

## О МОЕЙ НАУЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*А.Ф.Тулинов*

Если вспоминать о моей научной деятельности как физика – то начать надо с 1949 года, когда я – студент третьего курса физического факультета МГУ был зачислен на кафедру ускорителей отделения ядерной физики. В то время авторитет ядерной физики был исключительно высок, и поэтому на отделение набирались студенты, имевшие только отличную успеваемость. Соответственно, студенческий коллектив был очень сильный, что предъявляло соответствующие требования к преподавательскому составу. Поэтому с самого начала, то есть с третьего курса, с нами работали крупные специалисты – ядерщики, как то: Д.И.Блохинцев, В.И.Векслер, Л.В.Грошев, А.А.Коломенский, М.А.Марков, В.А.Петухов, И.М.Франк, Г.М.Франк, И.С.Шапино, Ф.Шапино. Почти все они уже в те годы являлись руководителями крупных научных коллективов. Впоследствии многие из них стали членами академии наук, лауреатами престижных премий, получили широкую известность, и не только среди специалистов.

Надо сказать, что курс, на котором я учился, был первым массовым послевоенным курсом, и поэтому в организационном плане возникало много проблем. Так, например, занятия по спецпредметам проходили вдали от места расположения основных зданий университета, а именно в районе метро Сокол. Все, что касалось ядерной физики, проходило под грифом “секретно”, поэтому учебной литературы было крайне мало, и основные надежды мы возлагали на собственные конспекты лекций. Но, несмотря на “звездный” преподавательский состав, педагогические способности знаменитых ученых были разными. Так эталоном лекторского мастерства считался профессор Валентин Афанасьевич Петухов. Свой курс ускорителей он читал блестяще. Мы все от его лекций были в полном восторге. С другой стороны, заведующий кафедрой ускорителей, выдающийся ученый и замечательный человек Владимир Иосифович Векслер в плане педагогики сильно ему уступал. Будущий академик читал курс “Прохождение частиц через вещество”. Много лет спустя, мы, его бывшие студенты, вспоминали комические эпизоды, связанные



с чтением лекций своим заведующим. Так, например, он мог исписать всю доску формулами, отойти от нее, посмотреть на написанное, смутиться, и виновато улыбнувшись, сказать: “Простите. Я тут все неправильно написал. Давайте попробуем еще раз”. А еще он умел работать “с двух рук”: правой писал формулы и тут же стирал все написанное левой. Студенты, конечно, ворчали, но зная Владимира Иосифовича, относились ко всему этому по – доброму. Огромное уважение вызывал сам факт происхождения будущего академика Векслера. Бывший беспризорник, подобранный на улице и воспитывавшийся в колонии им. Коминтерна, Владимир Иосифович стал выдающимся советским ученым, одним из основоположников науки об ускорителях в СССР.

Исторически получилось так, что мои студенческие годы в стенах Московского университета совпали со строительством нового здания МГУ на Ленинских Горах. Поэтому на преддипломную практику и на выполнение дипломной работы часть студентов нашей кафедры ускорителей, в числе которых был и я, пришли уже в 19 корпус, в лабораторию ядерных реакций.

Первое, что произвело большое впечатление на нас, новичков – это был циклотрон. К моменту нашего появления в лаборатории, он был уже запущен, более того, на нем уже получили пучок дейтронов с энергией  $\sim 3$  МэВ. Сотрудников – физиков в лаборатории было немного. Это были: заведующий лабораторией Сергей Сергеевич Васильев, его супруга Татьяна Николаевна Михалева, Иван Андреевич Савенко. Кроме них в лаборатории работали М.Г.Андреева, Л.Р.Войцик и небольшая группа технического персонала, в основном связанная с обслуживанием циклотрона. Когда в лаборатории появились мы - студенты, то нас оказалось значительно больше, чем штатных специалистов. Разбитые на группы, под руководством сотрудников, мы выполняли работы чисто методического характера. Физические измерения на циклотроне еще не были начаты, поскольку лаборатория находилась еще в подготовительной стадии.

Я часто вспоминаю свои впечатления о первом посещении лаборатории. Нас встретил сам С.С.Васильев, который не произвел тогда какого-то сильного впечатления. Нас больше интересовала ускорительная техника. Сергей Сергеевич показал циклотрон, небольшой ускоритель Ван-де-Граафа (на 200 кэВ), пару лабораторных



комнат. Правда, обстоятельного разговора не получилось. Мы стеснялись задавать вопросы. Сказывался ореол секретности, который окружал все, что было связано с институтом в целом и с лабораторией, располагающей циклотроном, в особенности. Для характеристики того времени можно отметить тот факт, что многие студенты, работавшие в других лабораториях института и не подозревали, что буквально за стеной имеется такая внушительная установка как циклотрон.

После первой встречи студенты были распределены по руководителям, и я вместе с И.Б.Тепловым оказался в группе, руководимой Львом Ромуальдовичем Войциком. Лев Ромуальдович отвечал за работу ускорителя Ван-де-Графа. Я с удовольствием вспоминаю его как опытного экспериментатора, очень живого и приятного в общении человека. Он весело обучал молодых людей азам экспериментальной ‘кухни’. К сожалению, Войцик вскоре перешел на другую работу, и соответственно окончательный запуск ускорителя и выполнения на нем различных калибровочных измерений мы проводили практически самостоятельно. Правда, надо отметить, что работа по запуску малого ускорителя не была в числе основных задач лаборатории. Главные направления были связаны, естественно, с циклотроном. Поэтому следует сказать в целом о тематике лаборатории ядерных реакций на раннем этапе ее деятельности.

Поскольку энергия ускоренных на циклотроне частиц (на первых порах это были дейтроны) была относительно небольшой (~ 4 МэВ), то научная тематика с самого начала стала складываться вокруг трех направлений, довольно типичных для ядерной физики низких и средних энергий. Это – деление тяжелых ядер, ядерные реакции при небольших энергиях и прохождение частиц через вещество. По физике деления основное внимание уделялось поначалу вопросам регистрации осколков с помощью камеры Вильсона и ядерных фотопластинок. Что касается ядерных реакций, то вначале из-за малости энергии пучка частиц ориентация была исключительно на реакции с самыми легкими ядрами. Большое внимание уделялось, например, таким реакциям, как  $d+d$ ,  $d+t$ . Но это продолжалось не очень долго. На рубеже 40-50-х годов были открыты так называемые прямые ядерные реакции и ситуация в этой области физики изменилась. Оказалось, сечения прямых реакций ( $d,p$ ), ( $d,n$ ) вследствие их поверхностного характера могут быть довольно большими и при



низких энергиях. Кроме того, благодаря очень простой кинематике этих реакций, изучая угловые распределения регистрируемых нуклонов, можно довольно надежно определять квантовые характеристики состояний конечного ядра. Таким образом, стало очевидным, что область возможных исследований на циклотроне лаборатории может быть существенно расширена. Можно в качестве мишеней использовать не только самые легкие ядра, но и продвинуться в сторону средних ядер. И действительно, изучение прямых реакций на легких и средних ядрах стало на много лет одним из приоритетных направлений в работе лаборатории. Впоследствии выяснилось, что прямые реакции идут не только под действием дейтронов, но вызываются и другими частицами ( $p, \alpha, t, \text{He}^3$ ). В этих случаях ситуация существенно усложняется, поскольку каждая реакция является результатом наложения нескольких конкурирующих механизмов. Возникающие при этом вопросы оказались настолько сложными и вместе с тем важными, что и сейчас, по прошествии нескольких десятилетий, изучение разных механизмов реакций и их конкуренции остаются одной из фундаментальных проблем современной ядерной физики.

Третье направление, которое тогда только начинало формироваться в лаборатории – прохождение быстрых многозарядных ионов через вещество. Хорошо известно, что многие работы по ядерной физике и физике космических лучей базируются на исследованиях прохождения частиц через различные среды. Однако, до периода, к которому относятся описываемые события, а именно до начала – середины пятидесятих годов – изучалось почти исключительно прохождение через вещество таких малозарядных частиц как электроны, протоны, дейтроны,  $\alpha$ -частицы. В основном, в ядерных лабораториях только с этими частицами тогда имели дело. Для них были разработаны методы ускорения, регистрации, измерения энергии, других параметров. Этому во многом способствовал тот факт, что теоретическое описание прохождения частиц с малым зарядом оказалось не очень сложным. Что касается прохождения более тяжелых ионов через вещество, то в те годы эта область практически не разрабатывалась. На существовавших тогда ускорителях ускорением многозарядных ионов (МЗИ) не занимались, теория процессов, сопровождающих движение МЗИ в веществе, теоретиков не привле-



кала. Более того, некоторые из них считали столкновение двух многоэлектронных атомов задачей вообще бессмысленной. Но тем не менее, с самого начала работы в лаборатории ее руководителем С.С.Васильевым было принято решение, что исследование прохождения многозарядных ионов через вещество будет одним из основных научных направлений. Была надежда, что развитие ускорительной техники в ближайшие годы приведет к возможности получать пучки МЗИ достаточно высоких энергий. Но даже и при существующих на тот момент энергиях, изучение прохождения МЗИ через вещество представляло собой очень интересную и перспективную задачу. Время показало правильность выбора стратегии развития научной тематики лаборатории.

