

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

539.107

**НАЧАЛО ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ В ФИАН  
И НЕКОТОРЫЕ СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
СТРОЕНИЯ АТОМНЫХ ЯДЕР\*)***Н. М. Франк*

Пять лет тому назад, в день семидесятилетия С. И. Вавилова, на мою долю выпала почетная обязанность прочесть доклад, составленный совместно с В. Л. Левшиным и А. Н. Терениным<sup>1</sup>. Этот доклад содержал очерк развития работ С. И. Вавилова в области физики. Он включил в себя только те направления исследований, которые были главными в его деятельности, и не мог претендовать на полноту. К нему можно добавить многое и прежде всего то, что сделано за истекшие пять лет и явилось дальнейшим развитием работ или идей С. И. Вавилова. Ряд вопросов освещен сегодня в докладе И. П. Феофилова на этом заседании. Нужно, однако, помнить, что творческое наследие таких физиков, как С. И. Вавилов, содержит не только труды, подписанные его именем, или труды его сотрудников и учеников, продолжающих разработку тех же проблем. Имеется нечто не менее важное, на что, однако, не может быть ссылок в опубликованных работах. Это — то идейное влияние, прямое или косвенное, которое оказывает ученый. Оно проявляется в особенностях творческого метода, в характере поисков, а иногда и в конкретном выборе тем. Это именно то влияние, которое нужно считать научной школой ученого, которую не следует отождествлять с простой совокупностью тех, кто работал или работает под его непосредственным руководством. Я имею здесь в виду и нечто большее, чем организационную помощь работам, хотя она в условиях современной науки играет важнейшую роль. Существенно и другое — личное влияние ученого, во многом неотделимое и от его человеческих свойств. Это личное влияние С. И. Вавилова было настолько сильным, что все мы, близко с ним общавшиеся, чувствуем его и сейчас, через пятнадцать лет после его кончины.

Мне представляется существенным рассказать в связи с этим о том, что было сделано С. И. Вавиловым для развития работ, лежавших вне круга его непосредственных научных интересов. Здесь можно было бы говорить о многом, и в одном докладе это сделать очень трудно. Поэтому я остановлюсь на частном примере, мне наиболее близком — на начале развития работ по ядерной физике, возникших в Физическом институте АН СССР по инициативе С. И. Вавилова. Я хочу рассказать также и о некоторых современных исследованиях в этой области. С. И. Вавилов оказал сильное влияние на тех, кто начинал эти работы. Естественно

---

\*) Доклад, прочитанный 24 марта 1966 г. на заседании Президиума АН СССР, Отделения общей и прикладной физики, Отделения ядерной физики и Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР, посвященном 75-летию со дня рождения академика С. И. Вавилова.

говорить в связи с этим не только об их результатах, но и о работах, связанных с ними, более молодых физиков.

В 1932 г. Сергей Иванович был назначен директором физического отдела Физико-математического института Академии наук, находившегося, как и сама Академия наук, в Ленинграде. Незадолго до этого институт пережил один из самых трудных периодов своего развития за 200 лет. Был момент, когда весь его штат состоял из директора, двух заведующих отделами и четырех научных сотрудников \*). Время, когда Академия наук станет во главе науки и объединит в своем составе основные институты страны, тогда еще не наступило, но оно уже приближалось. К моменту назначения С. И. Вавилова Физический отдел был еще немногочислен, а характер работы в нем самый патриархальный. Вопреки тому, к чему мы привыкли теперь, у входа вас не встречал вахтер, но зато уютно звенел колокольчик, привешенный к двери. Звенел он, однако, не часто. Народу было немного, и далеко не все, кто числился в штате, ходили в институт. Были, разумеется, и те, кто ходил, и те, кто работал, что, как известно, не одно и то же. Помню, что при первом моем посещении института С. И. Вавилов указал мне на молодого человека, быстро пробежавшего по коридору: «Вот, обратите внимание, он всегда здесь и притом всегда работает». Это было сказано о Леониде Васильевиче Грошеве.

К моменту прихода С. И. Вавилова профиль будущего Физического института еще никак не был определен. Сам С. И. Вавилов отмечает, что существовал проект превращения его в чисто теоретический институт. Для этого были основания. В состав института входил математический отдел, возглавляемый академиком И. М. Виноградовым, и была прекрасная библиотека \*\*), но современной физической аппаратуры было немного. Если принять во внимание, что в Ленинграде тогда были такие первоклассные институты, как Физико-технический, Радиевый и Оптический, созданные Иоффе, Вернадским и Рождественским, то превращение Физического отдела в теоретический могло бы показаться наиболее естественным. Вторая, не менее естественная, возможность состояла в том, чтобы развить здесь те направления оптических исследований, с которыми сам С. И. Вавилов был связан наиболее близко. Однако Сергей Иванович поступил иначе. Дальновидность С. И. Вавилова сказалась в том, что он с самого начала наметил превратить институт в институт многоплановый, включающий различные направления физических исследований. Примерно через два года решением Правительства Академия наук была переведена в Москву, Физический отдел Физико-математического института был превращен в Физический институт, получивший, по предложению С. И. Вавилова, имя П. Н. Лебедева. В институт влились силы московских физиков, и установка С. И. Вавилова на создание Физического института широкого профиля не только оправдала себя полностью, но и оказалась единственно возможной. Дальновидность С. И. Вавилова сказалась и в том, что с самого начала его прихода в институт в Ленинграде он счел необходимым развивать в нем исследования в области ядерной физики.

Ядерная физика в то время вступала в полосу замечательных открытий. Был открыт позитрон, а затем нейтрон. Для физики это были события большого значения и они широко обсуждались. В сентябре 1933 г.

\*) Подробнее об этом рассказано в книге С. И. Вавилова <sup>2</sup>.

\*\*) При переезде в Москву библиотека пополнилась книжным фондом, сохранившимся от Института физики и биофизики, который возглавлял П. П. Лазарев. В дальнейшем она обогащалась не только текущей литературой, но, в значительной степени благодаря усилиям С. И. Вавилова, и редкими научными изданиями. Библиотека ФИАН остается и сейчас лучшей физической библиотекой страны. Ею по-прежнему руководит Т. О. Вреден-Кобецкая, работавшая в библиотеке еще в Ленинграде.

состоялась первая Всесоюзная конференция по атомному ядру, проходившая в Физико-техническом институте в Ленинграде. Среди тех, кто помогал А. Ф. Иоффе в ее организации, был, насколько я помню, и молодой И. В. Курчатов. Конференция была небольшая. Примерно половина докладов была сделана иностранными учеными: Ф. Жолио, П. Дираком, Ф. Перреном, Л. Греем. Кроме того, были доклады Д. В. Скобельцына, С. Э. Фриша, Д. Д. Иваненко, Г. А. Гамова, К. Д. Синельникова и А. И. Лейпунского. В основном они были либо теоретического, либо обзорного характера<sup>3</sup>. Собственные экспериментальные данные содержались, если не ошибаюсь, только в докладе Д. В. Скобельцына. По ряду сообщений состоялись оживленные прения. Кроме перечисленных здесь докладчиков выступали А. Ф. Иоффе, В. Вейскопф, И. Е. Тамм, Я. И. Френкель, В. А. Фок, М. П. Бронштейн и др. Несомненно, что интерес к ядерной физике постепенно возрастал и начался приток в нее новых людей, группировавшихся вокруг тех немногих, кто занимался ее изучением и ранее.

Что касается Физического института Академии наук, возглавляемого С. И. Вавиловым, то каких-либо благоприятных предпосылок для развития в нем ядерной физики не было — не было ни подготовленных кадров, ни аппаратуры. Сам С. И. Вавилов не занимался ядерной физикой и не предполагал ею заниматься. Не было и внешних стимулов для развития работ в этой области. Ядерная физика считалась в то время одним из наиболее бесполезных, с практической точки зрения, разделов физики и не была ведущей среди теоретических проблем науки. Наличие ее в тематике института никто бы не считал обязательным.

Если в таких условиях С. И. Вавилов взялся сам за организацию работ в этой области, то это, конечно, результат очень глубокого понимания им принципиального значения сделанных открытий, а следовательно, и перспектив развития ядерной физики в будущем. С. И. привлек к этой работе нескольких молодых физиков. К числу их, совсем неопытных и неподготовленных к работам по ядерной физике, принадлежал в то время и я. Сергею Ивановичу было бы, конечно, проще предложить мне тему по оптике или люминесценции, к выполнению которой я в известной мере был подготовлен. Между тем он рекомендовал мне перейти из Оптического института, где я тогда работал у А. Н. Теренина, в Академию наук с тем, чтобы заняться работой именно в области ядерной физики.

