-генератор для питания электромагнита мощностью 100 кВт, извлеченный из утиля и восстановленный усилиями И. В. Курчатова. 1 июня 1941 г. успешно прошла испытания вакуумная камера циклотрона. Проводился монтаж всего его оборудования.

20 июня 1941 г. на циклотрон пришел корреспондент ЦО «Правда» (есть основания полагать, что это был известный журналист Б. Агапов). 22 июня его корреспонденция появилась в газете: «Ленинград, 21 июня (корр. «Правды»). В Лесном, на территории Физико-технического института Академии наук СССР, недавно построено двухэтажное здание, похожее на планетарий. Продолговатый корпус здания увенчан куполом. Это — первая в Советском Союзе мощная циклотронная лаборатория для расщепления атомного ядра **).

Сейчас в новом здании устанавливаются электрические агрегаты, монтируется оборудование. В машинном зале уже стоит генератор мощностью 120 кВт. Через люк в потолке на бетонный фундамент спускаются детали второго генератора. В соседнем помещении смонтирован огромный распределительный щит.

Внушительное впечатление производит круглый зал, построенный из железа и стекла. Он покоится на восьми массивных стальных колоннах. В ближайшее время здесь будет установлен 75-тонный электромагнит высотой около четырех метров. Диаметр его полюсов 1200 мм.

Под куполом зала две мощные подкрановые балки. Скоро на них лягут рельсы и придут в движение крановые тележки грузоподъемностью в 25 т. В глубокой нише смонтирован коротковолновой высокочастотный генератор³ (с. 28—29).

В беседе с корреспондентом Л. М. Неменов сообщил, что все оборудование циклотрона уже готово, кроме электромагнита.

Пуск циклотрона намечался на самое начало 1942 г. Война круто оборвала циклотронные работы. И. В. Курчатов со своими сотрудниками присоединился к исследованиям по размагничиванию кораблей, которые велись в ФТИ под руководством А. П. Александрова. При эвакуации ФТИ в Казань вакуумная латунная камера, а также дефицитные листы меди и латуни были надежно упрятаны; все работы по циклотрону были прекращены.

Как хорошо известно, с конца 1942 г. началась организационная деятельность по проблеме урана, возглавленная И. В. Курчатовым. В январе 1943 г. была прорвана блокада Ленинграда; 6 февраля начала функционировать проложенная за 18 дней 33-километровая линия железной дороги, связавшая

*) Здесь следует отметить огромную помощь, оказанную ЛФТИ во всех этих работах со стороны руководства завода «Электросила» (главный инженер завода — Д. В. Ефремов) и завода «Большевик» (на этом заводе, в частности, его гл. инженер, Л. Р. Гонар, предложили использовать для изготовления электромагнита железо типа «Армко»). Заметим, что директором з-да «Большевик» был в те годы Д. Ф. Устинов.

**) Здесь допущена неточность — «забыт» циклотрон РИ (Авт.).

Ленинград с Большой Землей. В марте 1943 г. Курчатов поставил задачу сооружения циклотрона лаб. № 2, имея в виду прежде всего получить с его помощью для исследовательских целей плутоний¹¹. Для ускорения работ с циклотроном было решено использовать детали физтеховского циклотрона. В Ленинград были срочно командированы Л. М. Неменов и П. Я. Глазунов, которым удалось двумя вагонами железной дорогой отправить в Москву к началу мая 1943 г. ВЧ генератор и выпрямитель для циклотрона (смонтированные в трех больших шкафах), латунные и медные листы, пирексовые изоляторы для дуантов и некоторое другое оборудование (в частности, вакуумные насосы). Электромагнит был обнаружен — в целости и сохранности — на «Электросиле» (расположенной в то время всего в 3 км от линии фронта!), но перевозить его в Москву не представлялось возможным. Нет сомнения в том, что эти важные узлы и детали циклотрона ФТИ сыграли большую роль в ударном запуске первого московского циклотрона, который уже в конце 1944 г. дал пучок дейтонов с энергией 4,2 МэВ.

Что касается здания циклотрона ФТИ, то в годы войны оно использовалось и для производственных целей, и в качестве казармы для военных.

С ходатайством о необходимости восстановления циклотрона ФТИ вошли в Правительство И. В. Курчатов и А. И. Алиханов. Соответствующее решение было принято в январе 1945 г. Большую роль в его запуске сыграл переход в ФТИ (из РИ) Д. Г. Алхазова, который в сентябре 1945 г. был назначен заведующим циклотронной лабораторией. В работах по восстановлению циклотрона деятельное участие приняли А. П. Гринберг, В. П. Дзелиев, Н. В. Федоренко и др. Задачи, стоявшие перед коллективом физтеховцев, сводились к установке электромагнита (который всю войну пролежал на «Электросиле») и его испытаниям (осуществлено в мае 1945 г.), изготовлению и наладке ВЧ генератора (зима 1945—1946 гг.), изготовлению камеры циклотрона и проверке ее вакуумных свойств (весна 1946 г.), сооружению пульта управления и, наконец, согласованию работы всех узлов и пуску циклотрона.

Сразу после окончания войны, в июне 1945 г., Академия наук СССР праздновала свой юбилей. На торжественно проводившуюся юбилейную сессию были приглашены многочисленные гости из-за рубежа. В конце июня все участники сессии, включая и иностранцев, приехали из Москвы в Ленинград. Физикам, посетившим 27 июня ФТИ, А. И. Алиханов продемонстрировал достраивавшееся здание циклотрона и саму монтируемую на нем установку. Среди гостей ФТИ были, среди прочих, супруги Жолио-Кюри, П. Оже, Фр. Перрен, М. Борн и многие другие.

Через год, 18 июля 1946 г., на циклотроне был получен физический пучок дейтонов, а еще спустя месяц, 21 августа, — рабочий пучок. К ноябрю его интенсивность составляла 250 мкА при энергии ускоренных дейтонов 6 МэВ.

Циклотрон ФТИ заработал!

Первые исследования, выполненные на циклотроне, были связаны с нейтронным облучением ряда веществ, предпринятым для получения радиоактивных изотопов. Особое значение имели работы по облучению урана и получению плутония. Здесь следует указать, что микропорция плутония (содержавшая $\sim 10^{12}$ его атомов) была получена Б. В. Курчатовым в октябре 1944 г. при бомбардировке урана нейтронами от обычного радий-бериллиевого источника. В последующих опытах Б. В. Курчатова источником нейтронов стал циклотрон лаб. № 2¹¹. С его помощью было получено несколько сотых долей микрограмма Pu (а с пуском физического реактора лаб. № 2 плутония оказалось так «много», что И. В. Курчатов смог увидеть соответствующий «кусочек» плутония весом 10 мкг в микроскоп¹² (с. 37—38)). Располагая этими порциями плутония, Б. В. Курчатов сумел разработать лабораторную технологию его выделения. На очереди стояла важнейшая задача разработки заводской технологии извлечения Pu, поставленная перед В. Г. Хлопиным и коллективом его сотрудников (см. ^{13a} (с. 11)). В процессе

ее решения большую роль сыграл физтеховский циклотрон. Он обеспечивал нейтронный пучок примерно в 30 раз большей интенсивности, чем циклотрон лаб. № 2, с которым работал Б. В. Курчатов. Время облучения урановой мишени в 1946—1947 гг. составляло, по воспоминаниям Д. Г. Алхазова (записанным А. П. Гринбергом), около 2000 часов. Тем самым до начала работ промышленных реакторов в распоряжении В. Г. Хлопина оказались порции плутония *), позволившие сделать существенные шаги в разработке промышленной технологии Pu (см. ¹⁴ (с. 554) и ¹⁵).

Другой цикл работ ФТИ был связан с определением сечений поглощения нейтронов в различных веществах — этим работам особое значение придавал И. В. Курчатов. Велись они физтеховцами в содружестве с московскими сотрудниками И. В. Курчатова — М. И. Певзнером и М. К. Романовским. Большую роль в успешном осуществлении этого комплекса работ (длвшегося с перерывами с лета 1949 г. до самого начала 1953 г.) сыграл селектор нейтронов — сначала двухканальный (Д. С. Андреев, И. Л. Альперт, лето 1949 г.), а потом и десятиканальный (Д. С. Андреев, Л. Н. Гальперин, 1951 г.) **).

Существенным достижением циклотронной лаборатории ФТИ было использование циклотрона для работы этого ускорителя в фазотронном режиме. Теоретические расчеты, относящиеся к этому режиму (Д. Г. Алхазов, Д. М. Каминкер), были выполнены уже к концу 1946 г. Циклотрон ФТИ начал работать в фазотронном режиме в апреле 1947 г. и был первым в СССР ускорителем этого типа. В 1948 г. максимальная энергия дейтронов в фазотроне составляла 22 МэВ, а протонов — 24 МэВ при токах пучка порядка 0,1—0,2 мкА (Д. М. Каминкер, И. Л. Альперт).

