

**УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**

53(092)

**ИГОРЬ ВАСИЛЬЕВИЧ КУРЧАТОВ В ЛЕНИНГРАДСКОМ  
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ****А. П. Гринберг, В. Я. Френкель****1. ВВЕДЕНИЕ**

1. Биография И. В. Курчатова давно привлекает внимание физиков, историков науки, писателей и, прежде всего, читателей. В «Персональном указателе литературы» о Курчатове<sup>1</sup>, изданном в 1977 г., насчитывается более 100 наименований работ, посвященных тому или иному этапу его деятельности. Естественно, что основное внимание в этих работах уделено главному делу жизни Курчатова: исследованиям по проблеме урана. В числе многих причин, определивших успех возглавленных Курчатовым работ, должна быть названа замечательная научная школа, которую он прошел в стенах Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ)\*). Вместе с тем исследования Игоря Васильевича в ЛФТИ в 1925—1943 г., т. е. времени, оказавшем решающее влияние на формирование его творческой манеры, определившем широкий круг его научных интересов, уделено неоправданно мало внимания. В задачу предлагаемой статьи входит хотя бы частично восполнить этот пробел.

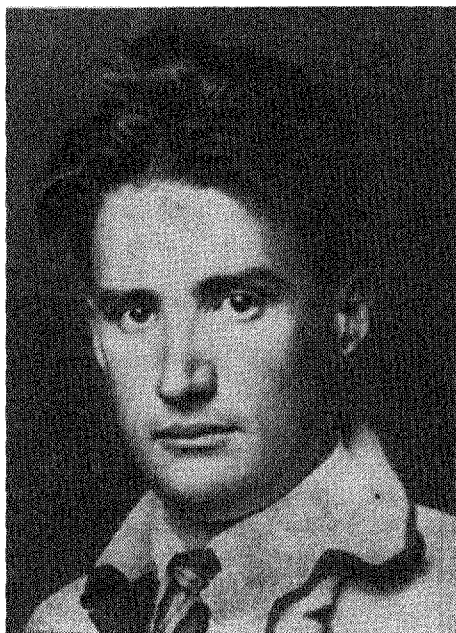
2. Сведения о первых годах жизни и учебы И. В. Курчатова содержатся в ряде изданий, из числа которых в первую очередь следует назвать книги И. Н. Головина<sup>2</sup> и П. Т. Астапенкова<sup>3</sup>. Мы приведем выдержку из начала одной из многочисленных автобиографий Игоря Васильевича: «Родился в январе 1903 г. на Симском заводе б. Уфимской губернии в семье землемера. С 1913 г. жил в Симферополе, где в 1920 г. окончил гимназию, а в 1923 г. физико-математический факультет Крымского университета. Конец 1923 г. и начало 1924 г. работал в качестве наблюдателя в электрическом павильоне Павловской магнитно-метеорологической обсерватории. Здесь мною было выполнено первое самостоятельное исследование. Конец 1924 г. и начало 1925 г. работал ассистентом физики в Бакинском политехническом институте, где проводил исследования по электропроводности твердых диэлектриков.

Осенью 1925 г. Ученым советом Физико-технического института был избран физиком ин-та. В дальнейшем работал в этом институте в должности старшего физика, заведующего отделом, начальника группы изучения твердого тела, заведующим лабораторией» (Архив ИАЭ им. И. В. Курчатова, ф. 2, оп. 1, ед. хр. 169, л. 57; автобиография написана в 1935 г.)\*\*).

\*) «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе АН СССР на протяжении первых 30 лет своего существования многократно менял свое название. Так, к моменту прихода в него И. В. Курчатова (1925 г.) он назывался Государственным физико-техническим рентгенологическим институтом. Однако в 30—40-е годы, о которых по преимуществу идет речь в нашей статье, институт назывался Ленинградским физико-техническим, и это название мы будем использовать в дальнейшем.

\*\*) В дальнейшем ссылки на документы различных архивов будут даваться в тексте, ссылки на опубликованные работы — в списке литературы.

Этот отрывок можно было бы подробно прокомментировать. Ограничимся указанием на то, что симферопольскую гимназию Игорь Курчатов окончил с золотой медалью и что столь же успешно он учился в университете, который закончил досрочно. В 1920 г. — первом году пребывания в университете — Курчатов мог слушать там лекции по физике Я. И. Френкеля, по математике — В. И. Смирнова, Н. С. Кошлякова и М. Л. Франка; ректорами университета были В. И. Вернадский и А. А. Байков. Со всеми



Игорь Васильевич Курчатов. Первая половина 20-х годов.

этим людьми судьба сводила его в дальнейшем. Павловская обсерватория — филиал Главной геофизической лаборатории им. Воейкова (Ленинград). В автобиографиях И. В. Курчатова отмечается и кратковременная его работа еще в одном сходном по профилю учреждении — Центральной гидрометеорологической станции Черного и Азовского морей; с июля по октябрь 1924 г. И. В. Курчатов выполнял там обязанности «инспектора Гиместанции» и сделал две опубликованные работы о сейсах в Черном и Азовском морях. Одновременно с работой в Павловске он учился в течение года на кораблестроительном факультете Ленинградского политехнического института, откуда был отчислен... за неуспеваемость. Этот эпизод, в свое время огорчивший Игоря Васильевича (он специально разъяснил причины отчисления — перегруженность работой в Павловске — в одном из документов 20-х годов), ныне может лишь вызвать улыбку.

3. В многочисленных автобиографиях И. В. Курчатова, в заполнявшихся им личных листках по учету кадров и т. д. точное время прихода

№№ п/п	Дата	Звание и должность
1 *)	1 октября 1925 г.	Научный сотрудник 1-го разряда
2 *)	1 марта 1928 г.	Старший инженер-физик
3 *)	16 сентября 1930 г.	Зав. лабораторией (сейсмоэлектриков)
4	18 сентября 1930 г.	Зав. отделом общей физики
5	1 июля 1931 г.	Начальник группы физики кристаллов
6	1 мая 1933 г.	Начальник отдела (ядерной физики)
7	16 февраля 1934 г.	Начальник отдела
8	16 ноября 1936 г.	Зав. лабораторией ядерных реакций
9	Апрель 1942 г.	Зав. лабораторией № 3 ЛФТИ (танковой брони)
10 *)	Август 1943 г.	Зав. лабораторией № 2 с переводом на работу в Москву
11 *)	15 января 1944 г.	В связи с переходом на оплату по отдельной ведомости снят с оплаты и штатов ЛФТИ

\*) Взяты из трудовой книжки данные помечены звездочкой у порядкового номера в первом столбце. Остальные сведения почерпнуты из Архивов ЛФТИ и ИАЭ им. И. В. Курчатова.

его в ЛФТИ и дальнейшее «продвижение по службе» варьируется, хотя и не в очень широких пределах. Это и естественно: можно ошибиться в указании месяца и, тем более, числа, или точного названия должности. Возможность последней неточности усугубляется тем, что в довоенные годы номенклатура сотрудников ЛФТИ, названия лабораторий, отделов, бригад, групп часто менялись. Поэтому мы считаем целесообразным привести уточненные данные, пользуясь документами из архивов ФТИ им. А. Ф. Иоффе и ИАЭ им. И. В. Курчатова, в частности, данными трудовой книжки Игоря Васильевича (она приложена к его личному делу, переданному в свое время из ЛФТИ в ИАЭ; см. Архив ИАЭ, ед. хр. 169). Первые записи в книжке относятся к 1925 г. Весь этот материал систематизирован нами в таблицу.

## 2. РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ

1. Игорь Васильевич Курчатов приехал из Баку в Ленинград осенью 1925 г. и с 1 октября приступил к работе в ЛФТИ, куда его приняли сверх штата, в качестве физика (научного сотрудника 1-го разряда — по другому документу) Ленинградской физико-технической лаборатории (ЛФТЛ). То было примечательное для ЛФТИ время. Институт стремительно расширялся. Всего лишь за два года до этого, т. е. в 1923 г., он переехал из тесных комнат Лаборатории общей физики Ленинградского политехнического института в новое здание (в котором и сейчас помещается администрация института, библиотека и ряд научных лабораторий), и, тем не менее, к концу 1925 г. вновь ощущалась нехватка площади. Еще большие трудности были связаны с недостатком денежных средств. Наркомпрос, его Главный ученый совет, в ведении которых находился ЛФТИ, не могли обеспечить растущие потребности института в кадрах, помещениях, оборудовании. Вместе с тем, поддерживая прямые связи с вузами и прежде всего с Ленинградским политехническим институтом, ЛФТИ все теснее взаимодействовал с промышленными предприятиями в Ленинграде и за его пределами. Это взаимодействие А. Ф. Иоффе и его ближайшие помощники по институту — А. А. Чернышев, Н. Н. Семенов, Д. А. Рожанский, В. Н. Глазанов и др. осуществляли через специальную лабораторию, подведомственную ВСНХ. ВСНХ имел в своем распоряжении большие средства и, главное, непосредственно планировал развитие советской промышленности. Ленинградская Физико-техническая Лаборатория фактически начала свою деятельность еще в конце 1924 г. Положение о Лаборатории было принято на заседании Президиума ВСНХ 19 октября 1925 г. В задачи ЛФТЛ входило, в соответствии с этим положением, проведение физико-технических исследований и их применение к нуждам промышленности, выполнение работ по ее заданиям, стажировка в ЛФТЛ заводских инженеров, организация технических консультаций и т. д. 1 марта 1926 г. ЛФТЛ начала функционировать в специально переданном ей здании в Яшумовом переулке, д. 1 а (ныне улица Курчатова). Поначалу в штате ЛФТЛ было всего 45 человек, но число их быстро росло, причем часть сотрудников одновременно работала в ЛФТИ.

Научные интересы и исследования А. Ф. Иоффе, которые он вел еще в 10-е годы, находились в примечательном соответствии с запросами развивающейся советской промышленности. Его работы по физике рентгеновских лучей и их влиянию на электрические свойства твердых тел стимулировали постановку в ЛФТИ и ЛФТЛ исследований по рентгеноструктурному анализу и дефектоскопии. Изучение упругих и прочностных свойств кристаллов определяло развитие контактов отдела ЛФТЛ, воз-

главленного Н. Н. Давиденковым, с металлургическими заводами, со службой эксплуатации железных дорог.

2. Специальный интерес для нас представляет широкий фронт работ по физике диэлектриков и механизму их электропроводности, который также восходил к дореволюционным работам А. Ф. Иоффе на эту тему, начатым еще в Мюнхене. Строительство электростанций и линий передач, нужды кабельной промышленности требовали действенной помощи от физиков. Именно это направление прикладных исследований — изучение условий протекания пробоя диэлектриков, их изолирующих свойств при гигантских напряжениях — возглавил А. Ф. Иоффе в рамках отдела общей физики ЛФТЛ. Он привлек к работам в этом направлении А. Ф. Вальтера, Б. М. Гохберга, Н. Н. Семенова, В. А. Фока — из числа своих учеников по ЛФТИ или по физико-механическому факультету ЛПИ. Однако отдел общей физики ЛФТЛ нуждался в значительно большем числе энергичных сотрудников.

А. Ф. Иоффе в сентябре 1924 г., во время работы IV съезда русских физиков, проходившего в Ленинграде, обратил внимание на К. Д. Синельникова, о котором знал от своего коллеги (и свойственника), проф. С. Н. Усатого. К. Д. Синельников был учеником Усатого по Таврическому (Симферопольскому) университету, а затем его сотрудником по университету в Баку. Хотя К. Д. Синельников заранее и не представил доклада на съезд, он выступил на нем с сообщением о своих работах по физике диэлектриков, которое понравилось А. Ф. Иоффе. Абрам Федорович пригласил молодого человека на работу к себе в институт, в котором тот и стал трудиться с 1 декабря 1924 г. К. Д. Синельников, поддержанный С. Н. Усатым, порекомендовал А. Ф. Иоффе своего товарища по Симферополю и Баку — Игоря Васильевича Курчатова, также занимавшегося работами по физике диэлектриков. С этой области исследований и начался физтеховский период деятельности И. В. Курчатова, продолжавшийся около двух десятков лет.