Известно, что С. И. Вавилов был врагом каких-либо модных увлечений в науке и не одобрял тех, кто гонится за эффектными открытиями. Во главу угла он ставил выяснение физической сущности явлений, исследование их механизма, и полагал, что открытия должны возникать именно на этом пути, хотя и могут быть неожиданными. Его привлекала принципиальная сторона физических явлений. В открытии позитронов его, естественно, интересовал прежде всего процесс рождения пар  $\gamma$ -лучами. Он отмечал, что в этом процессе проявляются такие свойства света, которые не имеют никакого аналога в линейной волновой оптике. Его отношение к принципиальному значению превращения света в частицы вещества, пожалуй, лучше выражают его слова в книге «Глаз и Солнце»<sup>4</sup>. Он сравнивает его там со сказочным превращением мелодии в скрипку. Не случайно поэтому, что по инициативе С. И. Вавилова Л. В. Грошев и я примерно с 1935 г. занялись исследованием механизма рождения пар  $\gamma$ -лучами. Перед нами ставилась задача изучать элементарный акт этого процесса и с этой целью наблюдать рождение пар в камере Вильсона, наполненной тяжелым газом, например, криптоном или ксеноном. С. И. Вавилова занимала здесь, в частности, роль волновых характеристик

световых волн, и в качестве одной из задач он хотел выяснить, как влияет на рождение пар поляризация световых волн. В письме С. И. Вавилова, написанном мне в сентябре 1935 г., когда я по болезни на довольно длительный срок выбыл из института, он сообщает: «Составили план на 1936 г. Основной темой для Вас и Грошева оставили влияние положения электрического вектора  $\gamma$ -волны на распределение пар в пространстве. Думаю, что до поляризованного света удастся добраться не скоро. Однако очень

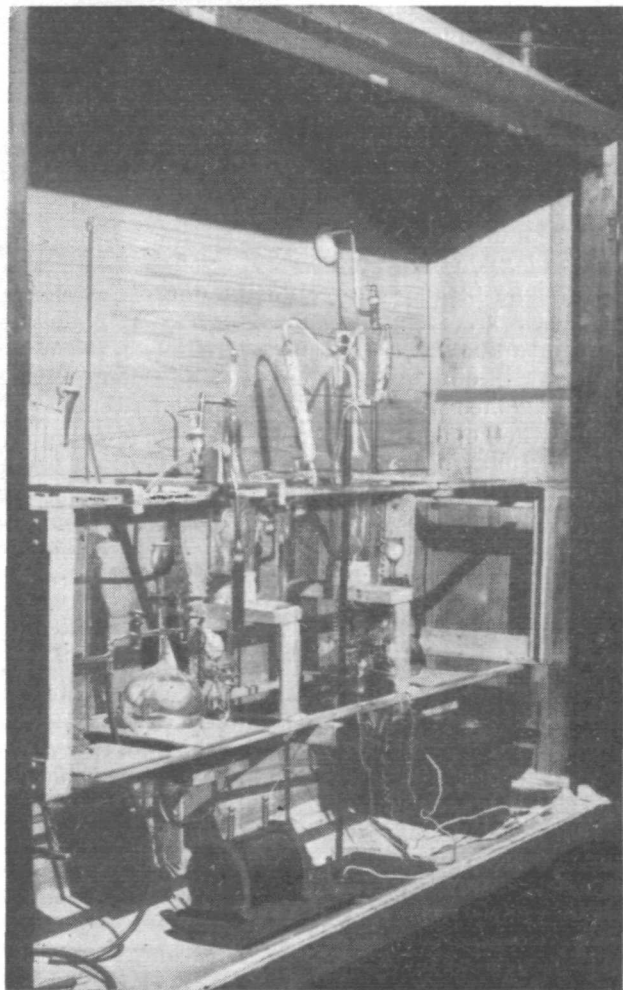


Рис. 1. Эманиционная установка ФИАН.

интересны и опыты с естественными  $\gamma$ -лучами». И далее он добавляет: «С оборудованием довольно благополучно, я привез из Парижа литр ксенона, будет, по-видимому, тяжелая вода, заказан полоний, есть надежда достать радиоторий». Отсюда видно, как непосредственно помогал С. И. Вавилов работам по ядерной физике. С. И. Вавилову в самом деле удалось выписать и получить небольшой импортный препарат радиотория, с которым мы и начали работу. Вскоре, однако, проблеме источников  $\gamma$ -лучей удалось решить радикально. В конце 1936 г. ассигнования, отпущенные Академии наук СССР, оказались, как это иногда бывает, не полностью освоенными и С. И. Вавилову удалось исхлопотать немалую по тем временам сумму денег на приобретение для Физического института радия. Это были препараты радия-мезотория, и для решения вопроса о наиболее

рациональном их использовании С. И. Вавилов собрал небольшое совещание с участием А. Ф. Иоффе и В. Г. Хлопина. Несколько ампул, содержащих различное количество радия (в том числе одна почти в 500 мг эквивалента радия) были оставлены как источники  $\gamma$ -лучей. Большая же часть (около грамма) была в 1937 г. растворена и использовалась для получения радона. Эту работу выполнил собственноручно В. Г. Хлопин, при этом он извлек содержащийся в препаратах радиоторий, которым в дальнейшем пользовались мы с Л. В. Грошевым. Эманиционная установка просуществовала до начала Великой

Отечественной войны. Это была единственная в то время установка, находившаяся в распоряжении физиков Москвы (рис. 1). Радон применялся главным образом в виде радон-бериллиевых источников нейтронов, а частично передавался медицинским учреждениям, у которых количество радона, применявшегося для лучевой терапии, было тогда недостаточным \*).

Наше с Л. В. Грошевым исследование образования пар заняло несколько лет <sup>5</sup>, но до выяснения вопроса о влиянии поляризации света, специально интересовавшего Сергея Ивановича, мы так и не добрались.

Не меньшее значение С. И. Вавилов придавал открытию нейтрона. Он подчеркивал, что это открытие разрушило представление о том, что электрический заряд есть неотъемлемое свойство частиц вещества, бывшее до этого общепринятым. С. И. считал очень важным выяснение основных свойств этой частицы, и в частности, волновых свойств. Дифракция нейтронов, ставшая теперь рабочим методом исследования структуры вещества, в то время еще лежала за пределами возможности эксперимента, она возникла позже.

Придавая большое значение исследованию нейтронов, он предложил своему аспиранту Н. А. Добротину начать работу в этой области. Результатом явилось исследование Н. А. Добротиным методом камеры Вильсона углового распределения протонов, выбиваемых нейтронами из пластинки парафина <sup>6</sup>. Теперь уже немногие помнят, что работа Добротина полностью устранила имевшиеся в то время противоречия в вопросе об угловом распределении при рассеянии нейтронов протонами — вопросе фундаментальном для нейтронной физики \*\*).

Для широты научных интересов С. И. Вавилова характерно, что будучи в Италии в июне 1935 г., он посетил в Риме лабораторию Ферми и в письме оттуда подробно рассказал о первых опытах по непосредственному измерению скорости тепловых нейтронов.

Третьей темой по ядерной физике, возникшей столь же естественно по инициативе С. И. Вавилова, была тема, порученная аспиранту

\*) Вспоминая о работах с радием, нельзя не назвать нескольких имен. Неоднократно нам помогал В. Г. Хлопин, причем надо помнить, что все работы по переработке радиоактивных препаратов проводились тогда в условиях, очень вредных для здоровья. Ему помогал Н. А. Самойло и она же ведала эманационной установкой до своей временной смерти в 1940 г. В 1941 г., после начала войны, Сергей Иванович поручил мне обеспечить сохранность радия. Угроза воздушных налетов на Москву стала реальной, и оставлять радий в растворе было опасно. При попадании бомбы не только погиб бы радий, но и произошло бы радиоактивное загрязнение окружающей местности. Посоветовавшись, мы решили высушить раствор, а соль радия запаять в ампулы. Так как специализированного помещения не было, то пришлось выпаривать раствор на электрической плитке, поставленной прямо во дворе института (это было начало июля и погода стояла прекрасная). Этим занимался Н. П. Страхов, а я выполнял функции лаборанта. Хотя работе иногда мешало объявление воздушной тревоги, она была успешно закончена и ампулы с радием вывезены в безопасное место.