2. ИССЛЕДОВАНИЕ КУЛОНОВСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ УРОВНЕЙ

В 1954 г. в результате успешного освоения источника многозарядных ионов на циклотроне ФТИ был получен выведенный пучок ускоренных ионов $^{14}\text{N}^{3+}$ с $E = 15$ МэВ и интенсивностью в месте мишени $\sim 10^{-7}$ А. Это обеспечило возможность начала большого цикла работ по исследованию кулоновского возбуждения (КВ) ядерных уровней — процесса возбуждения ядер в результате их взаимодействия с электромагнитным полем налетающей частицы. Исследования КВ, так же как и последующие исследования структуры высокоспиновых и высоковозбужденных состояний ядра, проводились под научным руководством одного из авторов статьи — И. Х. Лемберга. На возможность использования тяжелых ионов для исследования КВ впервые внимание сотрудников циклотронной лаборатории обратил Г. Н. Флёров.

Теория КВ в первом приближении квантовомеханической теории возмущения на основе классического рассмотрения траектории налетающей частицы была разработана в ФТИ К. А. Тер-Мартirosяном¹⁷. Две особенности отличают КВ от других ядерных реакций. Первая заключается в том, что хорошо известный характер электромагнитных сил позволил получить количественное выражение для сечения возбуждения. Оно оказалось пропорциональным приведенной вероятности электрического перехода $B(E_L)$ из основного в возбужденное состояние, и это позволило использовать результаты измерения сечений для получения сведений о значениях $B(E_L)$. Последние очень чувствительны к виду волновых функций и потому важны для суждения о применимости различных теоретических моделей структуры ядра. Вторая особенность реакций КВ состоит в присущей им селективности. Сечения КВ резко падают с увеличением энергии возбуждения уровня (ΔE). Сечения возбуждения магнитных переходов очень малы и на опыте не на-

*) Плутоний был «наработан» и на восстановленном циклотроне РИ (см. ¹³⁶).

**) См. также ¹⁶ (см. 45).

блюдались, а из электрических возбуждаются главным образом квадрупольные переходы (с $L = 2$). Сечение октупольных переходов (с $L = 3$) существенно меньше. Так как коллективные состояния ядра характеризуются сравнительно малыми ΔE и большими значениями $B(E_L)$, то очевидны возможности КВ для выявления и детального исследования нижних коллективных состояний ядра.

Предварительные оценки¹⁸ продемонстрировали основные преимущества использования ускоренных многозарядных тяжелых ионов (ТИ) для исследования КВ — увеличение сечения возбуждения и существенное уменьшение интенсивности фонового характеристического рентгеновского излучения. Уже в первых опытах¹⁹ с помощью ТИ были возбуждены уровни ряда элементов. Это были первые исследования КВ с помощью ТИ, и при этом впервые для этой цели использовались частицы, ускоренные в циклотроне. Главным результатом этих опытов явилось то, что на ряде примеров было показано, что конкурирующий вклад ядерных реакций при использовании ТИ значительно слабее, чем при использовании более легких частиц.

Постановка и развитие работ по исследованию КВ потребовали решения ряда методических и технических вопросов.

На циклотроне ФТИ, первоначально предназначенном для ускорения легких ионов и рассчитанном на получение частиц с фиксированной энергией, в результате ряда усовершенствований и нововведений в период с 1955 по 1965 гг. были получены выведенные пучки ионов ${}^4\text{He}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{21}\text{Ne}$, ${}^{22}\text{Ne}$ и ${}^{40}\text{Ar}$ с энергией от 4,5 до 66 МэВ и интенсивностью от $5 \cdot 10^{-11}$ до $5 \cdot 10^{-7}$ А, в зависимости от сорта иона и его энергии.

Был изготовлен и в дальнейшем постоянно совершенствовался осцилляторный спектрометр на базе NaI(Tl). В 1955 г. силами лаборатории был изготовлен многоканальный анализатор амплитуды импульсов. С целью фокусировки пучка выведенных ионов в этом же году были изготовлены квадрупольные линзы — первые в СССР²⁰.

Была разработана методика определения приведенных вероятностей переходов, основанная на измерении абсолютных выходов γ -квантов, испускаемых в реакции КВ, а также методика точного определения эффективности регистрации кристаллом NaI(Tl) γ -квантов различной энергии.

Конкуренция процессов, идущих с образованием составного ядра, особенно велика в случае легких ядер. Поэтому до начала работ с использованием ТИ КВ уровней ядер с $A \leq 45$ наблюдали лишь в двух случаях.

В ФТИ было изучено КВ еще 12 легких ядер, в том числе уровней таких легких ядер, как ${}^7\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$. Использование ТИ позволило впервые наблюдать КВ ядерных уровней бомбардирующих частиц. Так было изучено КВ состояний $2_1^+ {}^{18}\text{O}$, ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{40}\text{Ar}$ и состояния $(5/2)_1^+ {}^{21}\text{Ne}$.

Исследования КВ ${}^{25}\text{Mg}$ ²¹ и ${}^{27}\text{Al}$ ²² дали важное подтверждение предположению²³ о новой области ядер со статической деформацией в районе с $A \approx 25$. Оказалось, что вероятности $B(E2)$ для переходов из основных состояний на уровнях 1,61 МэВ ${}^{25}\text{Mg}$ и 2,21 МэВ ${}^{27}\text{Al}$ существенно больше значений $B(E2)$ для переходов на нижерасположенные состояния этих ядер. Если уровни 1,61 и 2,21 МэВ являются ротационными состояниями деформированного ядра, то, исходя из значений $B(E2)$, можно определить величину внутреннего квадрупольного момента Q_0 . Определенные таким образом для ${}^{25}\text{Mg}$ и ${}^{27}\text{Al}$ значения Q_0 находятся в согласии со значениями Q_0 , полученными независимым образом из измерений сверхтонкой структуры оптических спектров. Наконец, значения Q_0 , определенные из наших данных для $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ в случае ${}^{20}\text{Ne}$, ${}^{22}\text{Ne}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{26}\text{Mg}$ и ${}^{28}\text{Si}$ в предположении их ротационной природы, также хорошо согласовались с теоретическими оценками, полученными в предположении о статической деформации этих ядер.

Важным вкладом циклотронной лаборатории ФТИ (ЦЛ ФТИ) в понимание структуры нижних возбужденных состояний ядер явилось система-

тическое исследование КВ первых возбужденных состояний сферических четно-четных ядер. Работы по исследованию КВ с помощью протонов и α -частиц значительно расширили сведения о значениях $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ и связанных с ними временах жизни (τ) 2_1^+ -состояний. Использование ТИ позволило распространить исследования на самые сложные случаи, такие, как исследование КВ высокоэнергетических уровней ядер, замкнутых по одной оболочке. В некоторых случаях, например, при наличии интенсивного фонового излучения, испускаемого в реакциях тяжелых ионов с примесями легких элементов, КВ изучали, регистрируя совпадения ТИ, рассеянных назад, т. е. в заднюю полусферу под углами, близкими к 180° , и γ -квантов, испускаемых в результате КВ. Всего значения $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ определены более чем для 60 изотопов; для 15 из них эти измерения выполнены с помощью исследования совпадений типа γ -ТИ. В ряде случаев впервые определены и значения энергий 2_1^+ -состояний.

Выяснилось, что опытные значения $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ в случае сферических ядер на 1—2 порядка превышают одночастичные оценки. Это указывает на коллективную природу уровней. С другой стороны, оказалось, что значения $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ и энергии уровней $\Delta E_{2_1^+}$ сильно зависят от степени заполнения оболочек.

С. Т. Беляевым в работе ²⁴ на основе микроскопического подхода к рассмотрению коллективных возбуждений сферических четно-четных ядер с учетом спаривания и с помощью преобразования Боголюбова получены выражения для $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ и $\Delta E_{2_1^+}$. Детальные расчеты в рамках этого подхода, выполненные сотрудниками ФТИ ²⁵, показали, что теория хорошо описывает опытные значения $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ и их ход с изменением числа нейтронов. В работе ²⁶ наряду с взаимодействием типа частица — дырка учитывалось также взаимодействие частица — частица. Это позволило существенно улучшить и описание значений $\Delta E_{2_1^+}$.

Сечения возбуждения более высокорасположенных уровней четно-четных ядер на несколько порядков меньше, чем уровней 2_1^+ . Поэтому исследование вторых уровней сферических ядер — 0_2^+ , 2_2^+ и 4_1^+ (иногда называемых триплетными) проводилось с помощью измерения гамма-совпадений ²⁷ и совпадений γ -квантов и тяжелых ионов ²⁸. Использование ТИ позволило осуществить процесс каскадного двукратного возбуждения уровней, идущий во втором порядке теории возмущения, в результате которого в ряде случаев были возбуждены уровни четно-четных ядер с характеристиками 4_1^+ . Эти уровни не удавалось раньше возбудить с помощью протонов или α -частиц.