На начальном этапе было решено проводить исследования взаимодействия МЗИ с веществом по нескольким направлениям. Первое – разработка технологии ускорения МЗИ на циклотроне лаборатории ядерных реакций (ЛЯР) и исследование прохождения МЗИ через вещество непосредственно на пучке частиц. Эта работа изначально была поручена группе студентов, впоследствии ставшими сотрудниками ЛЯР. Руководителем этих работ стал В.С.Николаев. Его ближайшими сотрудниками – Я.А.Теплова и И.С.Дмитриев.

Второе направление – прохождение осколков деления через вещество. Но работа по этой тематике по разным причинам длилась недолго. Что же касается третьего направления – использования ядер отдачи в ядерных реакциях, то работа в этом направлении началась только в 1952 году. Именно в том году я закончил факультет и поступил в аспирантуру, и С.С.Васильев, ставший моим научным руководителем, предложил мне эту работу в качестве темы для кандидатской диссертации. С самого начала эта тема была сформулирована, как сугубо “поисковая”. Трудно сказать, была ли у С.С.Васильева какая – то конкретная физическая идея, когда он предлагал эту тему своему аспиранту. Дело в том, что для изучения традиционных для того времени вопросов физики ядерных реакций, обходились регистрацией одного из продуктов – легкой частицы и этого, казалось, было вполне достаточно, а что касается регистрации ядер отдачи – то в экспериментальном плане это было очень непростое дело. И я в полной мере познал все эти трудности. По всей видимости, именно тогда закладывались мои навыки экспериментальной работы – ведь трудности возникали на каждом шагу. Сначала надо было научиться



надежно регистрировать ядра отдачи, используя для этого новый по тому времени прибор – открытый электронный умножитель (ЭУ), работающий без люминофора и изготовленный непосредственно в лаборатории. Этот открытый ЭУ использовался без амплитудной селекции и без всякого рода переходных окошек, поэтому вся аппаратура работала в режиме больших перегрузок, что естественно, (экспериментаторы поймут) мешало выделять совпадения с импульсами от легких частиц. Далее, для надежной фиксации углов вылета ядер отдачи необходимо было свести к минимуму их многократное рассеяние, что приводило к необходимости работать с предельно тонкими мишенями, а это, в свою очередь, резко уменьшало выход продуктов реакции. Много хлопот доставили работы по изготовлению очень тонких пленок разного состава и высокого качества, достаточно долго сохраняющих свои свойства под пучком. Кроме того, надо помнить, что в те годы экспериментальное оборудование зачастую изготовлялось, в лучшем случае, в мастерских НИИЯФ, куда надо было сделать соответствующий заказ с чертежами, расчетами и т.д., а иногда просто и в лаборатории из подручных средств. Иногда недостающие детали и приспособления делали буквально “из воздуха”!

Так или иначе, но в процессе работы трудности были более или менее преодолены. Диссертация под названием «Использование ядер отдачи для изучения ядерных реакций» была защищена мною в срок в 1955г. В диссертации были представлены результаты разработки на то время оригинального метода определения положений уровней в конечных ядрах, фиксируя направления вылета ядер отдачи. Вспоминая эту работу, я должен отметить, как много она мне дала с точки зрения становления физика – экспериментатора. Например, интересна история создания камеры “на лентах”. Так ряд задач, связанных с изучением спектров возбуждения конечных ядер, требовал возможности плавно изменять угловое положение детектора ядер отдачи при фиксированном положении детектора легкой частицы. Конструкции имевшихся тогда вакуумных камер были таковы, что электронный умножитель вместе с высоковольтной системой и частью электроники надо было вводить в вакуумную камеру и дистанционно перемещать все это внутри без нарушения вакуума. Технически это было очень неудобно, но, казалось, другого выхода не было. Более того, однажды С.С.Васильев даже сказал, что



придется, наверное, запроектировать в новом здании лаборатории вакуумную камеру объемом в несколько кубических метров. “Однако – добавил он шутливо – наверняка можно придумать какую – нибудь систему попроще. Поразмышляйте на досуге.” И совсем шутливо добавил: “Изобретете – выручите и себя, и ядерную физику”. Речь шла о системе, в которой патрубок для внешнего крепления детектора мог бы перемещаться без нарушения вакуума в горизонтальной плоскости в широком диапазоне углов. Этот разговор так повлиял на меня – тогда еще молодого экспериментатора, что в течение какого-то времени ни о чем другом, кроме как о “системе”, я думать не мог. Главная трудность оказалась связанной с тем, что сохранение неподвижного патрубка для выхода из камеры падающего пучка частиц перечеркивало все мыслимые варианты. Однако решение в конце концов нашлось. Подвижные патрубки следовало скрепить с гибкими подвижными металлическими лентами, которые в свою очередь накручивались на специальные стержни. При этом надо было придумать дополнительные приспособления, обеспечивающие вакуумное уплотнение. Когда я рассказал о своих мыслях по поводу камеры С.С.Васильеву, тот был очень удивлен. Удивление сменилось крайней заинтересованностью. Он одобрил и общую идею, и конструкцию. Вскоре камера была изготовлена. Она существенно упростила многие последующие работы, связанные как с ядрами отдачи, так и в последствии, с кристаллами. Близкая по замыслу конструкция камеры была описана в одном из зарубежных журналов лишь несколько лет спустя. Мне часто приходится вспоминать этот эпизод, и я испытываю благодарность к своему научному руководителю за доверие и поддержку. Я всегда утверждал и утверждаю, что такие моменты помогают молодому исследователю с самого начала научной карьеры преодолеть ощущение робости, скромности и недооценки своих возможностей.

Следующий цикл работ, к выполнению которых я, как молодой кандидат наук подключился сразу после окончания аспирантуры, был связан с доплеровским методом определения времени жизни возбужденных состояний ядер. Статьи с описанием этого метода появились еще в мои аспирантские времена. Уже тогда я заинтересовался этими результатами, поскольку в доплеровском методе существенную роль играли как раз ядра отдачи, изучению которых и

была посвящена моя кандидатская диссертация. Идея этого изящного метода хорошо известна: в эксперименте сравнивается энергия гамма-квантов, вылетающих из возбужденного ядра отдачи в направлении импульса ядра отдачи и в противоположном направлении. Если ядра отдачи высвечивают до их остановки в мишени, то энергии этих гамма – квантов различаются, если же высвечивание происходит после остановки – то энергии фотонов остаются неизменными. Таким образом время жизни возбужденного ядра сравнивается с временем торможения ядра отдачи. Процесс торможения ядра отдачи в данном случае – некоторое сопутствующее явление, которое предполагается известным и которое задает временной масштаб для измерения времени жизни возбужденного ядра. Предварительные оценки показывали, что времена торможения для разных ионов и разных сред лежат в диапазоне  $10^{-12}$  –  $10^{-14}$  сек. Успех этого метода предопределил тот факт, что довольно много гамма-переходов в ядрах попадает именно в этот диапазон временных значений. Можно сказать, что доплеровский метод и в настоящее время является одним из наиболее эффективных методов для определения времен жизни возбужденных состояний по гамма – переходам. Однако на первых порах применению этой методики сопутствовали технические трудности. Дело в том, что сдвиг гамма – линии был очень мал, поэтому для фиксации этого сдвига требовалась радиотехническая аппаратура с очень высокими параметрами, в частности, отличающаяся чрезвычайно высокой стабильностью. В те времена лаборатория такой аппаратурой не располагала и на первый взгляд, проведение подобных исследований не представлялось возможным. Однако идея казалась очень заманчивой, и поэтому мысли экспериментаторов были направлены на сохранение использования торможения ядер отдачи в качестве сопутствующего процесса, и в то же время на изобретение способов обойти трудность, связанную с регистрацией гамма- квантов. Но для этого надо было вместо доплеровского сдвига попытаться найти какой-то другой индикатор того, насколько ядро отдачи затормозилось к моменту высвечивания гамма – кванта. Вот тут – то молодым сотрудникам и помог накопленный нами к тому времени опыт работы с ядрами отдачи. Идея была проста и остроумна. Дело в том, что при испускании гамма – кванта ядра получают дополнительный импульс. Если на пути ядра отдачи имеется некоторый тормозящий слой, то зная угол вылета и





скорость торможения частицы, можно определить время пролета ядра до высвечивания фотона. Однако слабым местом этого метода являлось необходимость работы с тонкими пленками, которые должны были достаточно долго сохранять свои свойства под пучком. Но тем не менее мне вместе с А.Н.Бояркиной удалось экспериментально реализовать этот метод и выполнить измерения времени жизни возбужденного ядра  $\text{Be}^{10}$  в реакции  $\text{Be}^9(d,p)\text{Be}^{10}$ . Тем самым нами было доказано, что метод действительно работает в области  $10^{-12}$ – $10^{-14}$  сек. Правда он оказался довольно трудоемким и опасения по поводу его слабых сторон подтвердились.