3. «Пробой пера» на новом месте работы для двадцатидвухлетнего Курчатова, опубликовавшего к тому времени 5 работ, было методическое исследование (выполненное совместно с К. Д. Синельниковым)<sup>4</sup>, посвященное прохождению медленных электронов через тонкие металлические фольги. Задача такого рода возникла в связи с актуальными в то время попытками помещения фотоплетки за пределы трубки Брауна (прообраза современного катодного осциллографа). Предполагалось, что ускоренные в вакуумной трубке электроны, прострелив тонкое металлическое окошко, смогут непосредственно воздействовать на пленку. Этому вопросу была посвящена заметка американского физика Гартига<sup>5</sup>, получившего странные результаты, согласно которым медленные электроны с энергией в несколько электрон-вольт проходят сквозь алюминиевую фольгу толщиной в 3—9 мкм. В совершенстве фольги, т. е. в отсутствии в ней сквозных отверстий, Гартиг убеждался простым просмотром ее на просвет. Синельников и Курчатов на аналогичной установке поначалу подтвердили полученные американским исследователем результаты, а затем однозначно показали, что они определяются несовершенством фольги — наличием в ней невидимых при рассмотрении на свет отверстий, существование которых, однако, молодые советские физики доказали, наблюдая в жидкости прошедшие через фольгу пузырьки воздуха. После этого, работая с действительно бездефектной фольгой, авторы<sup>4</sup> получили результаты, свободные от противоречий.

Указанная работа не получила дальнейшего развития, она интересна именно как стартовая для Курчатова (а также как свидетельство необычности — с современной точки зрения — задач, стоявших в то время перед

экспериментаторами: трудно представить себе, что в середине 20-х годов фотографирование кривых, вычерчиваемых электронным пучком трубки Брауна, осуществлялось внутри этой трубки).

4. Изучение физики диэлектриков переживало в 20-е годы пору интенсивного развития. К концу прошлого века работами прежде всего Варбурга было доказано, что перенос тока в стекле производится ионами натрия. Оказалось, что для стекла и других твердых диэлектриков с достаточной точностью соблюдается закон Фарадея. Что касается закона Ома, то от него имелись существенные отступления. В широком интервале температур неясна была зависимость электропроводности от температуры.

Сотрудники лаборатории А. Ф. Иоффе включились в этот комплекс вопросов, волновавших его в тот момент.

Еще А. Ф. Иоффе установил, что основное падение (скачок) потенциала приходится в некоторых диэлектриках на приэлектродные области. Считалось, что такой эффект имеет место лишь при высоких температурах. В работе И. В. Курчатова и К. Д. Синельникова<sup>6</sup> эта точка зрения отвергалась. Основное внимание уделялось при этом исследованиям приэлектродного слоя, методам измерения его толщины и определению падения напряжения на нем. И. В. Курчатов и его коллега вплотную подходят к проблеме пробоя диэлектриков.

К тому времени большое распространение получила тепловая теория пробоя. В условиях, когда тепло, выделяемое при прохождении тока через диэлектрик, не полностью отводится за его пределы, идет разогрев образца, вызывающий увеличение тока и соответствующее возрастание джоулева тепла: процесс лавинообразно нарастает — вплоть до пробоя (термическое разрушение диэлектрика). Однако при низких температурах, достаточной площади поверхности электродов и не слишком больших толщинах образца пробой осуществляется за счет не теплового, а какого-то иного механизма. Поскольку в исследованных диэлектриках электронной проводимости не наблюдалось, А. Ф. Иоффе, К. Д. Синельников, И. В. Курчатов и П. П. Кобеко в работе<sup>7</sup> выступили с поддержкой и развитием выдвинутого несколько ранее А. Ф. Иоффе предположения о том, что пробой происходит в результате развития ионной лавины, приводящей к ударной ионизации. Соответствующая идея состояла в том, что длина свободного пробега иона в кристалле достаточна для накопления энергии, необходимой для выбивания нового иона. Если, однако, испытываемые образцы достаточно тонки, так что на пути иона к электроду «укладывается» всего несколько длин свободного пробега, лавина не успевает сформироваться в масштабах, соответствующих пробую. Значит, должен иметь место эффект возрастания пробивного напряжения с уменьшением толщины образца. Опыты подтвердили, казалось бы, существование этой тенденции. А отсюда вытекали широкие возможности для технических применений — создание высоковольтных слоистых изоляторов, составленных из тонких изолирующих прослоек (типа стекла, слюды, олифы и т. д.), а также высоковольтных «аккумуляторов».

Дальнейшие исследования (теоретические<sup>8</sup> и экспериментальные<sup>9</sup>) показали, что концепция ионной лавины и результаты соответствующих опытов должны быть пересмотрены, поскольку в последние вкралась систематическая ошибка при определении толщины изучавшихся слоев.

5. Существенно, однако, что в ходе этих работ лаборатории А. Ф. Иоффе, и в частности — работ И. В. Курчатова и его коллег, был получен и ряд положительных, сохранивших свое значение и поныне результатов: были найдены новые изоляционные материалы, выполнены прецизионные эксперименты, доказавшие справедливость закона Фарадея<sup>10</sup>, проложен путь к построению картины электрической прочности кристаллов, разви-

та глубокая аналогия между механическими и электрическими свойствами кристаллов (роль примесей и др. искажений решетки в процессах, связанных с механическим и электрическим разрушением).

Отметим, что эффект роста пробивного напряжения с уменьшением толщины образца позднее надежно наблюдался в ряде экспериментов с диэлектриками, однако пробой здесь возникал за счет развития электронной лавины, так что можно сказать, что сама идея об ударной ионизации в твердых телах, хотя и в модифицированной форме, получила свое развитие и подтверждение. Более того, исследования  $p-n$ -переходов продемонстрировали существование того же самого эффекта в полупроводниках<sup>11 \*</sup>). При этом  $p-n$ -переход, из которого свободные носители были «вытянуты» под влиянием сильного электрического поля, оказался аналогом тонких приэлектродных слоев в диэлектрике, ответственных за высоковольтную поляризацию и другие эффекты. Прямые эксперименты в полупроводниках (германии и кремнии), выполненные в конце 50-х годов, т. е. еще при жизни А. Ф. Иоффе и И. В. Курчатова, показали, что пробивная напряженность поля на  $p-n$ -переходе возрастает с уменьшением его толщины. Таким образом, здесь имеет место возникновение лавины носителей и «эффект Иоффе», как это и подчеркивается в<sup>11</sup>.

6. К рассматриваемому циклу исследований по электрической прочности диэлектриков примыкает статья П. П. Кобеко и И. В. Курчатова<sup>12</sup>, опубликованная в журнале «Физика и производство». Она представляет определенный интерес, поскольку свидетельствует об активных контактах молодых физтеховцев с промышленностью, в данном случае — с заводом «Красный треугольник». Развитию таких контактов, осуществлявшихся А. Ф. Иоффе и его коллегами, был призван способствовать и сам журнал. В его редколлегию входили Г. В. Брауде, А. Ф. Вальтер, И. В. Курчатов и Д. А. Рожанский.

Статья Кобеко и Курчатова называлась «Работа Физико-технического института по связи с производством на заводе «Красный треугольник». Она посвящена анализу продукции эбонитного цеха завода. Оказалось, что на заводе не проводились исследования электроизолирующих свойств выпускавшейся продукции. Одна из задач, которая ставилась при проведении соответствующих исследований в ЛФТИ, сводилась к тому, чтобы «дать возможность цеху ориентироваться в нужных для него размерах лаборатории, а также возможных научно-исследовательских задачах». Мы видим, что Кобеко и Курчатов принимали самое непосредственное участие в движении по организации заводских лабораторий. Это мероприятие, проводившееся по инициативе руководства ЛФТИ, трудно переоценить. Что касается существа исследований, то в процессе их проведения был обнаружен большой разброс в значениях пробивных напряжений листового эбонита. Как было показано в<sup>12</sup>, это было связано с существованием «слабых мест» на листах эбонита, которые оказались возможным наблюдать визуально. Они возникали из-за несовершенства технологии, относящейся к процессам вулканизации каучука, которую предлагалось усовершенствовать. «Мы надеемся, — писали авторы в заключение своей работы, — что затронутые в этой статье вопросы будут решены уже в лаборатории завода; проект лаборатории нами разработан и представлен на рассмотрение администрации «Красного треугольника».

7. Исследования И. В. Курчатова по электрическим свойствам диэлектриков можно считать прелюдией к серии работ по сегнетоэлектричеству, принесшей ему и его коллеге и товарищу, Павлу Павловичу Кобе-

\*) В указанной статье имеется подробная библиография соответствующих экспериментальных и теоретических работ.

ко, мировую известность. Однако прежде чем перейти к их обзору, остановимся на некоторых других работах Игоря Васильевича по физике диэлектриков и полупроводников.

Первая такая работа <sup>13</sup> (как и большинство других в 1927 — 1933 гг., совместная с П. П. Кобеко) возникла в процессе критического пересмотра, столь характерного для стиля работ И. В. Курчатова, данных исследования немецкого физика Трея по униполярной проводимости солей  $\text{AgI}$  и  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Детектирующие свойства образцов, спрессованных из порошков, не зависели от расположения точек контакта с электродом в виде острия. (Вопрос о возможности подобной избирательности представлялся естественным во времена детекторных радиоприемников!) Измерения Кобеко и Курчатова, выполненные с использованием зондов Иоффе, показали, что в образце происходит образование непроводящих слоев йода (или, соответственно, серы) в прианодной области и что наблюдавшееся спадание тока во времени связано с возрастанием сопротивления образцов. Таким образом, униполярность определялась геометрией обоих электродов (острия и пластины) и соответствующим различием в скорости спадания тока со временем. Последнее обстоятельство нашло свое отражение и во временном ходе коэффициента выпрямления.

Авторы <sup>13</sup> указали в заключение, что наблюдаемое Треем явление униполярной проводимости (неправильно истолкованное им в терминах подвижности ионов, участвующих в процессах электролитической проводимости при повышенных температурах), характерно не только для изученных им образцов  $\text{AgI}$  и  $\text{Ag}_2\text{S}$ , но проявляется при температурах порядка  $300^\circ\text{C}$  у целого ряда других веществ — в стекле, слюде,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . Во всех этих диэлектриках при приложении напряжения осуществляется образование изолирующих слоев и приэлектродной области — процесс, названный Кобеко и Курчатовым формовкой (впервые он наблюдался, как это отмечалось, Варбургом на примере стекла). Подобное расширение области проявления того или иного эффекта, своеобразное его обобщение, очень характерно для стиля работы И. В. Курчатова.

Этим же проблемам посвящена более подробная статья Кобеко, Курчатова и Синельникова <sup>14</sup>, в которой объектом исследований была униполярная проводимость образцов из порошкообразных  $\text{CuS}$  и  $\text{Cu}_2\text{S}$  (сернистые соединения меди — полупроводники; рассматриваемая работа является, вероятно, первым исследованием в этой области физики у нас в стране). Прежде всего авторы доказали, что в условиях опыта в электропроводности принимают участие ионы меди: закон Фарадея, хотя и не точно, но соблюдался. Эффект униполярности не зависел от материала электродов, если один из них был плоским, а другой — острием (в соответствии с результатом предыдущей статьи). Однако униполярность была зафиксирована и тогда, когда оба электрода были плоскими, но один из них обязательно должен был быть алюминиевым. Авторы предположили, что и в этом случае имеет место резкая разница в величинах поверхностей контактов электродов с изучаемым образцом.

Другим фактором, который определял униполярность, было образование металлических нитей в диэлектрическом кристалле. Дело в том, что отложение металла в процессе электролитической проводимости некоторых твердых тел происходит не равномерно по всей поверхности, а в виде тонких нитей, прорастающих сквозь испытываемый образец. На положительное острие такие нити (мостики) прорасти не успевают, так как на нем очень быстро образуется формовочный изолирующий слой. Когда же анодом является электрод большой площади, происходит быстрое прорастание нитей. Таким образом, и этот эффект приводит к униполярности: по металлическим нитям протекает электронный ток. Закон Фарадея при этом

не проявляется, так как проводимость практически сразу же перестает быть «электролитической».

Совокупность металлических нитей-мостиков, прорастающих в кристалле по выделенным направлениям его решетки, напоминает дерево. Поэтому такого рода эффект получил название «дендритного» (а проводимость — «дендритной»). В более поздних работах, выполненных в стенах Украинского физико-технического института в Харькове И. В. Курчатовым и его коллегами (А. К. Вальтером, К. Д. Синельниковым и О. Н. Трапезниковой), этот эффект, как таковой, подвергся тщательному изучению. При этом авторами были сделаны впечатляющие снимки пронизывающих кристалл металлических нитей.

В задачу авторов <sup>14</sup> входило доказательство адекватности описанной выше «формовочно-дендритной» модели эффекта униполярности. Дополнительными опытами и изучением шлифов алюминиевого электрода было показано, что лишь 5% его поверхности имеет контакт с образцами из  $\text{CuS}$  и  $\text{Cu}_2\text{S}$  (а равно и с некоторыми другими специально изучавшимися металлами, в том числе с медью). Это было объяснено тем, что большая часть поверхности контакта покрыта тонкой пленкой окисла.

На основе электрических измерений было установлено, что при положительном потенциале на обоих электродах происходит отложение слоя серы (так называемая формовка), причем когда анодом был алюминиевый электрод, отложение слоя серы заканчивалось быстро именно из-за небольшой эффективной площади контакта. Процессы формирования и распада приэлектродного изолирующего слоя серы, а также роста дендритов подробно исследовались с применением импульсной методики подачи напряжения на образцах.