Н. П. Страхов немало сделал для лаборатории атомного ядра и в послевоенные годы, и сейчас нельзя не вспомнить о нем и его самоотверженном труде с большим уважением.

Хочу добавить несколько слов совсем личного порядка. О таинственном светящемся сосуде с радием, запертым в сейфе, из которого по тоненькой трубке выделяется не менее таинственный газ — эманация, я слышал еще школьником от отца. Он был человек широко образованный и, видимо, знал работы Марии Кюри, хотя и был математиком. В то время я, разумеется, совсем не думал и ни в коей мере не мечтал, что буду иметь к этому близкое отношение. Теперь же, пожалуй, даже для школьника все это уже не покажется таинственным. ореол романтики рассеялся. И мы с грустью вспоминаем о тех, кому радий укоротил жизнь. Некоторых из них я здесь назвал.

\*\*) Позже Н. А. Добротиным и К. И. Алексеевой был выполнен ряд работ по искусственной радиоактивности под действием нейтронов. В частности, К. И. Алексеевой было открыто несколько долгоживущих радиоактивных изотопов, например, долгоживущее изомерное состояние серебра <sup>7</sup>.

П. А. Черенкову. Задача была вполне конкретной — сравнить механизм люминесценции ураниловых солей под действием  $\gamma$ -лучей с тем, что получено при возбуждении видимым светом и рентгеновскими лучами. Эта тема была успешно выполнена<sup>8</sup>, но, конечно, теперь всем известна не столько эта работа, сколько результат нового открытия, сделанного Черенковым в ходе исследования  $\gamma$ -люминесценции. Я очень хорошо помню, какое значение придавал С. И. Вавилов уже первым его результатам. В самом начале исследования, еще до опубликования в 1934 г. первой работы<sup>9</sup>, он рассказывал, что Черенков измерил поляризацию свечения и что она, вопреки ожиданиям, такова, что преимущественным направлением электрического вектора является направление пучка  $\gamma$ -лучей. Если это так, — говорил он, то единственным объяснением может быть то, что свечение на самом деле вызывается не  $\gamma$ -лучами, но что источником излучения являются сами электроны, которые создают эти  $\gamma$ -лучи. С. И. Вавилов посоветовал мне познакомиться с Черенковым и с его опытами по поляризации свечения, что я, разумеется, и сделал. Я впервые увидел тогда это свечение и, конечно, убедился, что утверждение Павла Алексеевича о знаке поляризации правильно.

Возвращаясь к письму С. И., о котором я уже говорил, замечу, что в нем упомянуты и планы остальных участников исследований по ядерной физике на 1936 г. В нем говорится, что «Добротин собирается продумать «опыт Физо» с медленными нейтронами; Вернов будет заниматься космическими лучами; Черенков — по-прежнему свечением под действием  $\gamma$ -лучей. Со Скобельцыным договор заключается». Здесь имелся в виду вопрос о периодических приездах Дмитрия Владимировича Скобельцына из Ленинграда в Москву еще до перехода его в ФИАН, что и удалось тогда осуществить. В. И. Векслер в письме еще не упомянут, он начал работать в ФИАН несколько позже, сразу же включившись в исследование космических лучей<sup>\*</sup>). Резюмируя сказанное о ядерной физике, С. И. Вавилов пишет: «В целом я считаю, что лаборатория на правильном пути и года через два из нее выработается то, что нужно».

Однако первые шаги в ядерной физике в институте не были легкими. Институт нередко обследовали и критиковали. Если это была ведомственная комиссия, то она отмечала, что поскольку ядерная физика наука бесполезная, то нет оснований для ее развития. При обсуждениях в Академии наук мотив критики был иной. Ядерной физикой не занимается здесь никто из признанных авторитетов, а у молодых ничего не выйдет. В самом деле, единственный специалист в области ядерной физики проф. Л. В. Мысовский, принимавший участие в работах лаборатории в ленинградский период, в Москву не переехал и контакт с ним постепенно был утерян. Критике подвергался и сам С. И. Вавилов за работу Черенкова. Я очень хорошо помню язвительные замечания по поводу того, что в ФИАН занимаются изучением никому не нужного свечения неизвестно чего под действием  $\gamma$ -лучей. В то время необходима была очень глубокая убежденность в том, что ядерная физика имеет принципиальное значение, и весь авторитет С. И. Вавилова, чтобы отстоять ее развитие в институте.

Что касается самих молодых физиков, то они и в самом деле нуждались в помощи, и помощь со стороны С. И. Вавилова всегда была очень конкретной. Это были советы опытного физика-экспериментатора, человека необычайной широты знаний. При этом он зачастую рекомендовал: «А вы поговорите с тем-то» или «а вы поинтересуйтесь работой такого-то». Память С. И. была исключительная и он всегда помнил, кто чем и когда занимался,

---

<sup>\*</sup>) Горько сознавать, что Владимира Иосифовича Векслера теперь уже нет с нами. Он скончался 22 сентября 1966 г.

и великолепно знал научную литературу, и притом не только по своей специальности.

Разумеется, начав работу по изучению пар, мы учились у Д. В. Скобелы, задолго до его перехода в ФИАН, и методу камеры Вильсона, и методам работы с  $\gamma$ -лучами, и по его совету воспроизвели для нашей работы конструкцию камеры Вильсона, аналогичную разработанной Жолио-Кюри (рис. 2). Как уже отмечалось, С. И. Вавилов активно заботился о том, чтобы возможность такой регулярной помощи была нам обеспечена. Трудно понять, почему было столько желающих считать положение катастрофическим и почему вообще так часто думают, что молодых ученых следует

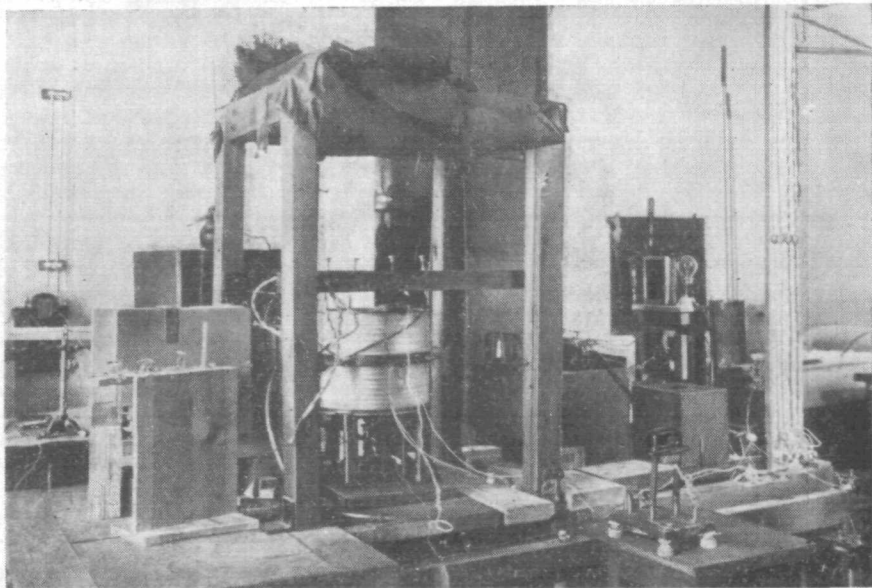


Рис. 2. Герметическая камера Вильсона для исследования рождения в газе пар от  $\gamma$ -лучей.

вести за ручку, как маленьких детей. Вероятно, всем поколениям физиков, начинающим самостоятельную работу, в той или иной мере суждено слышать одну и ту же фразу: «Ничего не выйдет!» Большая удача встретить на своем жизненном пути человека, который не говорит «ничего не выйдет», но вместо этого способен дать совет, который поможет направить работу так, чтобы она вышла. С. И. Вавилов всегда мог дать такой совет, а эта способность гораздо более ценная, чем просто благожелательное отношение.

Заканчивая обзор начальной стадии работ по ядерной физике в ФИАН, я хочу добавить несколько слов и еще по одному вопросу, в какой-то мере с ней связанному. В нашей стране в то время начались полеты в стратосферу и интерес к исследованиям, связанным с большими высотами, возрастал. С. И. Вавилов был председателем Комиссии по изучению стратосферы и организатором конференции по этой проблеме (1934 г.).