В этих работах получены сведения о значениях $B(E2)_{2_2^+ \rightarrow 0_1^+}$, $B(E2)_{2_2^+ \rightarrow 2_1^+}$ и $B(M1)_{2_2^+ \rightarrow 2_1^+}$ для изотопов Ge, Se, Mo, Pd и Te, а также о значениях $B(E2)_{4_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ для изотопов Pd и Pt. В работе ²⁹ изучено двойное кулоновское возбуждение уровня 0_2^+ ^{70}Ge . Значение $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ превышает $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$; между тем состояние 0_2^+ расположено в непосредственной близости от 2_1^+ -состояния ^{70}Ge и вряд ли может рассматриваться как двухфононное.

Главным следствием из сопоставления новых сведений о вторых уровнях изученных четно-четных ядер с выводами теории явилось то, что сильно отличающиеся по исходным предположениям модели, а именно модель неаксиального ротатора Давыдова — Филиппова и модель Беляева — Зелевинского, учитывающая ангармонизм квадрупольных колебаний, примерно одинаково описывают вероятности переходов со вторых уровней и между ними.

К этому циклу работ примыкает и исследование ³⁰ КВ вибрационных состояний 2_1^+ в деформированных ядрах ^{182}W , ^{184}W и ^{186}W , в котором впервые определены значения $B(E2)_{0_1^+ \rightarrow 2_1^+}$ для переходов на γ -вибрационные состояния в деформированных ядрах.

Условия для наблюдения многократного возбуждения уровней особенно благоприятны в деформированных ядрах. В работе³¹ при помощи исследований совпадений γ -квантов с рассеянными назад ионами азота было изучено возбуждение состояний ^{154}Sm и ^{160}Gd со значениями спинов до 6^+ включительно.

Интересны результаты исследования КВ октупольных электрических переходов на уровни 3^- в четно-четных изотопах олова. Значения $B(E3)$ оказались примерно в 30 раз больше одночастичных оценок. Этот результат указывает на коллективный характер октупольных переходов в изотопах олова. В то же время он отвергает чрезмерно завышенные оценки усиления этих переходов, опубликованные в первой работе³², в которой изучали возбуждение $E3$ -переходов.

Систематически изучалось КВ ядер с нечетным A ^{33,34}. Изучено возбуждение около 150 уровней в 60 ядрах с нечетным A . Обнаружено много неизвестных ранее уровней, и это позволило уточнить схемы распада этих ядер. Была достигнута высокая чувствительность измерений; в частности, были измерены значения $B(E2)$, на два порядка меньшие, чем по одночастичной оценке. Во многих случаях исследования ядер с нечетным A включали изучение угловых распределений γ -квантов, корреляций направления γ -квантов и рассеянных тяжелых ионов, а также корреляции направления и поляризации γ -квантов. В этих исследованиях^{35,36} получена важная дополнительная спектроскопическая информация о спинах состояний, амплитуде и знаке величины δ , характеризующей отношение амплитуд интенсивностей переходов с различной мультипольностью. Данные о δ^2 совместно со сведениями о $B(E2)$ позволяют использовать КВ для получения систематики значений приведенных вероятностей магнитных дипольных переходов, хотя непосредственно возбуждение $M1$ -переходов на опыте не наблюдается. Особенно стимулировало исследование КВ ядер с нечетным A появление в лаборатории Ge(Li) -детекторов γ -излучения, отличающихся высоким энергетическим разрешением. Существенно обогатила систематику значений $B(M1)$ серия работ^{37,38}, в которых наряду со значениями $B(E2)$, а следовательно, и $\tau(E2)$, получаемыми в работах по исследованию КВ уровней, в этих же опытах определяли полное время жизни (τ) возбужденного состояния и, используя соотношение $1/\tau = (1/\tau(E2)) + (1/\tau(M1))$, находили $\tau(M1)$, а затем и $B(M1)$. Значение τ в этих опытах определяли, используя эффект ослабления доплеровского смещения энергии γ -лучей при торможении ядра отдачи в веществе (подробнее о нем будет сказано в следующем разделе) на основе анализа формы доплеровски смещенной γ -линии, зарегистрированной Ge(Li) -детектором. Результаты исследований ядер с нечетным A детально сопоставлялись с выводами различных модификаций моделей связи нечетной частицы и возбужденных состояний остова. На примере ряда ядер было показано, что эта модель может претендовать лишь на качественное объяснение структуры нижних возбужденных состояний нечетных ядер. Лучшее согласие имело место при сравнении данных эксперимента в случае ядер с тремя нуклонами или дырками сверх одной замкнутой оболочки или подоболочки (^{89}Ga , ^{71}Ge , ^{127}I)³⁹ с выводами модели Пара — Алаги, учитывающими наряду со связью трех валентных частиц или дырок с коллективными возбуждениями остова взаимодействие этих частиц между собой.

Исследования КВ, выполненные на циклотроне ФТИ, внесли важный вклад в понимание природы нижних возбужденных состояний ядер. За цикл работ по исследованию кулоновского возбуждения ядер, опубликованных в 1956—1966 гг., Государственной премией СССР 1968 г. в области науки и техники награждены Д. Г. Алхазов, И. Х. Лемберг, Д. С. Андреев, К. И. Ерохина, К. А. Тер-Мартirosян, Ю. П. Гангский.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСПИНОВЫХ И ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДРА

Исследования КВ оказались очень полезны для идентификации нижних коллективных состояний ядер и выяснения их особенностей. Однако все многообразие свойств коллективных состояний, проявляющееся в очень индивидуальной структуре состояний переходных ядер и их взаимодействии с квазичастичными возбуждениями, может быть понято лишь на основе изучения полос высокоспиновых и высоковозбужденных состояний. В этом отношении большой интерес представляла ранее практически не изученная область ядер с $A \leq 100$.

Между тем именно отмеченная ранее селективность процесса КВ, осуществляемого в условиях справедливости первого порядка теории возмущения, не позволяла использовать этот процесс для изучения высокоспиновых и высоковозбужденных состояний. Правда, для этой цели может быть использовано многократное КВ, но практическое использование этого процесса требует специальных ускорителей, на которых можно ускорять ионы с массой 50 и более а. е. до энергий 10 МэВ и более на нуклон. Поэтому новым научным направлением ЦЛ ФТИ, продолжающим ее деятельность в области изучения структуры возбужденных состояний ядра, явились исследования реакций с α -частицами и тяжелыми ионами, идущими через стадию составного ядра.

ТИ вносят в образующееся составное ядро большие угловой момент и энергию возбуждения. Это приводит к преимущественному заселению высоковозбужденных и высокоспиновых состояний, ранее не реализовавшихся ни в реакциях с протонами, ни при изучении α -распада. Большой момент, вносимый в ядро, оказывается в значительной мере выстроенным, поэтому γ -излучение анизотропно, и исследование его углового распределения (УР) позволяет извлечь сведения о спинах уровней и мультипольности электромагнитных переходов. Наконец, важной особенностью реакций с тяжелыми ионами является большой импульс, приобретаемый конечными ядрами-продуктами реакции (до 1,6% от скорости света в реакциях с ТИ и до 0,5% — с α -частицами, ускоренными на циклотроне ФТИ), что позволяет применить для измерения τ методы, использующие доплеровский эффект смещения энергии γ -лучей в зависимости от скорости ядра.

Новое направление исследований инициировало ряд важных методических разработок, во многом представляющих и самостоятельный интерес.

В совместной работе с сотрудниками НИИЭФА⁴⁰ на основе формирования радиального спада магнитного поля, коррекции его низких гармоник до уровня 1Э, модернизации «центральной оптики» циклотрона для получения центрированного пучка и фокусировки выведенного пучка магнитным каналом была существенно (в 10—30 раз) повышена, интенсивность выведенных пучков ТИ, а энергетическая неоднородность пучка уменьшена в 2—5 раз. В результате коренной реконструкции генератора высокочастотного напряжения⁴¹, выполненной силами лаборатории, был расширен диапазон его частот, и это позволило повысить максимальную энергию ускоряемых α -частиц с 17 до 28 МэВ. Тем самым наряду с реакциями с ТИ была обеспечена возможность изучения реакций (α , 2n) для ядер с $A < 100$, а в некоторых случаях и реакций (α , 3n).