Впоследствии мне приходилось неоднократно отмечать, что основательное исследование возможностей доплеровского метода, а также работа с описанным выше альтернативным методом оказались очень важными для наших дальнейших работ. Именно эти работы способствовали возникновению постоянного интереса к методам определения малых времен протекания атомно – ядерных процессов, что в последствии привело к “кристаллическим” работам.

Описанные выше работы над новым методом определения времени жизни возбужденных атомов по времени совпали с периодом окончательного переезда в новое здание лаборатории на Ленинских горах, с работами по запуску новых ускорителей (120-см циклотрона, электростатического ускорителя, бетатрона, каскадного генератора). Создавалась новая экспериментальная база. В работу включилась большая группа молодых научных сотрудников – выпускников кафедры ускорителей, оставленных в лаборатории после выполнения ими дипломных или аспирантских работ. В эту группу входили: Г.Ф.Тимушев, В.С.Николаев, Ю.А.Воробьев, И.С.Дмитриев, В.Г.Неудачин, В.Г.Сухаревский, И.Б.Теплов, Я.А.Теплова, Е.А.Романовский, А.А.Бедняков, В.Г.Шевченко, А.М.Попова, В.В.Комаров ну и я, А.Ф.Тулинов. Впоследствии именно эта группа и образовала основной костяк нового, значительно увеличившегося коллектива лаборатории и фактически определяла на многие годы всю деятельность лаборатории (впоследствии ОФАЯ).

После переезда в новое здание, постепенно стали формироваться более или менее самостоятельно работающие научные группы. Начала создаваться и группа, работающая непосредственно уже под моим руководством. С самого начала у нас не было какого – то одного направления. С тех пор, как С.С.Васильев предложил



тему, связанную с ядрами отдачи, так получилось, что я с сотрудниками стал параллельно заниматься как механизмами ядерных реакций, так и вопросами взаимодействия ионов с веществом. Это привело к тому, что в начале шестидесятых годов под моим руководством было выполнено сразу несколько диссертационных и дипломных работ по разным направлениям. Так диссертация А.А. Беднякова и дипломная работа Г.А. Иферова были посвящены изучению многократного рассеяния ионов в веществе. Увлечение на каком-то этапе многократным рассеянием было, разумеется, инициировано тем, что при работе с ядрами отдачи выявилась существенная роль этого явления, а экспериментальных и теоретических данных о нем явно не хватало. Но в то же время в группе выполнялись и чисто ядерные работы. Диссертация ассистента кафедры Ю.В.Меликова была связана с изучением прямых ядерных реакций на легких ядрах, а аспиранта В.Долинова – с исследованием ядерных реакций, в которых возбужденное ядро отдачи испускает легкую частицу. Диссертация В.К.Долинова явилась, по существу, развитием работы, связанной с альтернативным методом определения времени жизни возбужденного состояния. Только в этом случае вместо гамма-кванта из возбужденного ядра вылетала вторая легкая частица. Изучение корреляции в направлении вылета двух легких частиц давало возможность определять квантовые характеристики промежуточных состояний. Но такая возможность существенно зависела от времени жизни промежуточного состояния. Поэтому снова возникал вопрос о поисках метода, определения ультрамалых значений времен протекания ядерных реакций. И мне пришлось вновь вернуться “к изобретательству, к придумыванию” именно такого метода. Но для такого рода деятельности база была уже существенно солиднее, чем прежде. Было уже сформировано то, что впоследствии называлось “временное чутье”, да и опыт проведения экспериментальных работ существенно увеличился. А требования к новому методу были весьма жесткими. Так он должен был позволять проводить измерения времен на несколько порядков меньших, чем это было возможно предыдущими методами. Необходимо было подобрать и использовать так называемое “сопутствующее явление”, которое должно было иметь адекватный временной масштаб и в то же время, быть хорошо изученным. После долгих размышлений пришлось признать, что единственным “сопутствующим явлением” оказывалось



само перемещение составного ядра под действием импульса от налетающей частицы. Если бы удалось зафиксировать величину сдвига, а этот сдвиг составлял малую часть межатомного расстояния, то был бы получен один из вариантов известной времяпролетной методики, но уже перенесенной на иной масштаб расстояний. То есть, в основе данной методики лежала возможность определения местонахождения составного ядра в момент распада. И однажды пришла мысль, что если ядра мишени будут выстроены в один ряд, то тогда, частицы, вылетающие из этих ядер в направлении цепочки, не будут регистрироваться детектором, так как соседние ядра будут образовывать тень в потоке таких частиц. А вот если в результате полученного импульса ядро-источник сместилось с оси цепочки, то частицы, вылетающие в направлении ряда, уже могут регистрироваться. Кроме того, качественно понятно, что характер углового распределения частиц вблизи направления ряда должен зависеть от величины смещения! А что такое цепочка атомов? Это же монокристалл! Значит, надо использовать в качестве мишени монокристалл! Но тут сразу возник вопрос. Очевидно, что особенности в угловом распределении будут сосредоточены в довольно малом телесном угле вблизи оси цепочки. Каков же по порядку величины этот телесный угол и, следовательно, наблюдаемы ли в принципе эти особенности? Были сделаны оценки угловой величины возникающей тени в простейшем предположении для случая, когда частицы вылетают из узла цепочки. Для чисто кулоновского потенциала полная угловая ширина тени при рассеянии на одном соседнем атоме составляет величину  $\psi_{кр.} = \sqrt{\frac{2b}{d}}$ , где  $b$  – расстояние наибольшего сближения при

лобовом столкновении, а  $d$  – расстояние между соседними ядрами в цепочке. Для относительно тяжелого кристалла, например, вольфрама, и энергии протонов в несколько МэВ, получается  $\psi_{кр.} = 1,4^\circ$ . Оценка эта, конечно, грубая, но ведь эффект можно наблюдать! Необходимо было только, чтобы размеры пятна на мишени не превышали ширины тени в районе детектора. Условие отнюдь не жесткое и вполне экспериментально выполнимое, и поэтому первое впечатление было такое, что сами тени наверняка кем-то наблюдались – ведь это так очевидно! Ну, например, они должны были проявляться в экспериментах при упругом рассеянии любых заряженных



частиц, например протонов на монокристалле. Но нас “тени” интересовали как “сопутствующее явление”. Больше интересовал более тонкий эффект – ведь напомним, что разговор идет о времени жизни составного ядра, появившегося в результате ядерной реакции. А именно, нас интересовало искажение тени под действием смещения точки вылета частиц. Считая, что “тени” – явление уже известное, мы размышляли, как эти самые “тени” использовать в своих задачах, тем более, что сообщение о такой возможности сотрудники лаборатории восприняли с большим энтузиазмом. Оставалось за малым – найти работы и людей, которые наблюдали и работали с этими самыми “теньями”. Но, как ни странно, чтение научной литературы и беседы со многими специалистами привели к убеждению, что сам эффект теней ранее не наблюдался и, естественно, никем не изучался. На первый взгляд это было удивительно. Впоследствии, рассуждая об этом феномене, я списывал это на стереотип мышления ядерщиков. Если имеешь дело с медленными нейтронами – размышлял я, – где длина волны де Бройля соизмерима с постоянной решетки и, соответственно, проявляются всякого рода дифракционные явления, то там использование монокристаллических мишеней – стандартная постановка опыта. Если же энергию увеличивать, дифракционные явления из – за малости длины волны постепенно исчезают, а с ними исчезает и чувствительность к структуре мишени. Так как при работе с заряженными частицами обычно используется энергия порядка МэВ и выше, то длина волны становится настолько малой, что ни о какой дифракции речь не идет. Что же касается ориентационных явлений не волнового, а корпускулярного характера то такого рода задач в ядерной физике до того времени просто не было.