В 1934 г. по инициативе моего брата Г. М. Франка началась подготовка к первой высокогорной эльбрусской комплексной экспедиции. Эту инициативу сразу поддержали и С. И. Вавилов и А. Ф. Иоффе, и в экспедиции уже в первый год приняли участие ряд институтов самого различного профиля. Первым начальником экспедиции был профессор Военной электротехнической академии А. А. Яковлев. Затем ряд лет экспедицией



руководили Г. М. Франк и В. И. Векслер. В первый же год работы экспедиции в ней приняла участие группа ФИАН, состоявшая из Добротина, Черенкова и Франка. Мы провели тогда первые наблюдения космических лучей камерой Вильсона на различных высотах от 2000 м (Терскол) до 4300 м (Приют одиннадцати). Кроме того, по предложению С. И. Вавилова, вместе с группой ГОИ, состоявшей из академика А. А. Лебедева и И. А. Хвостикова, мы занимались изучением свечения ночного неба <sup>10</sup>. Условия работы, особенно для исследования космических лучей, тогда были еще чрезвычайно неблагоприятными. Работать для уменьшения



Рис. 3. Репетиция работы с камерой Вильсона в «полевых условиях» на крыше Академии наук СССР в Ленинграде в 1934 г. (Слева Н. А. Добротин, справа И. М. Франк.)

радиоактивного фона пришлось прямо на льду ледника, притом даже без палатки (рис. 3 и 4). В качестве источника света мы использовали Солнце, направляя его свет от зеркала гелиостата в камеру Вильсона. Тем не менее камера Вильсона работала и даже удавалось получать фотографии. Это было началом серии работ по изучению космических лучей, которые велись в эльбрусской экспедиции в последующие годы, главным образом В. И. Векслером и Н. А. Добротиным. Примерно в то же время С. Н. Вернов применил метод шаров-радиозондов, изобретенных Молчановым для наблюдения космических лучей <sup>11</sup>. Несколькою годами позже он совершил морскую экспедицию к экваториальным широтам. В результате этих работ Вернов открыл существование сильного широтного эффекта космических лучей в стратосфере <sup>12</sup>. Вспоминаю, как при обсуждении этой работы в Академии наук С. И. Вавилов отстаивал полученные С. Н. Верновым результаты от нападок со ссылкой на иностранные авторитеты, у которых такой результат не получился. Замечу, что вместе с С. Н. Верновым в экспедиции был и Н. Л. Григоров, теперь профессор МГУ, а в то время лаборант ФИАН. Разумеется, от всех этих работ до космической станции «Протон» расстояние велико и по числу прошедших с тех пор лет, и по уровню развития нашей науки и техники. Но все же это было начало того пути, по которому предстояло идти, и имя С. И. Вавилова, активно помогавшего исследованиям уже на первых шагах этого пути, не должно быть



забыто. Разумеется, роль С. И. Вавилова в развитии ядерной физики на этом не закончилась. Она была очень велика и в последующие годы. Достаточно сказать, что он был председателем Совета, созданного при Президенте Академии наук СССР, ведавшего координацией работ по мирному использованию атомной энергии. Здесь можно было бы вспомнить о многих сторонах его деятельности. Однако я хочу коснуться, хотя бы вкратце, некоторых современных проблем ядерной физики.

Прежде всего несколько слов об излучении, открытом П. А. Черенковым. С. И. Вавилов в первой своей работе<sup>9</sup> безошибочно назвал его «синим



Рис. 4. Сборка камеры Вильсона на одном из ледников Эльбруса.

свечением», хотя тогда увидеть его цвет было абсолютно невозможно. При столь малых интенсивностях глаз уже не обладает способностью цветного зрения. Теперь же не представляет трудности не только видеть цвет этого свечения, но и фотографировать его (см. цветные фотографии на вкладном листе) и даже получать в импульсном реакторе моментальные цветные фотографии. Свечение воды в реакторе легко увидеть, но там его очень трудно исследовать. Никто даже не пытается это делать. Я уже говорил однажды<sup>1</sup>, что рассматривая такие фотографии, нельзя не думать, что было бы без опытов Черенкова, основанных на методах анализа природы излучения, развитых Вавиловым? Не считалось бы и сейчас свечение воды в реакторах явлением несущественным, возникающим в результате какой-либо люминесценции? Ведь люминесценция — явление весьма распространенное и в факте свечения воды нет ничего удивительного.

Я привел фотографию, полученную с импульсным реактором, имея в виду рассказать немного о проблемах нейтронной физики, связанных с изучением строения ядер, для которых использование импульсных источников нейтронов очень плодотворно.

Реальное ядро — это система, строение которой сложно, и здесь физика столкнулась с задачами, решение которых чрезвычайно трудно. Можно спросить себя, правильно ли заниматься ими сейчас, когда даже в проблемах элементарных взаимодействий отдельных частиц, существенных и для строения ядра, и для ядерных сил, еще столько неизвестного?

Здесь, пожалуй, уместна аналогия с работами С. И. Вавилова. В самом деле, отдавая должное значению проблем атомной спектроскопии, сам он занимался изучением оптических свойств очень сложных молекул. Он исходил из того, что закономерности сложных систем могут быть

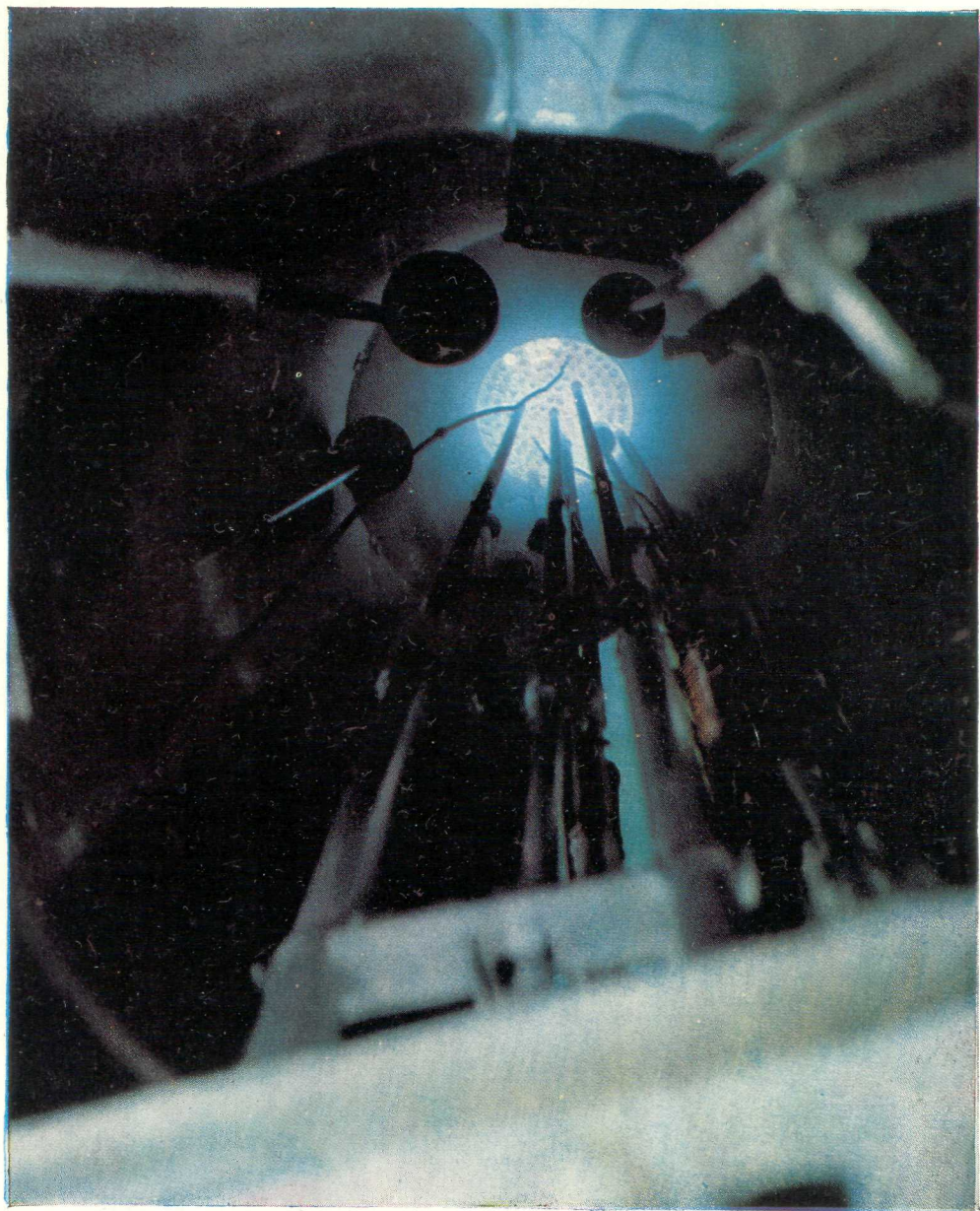
специфическими для них и притом в силу их статистического характера даже более простыми, чем для атомов. Успех его работ показал, что это действительно так, и путь изучения от простых систем к сложным не всегда самый короткий путь. Нечто аналогичное произошло с изучением атомного ядра. Радужные надежды на то, что проблема ядерных сил будет быстро решена физикой элементарных частиц и ядро станет возможным рассчитать подобно тому, как был рассчитан атом Бора, не оправдались. Наоборот, проблема элементарных частиц представляется с годами все более и более сложной, так что сам термин элементарная частица в известной мере уже выглядит как нечто устарелое.