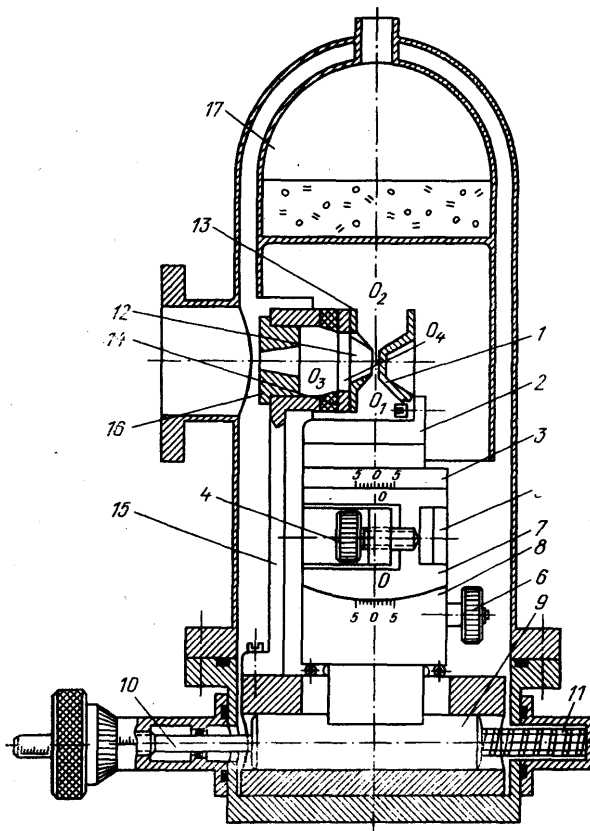
Много внимания было уделено освоению и дальнейшему развитию нового и весьма плодотворного метода измерения времен жизни возбужденных состояний ядра с помощью доплеровских эффектов.

Существуют два основных вида измерения τ на основе эффекта Доплера. Для измерения значений τ в области 10^{-12} — 10^{-9} с используют метод, основанный на применении специального прибора — плунжерной камеры. Здесь в качестве меры времени служит время, необходимое для пролета в вакууме зазора D между мишенью и плунжером.

На рис. 3 представлено схематическое изображение нового варианта плунжерной камеры, сконструированной и изготовленной в ЦЛ ФТИ⁴². Параллельность тонкой мишени и поверхности плунжера обеспечивается гониометром. Точность юстировки углов составляет $4''$. Зазор D с помощью микрометрического винта устанавливается с точностью 1 мкм. Два других экземпляра этого прибора, изготовленные в ФТИ, успешно используются в ЦИЯИ АН ГДР и в ИЯФ АН УССР. Энергия γ -лучей, зарегистрированных Ge(Li)-детектором, зависит от того, испущен ли γ -квант во время движения

Рис. 3. Схематическое устройство плунжерной камеры, изготовленной в ФТИ.

1 — плунжер; 2 — изолятор; 3 — верхний столик гониометра; 4 — регулировочный винт гониометра (ось O_1O_2); 5 — рычаг поворота; 6 — регулировочный винт гониометра (ось O_3O_4); 7 — нижний столик гониометра; 8 — основание гониометра; 9 — платформа горизонтального хода; 10 — микрометрический винт; 11 — пружина обратного хода; 12 — мишень; 13 — держатель мишени; 14, 15 — изоляторы; 16 — коллиматор; 17 — азотная ловушка



ядра со скоростью v или после торможения ядра в плунжере. Таким образом, каждому переходу в спектре γ -лучей соответствуют две линии — смещенная по энергии и несмещенная. Определение отношения их интенсивностей, как функции D , позволяет при сравнении с расчетной зависимостью определить значение τ . На рис. 4 показаны опытные и теоретические зависимости интенсивностей несмещенных и смещенных линий от D для $^{78}\text{Kг}$.

Для измерений τ в диапазоне 10^{-14} — 10^{-12} с применяется метод ослабления доплеровского сдвига энергии (ОДС) γ -лучей из-за торможения ядер в веществе. Мерой времени при этом является характеристическое время торможения ядер в веществе, которое можно вычислить, используя теоретическое выражение для тормозных потерь Линхарда — Шарфе — Шютта (ЛШШ).

Важным вкладом в повышение точности методов ОДС явился разработанный в лаборатории оригинальный метод определения значений поправочных коэффициентов, улучшающих согласие уравнения ЛШШ с опытом^{43,44}. Метод основан на измерении эффекта ОДС для случая полутонкой мишени и γ -излучения, испускаемого из состояния с достаточно коротким временем жизни. Обычно величину τ определяют, измеряя коэффициент ослабления (F)

доплеровского сдвига энергии γ -лучей, т. е. отношение наблюдаемого сдвига к максимально возможному, и сравнивая его с теоретически рассчитанной зависимостью $F(\tau)$. Недостатками этого способа являются невозможность выявления систематических ошибок и невозможность определения τ , если доплеровские линии частично перекрываются между собой.

Значительным шагом вперед явилась методика определения τ на основе расчета формы доплеровски уширенной γ -линии. Соответствующие программы⁴⁵ включают точный расчет кинематического разброса конеч-

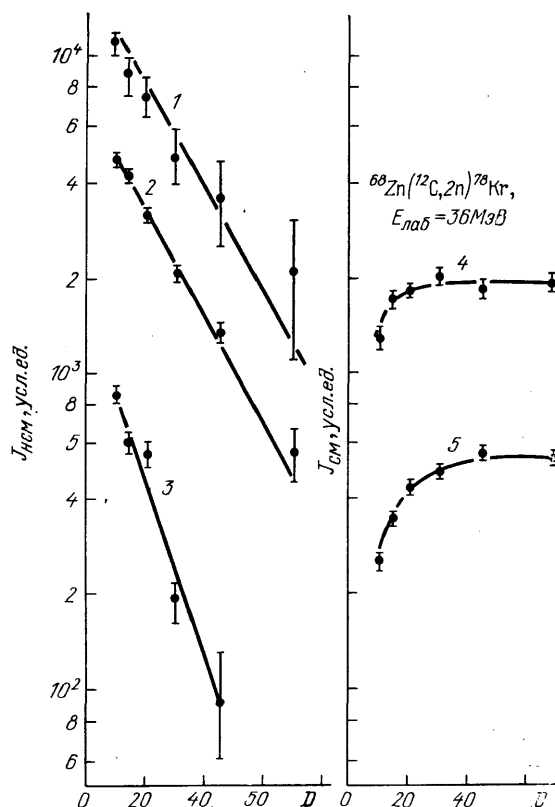


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические зависимости интенсивностей некоторых смещенных и несмещенных γ -линий в ^{78}Kr от расстояния D между мишенью и плунжером (в микронах).

1 — 3219,3 кэВ ($E_\gamma = 920,5$ кэВ), $\tau = 7,4$ пс; 2 — 1564,0 кэВ ($E_\gamma = 1109,5$ кэВ), $\tau = 7,3$ пс; 3 — 1147,3 кэВ ($E_\gamma = 1147,3$ кэВ), $\tau = 4,5$ пс; 4 — 3917,7 кэВ ($E_\gamma = 698,4$ кэВ), $\tau = 1,2$ пс; 5 — 3287,6 кэВ ($E_\gamma = 538,7$ кэВ), $\tau = 2,8$ пс

обработки с их помощью двух перекрывающихся линий, одна из которых (или обе одновременно) искажена эффектом Доплера. На рис. 5 представлен пример⁴⁶ определения τ по форме пика для случая перекрывающихся линий. Подробнее опыт лаборатории в освоении и развитии доплеровских методов измерения времен жизни возбужденных состояний ядер освещен в обзорах^{47,48}.

Для понимания структуры возбужденных состояний ядра важно знание схемы их распада, энергий уровней, их квантовых характеристик, относительной интенсивности переходов, значений δ . Эти сведения важны с точки зрения сопоставления их с выводами теоретических подходов. Они нужны и для интерпретации результатов измерений τ и УР γ -лучей.

ных ядер, выполненный на основе статистической теории ядерных реакций. Учитываются торможение в мишени, подложке (или веществе плунжера), каскадная подпитка с вышерасположенных дискретных состояний, боковая подпитка, связанная с заселением исследуемых состояний каскадным квазинепрерывным γ -излучением, а также конечные размеры детектора γ -лучей. Характерной особенностью расчетов является широкое использование метода Монте-Карло, обеспечивающего возможность проведения конкретных расчетов с учетом большого числа факторов (разные углы детектирования γ -лучей, разброс толщины мишени и т. д.). Важной чертой этих расчетов является применение оригинальной процедуры моделирования точной функции распределения конечных ядер по углам рассеяния в результате их многократного рассеяния, существенно экономящей время расчетов. Это дало возможность использовать для измерения спектры γ -лучей, зарегистрированных при $\theta = 90^\circ$, с помощью Ge(Li)-детектора с высоким разрешением (1,9 кэВ при $E_\gamma = 1,33$ МэВ).

Важной особенностью расчетов является возможность

С целью установления схемы распада введен в строй работающий в линию с циклотроном и лабораторной ЭВМ измерительный комплекс, предназначенный для регистрации и последующего анализа многомерных совпадений γ -квантов, испускаемых при разрядке возбужденных состояний конечных ядер — продуктов реакции⁴⁹. С помощью этого комплекса установлены схемы распада ядер ^{76}Se , ^{78}Se , ^{78}Kr , ^{84}Kr и ^{85}Kr .