Все эти события происходили сразу после летних отпусков в 1964 году, ибо эта идея появилась у меня в конце лета, когда я был еще на даче, где-то между походом за грибами в ближайший лес и отдыхом на берегу небольшой подмосковной речки. Вернувшись в лабораторию и, проведя некоторые дискуссии и дополнительные оценки, нами было принято решение поставить эксперимент по наблюдению эффекта теней на протонах от циклотрона при энергии 3 МэВ. В качестве мишени был выбран монокристалл вольфрама. При этом мы исходили из того, что вольфрам тугоплавок и имеет достаточно большое значение  $Z$ , чтобы по возможности иметь большую угловую ширину тени. Предполагалось наблюдать тени при



упругом рассеянии протонов. В этом случае можно было с большой точностью считать, что точка вылета рассеянных протонов совпадает с узлом решетки кристалла. Детектирование протонов осуществлялось обычным полупроводниковым детектором. Путем соответствующего диафрагмирования было обеспечено угловое разрешение, достаточное для наблюдения угловых особенностей вплоть до  $0,1^\circ$ . Расстояние от мишени до счетчика было порядка 1 метра. Угловые распределения рассеянных протонов изучались в окрестности осей низких индексов. Первые опыты проводились с осью [111], так как для нее межъядерное расстояние  $d$  минимально, и, следовательно, угловая ширина в этом случае при прочих равных условиях была наибольшей. Разумеется, оптимальные условия эксперимента были достигнуты не сразу. Опыта работы с монокристаллами не было. Пришлось провести значительную предварительную работу методического характера. Здесь снова пригодилась моя старая камера с подвижными патрубками, о которой говорилось выше. Требовалось довольно точное ориентирование кристалла с помощью рентгеновской методики. Качественные результаты, свидетельствующие о том, что в направлении оси [111] наблюдается уменьшение интенсивности рассеянного пучка, были получены практически сразу после начала работ. Однако, для получения надежных количественных данных пришлось изрядно потрудиться. Большая работа, связанная с наблюдением теней на пучке циклотрона, была выполнена В.С.Куликаускасом, который в то время был аспирантом физического факультета. После окончания аспирантуры он был оставлен для работы в лаборатории и впоследствии активно участвовал в разнообразных исследованиях в области физики ориентационных явлений.

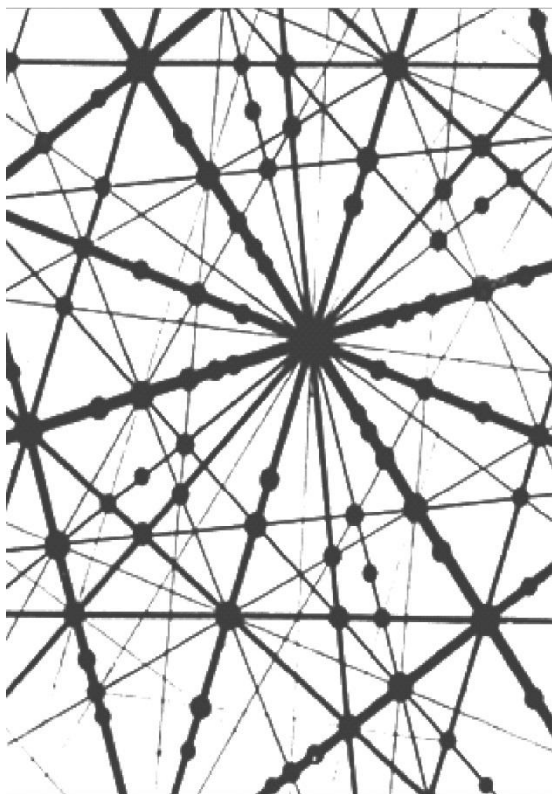
Как уже отмечалось выше, в первых опытах фиксировалась тень в направлении наиболее плотноупакованной оси монокристалла вольфрама. Первые же опыты показали, что тень имеет довольно большую, с позиции возможности измерения, ширину. Этот результат, естественно, окрылил всех участников работы. Стало ясно, что перед нами открывается довольно обширное поле для дальнейших исследований. Было решено с помощью той же методики исследовать влияние на параметры и форму теней самых различных факторов, таких как  $Z$  атомов кристалла, энергии частиц, типа кристаллографической оси, температуры. Но вместе с тем возникла и другая

задача. Поскольку у монокристалла имеется множество осей самых разных индексов, представлялось интересным наблюдать в одном опыте общую теневую картину. Было решено воспользоваться фотопластинками, чтобы захватить большой телесный угол. Ожидалось, что негативное изображение должно было содержать темные пятна разных размеров, выстроенных в соответствии с симметрией кристалла. Каждое пятно – место пересечения кристаллографической оси с плоскостью пластинки. Для того, чтобы захватить как можно большой телесный угол, пластинка должна была устанавливаться довольно близко от мишени, на расстоянии 3 – 5 см. Но чтобы при этом ширины теней были не очень маленькими, решено было проводить опыты при меньших энергиях. Эксперименты с фотопластинками проводились на каскадном генераторе, ускоряющем протоны до энергии 500 кэВ. Исходя из оценок необходимого углового разрешения, размеры диафрагмы у мишени выбирались довольно малыми (0,2 – 0,3 мм). В этой работе участвовали сотрудник лаборатории А.А.Бедняков и мои аспиранты – Арий Пузанов из Свердловска и Бэла Ахметова из Алма-Аты. В первых же опытах не обошлось без неожиданностей. На пластинке вместо ожидаемой системы пятен, получались тонкие, практически однородные прямые линии. Вначале даже пришла в голову мысль – а не ошибка ли это? Но после того, как обнаруженные линии в точности совпали с результатами построений соответствующих ОЦК-кристаллам проекций кристаллографических плоскостей, стало ясно, что никакой ошибки нет: линии на пластинке представляют собой следы пересечения этих плоскостей с плоскостью фотопластинки. Конечно, заранее было понимание того, что пятна должны располагаться вдоль прямых линий, но то, что система пятен вырождается в совершенно однородные линии – было неожиданностью. Конечно, позже пришло понимание, когда получаются пятна, а когда – линии, но результаты первых же опытов с пластинками позволили установить важный факт: тени бывают не только “осевыми”, но и “плоскостными”. Иначе говоря, совокупность атомов, расположенных в одной плоскости, выступает как некоторый самостоятельный объект, формирующий тень.

Говоря о работах, связанных с наблюдением эффекта теней, полезно кратко вспомнить об открытии еще одного ориентационного явления – каналирования. Началось все с того, что Дэвисом в Чок-



Ривере (Канада) была создана оригинальная высокочувствительная методика измерения пробегов ионов. В образцы вбивались радиоактивные ионы, после чего некоторый слой стравливался, и замерялась остаточная радиоактивность. Таким образом были измерены пробеги ионов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{41}\text{Ar}$  с энергией в десятки кэВ в обычном поликристаллическом алюминии.



На рисунке показана картина теней, полученная на фотопластинке в широком угловом диапазоне (протонограмма). Хорошо видны тени и от цепочек атомов, и от плоскостей.

Эксперимент неожиданно указал на присутствие какой-то длиннопребойной компоненты. Вскоре Оун и Робинзон (США) методом

машинного моделирования показали, что пробеги определенной части ионов возрастают в еще большей мере, если взять монокристаллический образец. Под влиянием этих работ в Орхусе (Дания), были начаты систематические исследования по изучению этого явления. Было установлено, что существует механизм отражения частиц от цепочек (“стринг-эффект”), который может при определенных условиях довольно долго удерживать движущиеся в кристалле частицы в “пустотах” между цепочками. При таком режиме движения (каналирование) практически исключается потеря энергии на упругие столкновения с отдельными атомами, а также уменьшаются электронные потери из-за пониженной плотности электронов в “пустотах”. Так вот, оказалось, что эффект каналирования и эффект теней – это дополняющие друг друга явления, проявляющиеся в разных группах частиц. Эффект каналирования относится к частицам, движущимся в кристалле в области “пустот”. В этом режиме могут двигаться, в основном, частицы, вводимые в кристалл извне. Эффект же теней относится к частицам, которые движутся в областях с максимальной концентрацией ядер. За счет именно этих частиц формируется тень. Наиболее ярко эффект проявляется, когда частицы вылетают изнутри, из узлов кристалла.