Если в установившемся режиме при разных знаках напряжения на алюминиевом аноде коэффициент выпрямления (униполярности) был равен примерно  $10^3$ , то на обычном переменном токе эта величина составляла 15—20. Следует однако сказать, что «электролитические» выпрямители, очень своеобразная физика которых была подробно изучена в ЛФТИ, в основном в работах Кобеко, Курчатова и Синельникова, уступали селеновым и купроксным выпрямителям. Как раз в рассматриваемое время этот тип выпрямителей начал выпускаться отечественной промышленностью. Поэтому И. В. Курчатов более не обращался к кругу физических и технических проблем, рассмотренных в <sup>14</sup>, и на последнем этапе своих исследований по электрическим свойствам твердых тел выполнил несколько работ по вентильным фотоэлементам на основе  $\text{Cu}_2\text{O}$ , интересуясь главным образом их спектральными характеристиками <sup>15</sup>.

8. Последнюю дань исследованиям электрических свойств твердых тел И. В. Курчатов отдал работой 1933 г. <sup>16</sup>, выполненной совместно с Н. А. Ковалевым, Т. З. Костиной и Л. И. Русиновым (в будущем — его сотрудником в Лаборатории атомного ядра ЛФТИ). Работа эта носила прикладной характер, а ее постановка определялась запросами электротехники — необходимостью защиты линий электропередач от перенапряжений, вызываемых ударами молнии. Сходная задача уже ставилась перед ЛФТИ в более ранние годы — в связи с защитой от перегрузок линий связи; перегрузки определялись соседством этих линий с линиями электропередач. Она была решена в свое время А. А. Чернышевым путем создания специальных вакуумных разрядников. В случае защиты высоковольтных линий эта проблема решалась с помощью твердых разрядников с саморегулирующимся сопротивлением. Оно включалось в цепь параллельно защищаемому объекту после срабатывания искрового промежутка с соответствующим образом подобранным расстоянием между электродами. Твердые сопротивления, разработанные с этой целью за рубежом, пред-



ставляли собой специальные керамические массы (тайрит — в США, оцелит — в Германии). Технология их изготовления была очень сложна, в связи с чем от ее воспроизведения желательно было отказаться. Таким образом, необходимо было разработать какой-либо эквивалент. В качестве такового И. В. Курчатов и его сотрудники выбрали прессованные порошки карборунда ( $\text{SiC}$ ) с определенным наполнителем — «связкой». Подобные порошки выпускались в других целях ленинградским заводом «Ильич». Необходимым условием работы таких составов в защитных устройствах было наличие зазоров (переходных контактов) между зернами карборунда. Все устройство в целом должно было отвечать ряду специфических требований, главным из которых было уменьшение сопротивления с ростом напряжения (нелинейная вольт-амперная характеристика), устойчивость контактов, малая инерционность и большой срок службы, определявшийся процессами старения карборунда и скреплявшей его массы в процессе прохождения через них тока.

Авторами <sup>16</sup> была разработана специальная технология получения карборундовых соединений, методика исследования их электрических характеристик (при импульсных нагрузках), позволившая подобрать необходимые эксплуатационные и геометрические параметры. Разработанное соединение марки С-100 характеризовалось прогнозированной в статье долговечностью не менее 5 лет и как по этому, так и по другим параметрам оценивалось как вполне рентабельное и конкурентоспособное по отношению к зарубежным образцам. Стабильность вольт-амперной характеристики карборундовых соединений была столь высока, что А. З. Шакиров, в развитие изложенных исследований, предложил использовать С-100 в приборах для измерения высоких напряжений.

Для объяснения механизма работы карборундовых саморегулирующихся соединений авторы, критически рассмотрев соответствующие американские работы (связывавшие «саморегуляцию» с возникновением микроскопических искровых разрядов между зернами карборунда), остановились на волново-механическом туннельном механизме прохождения тока (электронов) через тонкие зазоры между зернами, согласно которому ток по степенному закону зависел от приложенного напряжения. В результате экспериментальной проверки этих представлений был сделан вывод о столь хорошем соответствии, что самим авторам «представлялось удивительным совпадение теории, выведенной для чистых условий и (приложенной) к карборундовым массам». В дальнейшем, однако, Курчатов и Русинов к поставленной ими в <sup>16</sup> задаче уточнения теории саморегулирующихся сопротивлений не обращались.

Вместе с тем, как нетрудно видеть, физика и техника «саморегулирующихся сопротивлений» продолжала развиваться; эти приборы позднее получили название варисторов. Материалом для варисторов и теперь служит тот же карбид кремния (карборунд); с этой точки зрения обсуждаемую работу следует считать пионерской.

Наряду с разработанными ныне на основе  $\text{SiC}$  тиритом и вилитом последнее время все большее распространение получают окисно-цинковые варисторы. Математическое описание характеристик этих приборов (так называемый коэффициент нелинейности) совпадает с тем, которое использовалось в работе <sup>16</sup>. Что касается «физической подоплеки» процесса саморегуляции сопротивления, то он по современным представлениям определяется целым набором различных механизмов: автоэлектронной эмиссией с острий карборундовых зерен, прохождением тока через  $p-n$ -переходы, образующиеся на них в процессе технологического приготовления варисторов, тепловыми эффектами на микроконтактах. Высоковольтные вари-

сторы и сейчас используются для защиты высоковольтных линий передач и высоковольтных аппаратов. Приборы характеризуются надежностью в работе и долговечностью, измеряемой десятилетиями.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

1. Работы по сегнетоэлектричеству принадлежат к числу наиболее известных трудов Игоря Васильевича. Как и многие другие исследования по физике твердого тела, они выполнялись им в тесном сотрудничестве с Павлом Павловичем Кобеко и другими ленинградскими коллегами (В. И. Бернашевский, М. А. Еремеев, Б. В. Курчатов, Г. Я. Щепкин). Заметную часть работы Курчатов, после выделения из ЛФТИ Харьковского ФТИ, перенес на Украину, сотрудничая там с А. К. Вальтером и К. Д. Синельниковым. Просматривая соответствующие публикации (и архивные документы), можно непосредственно видеть, что экспериментаторы группы Курчатова тесно взаимодействовали с теоретиками — Л. Д. Ландау и Я. И. Френкелем<sup>17</sup>. Более того, допустимо предположить, что работы Ландау по фазовым переходам (1937 г.) и Я. И. Френкеля — по физике диэлектриков и ориентационному плавлению возникли не без влияния обсуждения сегнетоэлектрических явлений и размышлений об их природе. В ряде статей и в книге<sup>18</sup> упоминается разрабатывавшаяся Л. Д. Ландау теория сегнетоэлектрических явлений, однако в печатных работах ученого соответствующая публикация не обнаружена.

Изложению первых работ И. В. Курчатова по сегнетоэлектричеству уместно предпослать выдержку из статьи А. Ф. Иоффе: «И. В. Курчатов — исследователь диэлектриков»: «Во всей своей силе талант Игоря Васильевича проявился в открытии и изучении сегнетоэлектричества. Ряд аномалий в диэлектрических свойствах сегнетовой соли был описан и до него (см. ниже. — *Авт.*). Курчатов интуитивно заподозрил в этих аномалиях проявление новых сторон в поведении диэлектриков»<sup>19</sup>. Добавим, что и в данном случае ярко проявилась способность Игоря Васильевича от некоторых частных закономерностей переходить к расширению области их проявления, к установлению целого класса эффектов, представляющих собой новую область физики.

2. Первая по времени публикации работа П. П. Кобеко и И. В. Курчатова по сегнетоэлектрикам была закончена в марте 1930 г. и напечатана в третьем выпуске ЖРФХО за тот же год<sup>20</sup>. В статье специально отмечено, что на существование аномальных свойств сегнетовой соли указал авторам Н. Н. Андреев (1880—1970). Николай Николаевич Андреев практически одновременно с И. В. Курчатовым, но уже зрелым ученым пришедший в ЛФТИ и организовавший в ней отдел акустики, разумеется, интересовался вопросами пьезоэлектричества. К рассматриваемому времени в физической литературе уже обсуждались «диэлектрические аномалии» в свойствах сегнетовой соли — двойной натрокалиевой соли винной кислоты:  $\text{NaK}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . Наряду со статьями Д. А. Андерсона<sup>21</sup> и В. Г. Кеди<sup>22</sup> (опубликованными в 1918 г. в труднодоступных для советских физиков изданиях в США), с 1920 г. в журнале «Physical Review» начали публиковаться сообщения на эту тему Джозефа Валашека (Миннесотский университет). Это были поначалу краткие — объемом в 1 стр. печатного текста, без формул и графиков — тезисы докладов на заседаниях Американского Физического общества (апрель<sup>23</sup> и декабрь<sup>24</sup> 1920 г.). Исходя из изученных им особенностей процессов зарядки и разрядки конденсатора с диэлектриком из сегнетовой соли, нелинейной зависимости заряда от приложенной разности потенциалов, наблюдаемых Андерсоном, Валашек сообщал об установлении им явления гистерезиса в сегнетовой

соли, аналогичного хорошо известному гистерезису ферромагнетиков. При этом Валашек указал на возможность существования постоянной поляризации кристалла соли в отсутствие внешнего электрического поля. Следующая публикация Валашека<sup>25</sup> содержала важные сведения о температурном ходе поляризуемости соли, отличающем ее от обычных пьезоэлектриков. Пьезоэффект (величина пьезоэлектрического модуля) особенно сильно проявлялся в соли в интервале температур от  $-20^{\circ}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ; соответствующий коэффициент имеет в этой области два максимума. Аналогичные максимумы Валашек наблюдал и при измерении величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  по разряду конденсатора. Оба эти эффекта имели место только в направлении одной из кристаллографических осей монокристалла соли; по двум другим осям значения  $\epsilon$  были обычными.

Все эти соображения и утверждения, высказанные в еще более определенной форме и сопровождавшиеся описанием соответствующих экспериментов, были опубликованы Валашеком в ряде подробных статей, первая из которых вышла в 1922 г.<sup>26</sup> В ней говорится и об электрическом гистерезисе (график которого приводится в статье), и о спонтанной поляризации, и об одинаковом температурном ходе пьезоэлектрических модулей и величины  $\epsilon$ . Именно пьезоэффектом в сегнетовой соли, что существенно подчеркнуть, всего более интересуется американский автор, это отражено в названии всех его указанных выше публикаций. Говорит Валашек и о «точках Кюри» для сегнетовой соли. Максимальное значение  $\epsilon$  в этом кристалле было найдено им равным 1300. Это значение, как следует из приведенной в статье таблицы, в сильной степени зависит от материала электродов конденсатора, с которым велись опыты. Валашек отмечает разброс в значениях  $\epsilon$  от образца к образцу, при измерениях  $\epsilon$  на одном и том же образце, разделенных по времени; величина  $\epsilon$  зависела, наконец, и от условий опыта.

Теоретического описания явления Валашек не делал, указав, что наблюдаемые аномально большие значения  $\epsilon$ , вероятно, связаны с поляризационным смещением — под действием поля — «полусвободных зарядов» — ионов  $\text{H}^{+}$  и  $\text{O}^{-}$  кристаллизационной воды молекулы соли.

3. В работе Кобеко и Курчатова<sup>20</sup> сделана попытка объяснить аномалии в величине  $\epsilon$  высоковольтной поляризацией диэлектриков. Такая точка зрения представлялась авторам вполне закономерной, поскольку неучет существования поляризационных слоев в диэлектриках, как было им хорошо известно из работ А. Ф. Иоффе и своих собственных исследований, приводит к тому, что определенная по значениям емкости конденсатора величина  $\epsilon$  оказывается чрезвычайно сильно завышенной. Неудивительно поэтому, что в предисловии Курчатова к его книге<sup>18</sup> указывалось, что работы по сегнетовой соли «непосредственно примыкали к ряду исследований автора и П. П. Кобеко над влияниями высоковольтной поляризации, входившими в цикл вопросов, изучавшихся в лаборатории акад. А. Ф. Иоффе».

Последовательно развивая и улучшая методику измерения распределения потенциала вдоль пластины сегнетовой соли, помещенной в конденсатор, авторы в процессе дальнейших исследований показали, что рассматриваемый эффект не связан с высоковольтной поляризацией. Кобеко и Курчатова разработали технологию получения больших по размерам беспримесных кристаллов сегнетовой соли. Опираясь на опыт своих работ по изучению электрических свойств диэлектриков, они вместо контактов в виде тонкой фольги, приклеиваемой на поверхность кристалла соли, перешли к электродам из ее насыщенного раствора, который «прижимался» к образцу давлением столбика ртути. Благодаря этому приему советским физикам удалось при измерении (в зависимости от градиента потенциала)

получить однозначные и воспроизводимые результаты, а также уточнить значения  $\varepsilon$ , достигавшие в их первых экспериментах величины  $10^4$ . Был исключен и наблюдавшийся Валашеком эффект усталости, когда величина  $\varepsilon$  уменьшилась со временем, в течение которого на конденсатор подавалось напряжение.