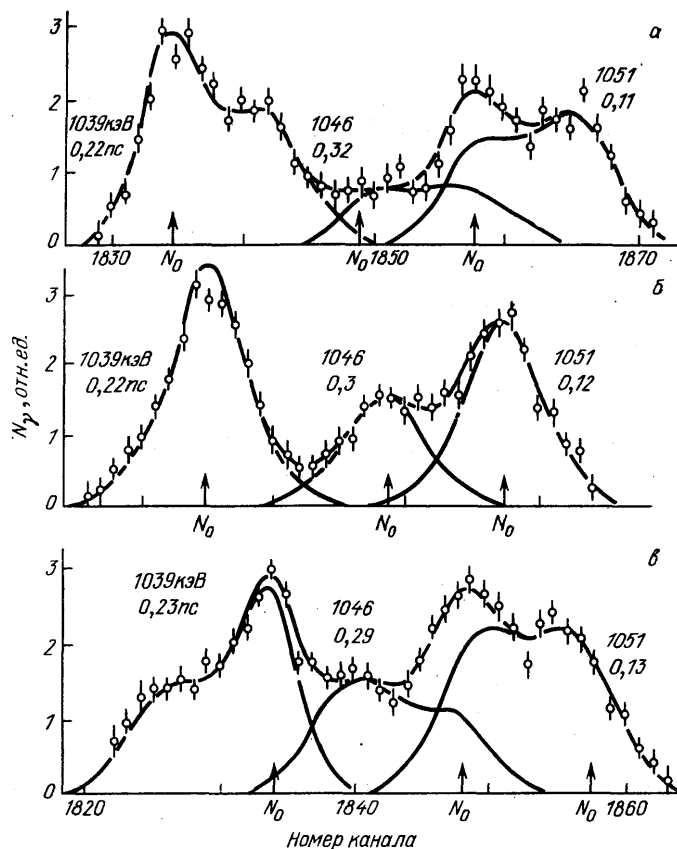


Рис. 5. Пример обработки сложной группы из трех доплеровских γ -линий, две из которых (1039 и 1051 кэВ) принадлежат ^{78}Kr . Реакция $^{68}\text{Ge}(\alpha, 2n)^{78}\text{Kr}$. Показана однозначность определения τ при использовании различных углов наблюдения θ . а — 25° . б — 90° . в — 150° .

Известно, что измерения УР γ -лучей не позволяют однозначно установить спин уровня и значение δ для исследуемого периода. Кроме того, измерения УР не дают четности состояния. Совместные исследования УР и функций возбуждения, т. е. зависимости выхода γ -квантов от энергии бомбардирующих частиц, позволили снять неоднозначность при установлении значений спинов.

В ряде случаев сопоставление опытных значений τ , измеренных в лаборатории, с данными систематики парциальных времен жизни электромагнитных переходов позволило сделать определенные выводы о четности состояний и устранить присущую измерениям УР неоднозначность значений δ .

С точки зрения установления квантовых характеристик состояний и мультипольностей переходов оказался очень полезен сконструированный и изготовленный совместно с сотрудниками Института металлов Уральского научного центра АН СССР компактный малогабаритный спектрометр конверсионных электронов с магнитным фильтром типа «минипельсин», размещаемый в непосредственной близости от мишени⁵⁰. С его помощью, в частности

установлена отрицательная четность полосы ^{84}Kr , базирующейся на состоянии с энергией 2700 кэВ.

В ходе опытов по исследованию реакций с тяжелыми ионами и α -частицами получены новые данные об энергиях, временах жизни, квантовых характеристиках большого количества высокоспиновых и высоковозбужденных состояний ядер и мультипольностях переходов между ними. Была существенно расширена систематика значений $B(E2)$ и $B(M1)$. Особенно следует отметить масштабность измерений t , характеризующую тем фактом, что для большинства уровней наряду с энергией определены и их времена жизни. Систематически изучена структура высокоспиновых и высоковозбужденных состояний нечетных ядер $^{67}\text{Zn}^{51}$, $^{69}\text{Ge}^{52}$, $^{69}\text{As}^{51}$, $^{83}\text{As}^{53}$, $^{83}\text{Kr}^{54}$ и $^{83}\text{Rb}^{55}$, нечетно-нечетных ядер $^{54}\text{Mn}^{56}$, ^{76}Br и четно-четных ядер $^{60}\text{Ni}^{57}$, $^{64}\text{Zn}^{57}$, $^{66}\text{Zn}^{58}$, $^{68}\text{Ge}^{58}$, $^{70}\text{Ge}^{59}$, $^{72}\text{Se}^{60}$, $^{74}\text{Se}^{60}$, $^{76}\text{Se}^{61}$, $^{78}\text{Se}^{61}$, $^{78}\text{Kr}^{62}$, $^{80}\text{Kr}^{63}$ и $^{84}\text{Kr}^{54}$. Некоторые из перечисленных ядер изучены в совместной работе с ЦИЯИ АН ГДР.

Каковы же физические следствия полученных результатов? Во всех изученных четно-четных ядрах обнаружено по несколько полос состояний положительной и отрицательной четности со спинами до 14 и энергией возбуждения до 5–6 МэВ. В ряде случаев полосы носят ярко выраженный квазиротационный характер. Понимание природы этих полос встретило известные трудности.

Микроскопические расчеты структуры возбужденных состояний ядра сталкиваются с проблемами, присущими задаче многих тел, и не могут претендовать на детальное описание свойств ядер. Поэтому большая роль в настоящее время отводится феноменологическим моделям, в частности и потому еще, что для их обоснования привлекаются представления микроскопической теории: таким образом, феноменологический подход отнюдь не сводится к отысканию подгоночных выражений. Наиболее развита феноменологическая модель Бора — Моттельсона, но ее математический аппарат достаточно сложен и систематические расчеты структуры возбужденных состояний ядер в рамках этой модели не проводились.

За последние годы определенный прогресс в понимании коллективных состояний достигнут в рамках модели взаимодействующих бозонов (МВБ), впервые сформулированной в ^{64, 65}. Эту модель с коллективной моделью Бора — Моттельсона объединяет предположение о том, что формирование низколежащих состояний четно-четных ядер в основном определяется низкочастотной квадрупольной модой. Появление квадрупольных квантов возбуждения описывается в МВБ с помощью бозонных гамильтонианов, которые помимо слагаемого, соответствующего энергии свободных бозонов, содержат ряд членов, выражающих взаимодействие между ними. Микроскопическим прообразом бозонов МВБ являются парные фермионные операторы. Именно учет взаимодействия бозонов обеспечил успех модели, позволяя, варьируя параметры, описывать различные характерные ситуации в ядре, которые ранее рассматривались независимо, и на этой основе единым образом объяснить эволюцию свойств ядер с изменением числа протонов или нейтронов.

В совместной работе сотрудников ЦЛ ФТИ и ЛГУ им. А. А. Жданова были разработаны алгоритм и программа вычислений структуры возбужденных состояний ядра в рамках МВБ, и в настоящее время ими выполнены расчеты структуры коллективных состояний изотопов ряда четно-четных ядер (изотопов Zn, Ge, Se, Kr, Sr) ^{66, 67}. В этих расчетах применяется вариант МВБ, в котором не делается различий между нейтронными и протонными бозонами. Гамильтониан содержит шесть параметров, которые находят, используя процедуру оптимизации. Для вычисления значений $B(E2)$ в расчетах используют дополнительный параметр e^* , именуемый эффективным зарядом.

На рис. 6 экспериментальные значения энергий возбужденных состояний изотопов Kr сравниваются с расчетными ⁶⁶, полученными в рамках МВБ.

Наибольшие расхождения имеют место для 3_1^- и 5_1^+ -состояний. Расхождения для состояний в области возбуждений 3–4 МэВ связаны с взаимодей-

ствием коллективных и двухквазичастичных состояний. В целом модель хорошо описывает энергии коллективных состояний изотопов Kr. Такая же ситуация имеет место и для изотопов Zn, Ge и Se. В частности, МВБ воспроизводит энергию аномально низко расположенных состояний 0_2^+ , Kr и Se. Наряду с энергиями уровней МВБ хорошо воспроизводит и экспериментальные значения $B(E2)$.