Позже, когда мы познакомились с ранними исследованиями по физике каналирования, а со многими участниками этих работ у нас установились самые дружеские отношения, мы конечно, совместными усилиями выстроили последовательность событий тех лет.

При этом установили много интересных совпадений в идеях, оценках, в некоторых тонкостях эксперимента. Но были и существенные различия, относящиеся главным образом к условиям, в которых выполнялись исследования. Естественно, что между физиками ряда зарубежных лабораторий, занимающихся каналированием, сразу же установились тесные контакты, оперативный обмен информацией. Мы же по понятным причинам в это сообщество не входили, соответствующей информации не имели, тем более, что основные экспериментальные работы по изучению эффекта каналирования выполнялись практически одновременно с нашими. Кроме того, у нас и предыстория несколько отличалась: мы в основном занимались ядерными реакциями, и следовательно шли от чисто ядерной задачи определения времени протекания ядерных реакций, в то время как основная часть наших зарубежных коллег ранее работала





с ионами относительно низких энергий, изучая катодное распыление, взаимодействие плазмы с веществом, масспектроскопию и т.д.

Обнаружение и изучение эффекта каналирования и эффекта теней, а также ряда сопутствующих этим эффектам особенностей в движении заряженных частиц в кристаллах, фактически явилось началом формирования обширного направления исследований, которое получило название физики ориентационных явлений, возникающих при взаимодействии заряженных частиц с монокристаллами. За прошедшие годы эта область интенсивно развивалась, были обнаружены новые эффекты и явления. Полученные в этой области результаты и разработанные методы стали широко использоваться для решения многих как фундаментальных, так и прикладных задач. В настоящее время в этой области активно работают или используют соответствующие методы многие десятки, если не сотни лабораторий. По этим вопросам систематически проводятся международные и национальные научные конференции. С 1969 года в Московском университете проводится, ставшая уже традиционной, ежегодная Всесоюзная (ныне Международная) научная конференция по физике взаимодействия быстрых заряженных частиц с кристаллами. Следует отметить, что в области изучения физики ориентационных явлений наша страна в целом занимала хорошие позиции. Многие важные результаты были получены советскими учеными. Проведение упомянутой выше ежегодной конференции в МГУ несомненно сыграло в этом плане важную роль. За тридцать с лишним лет развития исследований по физике ориентационных явлений, немало результатов получено и в нашем научном коллективе. Постепенно он трансформировался из научной группы в сектор, а затем в довольно большую лабораторию, которая стала называться лабораторией ядерных реакций. Кстати, прежняя лаборатория, которой руководил С.С.Васильев, постепенно превратилась в крупнейший в институте отдел физики атомного ядра, в котором работало свыше 200 человек. В отделе было четыре лаборатории. Их руководителями были В.С.Николаев, И.Б.Теплов, В.Г.Неудачин и я.

Работы нашей лаборатории получили довольно широкую известность. Из официальных актов признания можно отметить, что обнаружение эффекта теней было признано открытием и внесено в Государственный реестр открытий СССР за номером 54. В 1967 г.



работы были отмечены Ломоносовской премией 1-ой степени. В 1972 г. коллектив в составе Б.Г.Ахметовой, Г.А.Иферова, С.А.Карамяна, В.С.Куликаускаса, Ю.В.Меликова, Г.П.Похла, А.А.Пузанова, АФ.Тулинова за работы по исследованию взаимодействия заряженных частиц с кристаллами был удостоен Государственной премии СССР. Лабораторией были опубликованы сотни статей, защищено свыше 30 кандидатских и 6 докторских диссертаций\*.

Развитие исследований за истекшие десятилетия показали, что ориентационные явления и методы, основанные на их использовании, представляют наибольшую ценность для таких направлений, как физика конденсированного вещества, атомная физика, взаимодействие излучений с веществом, радиационная физика твердого тела. Наша лаборатория занималась всеми этими исследованиями. Вместе с тем и для ядерной физики применение их оказалось очень интересным. В первую очередь речь идет об изучении временных характеристик ядерных реакций, т.е. о реализации первоначальной идеи, приведшей к обнаружению эффекта теней. Если говорить об общей ситуации в этой области, то за сорок с лишним лет, прошедших с начала работы над методом определения временных характеристик с помощью эффекта теней, сделано много, метод стал общепризнанным. За это время к нему обращались физики из многих ядерных лабораторий. Если называть страны, то получается довольно длинный перечень. Кроме наших исследований можно отметить исследования, проведенные в Японии, Канаде, Дании, США, Англии, Италии, Германии. Здесь я хотел бы упомянуть имена нескольких зарубежных физиков, в разное время и в разной степени приложивших руку к развитию этого метода, известных своими работами по другим вопросам физики ориентационных явлений и ставших впоследствии моими друзьями. Это – Д.Геммел (США), который вскоре после меня независимо пришел к той же идее об определении  $\tau_p$  с использованием кристалла, это И.Нильсен и Д.Андерсен (Дания), В.Гибсон (США), к сожалению, недавно скончавшийся японский физик Ф.Фуджимото, которые своими экспериментальными исследованиями содействовали решению ряда важных вопросов развития и использования этого метода.

---

\* Информация приведена на момент написания этих воспоминаний.



Вместе с тем можно со всей определенностью сказать, что в нашей лаборатории исследования, связанные с освоением и применением метода, приобрели систематический и комплексный характер. Сформировалось довольно крупное, относительно самостоятельное направление. В работе по этой теме постоянно участвовала довольно большая группа сотрудников, аспирантов и студентов. По ней защищено 12 кандидатских и 2 докторских диссертации\*. Тот факт, что эта работа получила значительный размах, объясняется не только тем, что она постоянно была любимым детищем руководителя лаборатории, хотя это тоже было. Очень важным фактором было то, что возможности экспериментальной базы, созданной в свое время Сергеем Сергеевичем Васильевым, и потребности естественного развития такого рода направлений, оказались в поразительном соответствии. Все три ускорителя, построенные в свое время, оказались исключительно нужными и удобными в этих исследованиях. Стимулировало эту работу, конечно и то, что за ней внимательно, с большим интересом следили во многих ядерных лабораториях нашей страны. В этом плане я хотел бы особо отметить очень большую заинтересованность в успехе наших работ со стороны академика Г.Н.Флерова. С Георгием Николаевичем у меня сложились очень хорошие личные отношения, так как мы вместе работали в Совете по приложению методов ядерной физики в смежных областях АН СССР (он председателем, а я его заместителем). Но дело не только в этом. Сама научная проблематика лаборатории Г.Н.Флерова в Дубне, связанная с изучением разных ядерных процессов под действием тяжелых ионов, требовала использования временных методик. И в его лаборатории были выполнены некоторые уникальные разработки, правда относящиеся к диапазону больших времен. Г.Н.Флерова постоянно интересовала возможность продвижения в наш диапазон более коротких значений  $\tau_p$ . Во всяком случае между нашими лабораториями возникли разнообразные контакты, полезные особенно для нас, так как по своим масштабам и техническим возможностям наши лаборатории стояли, конечно, на разных уровнях

Конкретная работа над методом началась у нас вскоре после обнаружения эффекта теней, хотя сначала и небольшими силами.

---

\* Информация приведена на момент написания этих воспоминаний.



В ней участвовали аспирант А.А.Пузанов, молодой специалист Ю.Д.Отставнов и два студента. Очень скоро я почувствовал, что при этом был бы очень полезен более опытный физик-экспериментатор, который смог бы фактически возглавить работу по этому блоку. И таким человеком стал Ю.В.Меликов. К этому времени он только что закончил работу над диссертацией, связанной с ядерными реакциями и согласился целиком посвятить себя вопросам разработки нового метода. Все последующие события показали, что выбор был исключительно удачным. То, что удалось решить многочисленные задачи, связанные с созданием метода и началом его достаточно широкого использования – это в большой степени заслуга Ю.В.Меликова.

На первом этапе было решено начать сразу с проведения некоторых сугубо пробных экспериментов на кристаллах, которые удалось к тому времени добыть, в условиях, когда теоретические оценки были очень ненадежными из-за сложности изучаемого явления. Я напоминаю о том, что надо было в форме тени зафиксировать искажения, вызванные сдвигом источника за время порядка  $10^{-16}$ – $10^{-21}$  сек. Было поставлено два эксперимента, в которых заранее можно было рассчитать величины сдвигов источника частиц и попытаться заметить искажение тени. Первый опыт касался упругого рассеяния протонов на монокристалле вольфрама. При изменении энергии протонов и угла падения частиц на цепочку можно было изменять величину "недолета" до оси цепочки из-за кулоновского взаимодействия. Второй опыт был связан с использованием резонансной реакции (p, $\alpha$ ) на F, входящем в состав монокристалла CaF<sub>2</sub>. Для этой реакции при  $E_p = 340$  кэВ был известен резонанс и ранее измерена его  $\Gamma$ -ширина.