Существенным в работе <sup>20</sup> было прямое указание на роль ориентации диполей в кристалле сегнетовой соли в наблюдавшихся явлениях, вывод о которой был сделан авторами, исходя из температурной зависимости эффектов. Казалось бы, ориентация диполей в кристалле сегнетовой соли — в твердом теле — невозможна. Однако в это время начинают развиваться представления о диэлектрической поляризации, связанной с движением молекул. Так, авторам <sup>20</sup> были хорошо известны опыты Эрреры (1924 г.) со льдом и диметилсульфатом, в которых этот эффект был установлен <sup>27</sup> \*). Это позволяло им думать, что аналогичные процессы могут происходить и в сегнетовой соли.

В 1930 г. Л. Полинг разработал теорию, описывающую переход движения молекул твердых тел от качаний (колебаний) вокруг положения равновесия к вращениям. В свете этой теории можно было ожидать существования скачка в величине диэлектрической постоянной твердой соляной кислоты (HCl), который и был зафиксирован в работе И. В. Курчатова и Г. Я. Щепкина <sup>29</sup>.

4. В ряде исследований, выполненных в 20—30-е годы в ЛФТИ, изучалась корреляция между механическими и электрическими характеристиками кристаллов. В числе этих работ находится и исследование И. В. Курчатова и В. И. Бернашевского <sup>30</sup> по униполярной поляризации сегнетовой соли, впервые упомянутой еще Валашеком. Однако лишь в работе <sup>30</sup> это явление подверглось тщательному изучению. Авторы выдвинули гипотезу о том, что униполярность связана с механическими несовершенствами кристаллов соли. Работая с электродом в виде тонкой полоски, они как бы сканировали поверхность поперечного сечения исследуемого ими образца, последовательно «прощупывали» его. При этом оказалось, что отдельные участки (слои) кристалла характеризуются сильной униполярной поляризацией, скрадывающейся при измерении всего образца (с электродом, покрывающим всю площадь сечения). После прогрева кристалла и последующего медленного его охлаждения (отжига) «коэффициент униполярности» существенно снижался. И. В. Курчатов упоминает о том, что его учеником и сотрудником, М. А. Еремеевым, проводились исследования свойств кристаллов сегнетовой соли при всестороннем сжатии. При этом были получены данные о смещении точки фазового перехода, которое было предварительно, хотя и на основании учета только одного из влияющих на это смещение факторов, оценено И. В. Курчатовым.

Поведение диполей в структуре сегнетовой соли исследовались в работе <sup>31</sup>. Для изучения кинетики поляризации во внешнем поле, т. е. переориентации диполей (в пределах домена) авторы использовали импульсную методику подачи напряжения на образец. В те годы отсутствовали стандартные генераторы коротких импульсов, так что создание установки, обеспечивавшей подачу на образец импульса напряжения длительностью в  $10^{-9}$  с, требовало большого экспериментального искусства. Описание установки и контрольных опытов, подтвердивших ее работоспособ-

\*) И. В. Курчатов познакомился с Эррерой на конференции по физике твердых тел в Ленинграде (сентябрь 1932 г.), на которой бельгийский ученый выступил с докладом «Диэлектрическая поляризация в твердом теле» <sup>28</sup>. В докладе, в частности, излагаются результаты исследований Кобеко и Курчатова по сегнетоэлектричеству, причем подчеркивается их основополагающий характер.

ность, занимает большую часть статьи<sup>31</sup>. Оказалось, что при таких длительностях величина диэлектрической постоянной остается достаточно высокой; отсюда следовало, что период колебаний диполей меньше продолжительности импульса. Конфигурация доменов («колони», как называли их Курчатов), вытянутых вдоль одной из осей кристалла сегнетовой соли, изучалась позднее<sup>18</sup>. В духе исследований доменов ферромагнетиков в<sup>18</sup> предпринимается попытка найти соотношение между размерами домена и линейными размерами всего образца (размерный эффект) и описать процессы поляризации и деполяризации сегнетовой соли.

К работе<sup>31</sup> примыкает небольшое исследование<sup>32</sup>, в котором изучалась анизотропия сегнетовой соли — существование «аномально высокой» поляризуемости лишь в одном из кристаллографических направлений. В этой работе значение  $\epsilon$  по всем трем осям измерялось в широком интервале температур (от  $-180$  до  $40^\circ\text{C}$ ).

При изучении явлений сегнетоэлектричества естественно было задаться вопросом о том, какие особенности структуры кристалла и какие из составляющих его химических элементов ответственны за специфические сегнетоэлектрические свойства. Стоит здесь заметить, что хотя кристаллофизика и выделяет необходимые для этого условия (10 полярных классов симметрии кристаллов), они отнюдь не являются достаточными, а на сам этот кардинальный вопрос и сейчас не существует однозначного ответа. В порядке его поисков И. В. Курчатов, П. П. Кобеко и их сотрудники (М. А. Еремеев и Б. В. Курчатов) изучали свойства кристаллов сегнетовой соли с примесями — изоморфные кристаллы сегнетовой соли с примесями натрорубидиевой ( $\text{NaRbC}_6\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) и натроталлиевой ( $\text{NaTlC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) солей винной кислоты<sup>33</sup>. Оказалось, что 0,25% таких добавок в несколько раз снижает величину  $\epsilon$  (измеренную вдоль «оси поляризации»), а 0,5% — в 10–20 раз. Ответственным за «ориентацию» поляризации, таким образом, являлись только диполи, содержащиеся именно в сегнетовой соли, а в аммонийнатриевой соли ( $\text{NaNH}_4\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) вообще отсутствовал «сегнетоэлектрический эффект» (см. работы<sup>34 35</sup>, где эти представления подверглись дальнейшему исследованию и обсуждению).

5. Таким образом, к тому моменту, когда И. В. Курчатов начал исследования сегнетовой соли (1930 г.), был установлен ряд аномальных ее свойств, отмечалось сходство между нею и ферромагнетиками. В указанных выше работах 20-х годов и при измерении основных физических характеристик сегнетовой соли был обнаружен большой разброс соответствующих величин, результаты измерений были невоспроизводимы, отсутствовала какая-либо теория наблюдавшихся эффектов. Именно Курчатов и Кобеко и их сотрудники провели первые систематические исследования сегнетовой соли. И. В. Курчатову принадлежит и первая теория сегнетоэлектриков, сыгравшая большую роль в появившихся уже в послевоенные годы феноменологических теориях, основанных на общих принципах термодинамики и представлениях о фазовых переходах (В. Л. Гинзбург). Подчеркнем, что фазовый переход трактовался Игорем Васильевичем как результат упорядочения электрических дипольных моментов при понижении температуры (по аналогии с ферромагнетиками) и, соответственно, исчезновения спонтанной поляризации при  $T > T_k^*$ .

В основу своего рассмотрения И. В. Курчатов положил известное соотношение Клаузиуса — Мосотти, связывающее диэлектрическую по-

---

<sup>\*</sup>) Существование нижней точки Кюри в сегнетовой соли, надежно установленное И. В. Курчатовым и его сотрудниками (вслед за Валашеком), представляет собой очень частный и редкий в сегнетоэлектрике случай, не получивший окончательного теоретического описания.

стоянную  $\varepsilon$  с поляризуемостью диэлектрика  $\alpha$ :

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} N_0 \alpha; \quad (1)$$

здесь  $N_0$  — число молекул в единице объема, а поляризуемость  $\alpha$  представляет собой сумму из трех слагаемых: электронной  $\alpha_e$  и ионной  $\alpha_i$ , от температуры не зависящих, и дипольной  $\alpha_d$ , связанной с ориентацией «готовых» диполей сегнетовой соли в электрическом поле. Величина  $\alpha_d$ , определенная по аналогии с ланжевенновым рассмотрением для магнитных моментов (в магнитном поле), оказывалась равной  $(4\pi/3) N \mu^2 / (kT)$  ( $\mu$  — дипольный момент молекулы), т. е. явным образом зависела от температуры  $T$ . Если разрешить уравнение (1) относительно  $\varepsilon$ , то

$$\varepsilon = \frac{1 + (8\pi/3) N_0 \alpha}{1 - (4\pi/3) N_0 \alpha}, \quad (2)$$

так что при  $(4\pi/3) N_0 \alpha = 1$  величина  $\varepsilon$  обратится в бесконечность. Физически, по И. В. Курчатову, это и соответствует существованию в диэлектрике спонтанной поляризации. Зависимость  $\alpha$  от  $T$  позволяет понять экспериментально установленный факт разрушения спонтанной поляризации при высоких температурах.

Разрушение поляризации при  $T > T_K$  (в случае сегнетовой соли по данным Курчатова и сотрудников,  $T_K = 22,5^\circ\text{C}$ ) представлялось понятным и происходило путем привычного механизма: тепловое движение молекул препятствует установлению диполей в ровный строй, «в затылок друг другу». Однако разрушение такой ориентации при температурах меньше, чем некоторая критическая, аналогов в явлениях ферромагнетизма не имело. Курчатов полагал, что последний эффект определяется уменьшением концентрации дипольного газа  $N$  при понижении температуры и связанным с этим спаданием сил взаимодействия между диполями. В работе <sup>36</sup> И. В. Курчатов и Б. В. Курчатов уделили особое внимание именно нижнему температурному пределу спонтанной поляризации, который был назван в <sup>36</sup> «второй точкой Кюри». Проведенные измерения  $\varepsilon$  дали для этой точки значение  $-15^\circ\text{C}$  \*). И в этой работе проводилось исследование кристаллов, изоморфных сегнетовой соли. Так, добавка 1%  $\text{NaNH}_4\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  привела к тому, что верхняя температура Кюри стала равной  $4,3^\circ\text{C}$ , а нижняя  $-9^\circ\text{C}$ . В процессе исследований авторы сняли 30 экспериментальных точек кривой  $\varepsilon(T)$  в интервале от  $-33$  до  $33,6^\circ\text{C}$  и получили классическую двугорбую кривую для  $\varepsilon$ .

И. В. Курчатов записал уравнение (1) в несколько иной форме, выделив из правой части электронную и ионную поляризуемости и подставив вместо дипольной поляризуемости приведенное выше ее значение. При этом

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{4\pi}{3} P_0 + \frac{4\pi}{9} \frac{N \mu^2}{kT},$$

где  $P_0$  — сумма электронной и ионной поляризации единицы объема сегнетовой соли. В этой формуле величина  $N$ , обычно определяемая как число молекул в единице объема, фигурирует у Курчатова как «число способных к ориентации диполей также в единице объема». Построив на основе экспериментальных данных зависимость  $\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} T$  от  $T$ , Курчатов находит  $N \mu^2$  в функции от температуры, т. е., как он пишет, получает возможность проследить за изменением концентрации дипольного «газа» с температурой.

\*) По последним данным значения верхней и нижней точек Кюри сегнетовой соли равны соответственно  $24^\circ$  и  $-18^\circ\text{C}$ .

6. В 1920 г. Хервигом была развита теория, описывающая ориентационные эффекты в твердых диэлектриках, в конечной формуле которой фигурировало произведение  $N\mu^4$ . В работах <sup>34,35</sup> И. В. Курчатов сопоставляет найденные им ранее значения  $N\mu^2$  с этой величиной. Измеренная таким образом величина  $\mu$  оказалась равной  $\sim 3 \cdot 10^{-18}$  CGSE, что в несколько раз превышало ее значение, полученное по другим данным. В этих работах И. В. Курчатова обращает на себя внимание уже несколько критическое отношение к дипольной теории сегнетоэлектричества, рассматривающей фактически дипольный газ. С еще большей определенностью Курчатов пишет об этом в своей монографии: «Необходимо отметить, что хотя в основных чертах сегнетоэлектрики и правильно описываются теорией Дебая, все же полного количественного описания явления в рамках этой теории получить не удастся» (<sup>18</sup>, с. 38—39).

Итоги исследований И. В. Курчатова по сегнетоэлектричеству приведены им в кратком резюме, включенном в малоизвестную книгу «Проблемы современной физики в работах Физико-технического института А. Ф. Иоффе» <sup>37</sup>.

Игорь Васильевич Курчатов начал отходить от работ по физике сегнетоэлектриков — поистине «золотой жилы», на которую он натолкнулся в процессе исследований диэлектриков, — с конца 1932 г., когда переключился на изучение атомных ядер. Уже вплотную занимаясь ядерной физикой, он завершил упоминавшуюся монографию, подготовил ее сокращенный вариант, изданный в 1936 г. во Франции <sup>38</sup>.