По своему принципиальному значению проблема элементарных частиц, конечно, по-прежнему занимает центральное место в физике, не отменяя, разумеется, актуальность других разделов ядерной физики. Если, однако, первоначально пытались свести проблемы структуры ядра целиком к проблеме элементарных частиц, то теперь возникла другая тенденция, а именно: рассматривать их совсем независимо. Обе эти крайние точки зрения не оправданы. Глубокая связь между этими проблемами, разумеется, существует, и вместе с тем пути развития физики строения ядра и физики элементарных частиц во многом различны. Современная теория ядра развила самостоятельные методы, позволяющие многое понять в свойствах ядерной материи.

Не затрагивая всех проблем изучения ядра, я хочу остановиться на задачах нейтронной спектроскопии. Здесь немало аналогий с оптической спектроскопией, поскольку используется излучение, не несущее электрического заряда и являющееся эффективным методом возбуждения ядра, аналогично тому, как это делает свет, воздействующий на электронную оболочку атомов и молекул. Подобно свету медленный нейтрон не вносит в ядро значительного импульса, в то время как энергия возбуждения ядра при захвате нейтрона велика. Однако, в отличие от света, у нас нет призмы, с помощью которой можно было бы разложить пучок нейтронов в спектр по энергиям. Возможности дифракционных методов, если выйти за пределы области тепловых нейтронов, также ограничены из-за малости длины волны нейтрона. Поэтому основным в нейтронной спектроскопии является так называемый метод времени пролета, принцип которого необычайно прост. Используется импульсный источник нейтронов, излучающий в какой-то момент времени «белый спектр» нейтронов. Если наблюдать нейтроны на некотором расстоянии от источника, то они разложатся в спектр по времени пролета — каждой скорости нейтрона будет соответствовать свое время, в течение которого он будет лететь до детектора. Наблюдают те или иные действия нейтронов, например, возникновение гамма-лучей при захвате нейтронов, как функцию времени пролета; тем самым определяют зависимость вероятности этого процесса от энергии нейтрона. При этом, конечно, как во всяком спектрометре, надо учитывать его разрешающую способность и светосилу, зависящую от ряда факторов. Разрешающая способность, очевидно, тем больше, чем короче нейтронная вспышка, т. е. чем точнее задан момент вылета нейтронов и чем больше пролетная база.

Сопоставление нейтронной спектрометрии с оптической полезно быть может также и для того, чтобы понять ее значение. В самом деле, оптической спектрометрией далеко не исчерпываются методы физики строения вещества. Однако каждому известно, как много задач может решаться и действительно было решено спектральными методами.

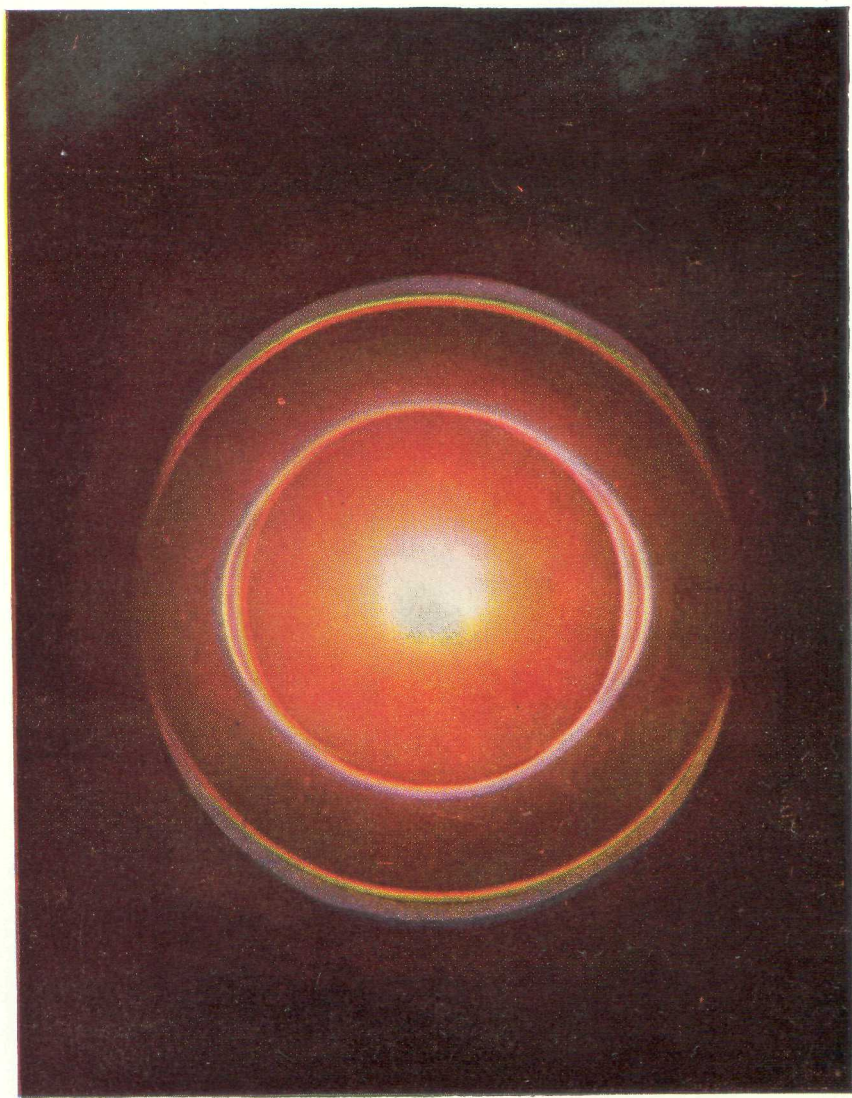
Нечто аналогичное имеет место и в ядерной физике. Современная ядерная физика располагает богатейшими и разнообразными методами исследования. Среди них нейтронная спектроскопия подобно оптической в неко-



Моментальная цветная фотография свечения Вавилова — Черенкова, полученная за время одного импульса мощного импульсного реактора типа Трига. Фотография любезно прислана из США доктором Марком. Из фотографии видно, как красиво и эффектно выглядит излучение Вавилова — Черенкова, возникающее в воде, окружающей активную зону реактора.







Цветная фотография излучения протонов с энергией  $660\text{ Мэв}$  в кристалле исландского шпата, полученная В. П. Зреловым<sup>13а</sup>. Согласно теории в двоякопреломляющей среде могут возникать два конуса волн излучения Вавилова — Черенкова. Оба они видны на фотографии. Внешний круг — проекция конуса, образуемого обыкновенной волной; эллипс — то же для необыкновенной волны; круг, пересекающий эллипс, — свечение стеклянной линзы.

Эта фотография наглядно иллюстрирует, какие тонкие особенности излучения Вавилова — Черенкова могут изучаться с помощью пучка быстрых частиц от ускорителей.



торых случаях открывает возможности, недостижимые другими путями, а иногда она является необходимым дополнением для других методов. И вместе с тем нейтронная спектроскопия — это лишь один из разделов не только ядерной физики, но даже спектроскопии атомных ядер, которая пользуется и другими средствами.