Таким образом, важным итогом проделанной работы явилось то, что новые сведения о коллективных высокоспиновых состояниях ядер с $A < 100$,

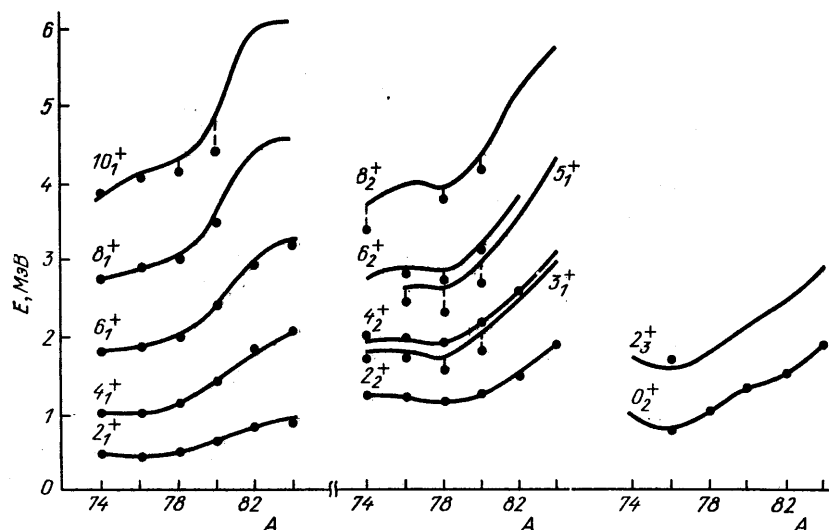


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и рассчитанных в рамках МВБ энергий возбужденных состояний изотопов Kr

их энергиях, вероятностях переходов внутри полос и между ними и их эволюции с изменением числа нуклонов получили в первом приближении свое объяснение на основе недавно развитой феноменологической теории модели взаимодействующих бозонов.

В настоящее время выяснилось, что выводы МВБ и коллективной модели Бора — Моттельсона во многом совпадают, и ряд работ посвящен обоснованию перехода от одной к другой. Однако сравнительная простота расчетов в МВБ позволило проделать их для многих ядер в широкой области A и впервые продемонстрировать возможности феноменологического подхода для описания коллективных состояний сферических и переходных ядер.

В то же время расчеты в рамках МВБ позволили обнаружить ряд примеров расхождения с результатами эксперимента, часть из которых связана с исходными ограничениями модели. Вопрос о трудностях модели изложен в ^{68,69}. В работе ⁶⁸ обсуждаются пути, позволяющие учесть некоторые из ограничений МВБ, и излагается содержание соответствующих работ, выполненных в ФТИ.

Отличный от МВБ подход для описания ангармонизма квадрупольного коллективного движения в ядрах развивается в последние годы в работах ^{69,70,71}. Без сомнения, большая информация о структуре возбужденных состояний с $A < 100$, полученная в ФТИ, окажется полезной для сопоставления обоих подходов.

Новые результаты получены и относительно квазичастичных возбуждений и их взаимодействия с коллективными состояниями. В рамках оболочечной модели принудительного вращения для ряда четных ядер (изотопов Se и Kr) была изучена зависимость выстроенного момента от частоты вращения. Анализ этой зависимости позволил обнаружить характерный эффект

обратного загиба, ранее обнаруженный в ядрах с $A > 100$, выявить полосы состояний, построенных на двухквазичастичных возбуждениях (так называемых «суперполос»), определить место пересечения этих полос, несмещенные энергии состояний с одинаковым спином при выключенном взаимодействии и смещение энергий в результате взаимодействия. Анализ позволяет также извлечь сведения об амплитудах смешанных состояний и величине выстроенного момента суперполосы. В работе⁶³ сопоставление рассмотренной зависимости для ^{80}Kr с аналогичными зависимостями в соседних ядрах с нечетным A позволило идентифицировать суперполосу в ^{80}Kr , как базирующуюся на двухквазипротонном состоянии.

В работе⁶² обнаружен новый эффект усиления M1-переходов между состояниями $10^+ \text{ } ^{78}\text{Kr}$ с одинаковым спином. Аналогичный эффект наблюдается и при исследовании ^{76}Se ⁶¹. Это явление объясняется сильным смешиванием взаимодействующих состояний, в результате чего растет роль диагональных матричных элементов.

Новым эффектом является также обнаружение аномально сильного M1-перехода в полосе высокоспиновых состояний отрицательной четности ^{83}Kr , базирующейся на трехквазичастичных возбуждениях типа «нечетная частица + двухквазичастичное возбуждение 3^- четно-четного остова»⁵³. В аналогичном ядре ^{86}Rb , отличающемся лишь типом нечетной частицы, значения B (M1) резко (на два порядка) растут с I . Оба эффекта оказалось возможным качественно объяснить в рамках схемы связи угловых моментов, предложенной в⁷². Это следует рассматривать как прямое доказательство существования трехквазичастичных состояний в рассмотренных ядрах. Особенно сильно проявляются квазичастичные возбуждения в ядрах, близких к замкнутым по одной оболочке. В ряде случаев здесь обнаружены новые изомерные состояния. В совместной работе⁷³ на основе комплексного исследования времен жизни состояний, углового распределения γ -лучей, их поляризации, определения магнитных моментов и установления схемы распада ^{84}Kr удалось обнаружить и идентифицировать четырехквазичастичное состояние $\nu (g_{9/2})^2_8 + \pi (p_{3/2}f_{5/2})_4 +$ (состояние 12^+ с $E = 5373$ кэВ) — первое четырехквазичастичное состояние в рассматриваемой области ядер.

4. ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Продолжая традиции ФТИ, ЦЛ развивала прикладные направления исследований, широко используя методы ядерной физики в других областях науки и техники.

В ряде случаев разработки ФТИ были пионерскими. Так, исследования КВ стимулировали в свое время овладение техникой сцинтилляционной γ -спектрометрии. Это в свою очередь позволило выполнить первую в СССР работу⁷⁴, значительно расширяющую возможности активационного анализа, в которой детектировались γ -кванты, а не β -частицы. Были определены очень малые концентрации примесей ($10^{-6}\%$) различных элементов в кремнии. Был предложен новый метод определения¹⁸ Q основанный на регистрации γ -лучей 350 кэВ, испускаемых в реакции $^{18}\text{O}(\alpha, n)^{21}\text{Ne}$ ⁷⁵. Этот метод оказался очень чувствительным и успешно использовался для индикации кислорода в таких задачах, как исследование механизма включения кислорода в биологические структуры при действии света⁷⁶, выяснение вопроса об участии ксантофиллов в переносе кислорода⁷⁷, исследование механизма синтеза витамина B_1 ⁷⁸ и других.

Большой набор ускоряемых ионов, возможность в десятки раз изменить их энергию, наличие системы сканирования пучка и опыт, накопленный при проведении фундаментальных исследований, позволили создать целый спектр методик для решения конкретных прикладных задач. Наибольшее развитие получили облучение высокоэнергичными ионами и ядерно-аналитические методы исследования поверхностных слоев твердых тел⁷⁹.

Получение в начале 70-х годов ионов аргона с энергией ~ 1 МэВ/н позволило провести серию работ по отработке технологии получения ядерных фильтров, исследования их характеристик и методов измерения диаметров пор с учетом формы микроканалов⁸⁰.

Плодотворным оказалось сотрудничество ЦЛ с полупроводниковыми лабораториями ФТИ. Бурное развитие физики и техники полупроводников потребовало новых подходов к технологическим операциям. Одной из первых работ по глубокой имплантации ионов на циклотроне ФТИ была работа по созданию охранного полуизолирующего слоя путем облучения протонами структуры GaP⁸¹. В результате подбора оптимальных условий облучения удалось получить в этих структурах напряжение пробоя, близкое к теоретическому для данной концентрации нескомпенсированных ионизованных доноров. Практически это означало увеличение пробойного напряжения вдвое.

Большая серия работ была выполнена совместно с лабораторией контактных явлений в полупроводниках. Путем глубокой имплантации ионов кислорода получены гетеролазеры непрерывного действия в системе InGaAsP⁸², полосковые гетеролазеры на основе двойных гетероструктур в системе InGaAsP — InP⁸³, в системе AlAs — GaAs⁸⁴.

Остановимся на некоторых ядерно-аналитических методах, развитых в ЦЛ ФТИ.

Разработана методика определения содержания водорода по дейтерию с использованием реакции ^2D (^3He , p) α . Из последних работ в этом направлении следует упомянуть определение содержания водорода в аморфном оксиде тантала⁸⁵. Знание поведения водорода здесь важно с точки зрения технологических процессов и использования этого материала в электролитических конденсаторах.

Большой цикл работ, использующих эту ядерную реакцию, выполнен с целью определения адсорбционной способности поверхности аморфных и поликристаллических пленок оксидов переходных металлов (ОПМ). Интерес к этой деятельности во многом обусловлен способностью целого ряда ОПМ радикально изменять свои физические характеристики (оптические, электрические, структурные и т. п.) при инжекции в эти соединения водорода. В данном случае изучен процесс фотоинжекции водорода в результате его отщепления от молекул органических соединений, адсорбированных на поверхности оксида⁸⁶.