Результаты этих двух опытов трудно оценить однозначно. С одной стороны, они не привели к надежно интерпретируемым результатам, хотя некоторые искажения теневой картины и выявились. Эти искажения касались отдельных элементов очень сложной области наложения осевых и плоскостных теней, и без детального теоретического анализа количественно связать их с  $\tau_p$  не удавалось. С другой стороны – в процессе выполнения этих первых работ стало ясно, что создание метода требует выполнения обширной программы разнообразных и систематических исследований, в том числе и в областях, смежных с собственно ядерными реакциями. Но при этом надо



было решить вопрос о том, на какой области ядерных реакций следует сосредоточить основные усилия. Постепенно выяснилось, что такой областью должно быть деление тяжелых ядер. При этом имелись в виду следующие соображения. Большинство обычных ядерных реакций имеет значения  $\tau_p$ , при которых сдвиги составного ядра оказываются меньше, чем амплитуда тепловых колебаний ядер, даже нулевых. В этих условиях извлекать данные из теневой картины о сдвиге ядра отдачи сложно. В то же время для деления ядер характерен очень широкий диапазон значений  $\tau_p$  – ведь все зависит от соотношения энергии возбуждения  $E^*$  ядра и высоты барьера деления  $E_b$ . При  $E^* < E_b$  мы имеем и секунды, и годы, в то время как при  $E^* \gg E_b$  процесс протекает за времена  $\tau_p \sim 10^{-16} - 10^{-21}$  сек., обычные для высоковозбужденных составных ядер. Ясно, что вблизи барьера имеется область значений  $E^*$ , которая наилучшим образом соответствует условиям применимости метода.

Конечно, для того, чтобы выделить эту область и работать внутри этой области, получить экспериментальные зависимости значений  $\tau_p$  от  $E^*$ , потребовалось решить и другие проблемы: в первую очередь надо было получить теневые картины для осколков деления и научиться их обсматривать. Эти исследования проводились на нашем циклотроне в 1967–1968 гг. В лабораторном лексиконе появились термины "осколкограмма", "фрагментограмма". Мы изучали деление ядер урана под действием  $\alpha$ -частиц с энергией 25 МэВ. Так как желательнее было за разумные экспозиции получить все распределение осколков в районе выбранной тени, необходимо было использовать адекватные методы регистрации осколков, к тому же на фоне большого количества других частиц. Для этого мы воспользовались опытом, который имелся в лаборатории Г.Н.Флерова, где регистрировали осколки трековыми детекторами. Оказалось, что обычные стекла после облучения и соответствующей химической обработки обнаруживают следы от осколков, но не регистрируют  $\alpha$ - и другие легкие частицы. При этом двумерная картина осколков в области тени получалась подсчетом отдельных треков с помощью микроскопа. Оказалось, что при достаточно больших экспозициях тени на трековых детекторах можно наблюдать визуально. Через некоторое время аналогичные теневые картины были получены на пучке многозарядных ионов  $^{22}\text{Ne}$  с использованием ускорителя лаборатории Г.Н.Флерова



Работы с пучками заряженных частиц позволили решить очень важную задачу. Мы научились получать и обсчитывать "фрагментограммы". Однако для выявления физической информации о величинах сдвигов составных ядер в этих опытах мы были еще не готовы. Энергия возбуждения составных ядер в таких экспериментах была велика. Эти ядра испускали каскад нейтронов, так что общая картина для интерпретации была слишком сложной. Позже нами были освоены способы извлечения и обработки нужной информации и в реакциях с заряженными частицами, более того, оказалось, что каскадное испускание нейтронов предоставляет интересные дополнительные возможности.

А тогда, после того, как методика получения и обсчета теней от осколков была освоена, мы приступили к исследованию деления под действием нейтронов. Этот переход диктовался самой логикой исследования. Только с нейтронами можно было надежно "попасть" в область возбуждений, лишь немного превышающих барьер деления и, в отличие от  $\gamma$ -квантов, сообщить заметный импульс составному ядру. Первый опыт был проведен при энергии нейтронов 3 МэВ на каскаднике нашей лаборатории. Нейтроны получались в реакции  $D(d,n)$ . В качестве мишени использовался монокристалл  $UO_2$  с естественным изотопным составом урана. В эксперименте фиксировались тени в направлении двух одинаковых осей [111], расположенных под разными углами к направлению сдвига ядра отдачи. Тень под малым углом получалась практически такой, как при отсутствии сдвига и считалась эталонной тенью. С ней сравнивали другую, так называемую рабочую тень, которая была получена под углом, близким к  $90^\circ$  и в результате сдвига имела максимальное искажение. В этом опыте было зафиксировано различие в двух тенях. "Рабочая" тень имела меньшую глубину. Эту разность глубин двух теней можно было, в принципе, уже связывать со сдвигом составного ядра. Далее начались систематические измерения с нейтронами разных энергий. Об этом речь пойдет ниже, однако следует кратко рассказать о ряде важных этапов в решении методических проблем, которое проводилось параллельно с физическими измерениями и включало в себя работу над экспериментальными и теоретическими вопросами.



Первая проблема была связана с монокристаллами делящихся элементов. Неоценимую помощь в этом плане нам оказали сотрудники радиохимической лаборатории НИИЯФ, в первую очередь, к.х.н. В.О.Кордюкевич. Ему удалось наладить технологию выращивания высококачественных монокристаллов  $UO_2$  с изотопом  $U^{238}$ . Поскольку предстояло работать позже с изотопом  $U^{235}$ , а количества этого изотопа были очень малыми, В.О.Кордюкевичем был разработан оригинальный метод выращивания монокристалла  $UO_2$  практически без потерь. Позже был налажен метод выращивания монокристаллов окисла тория. Эта работа по созданию высококачественных монокристаллов указанных трех типов позволила провести впоследствии работы с многими ядрами путем облучения [мишеней разными частицами и выделения разных изотопов при нейтронных каскадах.

Следующая группа проблем была связана с так называемым "соотношением перехода". Это соотношение давало возможность из наблюдаемого в эксперименте эффекта, например, упомянутой выше разности глубин теней, получить значение  $\tau_p$ . Работа проводилась в течение довольно длительного периода времени. Постепенно "соотношение" уточнялось за счет учета различных факторов. При этом использовались как различные теоретические модели, так и результаты экспериментов. В частности, в основу теоретических моделей был положен аналитический подход, разработанный Линдхардом для эффекта каналирования. Он включал в себя идею о стринг-эффекте, о котором уже говорилось выше. При этом рассматривались два важных случая: "тонкая мишень" и "толстая мишень". В случае тонкой мишени за основу бралась модель так называемого статистического равновесия в поперечном фазовом пространстве. В случае толстой мишени дополнительно учитывается медленное изменение поперечной энергии  $E$ , возникающее за счет отклонений поперечного движения осколков деления от двумерной потенциальности системы (колебания атомов, дискретность цепочек, рассеяние на электронах). Этот учет делался с помощью решения уравнения типа Фоккера–Планка. Кроме того, учитывалась и потеря энергии частиц.

Таким образом были построены "теоретические соотношения перехода", а далее проводилась их детальная проверка для многих экспериментальных ситуаций. Так большая работа в этом плане



была проведена аспирантами Н.Г.Чечениным и Н.В.Ереминым. Были детально изучены три ситуации: 1) случай тонкой мишени и малого сдвига (величина сдвига меньше постоянной решетки); 2) случай тонкой мишени и значительного сдвига (сдвиг порядка или больше постоянной решетки); 3) случай толстой мишени с учетом энергетических потерь. Экспериментальная проверка "соотношений перехода" проводилась с широким привлечением резонансных ядерных реакций, исследованных на ЭГ-8. При этом резонанс мог располагаться по желанию на разных глубинах, поэтому можно было детально изучать влияние толщины слоя кристалла на параметры тени. Наиболее удобными оказались несколько резонансов в реакции  $Al^{27}(p,\alpha)Si^{28}$ , ширины которых были известны и использовались для проверки и градуировки "соотношения перехода". В процессе этих работ были определены времена жизни и для тех резонансов, о которых ранее данных не было. В процессе построения "соотношений перехода" была исследована чувствительность к сдвигу различных параметров, как то: интенсивность в центре тени, "площадь лунки" в поперечном сечении, "объем лунки". Достигнуто взаимное согласование данных, полученных с помощью разных параметров.