Я буду говорить главным образом о результатах, полученных на нейтронном спектрометре, который применяется в лаборатории нейтронной физики в Дубне. Здесь используется реактор ИБР, имеющий весьма своеобразную конструкцию<sup>14</sup>. Специальное механическое устройство периодически меняет в нем коэффициент размножения нейтронов, делая реактор

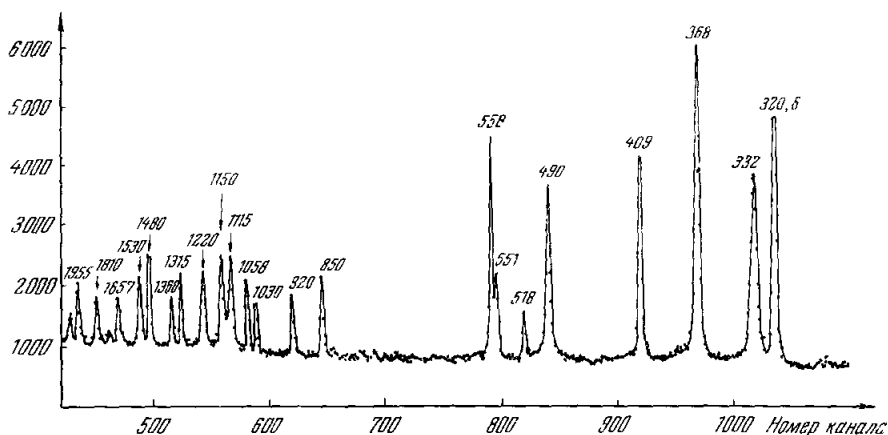


Рис. 5. Выход  $\gamma$ -лучей при захвате нейтронов ядрами германия как функция энергии нейтронов. Номер канала — величина, пропорциональная времени пролета, т. е. обратно пропорциональная скорости нейтрона. Цифры — кинетическая энергия нейтронов в электронвольтах, соответствующая отдельным резонансам.

на короткий срок надкритическим. В результате реактор с заданной частотой генерирует импульсы нейтронного излучения длительностью 40—60 мксек. Хотя этот реактор также называют импульсным (ИБР расшифровывается как импульсный быстрый реактор), но по принципу устройства и механизму действия он существенно отличается от обычных импульсных реакторов. По аналогии с ускорителями, применяющимися для тех же целей, его следовало бы называть «мигающим». Он генерирует периодически повторяющиеся импульсы излучения. Большой поток нейтронов позволяет использовать для анализа скоростей нейтронов пролетную базу (т. е. расстояние от реактора до детектора) рекордной длины — 1000 м. В последнее время для работ, требующих наибольшей разрешающей способности, реактор используется как импульсный размножитель нейтронов, создаваемых мигающим ускорителем — инжектором. В качестве инжектора используются фотонейтроны от электронного ускорителя — микротрона на 30 Мэв. Принцип такого ускорителя двадцать лет назад был предложен В. И. Векслером<sup>15</sup>. В дальнейшем ускоритель нашел широкое применение. Этим он обязан главным образом работам С. П. Капицы<sup>16</sup>.

На рис. 5 для примера показана одна из экспериментальных кривых, полученных в Дубне с помощью установки реактора ИБР с микротроном при пролетной базе 750 м. Кривая дает вероятность поглощения нейтронов в германии как функцию энергии нейтронов<sup>17</sup>. По оси ординат нанесен выход гамма-лучей, возникающих при захвате нейтронов, по оси абсцисс —



величина, обратно пропорциональная скорости нейтрона. По внешнему виду картина весьма напоминает то, что получается с помощью спектрофотометра для оптических спектров. Очевидно, что каждому пику на кривой должно соответствовать определенное возбужденное состояние ядра. Большая часть резонансов является возбужденными состояниями ядра изотопа германия с массовым числом 74. На рис. 5 представлены результаты для сравнительно медленных нейтронов — энергия их от 300 до 2000 эв, в то время как энергия возбуждения ядра при этом очень велика. При захвате нейтрона здесь выделяется энергия связи, равная 10 млн. 140 тысячам электронвольт. Чтобы получить энергию возбуждения, нужно прибавить к этой энергии связи кинетическую энергию нейтрона, величина которой написана над каждым из пиков. В сущности удивительно, что состояния ядер при таких высоких энергиях возбуждения столь узкие. Ширины уровней здесь всего десятые электронвольта и это при энергии возбуждения свыше 10 млн. электронвольт. Видно также, что нейтронная спектроскопия позволяет изучать особенности этих спектров во всех их деталях. В этом смысле этот метод не имеет себе равных.

Две особенности такого рода спектров бросаются в глаза. Во-первых, в расположении резонансов нет никакой видимой закономерности. Могут быть близкие уровни, а могут быть и далеко расставленные. Например, уровни 551 и 558 эв отличаются по энергии всего на 7 эв, а далее до 850 эв, т. е. в интервале 300 эв, нет заметных резонансов. Более детальное изучение расположения уровней также не открывает здесь никакой закономерности, кроме статистической. Ничего похожего на спектральные серии оптических спектров, по крайней мере пока, не обнаруживается.

Вторая особенность состоит в том, что резонансы могут быть совсем различной силы. Есть очень высокие пики, а могут быть и очень слабые, например, 518 и 558 эв. Величину резонанса определяют два фактора: вероятность того, что нейтрон захватится ядром, и вероятность того, что после этого произойдет испускание гамма-лучей. Удастся определить каждую из этих вероятностей в отдельности — их характеризуют величинами, называемыми нейтронной и  $\gamma$ -шириной резонанса. Оказывается, что вероятность испускания  $\gamma$ -лучей, т. е. гамма-ширина резонанса, — величина почти постоянная для разных резонансов ядра. Это значит, что время высвечивания, т. е. длительность  $\gamma$ -люминесценции, возбуждаемой нейтронами, не зависит от энергии нейтрона. Как правило, не очень существенно варьирует и спектр  $\gamma$ -лучей. Здесь полная аналогия с фотолюминесценцией сложных молекул, исследованных школой Вавилова, где длительность свечения и его спектр в широких пределах не зависят от энергии фотонов.

Совсем иначе обстоит дело для вероятности поглощения нейтронов. Нейтронная ширина, как оказалось, меняется от уровня к уровню чрезвычайно сильно и притом нерегулярно. Мы не можем объяснить, почему у данного резонанса большая или маленькая нейтронная ширина, но мы можем на опыте определить, какому статистическому закону подчиняется распределение ширин резонансов. При определенных предположениях теория позволяет предсказать, какое распределение следует ожидать, и опыт, по-видимому, это подтверждает. Данные пока еще не точны и не очень полны, но все же это реальный успех, достигнутый трудами многих физиков.

Пока неясно, можно ли здесь претендовать на нечто большее, чем чисто статистический результат. Во всяком случае нужно пытаться понять, с какими особенностями движения частиц в ядре связана столь различная восприимчивость ядра к возбуждению его нейтронами. Для этого нужно выяснить, не связана ли нейтронная ширина с еще какими-либо свойст-

вами резонанса. Пока нет надежных успехов в этих поисках, но интересные попытки сделаны. В работе Попова и Квитека<sup>18</sup> исследовано поглощение нейтронов ядрами самария и неодима. Особенность этих ядер состоит в том, что при захвате нейтрона здесь, кроме испускания  $\gamma$ -лучей, происходит испускание  $\alpha$ -частиц. Вероятность этого ничтожно мала. Примерно на миллион захваченных резонансных нейтронов вылетает одна  $\alpha$ -частица.