В 1938 г. увидел свет 4-й том первого издания Физического словаря. Следующие друг за другом статьи: «Сегнетова соль» и «Сегнетоэлектрики» <sup>39</sup> было предложено написать И. В. Курчатову. Эти лаконичные и содержательные заметки были последней данью исследованиям, сделавшим имя И. В. Курчатова широко известным не только в СССР, но и далеко за его пределами.

Дальнейший прогресс в изучении явлений сегнетоэлектричества был связан со сразу же получившими признание исследованиями Б. М. Вула и его сотрудников по титанату бария (1944 г.). Они определяли, во-первых, резкое возрастание интереса к возможностям технического использования сегнетоэлектриков, а во-вторых, стимулировали появление теоретических работ В. Л. Гинзбурга по феноменологической (термодинамической) теории сегнетоэлектрических явлений, тесно связанных с общей теорией фазовых переходов Л. Д. Ландау. Представляется знаменательным, что в ЛФТИ — на «родине сегнетоэлектричества» — и сегодня продолжают исследования по сегнетоэлектричеству, проводимые под руководством Г. А. Смоленского. С современным состоянием учения о сегнетоэлектриках можно ознакомиться в известных монографиях <sup>40–44</sup>.

7. Первые 10 лет пребывания И. В. Курчатова в ЛФТИ характеризовались еще и необычной его «книжной» активностью. Наиболее, пожалуй, хорошо известны две его книги: «Сегнетоэлектрики» <sup>18</sup> (1933 г.), о которой уже не раз говорилось, и «Расщепление атомного ядра» <sup>45</sup> (1935 г.), которая упоминается на последующих страницах. Менее известно, что в 1930 г. в издававшейся в Москве серии «Наука и техника» Курчатов выпустил небольшую книжку «Электрическая прочность вещества» <sup>46</sup>, в которой в популярной форме излагались основы учения о прохождении тока через диэлектрики.

В 1935 г. выходит курс «Электронные явления», допущенный Наркомпросом в качестве учебного пособия для университетов. Этот курс представляет собой совершенно переработанное издание монографии того же названия, написанной в 1928 г. Н. Н. Семеновым. В авторский коллектив новой книги входят (помимо Н. Н. Семенова) И. В. Курчатов, Д. Н. Нас-

ледов и Ю. Б. Харитон<sup>47</sup>. Из 17 глав этой книги 5 написаны Курчатовым: «Экспериментальное доказательство волновой природы электронов», «Волновая картина материи по Бройлю и Шрёдингеру» (эта глава написана совместно Курчатовым и Наследовым), «Электроны в металлах», «Испускание электронов металлом» и дополнение: «Искусственная радиоактивность». Вся эта работа Игоря Васильевича была, очевидно, непосредственным образом связана с его преподавательской деятельностью сначала (в 1927—1929 гг.) на физико-механическом факультете Политехнического института, а затем — с 1935 по 1943 г. — в Педагогическом институте им. М. Н. Покровского. В 1935 г. Курчатов возглавил в нем научно-исследовательские работы на кафедре общей физики, в 1937 г. стал заведовать кафедрой теоретической физики, а в декабре 1938 г. был избран заведующим кафедрой экспериментальной физики.

В том же 1935 г. на украинском языке выходит один из томов издававшегося под общей редакцией А. Ф. Иоффе курса общей физики. На обложке этой книги фамилии трех авторов — И. В. Курчатова, Н. Н. Семёнова и Ю. Б. Харитона<sup>48</sup>. Можно думать, что Курчатову принадлежат, как минимум, главы «Газы в силовом поле» (с. 99—129) и «Электропроводность» (с. 164—198). Просмотр украинского издания параллельно с русскими (как с первым<sup>49</sup>, так и со вторым<sup>50</sup>) показывает, что они практически идентичны. Таким образом, если учесть переиздания и переводы книг, которые написал Игорь Васильевич или в которых он был соавтором, то выходит, что за 5 лет, с 1930 по 1935 гг., они выходили 8 раз!

Все это свидетельствует о том, что Курчатов находился в курсе всех современных теоретических и экспериментальных исследований по электронной теории, газовому разряду, квантовой механике, физике полупроводников и диэлектриков, физике ядра. В начале 30-х годов, т. е. во времена, когда в нашей стране не издавались специальные реферативные журналы по физике, соответствующие отделы велись на страницах «Журнала технической физики» и выходившего в Харькове журнала «*Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion*», печатавшего статьи на немецком, английском и французском языках; главным редактором как первого, так и второго был А. Ф. Иоффе. Абрам Федорович привлек Игоря Васильевича к работе в этом отделе журналов. Начиная с первых их томов, практически в каждом выпуске (это особенно относится к ЖТФ) помещалось по несколько, иногда до 5—6 рефератов, составленных Курчатовым. Они охватывают вопросы физики и техники твердых выпрямителей и фотоэлементов, газового разряда. Наряду с этим Курчатов — автор больших обзоров, посвященных ходу работ различных конференций, по преимуществу советских: он дает обзор представленных на них докладов, дискуссий по ним<sup>51, 52</sup>.

#### 4. РАБОТЫ ПО ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

##### а) Подготовительный период

1. На протяжении многих лет ядерная физика в ЛФТИ была представлена только работами Д. В. Скобельцына. Еще в 1924 г.<sup>53</sup> в физической лаборатории Петроградского политехнического института он первым в Советском Союзе применил важное усовершенствование метода камеры Вильсона, поместив ее в магнитное поле \*).

\*) Впервые поместил камеру Вильсона в магнитное поле в 1923 г. сотрудник ЛФТИ П. Л. Капица<sup>54</sup> во время работы в лаборатории Резерфорда. Отличительной чертой аппаратуры, созданной П. Л. Капицей, было применение очень интенсивного импульсного магнитного поля ( $B \sim 80$  кГс), позволившего получить достаточно большую кривизну треков  $\alpha$ -частиц в камере.



С 1925 г. Скобелцын работал также и в ЛФТИ. В период 1924—1929 гг. он, пользуясь камерой Вильсона, выполнил ряд фундаментальных работ по взаимодействию  $\gamma$ -квантов с веществом. Одной из ранних работ этого цикла было измерение спектра  $\gamma$ -лучей  $\text{RaC}$ <sup>55</sup>.

В тематических планах ЛФТИ до 1933 г. исследования, которые можно отнести к области ядерной физики, встречались очень редко; они были явно не систематическими.

2. 1932 г. часто называют «золотым годом» ядерной физики. Чэдвик открыл нейтрон, Андерсон — позитрон. Ферми предложил решение загадки непрерывного спектра электронов при  $\beta$ -распаде, указав, что, возможно, в каждом акте  $\beta$ -распада в ядре одновременно рождаются электрон и нейтрино. В лаборатории Резерфорда Кокрофт и Уолтон построили высоковольтный ускоритель и впервые осуществили ядерную реакцию (расщепление лития протонами) с помощью искусственно ускоренных частиц. Лоренс и Ливингстон опубликовали первую подробную статью о конструкции недавно изобретенного Лоренсом ускорителя — циклотрона. Юри открыл тяжелый водород — дейтерий.

Вероятно, эта блестящая череда событий сыграла большую роль в решении И. В. Курчатова круто изменить направление своей научной работы и заняться исследованиями в области ядерной физики. Надо полагать, что решение было принято не без влияния А. Ф. Иоффе. Заметим, наконец, что и до 1932 г. Курчатов начал «присматриваться» к разработкам, целью которых были ядерные исследования, и даже принимал в них непосредственное участие. Речь идет о сооружении высоковольтных ускорителей заряженных частиц в Украинском физико-техническом институте (Харьков), где эти работы проводились под руководством К. Д. Синельникова.

Непосредственный переход Курчатова к вопросам ядерных исследований относится к концу 1932 г. В ноябре этого года в ЛФТИ под его руководством начал работать ядерный семинар. Секретарем семинара был Д. Д. Иваненко. Занятия его проводились 5 раз в месяц. Их посещало до 35 физиков (не только из ЛФТИ). В декабре был издан приказ по институту, в котором указывалось о создании «особой группы по ядру». А. Ф. Иоффе взял на себя обязанности начальника группы, И. В. Курчатов назначался его заместителем (<sup>56</sup>, с. 13). Всего в составе группы было 10 физиков, в их числе Д. В. Скобелцын, М. А. Еремеев, Д. Д. Иваненко и И. П. Селинов. Консультантами группы были назначены Г. А. Гамов и Л. В. Мысовский.

В 1933 г. «особая группа» была преобразована в Отдел ядерной физики. Его руководителем стал Курчатов. Он же заведовал Лабораторией ядерных реакций в этом отделе. Много времени Игорь Васильевич посвящал изучению литературы по физике атомного ядра. Однако уже в том же 1933 г. он вплотную занялся подготовкой технической базы для задуманных ядерных работ. Было ясно, что без мощного современного ускорителя немислимо быстрое развитие ядерных исследований в институте.

3. Рассматривая разработанные к тому времени типы ускорителей, И. В. Курчатов и А. И. Алиханов (также перешедший с несколькими своими сотрудниками на ядерную тематику) останавливают свое внимание на циклотроне. Начиная примерно с 1933 г., они обсуждают планы сооружения в Физтехе большого циклотрона.

Чтобы получить представление о способах наладки и особенностях работы такого ускорителя, Курчатов решает построить в своей лаборатории небольшой циклотрон — примерно такого же размера, как описанный в первой подробной статье Лоренса и Ливингстона<sup>57</sup>. Их циклотрон, построенный в Калифорнийском университете (г. Беркли, США), с диа-

метром полюса электромагнита 28 см, был пущен в ход в конце 1931 г., и в начале следующего года на нем были получены протоны с рекордной для того времени энергией 1,22 МэВ, причем ток пучка составлял  $10^{-9}$  А.

Сооружение малого циклотрона Игорь Васильевич в конце 1932 г. поручил М. А. Еремееву. Предполагалось, что в этом циклотроне удастся



1933 (34?) г. Слева направо: Г. Я. Щепкин, И. В. Курчатов, М. А. Еремеев.

ускорить протоны примерно до 1 МэВ. Диаметр полюсных наконечников магнита был выбран равным 28 см, как и у прототипа в лаборатории Лоренса. Общая масса магнита (с медными обмотками) составила около 2 т. Требуемая высокая стабильность напряженности ведущего магнитного поля была обеспечена тем, что обмотки магнита питались от аккумуляторной батареи института. Расчетная напряженность магнитного поля в зазоре высотой 4 см составляла 12 кЭ. Вакуумная камера циклотрона имела квадратную форму и содержала один дуант. Откачка камеры производилась ртутным диффузионным насосом. ВЧ генератор для питания дуанта был собран на одной лампе

с водяным охлаждением. Его выходная мощность составляла 10 кВт,  $\lambda \sim 15$  м.

Протоны были ускорены в этом циклотроне до 530 кэВ. Ток пучка не превышал нескольких единиц  $\times 10^{-10}$  А. По-видимому, никаких физических экспериментов на этом циклотроне Курчатов не проводил — вероятно, из-за малости тока пучка. М. А. Еремеев в автобиографии написал, что «дальнейшего разворота эта работа не получила из-за отсутствия средств». Однако в годовом отчете ЛФТИ за 1934 г. (архив ФТИ, ф. 3, оп. 1, ед. хр. 32, л. 7) приводится другая формулировка: «Дальнейшая разработка была прекращена ввиду того, что в Государственном радиевом институте собирается гораздо более мощная установка на 10 МэВ».

#### б) Ядерные реакции с протонами

Много внимания в 1933 г. Курчатов уделил сооружению высоковольтного ускорителя протонов. Главным его помощником в этой работе был Г. Я. Щепкин. Основой ускорителя был каскадный генератор на 500 кВ (по типу генератора Кокрофта и Уолтона). Он отличался компактностью, достигнутой благодаря остроумному размещению отдельных элементов и применению кенотронов с очень малым током накала, изготовленных по специальному заказу на заводе «Светлана». Для этой установки Курчатов и Щепкин собрали секционированную дисковую вакуумную трубку на 350 кВ. Конструкция трубки была разработана в Украинском ФТИ А. К. Вальтером и К. Д. Синельниковым совместно с И. В. Курчатовым и Г. Я. Щепкиным (<sup>45</sup>, с. 98—99). С помощью этой установки Курчатов с сотрудниками выполнили две работы <sup>58, 59</sup>.

Самое первое исследование Курчатова в области ядерной физики — работа <sup>58</sup> — было опубликовано в марте 1934 г. Целью его было получение некоторых данных об энергетическом балансе ядерной реакции  $B + p$ . Для этого изучались  $\gamma$ -лучи, возникающие в реакции. Авторы пришли к заключению, что новые данные не противоречат выдвинутому ранее предположению о расщеплении бора на три  $\alpha$ -частицы.