Возбуждение протонами и тяжелыми ионами характеристического рентгеновского излучения элементов облучаемой мишени используется в циклотронной лаборатории ФТИ для количественного анализа. Излучение регистрируется полупроводниковым детектором с высоким энергетическим разрешением (~ 250 эВ в области 14,4 кэВ). Нормировка выходов характеристического излучения осуществляется либо по заряду, перенесенному ионами, либо по интенсивности реперного характеристического излучения. В частности, этот метод был использован для определения потерь рутения при изготовлении оксиднорутениево-титановых анодов и для определения их сроков службы⁸⁷, для изучения влияния элементного состава поликристаллического селенида цинка на его оптические свойства и в ряде других работ.

Метод обратного резерфордского рассеяния (ОРР) заряженных частиц сейчас приобретает все большее распространение, так как позволяет не только устанавливать примеси различных элементов, но и измерять их распределение по глубине. В области масс в середине таблицы Д. И. Менделеева оказалось наиболее предпочтительным использование ионов углерода и азота. Для регистрации рассеянных ионов в лаборатории применяется кольцевой поверхностно-барьерный детектор. Средний угол регистрации $\sim 170^\circ$ относительно направления исходного пучка. Предусмотрена смена образцов без нарушения вакуума. С помощью метода ОРР в ЦЛ ФТИ проводятся систематические исследования свинцовосиликатных стекол, фотохромных стекол, оптических волноводов и других элементов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Коллективу лаборатории сразу после пуска циклотрона пришлось решать научные задачи, имеющие важное оборонное значение, и успешное их решение само по себе оправдало все затраты и усилия, связанные со строительством циклотрона, и подтвердило прозорливость его зачинателей.

Шли годы. Количество, масштабы и число различных видов ускорителей росли с необычайной быстротой. Многие из ровесников циклотрона ФТИ уже закрыты или капитально реконструированы. В СССР построен ряд новых ускорителей, в том числе и очень мощных.

В этом плане примечателен тот факт, что на одном из старейших циклотронов продолжают проводиться в настоящее время актуальные исследования, в ходе которых получен ряд интересных физических результатов и выводов.

Что обеспечило «долгожительство» циклотрона ФТИ? Это объясняется рядом обстоятельств. В методическом плане важную роль сыграла ставка на исследование ядерных реакций с помощью ускоренных ТИ. Преимущества и возможности, возникшие в результате их использования, а также полученные на этой основе результаты изложены в предыдущих разделах этой статьи. ЦЛ ФТИ была первой в мире, которая использовала ТИ в исследованиях КВ, и одной из первых, использовавших ТИ в исследованиях высокоспиновых и высоковозбужденных состояний ядер с $A < 100$.

В чисто научном плане сказались усилия, связанные с должным выбором направления исследований. Известно, что исследование излучения ядер, образующихся в ядерных реакциях, существенно расширяет возможности ядерно-спектроскопических исследований. Характерной чертой работ лаборатории явилось использование для целей спектроскопии ядра новых типов реакций — кулоновского возбуждения и реакций, приводящих к образованию высокоспиновых и высоковозбужденных состояний. Важной особенностью этих двух основных направлений, развиваемых ЦЛ, явилась возможность реализации высокоэффективных методов измерения приведенных вероятностей электромагнитных переходов (непосредственно или на основе измерения связанных с ними значений τ). Как уже отмечалось выше, расчетные значения вероятностей переходов сильно зависят от исходных теоретических предположений, и систематика данных о приведенных вероятностях исключительно важна для выработки представлений о структуре ядра.

Успеху работ в большой степени способствовали плодотворный контакт с теоретиками и их помощь при реализации конкретных вычислительных программ. Здесь хотелось бы прежде всего отметить связи лаборатории с Г. Алагой (Югославия), С. Т. Беляевым, Б. Л. Бирбрайром, Ф. Донау (ГДР), В. Г. Зелевинским, В. И. Исаковым, В. М. Михайловым, А. Д. Пилия, Л. А. Сливом, К. А. Тер-Мартirosяном и А. Г. Шуваевым.

Важную роль в длительном сохранении дееспособности циклотрона и его пригодности для решения возрастающих по трудности физических и прикладных задач сыграла и непрерывная его модернизация, выразившаяся в увеличении набора ускоряемых ТИ, расширении диапазона их энергий, увеличении на порядок и более интенсивности выведенных пучков, улучшении моноэнергетичности ускоренных ионов.

Наконец, в немалой степени право на существование и длительную жизнь циклотрона ФТИ было подтверждено значимостью прикладных исследований, выполненных с его помощью. Содержание этих исследований изложено в соответствующем разделе статьи. Здесь важно подчеркнуть два обстоятельства. Первое — это то, что в ряде случаев исследования с помощью циклотрона обеспечивали наиболее прямой и эффективный путь к достижению успешного результата. Второе заключается в том, что проведение прикладных исследований оказалось возможным благодаря использованию методических выводов, полученных в ходе проведения фундаментальных исследований.

Так, различного рода радиоактивационные методы, основанные на анализе мгновенного излучения рентгеновских и γ -лучей и примененные для определения чистоты материалов и исследования кинетики процессов в некоторых веществах, опирались на освоение сцинтилляционной техники и техники детектирования с помощью Ge(Li)-детекторов. Техника ступенчатого изменения и точного измерения энергии различных ионов, освоенная в физических исследованиях, получила широкое применение в работах по глубокой имплантации ионов, разработке технологии изготовления новых полупроводниковых приборов и в измерениях обратного рассеяния ионов для определения содержания примесей в некоторых материалах.

Немаловажную роль сыграло также постоянное и тесное сотрудничество ЦЛ с другими лабораториями ФТИ.

Наконец, следует отметить, что циклотрон, задуманный вначале как прибор для чисто ядерных исследований, оказался незаменимым при решении ряда вопросов в других и очень разных областях науки и техники, таких, как технология изготовления новых полупроводниковых приборов, биохимические и физиологические исследования, исследования чистоты оптических материалов и многих других.

И сегодня круг задач, ориентированных на использование циклотрона ФТИ, далеко не исчерпан. Продолжающаяся модернизация циклотрона, постоянное совершенствование техники детектирования радиоактивных излучений, введение в строй новых измерительных установок — все это создает хорошие перспективы использования циклотрона ФТИ для решения актуальных вопросов ядерной физики и обеспечения возможности ее приложения к другим областям науки и техники.

В заключение авторы выражают благодарность С. Я. Никитину за ценные замечания, которые авторы постарались учесть.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринберг А. П. // УФН. 1975. Т. 117. С. 333.
2. Вклад академика А. Ф. Иоффе в становление ядерной физики в СССР // Под ред. В. М. Тучкевича. — Л.: Наука, 1980.
3. Мысовский Л. В., Рукавишников В. Н. // Докл. Рос. Акад. наук. Сер. А. 1922. С. 53.
4. Френкель В. Я. // Вопр. истории естествозн. и техн. 1981. № 3. С. 170.
5. Гринберг А. П. // Физика: проблемы, история, люди. — Л.: Наука, 1986. — С. 173.
6. Цыгикало А. А., Ключарев А. П. // Очерки по истории развития ядерной физики в СССР. — Киев: Наукова думка, 1982. — С. 39.
7. Хижняк Н. А. // Ibidem. — С. 51.
8. Гринберг А. П., Френкель В. Я. Игорь Васильевич Курчатов в Физико-техническом институте. — Л.: Наука. 1984.
9. Алхазов Д. Г., Шилов В. П., Эйсмонт В. П. Первый в Европе. История создания и довоенных лет циклотрона Радиевского института: Препринт Радиевского института им. В. Г. Хлопина. Ч. 1 (РИ-157); ч. 2 (РИ-158). — Ленинград, 1982.
10. Архив ФТИ им. А. Ф. Иоффе. Ф. 3, оп. 1, ед. хр. 47: Материалы Ученого совета, л. 15/об.
11. Неменов Л. М. // АЭ. 1978. Т. 44. С. 17.
12. Меркин В. И. // Воспоминания об академике И. В. Курчатове. — М.: Наука, 1983. — С. 29.
13. а) Первухин М. Г. // Ibidem. — С. 6.
б) Лазарев Л. И., Комлев Л. В., Синицына Г. С., Ковальская М. П. // Радиохимия. 1982. Т. 24. С. 401.
14. Френкель В. Я. // УФН. 1968. Т. 96. С. 529.
15. Ядерная физика // Сост. Ю. И. Коптев. — Л.: Наука, 1968.
16. Головин И. Н., И. В. Курчатов. — М.: Атомиздат, 1978.
17. Тер-Мартirosян К. А. // ЖЭТФ. 1952. Т. 22. С. 284.
18. Гринберг А. П., Лемберг И. Х. // ЖЭТФ. 1956. Т. 30. С. 807.
19. Алхазов Д. Г., Андреев Д. С. и др. // Ibidem. С. 809.