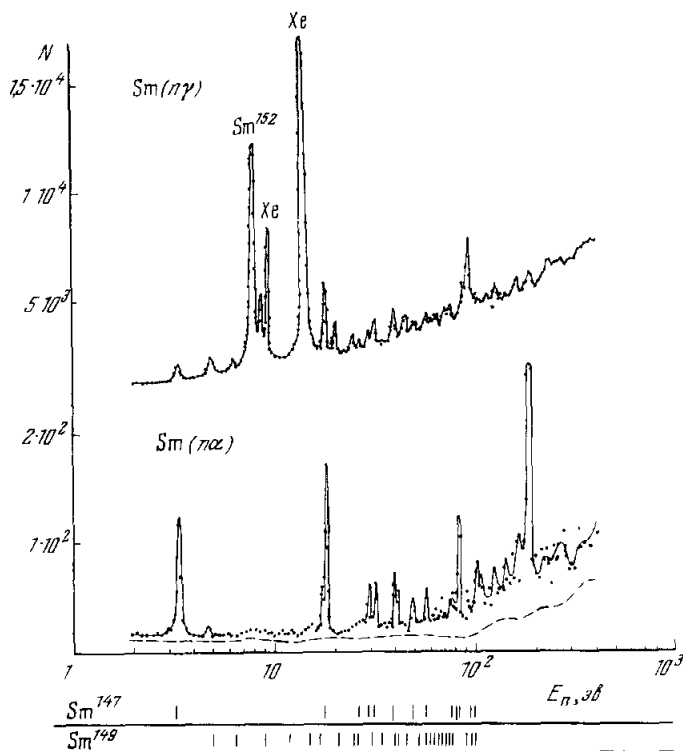


Рис. 6. На графике приведены зависимости вероятности взаимодействия нейтронов с ядрами изотопов самария от энергии нейтронов. Верхняя кривая аналогична рис. 6. Она дает выход гамма-лучей как функцию энергии нейтронов. Нижняя кривая дает вероятность испускания альфа-частиц из тех же ядер. Ход кривых совсем различен, т. е. вероятность испускания гамма-лучей и вероятность испускания альфа-частиц возбужденными ядрами самария — величины, не пропорциональные друг другу.

И все же эту вероятность удалось измерить (рис. 6). Надежды здесь возлагаются на то, что  $\alpha$ -радиоактивность — один из наиболее изученных процессов, и по особенностям  $\alpha$ -распада можно многое узнать о состояниях ядра, из которого происходит распад. Первые результаты интересны, но пока рано судить, в какой мере эти надежды оправдаются.

Уже из сказанного видно, что интерпретация результатов нейтронной спектроскопии — задача сложная. При этом следует принять во внимание следующее. Медленный нейтрон возбуждает не все состояния ядра, а только часть, которая характеризуется вполне определенными квантовыми числами и притом разными в различных ядрах. Например,

резонансы германия, которые я демонстрировал, имеют квантовые характеристики, а именно спин и четность  $5^+$  или  $4^+$ ; для самария они  $3^-$  и  $4^-$  и т. д. \*). Не одинакова и энергия возбуждения, которую получают различные ядра при захвате нейтрона. В результате даже качественно характер нейтронных спектров в разных ядрах различен. У одних ядер резонансы расположены густо — среднее расстояние порядка  $1 \text{ эв}$ , у других они могут быть в сотни раз реже. Казалось бы, что характеристики таких спектров несопоставимы. Однако это не так. Если вернуться к величине, которую называют нейтронной шириной, и просуммировать нейтронные ширины резонансов, лежащих в заданном, но достаточно большом интервале энергии, а полученную сумму разделить на величину этого интервала, то найденное таким образом среднее будет иметь вполне определенное значение — его называют обычно силовой функцией (в определении используются так называемые приведенные ширины). Оказывается, что силовая функция во всяком случае мало зависит от плотности уровней. Если уровни редкие, то в среднем их нейтронная ширина больше, если уровней много, то ширина каждого в среднем меньше. Таким образом, сумма ширин для ядер с близким атомным весом остается почти постоянной.

Правила сумм известны и в оптических спектрах, и их наличие связано с очень общими законами. Средняя характеристика резонансов — силовая функция — также должна быть непосредственным проявлением очень общих свойств ядерной материи. Существенно, что здесь мы уже кое-что знаем. Одним из наиболее замечательных достижений ядерной физики является так называемая оптическая модель ядра. Эта модель возникла совсем независимо от спектрометрии медленных нейтронов и обоснована опытами иного рода — а именно исследованием рассеяния быстрых нейтронов и протонов ядрами. Эта модель приписывает ядрам вполне определенный и практически одинаковый коэффициент преломления и поглощения для нейтронных волн. Тем самым можно предсказать среднюю величину поглощения нейтронов ядрами, причем различие в величинах поглощения зависит от различия размеров и от различия форм ядер. Из теории следует, и в какой-то мере это очевидно, что предсказания оптической модели и величина силовой функции должны быть непосредственно связаны между собой. Опыт показывает, что в тех, пока не очень многочисленных случаях, когда сопоставление возможно, согласие вполне удовлетворительное.

Отсюда видно, что в отношении определения средних величин нейтронная спектроскопия в самом деле достигла больших успехов, и что их измерение существенно для теории ядра. В частности, значительный вклад в определение этих средних величин внесен ядерной лабораторией ФИАН, использующей оригинальный метод спектрометрии — спектрометрию по времени замедления нейтронов в свинце <sup>19</sup>.

Однако все эти результаты относятся к средним величинам, точность которых пока невелика. Было бы крайне удивительно, если бы по мере их уточнения не вскрылись иные более тонкие закономерности. Существующие данные, однако, еще недостаточны для такого анализа. Одна из трудностей состоит в том, что в большинстве случаев неизвестны квантовые характеристики наблюдаемых резонансов. Например, в нейтронном спектре германия мы не знаем, какие из резонансов характеризуются квантовыми числами  $4^+$ , а какие  $5^+$ . Таким образом, не известно то, что называют

\*) При захвате ядром медленного нейтрона (так называемого  $s$ -нейтрона) к спину ядра прибавляется или вычитается величина спина нейтрона, равная  $1/2$ , а четность состояния не меняется. Таким образом, нейтрон возбуждает резонансы той же четности, как основное состояние бомбардируемого ядра, а по величине спина отличающиеся от него на  $+1/2$  или  $-1/2$ .

элементарной природой излучателей, изучением которых в оптике занимался С. И. Вавилов.

Работы Вавилова и его школы показали, что мощным средством исследования является использование поляризованного света. Это в такой же мере правильно и для поляризованных нейтронов, и для поляризованных ядер. Однако это направление работ не развивалось потому, что, в отличие от света, у нас не было хорошего поляризатора пучка нейтронов резонансной области энергий. Сейчас в результате работ Ф. Л. Шапиро с сотрудниками задачу получения такого поляризатора удалось решить<sup>20</sup>. Я покажу первый результат, полученный для ядра гольмия (рис. 7)<sup>21</sup>. Нижняя

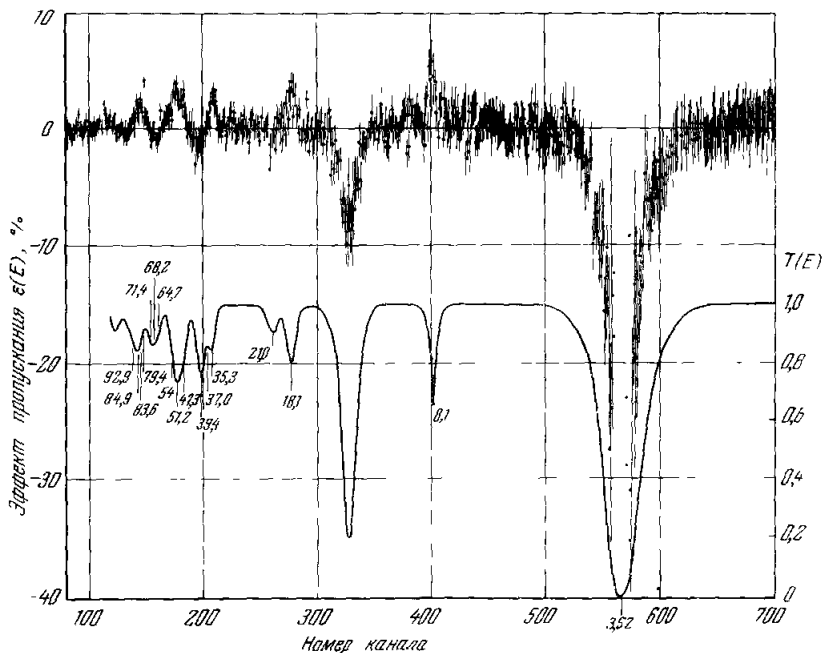


Рис. 7. Взаимодействие нейтронов с ядрами гольмия. Нижняя кривая — прозрачность мишени из гольмия как функция энергии нейтронов. Каждому резонансу соответствует резкое возрастание поглощения нейтронов, т. е. провал на кривой пропускания. На верхней кривой приведена разность относительной величины пропускания для двух знаков поляризации нейтронов относительно направления поляризации ядра. Если поглощаются нейтроны, поляризованные так же, как ядро, то разность отрицательна, и на кривой получается провал (например, при энергии 3,92 эв). Если поглощаются нейтроны со спином, ориентированным в противоположном направлении, то разность положительна (так например, для резонанса 8,1 эв). Первый случай соответствует сложению спинов ядра и нейтрона и так как ядро гольмия имеет спин  $7/2$ , то спин резонанса  $7/2 + 1/2 = 4$ . Во втором случае  $7/2 - 1/2 = 3$ .