Вторая работа с протонным пучком была опубликована также в 1934 г. <sup>59</sup>. Рассмотрим предварительно содержание примыкающей к ней статьи Курчатова и Синельникова <sup>60</sup>, в которой анализируются все имеющиеся в литературе данные о механизме реакции  $Li + p$ . Этих данных накопилось много, и некоторые были противоречивыми. В работе <sup>60</sup> авторы убедительно показали, что в пользу бегло высказанного ранее группой Резерфорда предположения о палиции реакции  ${}^6Li + {}^1H \rightarrow {}^4He + {}^3He$  (изотоп  ${}^6Li$  содержится в натуральной литиевой мишени в количестве  $\sim 7\%$ ) свидетельствуют многие аргументы. Поскольку, однако, легкий изотоп гелия ( ${}^3He$ ) не был известен среди стабильных нуклидов, возник вопрос, не является ли он радиоактивным. Решению этого вопроса и была посвящена работа <sup>59</sup>. Была сделана попытка найти позитронную активность, возникающую в результате бомбардировки лития протонами. Мишень из  $Li_2O$  облучалась протонами с энергией до 350 кэВ. В двух вариантах опыта исследовалась  $\beta$ -активность мишени: во время облучения — один из ранних примеров поиска радиоактивности в режиме «на пучке» — или спустя  $\sim 15$  с после конца облучения. Авторы пришли к выводу, что ядро  ${}^3He$  либо устойчиво, либо является долгоживущим, с периодом позитронной активности свыше 3 лет. Заметим, что существование в природе устойчивого нуклида  ${}^3He$  было твердо установлено в 1939 г. Его содержание в природном гелии составляет, по современным данным,  $\sim 1,3 \cdot 10^{-4}\%$  (в атмосфере).

#### в) Искусственная радиоактивность, вызываемая нейтронами

Весной 1934 г. в итальянском журнале «Ricerca Scientifica» одна за другой стали появляться заметки римской группы под руководством Э. Ферми <sup>61-63</sup>; в них сообщалось об открытии того факта, что при облучении многих элементов нейтронами возбуждается искусственная радиоактивность. Заметим, что предположение о возможности такого явления было высказано в пионерской работе Ф. Жолио и И. Кюри об искусственной радиоактивности <sup>64</sup>.

Эти новости крайне заинтересовали Курчатова. Он прекратил работы с использованием пучка протонов и очень энергично взялся за исследования «эффекта Ферми». Немедленно было налажено сотрудничество с физическим отделом Государственного радиового института (Ленинград); этим отделом руководил Л. В. Мысовский, в ГРИ давно уже действовала разрабатанная им эманационная установка. Изготовленные на ней ампулы и капилляры с радоном выдавались многим медицинским учреждениям. Наладить изготовление источников нейтронов того типа, которым пользовался Ферми, а именно, в виде стеклянных ампул, наполненных радоном и порошком бериллия, было нетрудно.

Профессора Дж. К. Трабакки, директора Физической лаборатории Министерства здравоохранения в Риме, который снабжал группу Ферми радон-бериллиевыми источниками нейтронов, в этой группе называли «божественным провидением». Таким же «божественным провидением» оказался для группы Курчатова профессор Мысовский. В дальнейшем на протяжении нескольких лет простые (но слабенькие) радон-бериллиевые

источники нейтронов верой и правдой служили физикам, пока не появились мощные источники нейтронов на основе ионных ускорителей.

Первые две работы лаборатории Курчатова по искусственной радиоактивности, наведенной нейтронами, были отправлены в печать всего через три месяца после появления первой заметки римской группы. В одной из них <sup>65</sup> изучалась радиоактивность, наведенная в фосфоре. Были установлены интересные данные, новые по сравнению с указанными в работе группы Ферми. В дополнение к  $\beta^-$ -активности с периодом полураспада  $\sim 3$  ч, которую в Риме с помощью радиохимического метода приписали кремнию (следовательно, надо было принять, что идет реакция  $^{31}\text{P} (n, p) ^{31}\text{Si}$ ,  $^{31}\text{Si} \xrightarrow{\beta^-} ^{31}\text{P}$ ), была найдена активность с периодом  $\sim 3$  мин. Естественно, авторы работы <sup>65</sup> поставили вопрос об «изотопической идентификации» (по современной терминологии — о «нуклидной идентификации») новой активности. Задача облегчалась тем, что фосфор имеет только один изотоп ( $^{31}\text{P}$ ). Было предположено, что новая активность принадлежит ядру  $^{28}\text{Al}$ , которое получается в ядерной реакции  $^{31}\text{P} (n, \alpha) ^{28}\text{Al}$ ; основанием для такой идентификации был известный факт, что  $^{28}\text{Al}$  имеет период  $\sim 3$  мин; путем  $\beta^-$ -распада он превращается в  $^{28}\text{Si}$ . Авторы приходят к выводу, что наблюдается *разветвление* ядерных реакций: часть ядер фосфора при облучении нейтронами претерпевает реакцию типа  $(n, p)$ , тогда как другая часть — реакцию типа  $(n, \alpha)$ . Явление разветвления ядерной реакции наблюдалось и ранее — в случаях, когда мишени бомбардировались заряженными частицами. Например, с 1929 г. была известна реакция  $^{27}\text{Al} (\alpha, p) ^{30}\text{Si}$  (Резерфорд и Чэдвик), а в работе И. Кюри и Ф. Жолио <sup>66</sup> (1934 г.) было установлено, что идет также реакция  $^{27}\text{Al} (\alpha, n) ^{30}\text{P}$ . Однако разветвление реакции при облучении вещества *нейтронами* в работе <sup>65</sup> наблюдалось впервые \*).

Во второй из упомянутых работ была исследована реакция  $\text{Al} + n$  (алюминий также состоит только из одного изотопа —  $^{27}\text{Al}$ ). Здесь тоже найдены новые данные: помимо указанной группой Ферми активности с периодом 12 мин была найдена активность с периодом  $> 12$  ч. Авторы установили также, что  $\beta^-$ -распад нуклида с периодом 12 мин сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов в количестве  $\sim 1$   $\gamma$ -квант на 1 распад. Для оценки энергии  $\gamma$ -квантов была снята кривая поглощения в свинце. Измерение параметров  $\gamma$ -излучения — относительной интенсивности и энергии квантов, — по-видимому, выполнено в этой работе впервые для искусственного радионуклида. Радиохимическое исследование показало, что активность с периодом 12 мин относится к магнию, — следовательно, она получается в реакции  $^{27}\text{Al} (n, p) ^{27}\text{Mg}$ . Активность же с периодом  $> 12$  ч скорее всего относится к натрию, т. е. идет реакция  $^{27}\text{Al} (n, \alpha) ^{24}\text{Na} \xrightarrow{\beta^-} ^{24}\text{Mg}$ . Это означает, что здесь, как и в случае реакции  $\text{P} + n$ , наблюдается разветвление реакции, возбуждаемой нейтронами, на два канала —  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$ .

Вскоре была опубликована еще одна статья Курчатова с сотрудниками <sup>69</sup>, уточняющая результаты работы <sup>68</sup>. Было подтверждено радиохимически, что долгоживущая активность в реакции  $\text{Al} + n$  относится к Na. Период ее, измеренный по  $\gamma$ -лучам, составляет 12—13 ч (современное значение  $\sim 15$  ч).

В октябре 1934 г. Ферми с сотрудниками открыл, что окружение источника нейтронов (рядом с которым находилась мишень) достаточно толстым слоем водородсодержащего вещества — парафина или воды — увеличивает наведенную радиоактивность мишени в некоторых случаях

\*) Независимо от группы Курчатова явление разветвления ядерной реакции было открыто также группой Жолио-Кюри <sup>67</sup> на том же примере  $\text{P} + n$ .

в сотни раз, причем речь идет только о реакциях типа  $(n, \gamma)$ . Явление было объяснено замедлением нейтронов до тепловых скоростей в результате многократных упругих столкновений с протонами и ростом сечения взаимодействия нейтронов с ядрами мишеней при уменьшении скорости нейтронов. Новый эффект имел большое практическое значение для всех, работавших в области искусственной радиоактивности, возбуждаемой нейтронами, так как появилась возможность исследовать и такие элементы, для которых сечения очень малы. Этим, в частности, сразу воспользовалась в ЛФТИ группа А. И. Алиханова, которая занималась изучением  $\beta$ -спектров искусственно радиоактивных нуклидов.

В лаборатории Курчатова работы по искусственной радиоактивности, наведенной медленными нейтронами, продолжались в течение 1935—1936 гг. Мы не будем здесь излагать содержание этих работ \*). Всего за короткое время с июля 1934 г. по февраль 1936 г. Курчатовым и его сотрудниками было опубликовано 17 статей о искусственной радиоактивности. Добавим, что к концу 1934 г. Курчатов закончил работу над монографией «Расщепление атомного ядра»<sup>45</sup>, в которой был дан «обзор основных экспериментальных данных, полученных за последние два-три года в области физики атомного ядра».

#### г) Изучение ядерной изомерии

Продолженные в 1935 г. работы группы Курчатова по искусственной радиоактивности вскоре естественным образом перешли в исследования с более широкой тематикой. Курчатова стали интересовать проблемы механизма ядерных реакций, вызываемых нейтронами, вопросы поглощения, замедления и рассеяния нейтронов в веществе, т. е. нейтронная физика в целом. Это стало главным направлением научных исследований Курчатова.

Прежде чем перейти к изложению результатов некоторых работ этого периода, необходимо остановиться на нескольких статьях, которые, наряду с работами, выполненными в других странах, положили начало очень богатой (и по количеству публикаций, и по научным результатам) области ядерной физики. Речь идет об изучении явления ядерной изомерии.

В начале 1935 г. в лаборатории Курчатова в качестве мишени для облучения медленными нейтронами был взят бром; этот элемент уже был исследован группой Ферми. В отличие от последней группа Курчатова измеряла не  $\beta$ -, а  $\gamma$ -активность полученных нуклидов<sup>70</sup>. Как и в других описанных выше случаях, удалось дополнить данные римской группы новыми данными: кроме известных активностей с периодами 18 мин и 4,2 ч (ранее химически идентифицированных с бромом) была найдена активность, также принадлежащая бром, с периодом 36 ч. Однако этот случай отличался от ранее упомянутых тем, что интерпретация его оказалась весьма затруднительной; действительно, при наличии только двух стабильных изотопов брома —  $^{79}\text{Br}$  и  $^{81}\text{Br}$  — и предполагая возможность только реакций типа  $(n, \gamma)$ , легко объяснить образование двух радиобромов, образование же третьего оказывается непонятным. В этом отношении ситуация была похожа на два других случая, обнаруженных к тому времени среди искусственных радионуклидов. Речь идет о продуктах, полученных при облучении нейтронами индия<sup>71</sup> и родия<sup>72</sup>. Возникшие загадки можно назвать «проблемой избыточного числа периодов». В пер-

\*) Наиболее полный список опубликованных работ И. В. Курчатова дан в специальной брошюре<sup>1</sup>.

ную поглощению С-нейтронов в серебре, кадмии и боре при различных температурах. Эта работа была доложена на 2-й Всесоюзной конференции по атомному ядру (Москва, 20—26 сентября 1937 г.). Одной из особенностей этого исследования<sup>94</sup> был охват очень широкого диапазона температур — 20,4—463 К. Проведение такой работы оказалось возможным благодаря тому, что в криогенной лаборатории УФИ, руководимой Л. В. Шубниковым, действовала установка для получения жидкого водорода (она была первой в нашей стране; пущена в ход в 1931 г.).

е) Работа в Циклотронной лаборатории  
Радиового института.  
Проектирование и строительство  
циклотрона в ЛФТИ

1. В начале 30-х годов в Ленинграде уже шло сооружение большого советского циклотрона. В 1932 г. по инициативе заведующего физическим отделом Государственного радиового института Л. В. Мысовского Ученый совет ГРИ принял решение о сооружении циклотрона в институте. Строительство его началось в том же году. По тем временам это была очень большая установка: электромагнит имел полюсные наконечники диаметром 1 м и массу около 31 т<sup>95</sup>. К концу 1935 г. все оборудование циклотрона было изготовлено. Однако налаживание работы установки шло очень медленно. Все попытки получить пучок ускоренных ионов в первой изготовленной в ГРИ вакуумной камере (квадратная камера с одним дуантом, с радиусом конечного витка орбиты  $r_k = 115$  мм) окончились неудачей. Вторая камера — круглая, с внутренним диаметром 600 мм, с двумя дуантами, с  $r_k = 256$  мм, была установлена в магнит в начале 1936 г. Только в феврале 1937 г. впервые удалось получить пучок протонов с энергией  $\sim 500$  кэВ. В июле того же года протоны были ускорены до  $\sim 3,2$  МэВ. Однако установка работала крайне неустойчиво.