20. Гринберг А. П., Лемберг И. Х. Отчет циклотронной лаборатории ЛФТИ АН СССР. — Л.: ЛФТИ, 1956. — С. 1.
21. Андреев Д. С., Васильев В. Д. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1961. Т. 25. С. 832.
22. Алхазов Д. Г., Ерохина К. И., Лемберг И. Х. // Ibidem. 1963. Т. 27. С. 211.
23. Gove H. E. // Proc. of Intern. Conference on Nuclear Structure. Kingston, Canada, 1960. — Amsterdam: North-Holland, 1960.
24. Beluaev S. T. // Kgl. Danske Vid. Selskab. Mat.-fys. Medd. 1959. V. 31. № 11.
25. Бирбраир Б. Л., Ерохина К. И., Лемберг И. Х. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1963. Т. 27. С. 150.
26. Birbrair B. L., Erochina K. I., Lemberg I. Kh. // Nucl. Phys. Ser. A. 1970. V. 145. P. 129.
27. Гангрский Ю. П., Лемберг И. Х. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1962. Т. 26. С. 1001.
28. Алхазов Д. Г., Андреев Д. С. и др. // Ibidem. 1963. Т. 27. С. 1285.
29. Гангрский Ю. П., Лемберг И. Х. // Ibidem. 1962. Т. 26. С. 212.
30. Алхазов Д. Г., Гринберг А. П. и др. // ЖЭТФ. 1958. Т. 35. С. 1325.
31. Афонин О. Ф., Гангрский Ю. П. и др. // Ibidem. 1962. Т. 43. С. 1604.
32. Hansen O., Nathan O. // Nucl. Phys. 1963. V. 42. P. 197.
33. Алхазов Д. Г., Ерохина К. И., Лемберг И. Х. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1963. Т. 27. С. 1363.
34. Алхазов Д. Г., Ерохина К. И., Лемберг И. Х. // Ibidem. 1964. Т. 28. С. 1667.
35. Алхазов Д. Г., Васильев В. Д. и др. // Ibidem. С. 1683.
36. Алхазов Д. Г., Гальперин Л. Н. и др. // Ibidem. 1965. Т. 29. С. 787.
37. Ерохина К. И., Жиргулявичюс Р. К. и др. // Ibidem. 1974. Т. 38. С. 1679.
38. Ерохина К. И., Жиргулявичюс Р. К. и др. // Лит. физ. сб. 1974. Т. 14. С. 591, 817.
39. Андреев Д. С., Гусинский Г. М. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1975. Т. 39. С. 2020.
40. Беляков В. А., Литунковский Р. Н. и др. // Труды 5-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. — М.: Наука. 1977. — Т. 1. С. 107.
41. Матюков А. В., Смирнов А. С. и др. Отчет циклотронной лаборатории. — Л.: ФТИ АН СССР, 1979.
42. Иванов М. А., Лемберг И. Х., Мишин А. С. // ПТЭ. 1974. № 3. С. 53.
43. Лемберг И. Х., Пастернак А. А. // Письма ЖЭТФ. 1974. Т. 19. С. 784.
44. Кудояров М. Ф., Лемберг И. Х., Пастернак А. А. // Программа и тезисы докладов 31-го совещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. — М.: Л.: Наука, 1981. — С. 410.
45. Пастернак А. А. // Ibidem. — С. 407, 408.
46. Андреев Д. С., Ерохина К. И. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1982. Т. 46. С. 30.
47. Лемберг И. Х., Пастернак А. А. // Современные методы ядерной спектроскопии. 1984. — Л.: Наука, 1985. — С. 3.
48. Гусинский Г. М., Мишин А. С. и др. // Ibidem. С. 64.
49. Грузинова Т. Н., Ерохина К. И. и др. // Прикладная ядерная спектроскопия. — М.: Атомиздат, 1977. — Вып. 7. С. 66.
50. Гринберг А. П., Зобов А. Е. и др. // Ibidem. — 1981. — Вып. 10. С. 3.
51. Кудояров М. Ф., Лемберг И. Х. и др. // ЯФ. 1978. Т. 27. С. 577.
52. Aleksandrov A. A., Kudoyarov M. E. et al. // Nucl. Phys. Ser. A. 1979. V. 321. P. 189.
53. Кудояров М. Ф., Лемберг И. Х. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1984. Т. 48. С. 1887.
54. Зобов А. Е., Изотов А. Л. и др. Схемы распада возбужденных состояний ядер $^{84}, ^{86}\text{Kr}$: Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР. № 967. — Ленинград, 1985.
55. Жовлиев У. Й., Киптиль В. Г. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. С. 2096.
56. Кудояров М. Ф., Лемберг И. Х., Пастернак А. А. // Ibidem. 1979. Т. 43. С. 2167.
57. Иванов М. А., Лемберг И. Х. и др. // Ibidem. 1975. Т. 39. С. 1695.
58. Гусинский Г. М., Иванов М. А. и др. // Ibidem. 1977. Т. 41. С. 66.
59. Ефимов А. Д., Ерохина К. И. и др. Времена жизни коллективных состояний ядра ^{70}Ge и модель взаимодействующих бозонов: Препринт ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР № 347. — Ленинград, 1983.
60. Киптиль В. Г., Лемберг И. Х. и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1979. Т. 43. С. 2276.
61. Зобов А. Е., Киптиль В. Г. и др. // Ibidem. 1984. Т. 48. С. 1878.
62. Winter G., Dubbers F. et al. // J. Phys. Ser. G. 1985. V. 11. P. 277.
63. Funke L., Döring I. // Nucl. Phys. Ser. A. 1981. V. 355. P. 228.
64. Janssen D., Donau F., et al. // Ibidem. 1971. V. 172. P. 145.

65. Janssen D., Jolos R. V., Donau F. // *Ibidem*. P. 145.
66. Ерохина К. И., Ефимов А. Д. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1984. Т. 48. С. 328.
67. Дойников Д. Н., Ерохина К. И. и др. // *Лекция X Всесоюзной школы по ядерной физике. Хумсан, 1983. — Ташкент: ФАН, 1985. — Ч. 2. С. 130.*
68. Джолос Р. В., Лемберг И. Х., Михайлов В. М. // *Физ. ЭЧАЯ*. 1985. Т. 16. С. 280.
69. Зелевинский В. Г. «Старая» и «новая» феноменологии квадрупольного коллективного движения в ядрах: Препринт ИЯФ СО АН СССР № 56. — Новосибирск, 1983.
70. Vогов О. К., Zelevinsky V. G. // *Nucl. Phys. Ser. A*. 1985. V. 439. P. 207.
71. Vогов О. К., Zelevinsky V. G. *Boson Models of Low-Lying Vibrations in Spherical Nuclei: Preprint INP of Sibir Branch of Acad. Sci. USSR No 120. — Novosibirsk, 1985.*
72. Donau F., Frauenthorf G. // *Proc. of Intern. Summer School. Polona Brasna. — Romania, 1982.*
73. Rotter H., Döring J. et al. // *Phys. Lett. Ser. B*. 1985. V. 163. P. 323.
74. Ерохина К. И., Лемберг И. Х. и др. // *Завод. лаб.* 1960. № 7. С. 821.
75. Лемберг И. Х., Гиршин А. Б., Гусинский Г. М. // *Ibidem*. 1966. № 12. С. 1499.
76. Гусинский Г. М., Лемберг И. Х. и др. // *ДАН СССР*. 1979. Т. 249. С. 1002.
77. Сааков В. С., Лемберг И. Х. // *Ibidem*. 1970. Т. 193. С. 713.
78. Фирсов Л. М., Хохлачева М. И., Гусинский Г. М. // *Биохимия*. 1976. Т. 41. С. 1176.
79. Гусинский Г. М., Найденов В. О. // *Труды международного совещания по циклотронам и их применению. Бехине, ЧССР, 1985. — Дубна: ОИЯИ, Р9-85-707, 1985. — С. 331.*
80. Гагарин Ю. Ф., Гусинский Г. М. и др. // *ПТЭ*. 1976. № 6. С. 213.
81. Гольдберг Ю. А., Гусинский Г. М. и др. // *ФТП*. 1978. Т. 12. С. 562.
82. Алферов Ж. И., Гореленок А. Т. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1979. Т. 43. С. 1448.
83. Гореленок А. Т., Колышкин В. И., Тарасов И. С. // *ЖТФ* 1983. Т. 53. С. 1973.
84. Колышкин В. И., Портной Е. Л. // *Письма ЖТФ*. 1977. Т. 3. С. 947.
85. Гусинский Г. М., Муждаба В. М. и др. // *ЖТФ*. 1976. Т. 56. С. 204.
86. Гаврилюк А. И., Гусинский Г. М. и др. // *ФТТ*. 1986. № 7. С. 2053.
87. Гусинский Г. М., Игнатьев В. И. и др. // *Завод. лаб.* 1984. Т. 50. С. 27.