кривая — это спектр поглощения для ядра гольмия в случае использования неполяризованных нейтронов. Ряд провалов — это линии поглощения ядра гольмия. На верхней кривой показана разность относительной величины пропускания образца поляризованных ядер гольмия, измеренной для двух знаков поляризации нейтронов. В зависимости от того, какой из двух сортов нейтронов поглощается, эта разность положительна или отрицательна. Провалы соответствуют резонансам гольмия с квантовым числом 4, а выступы — резонансам гольмия с квантовым числом 3. Для ряда резонансов это различие видно на глаз.

Я хочу добавить еще несколько слов об одной проблеме, связанной с нейтронами, получившей сейчас большое развитие. Мы довольно хорошо знаем первые возбужденные уровни ядра. Нейтронная спектрометрия дает сведения о состояниях выше энергии связи нейтрона. Однако мы мало знаем о том, что находится в промежутке — в обширном интервале, достигающем 10 млн. электронвольт. Одним из методов исследования и здесь является нейтронная физика. После захвата нейтрона испускаются гамма-лучи. Они возникают в результате перехода на множество уровней, расположенных как раз в этом промежутке, который трудно доступен. Количество уровней, расположенных здесь, огромно. Изучать этот спектр трудно.

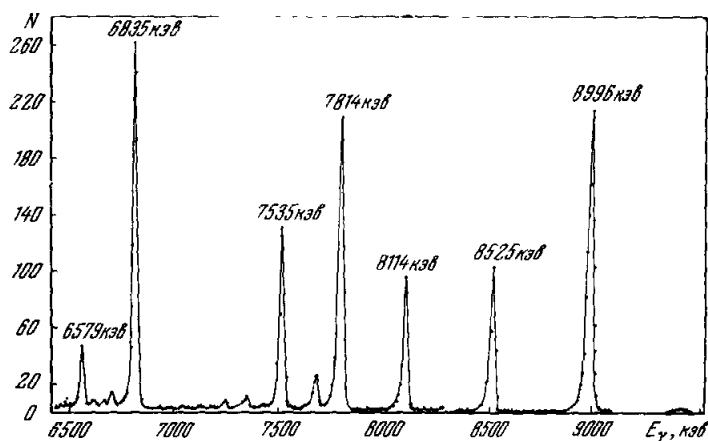


Рис. 8. Спектр гамма-лучей при захвате тепловых нейтронов ядрами никеля.

Очень значительный шаг в методах эксперимента, а затем в результатах исследования был сделан Л. В. Грошевым с сотрудниками. Я покажу результаты, полученные для никеля<sup>22</sup>. На первый взгляд картина спектра  $\gamma$ -лучей похожа на то, что наблюдается в случае нейтронных спектров, однако масштаб здесь совсем иной (рис. 8). Если там речь шла о электронвольтах и сотнях электронвольт, то здесь наблюдаются линии, лежащие в интервале примерно в 3 млн. электронвольт. Это сравнительно простой случай. Очень часто картина сложнее. И в сущности, совсем не тривиально, почему бывают такие простые случаи. Возникает множество вопросов о том, почему при испускании гамма-лучей значительное предпочтение имеют переходы только на некоторые уровни, какова их природа и как они расположены? Анализ этих спектров теперь уже становится возможным, и поэтому данные группы Грошева все в большей степени переходят из стадии накопления результатов в стадию их интерпретации.

Я охватил своим докладом историю двух интервалов работ по ядерной физике, разделенных примерно тремя десятилетиями. Думаю, что я действовал в духе традиций С. И. Вавилова, всегда отмечавшего преемственность в развитии науки. Недаром его книга по истории ФИАН, о которой я упоминал, называется «Физический кабинет, физическая лаборатория, Физический институт Академии наук СССР за 220 лет».

В своем сообщении я несколько раз обращался к аналогиям с оптическими исследованиями. Мы знаем, что работы школы Вавилова превратили учение о люминесценции, находившееся в стадии описательной, в точную науку о законах преобразования света. Если говорить о нейтронной спектроскопии, то ее задачи уже давно вышли за рамки простого определе-

ния нейтронных констант, необходимых для практических целей. Все в большей степени она занимается изучением механизма процессов. Все же, если продолжать и дальше сопоставление с учением о люминесценции, то по возможностям анализа мы стоим, вероятно, где-то на уровне работ С. И. Вавилова двадцатых годов. И, как обычно, в современной ядерной физике продвижение вперед — это коллективный труд физиков многих лабораторий.

Физический институт  
им. П. Н. Лебедева АН СССР

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Л. Левшин, А. Н. Теренин, И. М. Франк, УФН 75, 216 (1961).
2. С. И. Вавилов, Физический кабинет, физическая лаборатория, Физический институт АН СССР за 220 лет. Изд. АН СССР, 1954.
3. Атомное ядро (сборник докладов 1 Всесоюзной ядерной конференции). Проблемы новейшей физики, вып. XXIV, ГТТИ, 1934 г.
4. Книга «Глаз и Солнце» была напечатана в 1927 г., а затем с дополнениями и изменениями неоднократно переиздавалась. Она вошла в т. IV Собрания сочинений С. И. Вавилова (Изд-во АН СССР, 1956), после того издавалась Академией наук СССР в 1956 и 1961 г.
5. Л. В. Грошев, И. М. Франк, Изв. АН СССР (Отделение матем. и естеств. наук) 57 (1938); 763 (1938); Л. В. Грошев, ДАН СССР 26, 426 (1940); 26, 432 (1940).
6. Н. А. Добротин, ДАН СССР 2, 516 (1935); Труды ФИАН 1, вып. 1, 3, 1936.
7. К. И. Алексеева, ДАН СССР 18, 553 (1938).
8. П. А. Черенков, Труды ФИАН 1, вып. 1, 41, 1936.
9. П. А. Черенков, ДАН СССР 2, 451 (1934); С. И. Вавилов, ДАН СССР 2, 457 (1934).
10. Труды Эльбрусской экспедиции 1934—1935 гг. Изд. АН СССР, 1936 г.
11. С. Н. Вернов, Труды Всесоюзной конференции по изучению стратосферы 31 марта — 6 апреля 1934. Изд. АН СССР, 1935.
12. С. Н. Вернов, ДАН СССР 14, 263 (1937).
13. С. Н. Вернов, А. В. Миронов, ДАН СССР, 23, 137 (1939).
- 13а. В. П. Зрелов, ЖЭТФ 46, 447 (1964).
14. Г. Е. Блохин и др., Атомная энергия 10, 437 (1961).
15. В. И. Векслер, ДАН СССР 43, 346 (1944).
16. С. П. Капица, С. П. Быков, В. Н. Мелехин, ЖЭТФ 39, 997 (1960); ЖЭТФ 41, 368 (1961); С. П. Капица, Атомная энергия 18, 203 (1965).
17. Х. Малецкий, Л. Б. Пикельнер, И. М. Саламанич, Э. И. Шаппов, Доклад Л. Б. Пикельнера на Международном совещании МАГАТЭ по применению реакторов и бустеров быстрого действия. Дубна, 1966 г.
18. Ю. П. Попов, И. Квитек, Препринт ОИЯИ, Р-2695, 1966.
19. А. А. Бергман и др., Доклад на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1955 г.; Труды ФИАН 24, 3, 1964.
20. Ю. В. Таран, Ф. Л. Шапиро, ЖЭТФ 44, 2185 (1963); Д. Драгическу, В. И. Лушиков, В. Г. Николенко, Ю. В. Таран, Ф. Л. Шапиро, Phys. Letts 12, 334 (1964).
21. В. П. Алфименков, В. И. Лушиков, В. Г. Николенко, Ю. В. Таран, Ф. Л. Шапиро, Ядерная физика 3, 55 (1965).
22. Л. В. Грошев, А. И. Демидов, Н. Шадиев, Ядерная физика 3, 444 (1966).