Курчатов, естественно, очень интересовался ходом освоения циклотрона ГРИ. Он рассчитывал на то, что его лаборатории в ЛФТИ будет предоставлена возможность пользоваться этим циклотроном — по меньшей мере для облучения мишеней нейтронами. Кроме того, ему хотелось пройти основательный «практикум» на циклотроне ГРИ, чтобы воспользоваться накопленным опытом при предстоящем строительстве и эксплуатации циклотрона ЛФТИ. Он с трудом сдерживал нетерпение, видя, что до регулярной работы циклотрона ГРИ пока далеко. Возможно, он считал, что мог бы помочь Л. В. Мысовскому и его группе в налаживании эксплуатации циклотрона, если бы сам участвовал в ее организации. Так или иначе, приблизительно с весны 1937 г. Игорь Васильевич начал работать в Циклотронной лаборатории ГРИ один раз в шестидневку \*). Постепенно он стал руководителем работ. Он предложил заменить камеру № 2 более совершенной. Новую камеру сконструировали И. В. Курчатов, А. И. Алиханов и Д. Г. Алхазов. В ее изготовлении большую помощь

но продвигалось, и с начала 1939 г. Игорь Васильевич, как он писал своей жене Марине Дмитриевне, находился в этой лаборатории с 10 часов утра до 11 часов вечера. Основными его помощниками в то время были Д. Г. Алхазов и В. П. Джелепов — сотрудник ЛФТИ, откомандированный в Циклотронную лабораторию ГРИ с середины января 1939 г. На протяжении почти всего 1939 г. лаборатория занималась подробным исследованием обнаруженного еще в 1937 г. своеобразного режима работы циклотрона («режима тлеющего разряда» в дейтерии), при котором камера циклотрона превращалась в интенсивный источник нейтронов<sup>96,97</sup>. В этот период началось использование циклотрона ГРИ для научных работ. Так, нейтронами облучался уран — для исследования его деления и поиска трансурановых элементов; для группы Л. И. Русинова (ЛФТИ), занимавшейся исследованием ядерной изомерии брома, облучался бромистый этил.

Хотя Игорь Васильевич отметил, что в случаях, когда циклотрон используется в качестве источника нейтронов, «следует предпочесть более простой режим работы на тлеющем разряде обычному режиму с посторонним источником ионов»<sup>97</sup>, было ясно, что такой способ работы установки надо рассматривать лишь как промежуточный этап в ее освоении; необходимо было научиться получать пучки ионов с полной расчетной энергией (5—6 МэВ для дейтронов, 11—12 МэВ для  $\alpha$ -частиц) при удовлетворительном токе пучка и выводить их на мишень, расположенную за дефлектором \*).

В связи с болезнью Мысовского Курчатов с 1 апреля 1939 г. был утвержден на посту заведующего Физическим отделом РИАН<sup>\*\*)</sup> , оставаясь заведующим его Циклотронной лабораторией. В этой должности он пробыл до 5 октября 1940 г.

2. Вернемся теперь к планам сооружения большого циклотрона в ЛФТИ. Как уже упоминалось, эти планы возникли вскоре после перехода Курчатова и Алиханова на ядерную тематику. Однако прошло несколько лет, прежде чем в этом направлении были предприняты конкретные шаги.

По всей вероятности, в конце 1937 г. Наркоматом тяжелой промышленности СССР было принято решение о выделении материалов и средств на сооружение циклотрона в ЛФТИ. Отметим, однако, что задолго до этого решения И. В. Курчатов развернул большую подготовительную работу. Уже в 1936 г. он решил, что необходимо перейти от прикидочных расчетов, выполняемых в лаборатории, к рабочему проектированию, которое следует передать специалистам. К разработке теоретических аспектов циклотрона и к расчету электромагнита были привлечены ученые из Ленинградского индустриального (политехнического) института им. М. И. Калинина — работники кафедры теоретической физики инженерно-физического факультета Г. А. Гринберг, М. И. Конторович и Н. Н. Лебедев и работники кафедры электрических машин электромеханического факультета С. М. Гохберг, Л. Р. Нейман, А. И. Блохин и Е. М. Кельзон. Со стороны ЛФТИ было задано, что конечная энергия протонов и дейтронов, ускоренных в циклотроне, должна составлять 10 МэВ. Рабочий проект электромагнита циклотрона взялся разработать начальник Конструкторского бюро машин постоянного тока завода «Электросила» В. К. Федоров; в конце 1937 г. с ним было заключено соответствующее трудовое соглашение. Было предложено предусмотреть в проекте устройство для плавного перемещения верхней балки ярма магнита вместе с верхним полю-

\*) В нормальном режиме циклотрон ГРИ начал работать только в конце 1940 г., с камерой № 4 (внутренний диаметр 800 мм).

\*\*) С февраля 1938 г. Радиевый институт был переведен в систему Академии наук СССР и сокращенно стал называться РИАНом.

сом и его обмоткой с тем, чтобы была возможность вставлять в межполюсный зазор вакуумные камеры разной высоты \*). В. К. Федоров неоднократно встречался с Л. М. Неменовым и С. М. Гохбергом для согласования проекта. В начале 1938 г. он представил полный комплект рабочих чертежей магнита с диаметром полюсов 1,2 м. Масса магнита, согласно проекту, составляла ~75 т.

Результаты работы сотрудников кафедры теоретической физики изложены в отчете <sup>98</sup>, сотрудников кафедры электрических машин — в отчете <sup>99</sup> (см. также <sup>100</sup>).

В конце 1937 г. главному архитектору ЛФТИ Я. Д. Гликину было поручено обдумать проект здания для циклотрона (<sup>101</sup>; с. 195).

К времени начала проектирования циклотрона ЛФТИ (1935—1936 гг.) появились планы сооружения циклотронов в ряде стран Западной Европы. Однако ни в одном научном центре в Европе не был задуман столь большой циклотрон, как в ЛФТИ. Так, в Коллеж де Франс в Париже в 1934 г. начали проектировать циклотрон с диаметром полюсов  $D = 850$  мм (пущен в 1938 г.), в Институте теоретической физики в Копенгагене в 1936 г. — циклотрон с  $D = 900$  мм (пущен в 1938 г.), в Кембриджском университете (Англия в 1936 г. — циклотрон с  $D = 940$  мм (пущен в 1939 г.)). Таким образом, выбор параметров циклотрона ЛФТИ говорит о смелости замыслов и прозорливости физиков-ядерников Физтеха, о большом размахе их планов.

Даже к моменту завершения технического проекта циклотрона ЛФТИ в Европе строился только один циклотрон, по размеру превышавший ускоритель ЛФТИ, — это циклотрон Бирмингемского университета, с  $D = 1560$  мм (1938—1950 г.). В 1939 г. в лаборатории Лоренса в Беркли действовали два циклотрона, с  $D = 940$  и 1524 мм.

Основными сотрудниками лаборатории Курчатова, занимавшимися циклотроном, были Л. М. Неменов, физик-экспериментатор, Я. Л. Хургин, физик-теоретик, и П. Я. Глазунов — инженер-электрик \*\*). Игорь Васильевич организовал регулярные совещания нескольких групп. Рассматривались вопросы расчета и конструкции электромагнита, теории циклотрона, топографии и коррекции магнитного поля. В список участников совещаний, кроме уже названных лиц из ЛИИ и ЛФТИ, входили сотрудники Радиового института Д. Г. Алхазов и А. Н. Мурин (аспирант Курчатова).

Постановление Экономсовета при Совете Народных Комиссаров СССР о выделении средств на строительство здания для циклотрона ЛФТИ было принято 7 июня 1939 г. К этому времени уже были готовы проекты установки и здания, достигнута предварительная договоренность с заводами об изготовлении оборудования. Магнит для циклотрона был заказан на заводе «Электросила» в 1939 г. Специальное железо типа «армко» для этого магнита было изготовлено на заводе «Большевик». К февралю 1941 г. магнит был готов и начались его стендовые испытания.

22 сентября 1939 г. состоялась торжественная закладка здания Циклотронной лаборатории ЛФТИ \*\*\*). Проект здания был составлен архитектором Я. Д. Гликиным, рабочие чертежи — отделом капитального строительства ЛФТИ, начальником которого был Я. И. Лапковский, а глав-

\*) Эта особенность конструкции электромагнита циклотрона ЛФТИ оказалась очень удобной при выполнении работ, требующих выкатки вакуумной камеры из магнита.

\*\*) Я. Л. Хургин 29 июля 1940 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Теория циклотрона».

\*\*\*) Фактически строительные работы начались значительно раньше, так что ко дню торжественной церемонии уже была выложена часть стен здания.



ным инженером — А. Ф. Жигулев. Этот изобретательный, энергичный и высококвалифицированный специалист сыграл большую роль в успешном строительстве здания Циклотронной лаборатории. Строительные работы выполнялись 1-м строительным участком «Ленмашстроя».

В октябре 1940 г. Курчатов прекратил работу в Радиовом институте и со свойственной ему кипучей энергией всецело отдался руководству строительством циклотрона ЛФТИ. К лету 1941 г. здание Циклотронной лаборатории было почти готово<sup>102</sup>. Сюда был доставлен ВЧ генератор мощностью  $\sim 20$  кВт, изготовленный группой сотрудников ЛИИ. Вакуумная камера с пирексовыми изоляторами (ею в основном занимался Немецков) успешно прошла вакуумные испытания. Был намечен срок пуска циклотрона — 1 января 1942 г.

Война прервала все работы...

В 1943 г. по распоряжению Курчатова — директора Лаборатории № 2 АН СССР (так назывался тогда нынешний Институт атомной энергии им. И. В. Курчатова) — в осажденный Ленинград прилетели Л. М. Немецков и П. Я. Глазунов, чтобы вывезти из ЛФТИ в Москву ВЧ генератор, изоляторы дуантов, выкопанные из «хранилища» листы латуни и меди. Это оборудование, в свое время подготовленное для циклотрона ЛФТИ, было использовано для сооружения в Лаборатории № 2 первого московского циклотрона, с диаметром полюсов 73 см<sup>103</sup>. Циклотрон был пущен в 1944 г. Он был тогда единственным действующим циклотроном в СССР.

Курчатов считал, что этого недостаточно для обширных исследований по «урановой проблеме», которыми он руководил. Поэтому в 1945 г. Государственный Комитет Обороны принял решение о срочном завершении строительства циклотрона ЛФТИ. Эта работа была проведена под руководством Д. Г. Алхазова. Циклотрон ЛФТИ был пущен 27 ноября 1946 г. — был получен пучок дейтронов с энергией 6 МэВ при токе пучка на пробник 250 мкА.

Обстоятельства сложились так, что Курчатов так никогда и не увидел в собранном и действующем виде циклотрон ЛФТИ — ту установку, на строительство которой он потратил столь много усилий.

В лаборатории Курчатова в ЛФТИ разрабатывался еще один циклический ускоритель; в отличие от циклотрона он был предназначен для ускорения электронов. Эта установка, получившая название «квадратрон»<sup>104</sup>, с. 13), была предложена Я. Л. Хургиным, который изложил ее идею в 1938 г. на ядерном семинаре. Поскольку работы с быстрыми электронами самого Курчатова практически не интересовали, мы здесь не будем описывать этот ускоритель и ход его сооружения, которое также было прервано войной.

#### ж) Деление ядер урана

1. Поиски искусственно радиоактивных трансурановых элементов, которые, как предполагалось, должны возникать при облучении урана нейтронами, были начаты группой Ферми уже в 1934 г. К исследованиям такого рода вскоре подключились многие ядерные лаборатории. Неожиданно большое количество разных активностей, получаемых в реакциях  $U + n$  и  $Th + n$ , привело к возникновению сложной, запутанной ситуации, объяснения которой долго не могли найти. В конце 1938 г. Ган и Штрассман отправили в печать свою знаменитую статью<sup>105</sup>, а в начале 1939 г. были опубликованы не менее знаменитые письма О. Фриша и Л. Мейтнер<sup>106,107</sup>. Было найдено удивительное — и простое — объяснение загадок: под действием медленных нейтронов уран делится на два

примерно равных по массе осколка. Захватывающая история открытия деления ядра урана подробно описана во многих работах (см., например, статью В. Герлаха<sup>108</sup>).

Одна за другой в 1939 г. последовали важнейшие экспериментальные и теоретические работы, в которых выяснялись детали процесса деления, открывались новые факты. Прежде всего была экспериментально доказана справедливость гипотезы о делении ядра урана и была непосредственно измерена энергия деления. Было предсказано, а затем и показано, что под действием медленных нейтронов делится только крайне редкий изотоп урана — уран-235.