При переходе к осколкам деления возникли свои особенности. Помимо того, что необходимо было учитывать толстый слой кристалла и большие смещения составного ядра, надо было принимать во внимание наличие двух типов осколков. Поскольку кристалл  $UO_2$  имеет свою специфику структуры, были проведены специальные исследования роли кислородной подрешетки в процессе движения частиц, захваченных в каналы. Эти исследования проводились на каскаднике при энергии протонов 450 кэВ в диапазоне температуры от  $-100^\circ$  до  $+500^\circ$  С. Эти исследования позволили выявить ряд особенностей движения частиц вдоль разных осей кристалла.

Значительный объем исследований был связан с возникающими в кристаллах в процессе облучения радиационными дефектами. Особенно детально изучение этих эффектов было проведено при исследовании резонансных реакций на  $Al^{27}$ , так как монокристалл  $Al$  обладал относительно низкой радиационной стойкостью. При этом были разработаны способы получения количественных данных  $\tau_p$  с учетом накопления радиационных дефектов. Исследования на ради-





ационную стойкость были проведены и для кристаллов  $\text{UO}_2$ . К счастью, оказалось, что эти кристаллы являются достаточно радиационно стойкими и за некоторыми исключениями при тех экспозициях, с которыми мы имели дело, дефекты не оказывали существенного искажающего воздействия.

Проведение работ, о которых только что шла речь, и которые в равной мере были и физическими и методическими, происходило параллельно с исследованиями времени деления под действием нейтронов. После первого наблюдения конечного времени жизни составного ядра  $\text{U}^{239}$ , проведенного на нашем каскаднике, была выполнена серия исследований при разных энергиях нейтронов. В качестве источников нейтронов использовались разные реакции и разные ускорители. Исследования с  $\text{U}^{239}$  были продолжены с использованием двух электростатических ускорителей ИАЭ им. И.В.Курчатова. Была выявлена зависимость измеренного времени жизни от энергии возбуждения: с увеличением энергии возбуждения эффект конечного времени уменьшается. Особенно детальные систематические исследования были проведены с изотопом  $\text{U}^{236}$ , образующимся при захвате ядрами  $\text{U}^{235}$  нейтронов в диапазоне 0,2-4 МэВ. Эти исследования проводились также в ИАЭ, на ЭГ и тандемном ускорителе. Было показано, что при увеличении энергии возбуждения ядра  $\text{U}^{236}$  от 6,5 до 10 МэВ его время жизни уменьшается от  $10^{-15}$  до  $10^{-17}$  сек.

Такая параллельная работа по исследованию времени протекания процесса деления под действием нейтронов и деятельность, направленная на решение физических задач, способствующих повышению точности и чувствительности метода, заняла по существу все семидесятые годы. Во второй половине этого десятилетия произошли некоторые изменения в составе группы "делительщиков". В связи с длительными зарубежными командировками Н.Г.Чеченин переключился на исследование с помощью ориентационных методов некоторых твердотельных проблем. Вместе с тем группа пополнилась двумя выпускниками кафедры физики атомного ядра О.В.Фотиной и О.А.Юминовым. О.А.Юминов активно включился в экспериментальные нейтронные исследования и впоследствии стал одним из основных участников работ, а О.В.Фотиной были поручены теоретические и расчетные работы, связанные с обчетом экс-



периментальных данных о временах деления. Желательно было параллельно с измерениями  $\tau_p$  и продолжающимся совершенствованием методики проводить и теоретический анализ получаемых результатов. На этой стороне дела следует немного остановиться. Условия для развертывания работ собственно по физике деления были довольно благоприятными. Вообще, надо сказать, что уровень работ по физике деления у нас в стране был всегда очень высок. Конечно, тут была прямая связь с их оборонной значимостью. Но и предыстория этих работ была яркой. Достаточно упомянуть об открытии Г.Н.Флеровым и К.Л.Петржаком в 1940 г. спонтанного деления урана. К тому времени, о котором идет речь, только в Московском регионе работали группы делительщиков очень высокой квалификации: в лаборатории Г.Н.Флерова (ОИЯИ), в Курчатовском институте и в Физико-техническом институте Обнинска. Со всеми этими коллективами у нас были многообразные контакты. Они были естественны, так как во всех этих институтах в исследованиях участвовали к тому времени уже весьма маститые физики - выпускники физического факультета МГУ, многие из которых будучи студентами, работали в лаборатории Сергея Сергеевича Васильева, выполняли в свое время дипломные работы в ЛЯР еще на Соколе. Кроме того, конечно, во всех этих коллективах с интересом следили за развитием работ по измерению  $\tau_p$ , так как знание этой величины давало дополнительные возможности для изучения физики деления ядер. Если бы всего этого не было, разумеется, никто не дал бы нам бесплатно большое количество очень дефицитного ускорительного времени. Столь благоприятное научное окружение, конечно, помогало, и тем не менее, я хотел бы отметить высокую активность и работоспособность молодых сотрудников, влившихся в наш коллектив. Так как теоретической базой для описания процесса деления является статистическая теория ядерных реакций, то встал вопрос о создании, освоении и модификации программ, привязанных к конкретным задачам наших исследований, чем непосредственно занялась О.В.Фотина. Модификация этих программ прошла ряд этапов. Первым этапом явилось включение делительного канала в программы, ранее разработанные преимущественно для реакции  $(n,\gamma)$ . С помощью полученного варианта программ обсчитывались результаты, полученные с быстрыми нейтронами и ядрами  $U^{238}$  и  $U^{235}$ . Оказа-



лось, что в пределах погрешности эксперимента и уровня знаний параметров, используемых для описания процесса деления с помощью статистической модели, наблюдается неплохое согласие теории и эксперимента в том, что касается зависимости значений  $\tau_p$  от энергии возбуждения. Следующим этапом модификации программ был учет каскадного испускания нейтронов. Напомним, что в реакциях под действием заряженных частиц из-за кулоновского барьера составные ядра оказываются высоковозбужденными и картина деления оказывается сложной. Помимо деления составного ядра, могут быть акты деления ядер, образующихся в результате испускания каскада нейтронов. Статистическая модель, в принципе позволяет рассчитывать, причем на каждом его этапе, вероятности испускания нейтронов, деления, а также энергетические спектры испарительных нейтронов. Так как испарительные нейтроны группируются в области малых энергий, для каждого ядра каскада отбирается некоторый интервал энергий возбуждения. Путем изменения первичной энергии  $E$  можно перемещать пики по шкале энергии и в принципе выводить то или иное ядро каскада в положение, когда соответствующая группа располагается несколько выше барьера и, следовательно, для этого ядра время деления при разных возбуждениях попадает в наиболее удобный для изучения рабочий диапазон деления  $10^{-16}$ – $10^{-21}$  сек.

Возможность обсчитывать эти процессы была важна для нас по ряду причин. Нейтронные измерения, в основном, выполнили свою цель, метод заработал. Вместе с тем оказалось, что работа эта довольно утомительна как для участников с нашей стороны, так и для хозяев (сотрудников ИАЭ), хотя ради справедливости надо сказать, что с их стороны упреков не было. Надо иметь в виду, что деление на быстрых нейтронах – это вторичный процесс, а первичным является реакция с образованием нейтрона. Из-за малой интенсивности нейтронных пучков экспозиции были многодневными. Деление же под действием заряженных частиц – это первичный процесс и хорошие "фрагментограммы" можно было получать за несколько часов. С другой стороны, путем изменения энергии падающих частиц можно выводить разные ядра каскада в положение, удобное для изучения. А учитывая, что первичными могут быть разные частицы (p,d), мы получаем возможность изменять значение  $\tau_p$  не только для разных изотопов, но и для разных элементов. Надо иметь в виду, что



монокристаллы тогда были только для  $U^{238}$  и  $U^{239}$ . Работы по выращиванию монокристаллов с торием только разворачивались.

Разработанный комплекс программ позволил извлекать информацию о зависимости времени жизни деления от энергии возбуждения сразу для нескольких изотопов каскада из одной экспериментальной кривой – зависимости смещения ядра от энергии падающей частицы. Это давало возможность существенно сократить время измерений. В результате в начале 80-х годов, в относительно короткий срок на циклотроне были получены результаты времен деления для разных изотопов. Например, использовалась реакция ( $\alpha, f$ ) на уране, в результате чего были получены данные для изотопов плутония. Таким образом, стало возможным из одного цикла измерений получить информацию, например, сразу для трех изотопов плутония.

Таким образом, в первой половине 80-х годов можно было считать, в основном завершенным этап работ, связанный со становлением метода определения ультрамалых времен протекания реакций, с решением многих вспомогательных задач. Наконец, мы получили возможность перейти к этапу решения чисто физических задач, задач надежного измерения временных характеристик и извлечения из них различной информации, касающейся механизмов деления и свойств ядерного вещества делящихся ядер. Подведение итогов работ предшествующих лет ознаменовалось у нас защитой сразу нескольких диссертаций. Так кандидатские диссертации успешно защитили Н.Г.Еремин, О.А.Юминов, О.В.Фотина, несколько раньше – Н.Г.Чеченин, докторскую диссертацию – Ю.В.Меликов. Произошли и некоторые изменения в составе группы "делительщиков". Увлёкся работами по разработке других методов определения более коротких времен, основанных на интерференционных явлениях, Н.В.Еремин. Как уже говорилось выше, перешел на решение твердотельных проблем Н.Г.Чеченин. Группа несколько позже пополнилась молодыми выпускниками ядерного отделения факультета С.Ю.Платоновым и Д.О.Еременко. У О.В.Фотиной появилась молодая сотрудница – тоже выпускница ядерного отделения – Ю.Л.Парфенова. Перед группой "делительщиков" в обновленном составе и в условиях расширившихся возможностей, возникла задача, с одной стороны, постепенно расширять круг исследованных ядер, а с другой – попытаться извлечь из результатов максимум уже физической информации. Главным было, да и сейчас остается, нащупывать те проблемы



и задачи, в которых знание ( $E^*$ ), хотя бы в принципе, может дать новую информацию, Одна из таких задач вскоре оказалась в центре нашего внимания.

Как уже говорилось выше, зависимость  $\tau_p(E^*)$  для изотопов урана неплохо описывалась с помощью статистической модели. Эксперименты с  $\alpha$ -частицами дали аналогичные зависимости для изотопов плутония. Расчет с помощью статистической модели привел к тому же результату. Выявилось согласие теории и эксперимента, причем, и тут, и там использовались параметры, характеризующие обычный барьер деления. А вместе с тем в эти годы в физике деления происходили важные события. В конце 60-х годов в лаборатории Г. Н. Флерова были обнаружены так называемые быстроделющиеся изомеры, а в первой половине 70-х годов М.В.Струтинским и др. было дано объяснение этого явления. На основе оболочечной структуры ядра была рассчитана детальная форма потенциального барьера деления. Оказалось, что для многих ядер наблюдалась двугорбая кривая потенциальной энергии. Спонтанно делящиеся изомеры связаны с делением из второй ямы, соответствующей большой деформации. Стали накапливаться разнообразные экспериментальные данные, подтверждающие эти факты, некоторые специалисты довольно долго не соглашались с ними. И в этих условиях наши данные с изотопами урана и плутония как будто показывали, что либо барьеры одnogорбые, либо данные не чувствительны к такого рода изменениям формы.

Но как только были получены данные для  $Np$  в реакции с дейтронами, ситуация изменилась. Теоретический расчет показывал, что при разумных параметрах, полученных из других данных, теоретические и экспериментальные данные согласовать не удастся. Оказалось, что время протекания реакции, полученное экспериментально, заметно превышает теоретическое. Анализ, проведенный О.А.Юминовым в рамках двугорбового подхода, позволил связать это расхождение с наличием второй потенциальной ямы. Было получено соотношение, связывающее временную задержку с плотностью состояний во второй потенциальной яме. Оно позволило включить эффект второй ямы в программы, что далее было использовано для обработки экспериментальных данных, и ивлечения из них информации о плотности уровней во второй потенциальной яме и параметров ее барьеров.



Но при этом надо было понять, почему задержка не наблюдалась в изотопах урана и плутония. Последующие исследования показали, что как раз для этих изотопов вторая яма оказалась просто довольно мелкой, кроме того, сказывалась неодинаковая высота барьеров. А позже проведенные исследования показали, что в протактинии, например, напротив, наблюдается значительная задержка. Было ясно, что каждый изотоп требует детального анализа с учетом его структуры, а также всей совокупности данных, получаемых разными другими способами.

В результате на циклотроне при использовании заряженных частиц были изучены временные характеристики деления на 16 ядрах. По каждому ядру проведен детальный анализ, в результате которого определены плотности уровней во второй потенциальной яме. Выявились некоторые общие закономерности. Одна из них связана с симметрией ядер во второй потенциальной яме. Оказалось, что для ряда изотопов Pa, Np и U во второй потенциальной яме отсутствует как зеркальная, так и аксиальная симметрия. Этот цикл работ сопровождался проведением некоторых дополнительных исследований как физического, так и методического характера. Из физических исследований можно указать на расчетные работы, выполненные Д.О. Еременко, по определению вероятности заселения одночастичных состояний после перевала через первый барьер С помощью диффузионного формализма удалось показать, что эта вероятность близка к единице. Проводились усовершенствования и методического плана. Так, при некоторых измерениях при низких энергиях, где экспозиции были относительно велики, вводился учет накопления радиационных дефектов. В программный комплекс был введен вклад предравновесных реакций. В последние годы по результатам этих исследований были защищены кандидатские диссертации С.Ю. Платоновым и Д.О. Еременко. Кроме того, исследования с заряженными частицами составили основную часть успешно защищенной докторской диссертации О.А. Юминова. В настоящее время исследования процесса деления в различных направлениях продолжаются. Но эта тема уже выходит за рамки данной статьи.

Совсем кратко следует сказать о попытках продвинуться по шкале времен в диапазоне меньших значений  $t_p$ . Уже шла речь об опытах с кристаллом  $\text{CaF}_2$ . У изотопа F есть резонансный уровень



при  $E_p = 340$  кэВ с известной шириной, который соответствует значению  $\tau \sim 10^{-19}$  с. При этом средняя величина сдвига оказывается меньше амплитуды тепловых колебаний. Был проведен детальный анализ сдвига центра линейной тени относительно центра осевой. Было выявлено довольно надежно, с хорошей повторяемостью, что сдвиг существует, причем в нужную сторону. Большую работу по обнаружению сдвига провела О.В.Бормот, однако количественные связи характеристик этого сдвига и значения  $\tau_p$  еще предстоит установить.

Интересная работа, связанная с возможностью повышения чувствительности метода, выполнена Г.П.Похилом и аспирантом А.А.Туринге. При изучении эволюции потока частиц, движущихся в каналах на начальном этапе каналирования, ими решена задача об использовании резко неоднородного распределения частиц для измерения распределения частиц по каналу для измерения  $\tau_p$  при значениях, меньших, чем это можно сделать при описанной выше обычной постановке опыта.

Считаю необходимым отметить еще одну работу, выполненную в основном Г.А.Иферовым и Г.П.Похилом на начальном этапе исследования ядерных реакций на кристаллах. Эта работа не связана с изучением  $\tau$ ; она представляет самостоятельный интерес. Речь идет о возрастании выхода продуктов ядерных реакций в тех случаях, когда бомбардируемые ядра вводятся в монокристаллический образец. Так, в кристалл ниобия были имплантированы ядра дейтерия так, что они оказывались в междоузлиях. Затем на кристалл в направлении одной из осей направлялся пучок дейтронов. В результате неоднородности интенсивности пучка по сечению канала, выход продуктов реакции  $d(d,p)$  по сравнению со случаем обычной мишени заметно возрастал. Так был впервые экспериментально обнаружен так называемый "флакспикинг", изучению которого впоследствии было посвящено много работ, выполненных в разных лабораториях.

Заканчивая эти заметки, я еще раз мысленно возвращаюсь в 1949 года, когда я, студент-третьекурсник впервые переступил порог нашей лаборатории, в которой работало тогда всего пять человек. Прошло шестьдесят лет. На днях состоится защита кандидатской диссертации одного из наших молодых сотрудников. После защиты мы соберемся в лаборатории и поздравим новоиспеченного кандидата. И первое, что я сделаю – это вручу ему нашу шутливую



традиционную медаль “За теньевые заслуги”. Ребята сказали, что медаль уже готова и ее порядковый номер где-то около сотового. Это означает, что за шестьдесят лет в нашей лаборатории подготовлено и защищено порядка сотни кандидатских и докторских диссертаций. Я вспоминаю своих учеников, работающих сейчас во многих научных центрах, как в нашей стране, так и за рубежом – какими они приходили когда-то в наши стены – молодыми студентами и аспирантами. Я очень благодарен своим учителям, которые поверили тогда, в далеком 1949 году в студента-третьекурсника и не жалели времени и сил, открывая перед ним всю красоту науки, которая называется ФИЗИКА.