Уже в начале 1939 г. в нескольких независимых работах было установлено, что при делении урана испускаются вторичные нейтроны. Становилось ясно, что новые открытия в области деления урана могут приобрести фундаментальное практическое значение, — они впервые указали на то, что мечта об использовании «огромных запасов внутриядерной энергии» из области фантазии может перейти в область конкретных, в принципе осуществимых процессов. В газетах замелькали слова «цепная ядерная реакция» и пояснялось, что она будет возможна, если окажется, что на каждый акт деления урана выделяется несколько вторичных нейтронов.

И. В. Курчатов сразу после открытия деления урана наметил, какие исследования надо выполнить в первую очередь. Л. И. Русинов и Г. Н. Флеров занялись измерением среднего числа нейтронов ( $\nu$ ), испускаемых при каждом акте деления ядра урана. Полученный ими результат они сообщили на нейтронном семинаре ЛФТИ 10 апреля 1939 г. (это было отмечено в их докладе, сделанном на 4-м совещании по физике атомного ядра в Харькове в ноябре 1939 г.<sup>109</sup>). Поскольку в расчет результатов опыта входили взятые из литературы значения сечений реакций, известные с невысокой точностью, Русинов и Флеров получили значение  $\nu$  с большой относительной погрешностью:  $\nu = 2 \pm 1$ .

Неудивительно, что этому же вопросу — определению величины  $\nu$  — были посвящены работы ряда групп в разных странах, выполненные независимо и почти одновременно, с помощью различных методов.

Отчасти еще до получения надежного значения  $\nu$  были выполнены, опять-таки независимо во многих научных центрах, расчеты условий, при которых будет возможно осуществление цепной ядерной реакции деления урана. Один из первых таких расчетов содержался в работе сотрудников Ленинградского института химической физики (который в 1931 г. «отпочковался» от ЛФТИ и сохранил с ним тесные научные связи) Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона<sup>110</sup>. Авторы — ученики акад. Н. Н. Семенова — были знатоками теории химических цепных реакций. Их работа была наиболее подробной и аргументированной из числа опубликованных. Вскоре о ее результатах Ю. Б. Харитон делает обстоятельный доклад на 4-м совещании по физике атомного ядра в 1939 г.<sup>111</sup>. На этом же совещании обзорный доклад о делении урана и тория сделал А. И. Лейбуцкий<sup>112</sup>. Здесь также большое внимание было уделено анализу вопроса об осуществимости цепной ядерной реакции.

В дальнейшем, на протяжении 1940 и 1941 г., Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон неоднократно возвращались к различным аспектам расчета цепной ядерной реакции<sup>113–116</sup>. Совокупность их работ представляла собой подлинную энциклопедию по вопросам деления тяжелых ядер и теории цепной ядерной реакции. Несомненно, что глубокое понимание физики нейтронов, характерное для этих работ, в большой мере связано с участием авторов в оживленных дискуссиях, происходивших на заседаниях нейтронного семинара ЛФТИ под руководством Курчатова.

На начальном этапе наиболее подробно была разработана теория цепной реакции деления урана-235 медленными нейтронами. Вопрос о возможности осуществления цепной реакции деления урана-238 быстрыми нейтронами оставался открытым. Для его решения необходимо было, среди прочего, получить экспериментальные данные об энергетическом пороге деления, о ходе сечения деления с энергией нейтронов, о сечении неупругого рассеяния быстрых нейтронов на уране — поскольку этот процесс мог оказаться основной причиной, мешающей развитию цепной реакции деления вследствие перевода нейтронов в область ниже порога деления.

Естественно, что Курчатова живо интересовали эти вопросы. Под руководством Флерова аспирантка Курчатова по Пединституту им. М. П. Покровского Т. И. Никитинская производит измерение сечений неупругого рассеяния быстрых нейтронов на нескольких элементах.

В этой работе была получена оценка сечения неупругого рассеяния нейтронов на уране:  $\sigma = 1,6$  бн \*). На основании этого результата был сделан вывод, что цепная реакция на быстрых нейтронах на уране-238 невозможна.

2. В 1939 г. Курчатов поручает своему аспиранту по Физическому отделу РИАН К. А. Петржаку присоединиться к Флерову, чтобы создать установку, пригодную для решения ряда задач, связанных с проблемой деления урана-238 быстрыми нейтронами. Для намеченных исследований необходимо было разработать счетчик быстрых нейтронов высокой чувствительности. За исходный образец была взята камера деления О. Фриша; чувствительность была увеличена по сравнению с прототипом в 30—40 раз путем соответствующего увеличения площади электродов, покрытых окисью урана. Была разработана многослойная камера, в которой общая площадь 15 слоев окиси урана составляла 1000 см<sup>2</sup>.

Как известно, камера деления может быть сделана полностью бесфоновой, так как при надлежащих параметрах усилителя (коэффициент усиления и разрешающая способность) импульсы от  $\alpha$ -частиц, испускаемых ураном и его дочерними продуктами, не будут регистрироваться даже в том случае, если происходит почти одновременное испускание нескольких  $\alpha$ -частиц. Таким образом, камера будет регистрировать только акты деления урана.

Однако при наладке аппаратуры Петржак и Флеров обнаружили, что в отсутствие источника нейтронов камера регистрирует  $\sim 6$  больших («осколочных») импульсов в час. Эксперименты проводились сначала в РИАНе, на улице Рентгена, а затем — в расчете на среду, более спокойную в смысле радиоактивного фона, — в ЛФТИ. Было выполнено множество разных контрольных опытов. Большие импульсы неизменно появлялись с той же средней частотой. Тогда Курчатов, Петржак и Флеров решили объявить научному миру о предполагаемом открытии нового явления — спонтанного деления ядер урана. Первые сообщения об этом сделали Курчатов — на собрании Отделения физико-математических наук АН СССР в конце мая 1940 г.<sup>118</sup>, и В. Г. Хлопин — на собрании Отделения химических наук, в то же время. В июне того же года Петржак и Флеров отправили небольшую заметку в «Доклады АН СССР»<sup>119</sup>. Вопрос о том, к какому из изотопов урана относятся наблюдаемые акты спонтанного деления, был оставлен открытым. В более подробной статье, отправленной в печать в июле 1940 г.<sup>120</sup>, было высказано предположение, что спонтанно делится, вероятнее всего, уран-235. Впоследствии оказалось,

\*) В опубликованной аннотации этой работы<sup>117</sup> величина сечения вследствие опечатки указана неправильно.

что наблюдалось деление урана-238, причем период деления несколько меньше, чем по первоначальной оценке, приведенной в работе <sup>120</sup> ( $0,8 \cdot 10^{16}$  лет вместо  $(4 \pm 1) \cdot 10^{16}$  лет).

Хотя Курчатов был руководителем этой работы, наметил «все основные контрольные эксперименты и принимал самое непосредственное участие в обсуждении результатов исследований» <sup>120</sup>, он отказался поставить свою фамилию в числе соавторов. По свидетельству Петржака <sup>121</sup> он опасался, что впоследствии непосредственные исполнители будут забыты, и останется только одно его имя.

В дальнейшем с помощью многослойной камеры деления с увеличенной площадью рабочего слоя ( $\text{ThO}_2$  — 5000 см<sup>2</sup>, 15 электродов) Г. Н. Флеров и И. С. Панасюк попытались найти спонтанное деление тория <sup>122</sup>. Была получена только оценка нижней границы для величины периода спонтанного деления:  $T_{1/2} > 10^{19}$  лет.

Открытие спонтанного деления ядер имело большое значение для многих наук. Прежде всего оно означало открытие фундаментального свойства атомных ядер — их способности к неизвестному ранее типу радиоактивного распада. В области тяжелых ядер ( $Z > 100$ ) спонтанное деление оказалось основным процессом, определяющим их устойчивость. Поэтому вопросы об их периоде деления и о границе периодической системы элементов тесно связаны <sup>123</sup>. Возможность и степень сложности синтеза далеких трансурановых элементов непосредственно определяются величиной периода спонтанного деления соответствующих ядер. Способность тяжелых ядер к спонтанному делению приводит к существенным следствиям в астрофизике, а также в геофизике <sup>123</sup>.

3. На 5-м совещании по физике атомного ядра (Москва, ноябрь 1940 г.) Курчатов сделал доклад «Деление тяжелых ядер», в котором он проанализировал основные работы в этой области, опубликованные за год, прошедший после 4-го совещания <sup>124</sup>. Отметим, что как раз на этот срок приходится полное прекращение публикаций в иностранных журналах работ по делению тяжелых ядер: группа Жолио-Кюри перестала печатать свои работы после начала войны с Германией в сентябре 1939 г., американские физики летом 1940 г. решили впредь воздержаться от публикаций, чтобы не давать никакой научной информации в указанной области исследователям в фашистской Германии. Поэтому в том разделе своего доклада, который касался вопроса об осуществимости цепной ядерной реакции деления урана, Курчатов опирался в основном на расчеты Зельдовича и Харитона и некоторые другие советские работы. Он ясно указал, что принципиально вопрос об осуществимости цепной реакции деления решен положительно: видны два пути — либо использование обычного урана в смеси с тяжелой водой в качестве замедлителя нейтронов, либо использование урана, обогащенного изотопом  $^{235}\text{U}$  в смеси с обычной водой или, возможно, другими легкими веществами (например, углеродом), если окажется, что они обладают достаточно малым сечением захвата нейтронов. Разумеется, «на пути практической реализации в исследованных сейчас системах возникают громаднейшие трудности». Ведь речь шла о получении — в промышленном масштабе — тяжелой воды или обогащенного урана, в котором содержание изотопа  $^{235}\text{U}$  увеличено, например, вдвое (1,4% вместо 0,7%).

Как мы видим, в последнем предвоенном докладе Курчатова не упоминается лишь одна очень важная для сооружения ядерного реактора идея, которая возникла позже (если не говорить об иностранных работах, в то время не публиковавшихся); речь идет о предложении использовать «решетку» из урана и замедлителя вместо их однородной смеси, т. е. отдельные куски (блоки) урана окружить замедлителем. Это позволяет существ-

венно уменьшить роль резонансного захвата нейтронов ураном-238 и благодаря этому создать ядерный реактор на естественном уране. (В Советском Союзе, как указывает Ю. В. Сивинцев (<sup>125</sup>, с. 36), идею гетерогенного реактора высказал на одном из курчатовских семинаров (в Москве в 1943 г.) видный теоретик И. Я. Померанчук. Он и И. И. Гуревич в 1943 г. разработали общую теорию такой системы (<sup>2</sup>, с. 63—64).

4. Первым ученым в нашей стране, уделившим большое внимание научно-организационным вопросам, связанным с изучением деления ядер урана и с возможным громадным народнохозяйственным значением результатов таких исследований, был академик В. И. Вернадский. Он считал, что прежде всего необходимо в кратчайший срок выяснить, есть ли в Советском Союзе достаточные запасы урановой руды. Очень важным он считал также вопрос о выделении урана-235 из природного урана.

По инициативе Вернадского 25 июня 1940 г. Отделение геолого-географических наук АН СССР выделило «тройку», председателем которой стал Вернадский. Ей поручалось разработать проект мероприятий, которые необходимо осуществить в связи с возможностью использования внутриатомной энергии.

12 июля 1940 г. «тройка» обратилась со специальной запиской в Совнаркому; в ней содержался ряд предложений по урановой проблеме. Тем же числом датирована записка Вернадского и Хлопина в Президиум АН СССР, в которой они подробно изложили план необходимых организационных мероприятий на 1941—1942 г. \*)

30 июля 1940 г. на заседании Президиума АН СССР принято постановление о создании Комиссии по проблеме урана при Президиуме АН СССР (сокращенно ее называли Урановой комиссией). Председателем ее был В. Г. Хлопин, заместителями его — В. И. Вернадский и А. Ф. Иоффе; среди ее членов были И. В. Курчатов, П. Л. Капица, Ю. Б. Харитон (<sup>126</sup>, ст. 336).

Энергичного, привыкшего к напряженной работе Курчатова, по-видимому, не удовлетворяли темпы развертывания работ по урановой проблеме. Знакомился ли он подробно с программой первоочередных работ, намеченной в упомянутой докладной записке Вернадского и Хлопина? Сейчас об этом трудно судить. Если и знакомился, то, по-видимому, он и его коллеги считали необходимым еще раз подчеркнуть перед руководством Академии наук СССР неотложность комплекса работ и дополнить программу в некоторых пунктах. 29 августа 1940 г. в Президиум АН СССР на имя ее постоянного секретаря П. А. Светлова было отправлено письмо, подписанное И. В. Курчатовым, Ю. Б. Харитоном, Л. И. Русиновым и Г. Н. Флеровым: «Об использовании энергии урана в цепной реакции» (<sup>127</sup>, с. 199). Приведем заголовки пунктов предложенной ими в этом письме «программы работ на ближайшее время»: 1. Определение условий разветвления цепи в массе металлического урана. 2. Выяснение влияния нейтронов, возникших при расщеплении урана с атомным весом 238, на ход цепной реакции в смеси урана и воды. 3. Выяснение величины эффективных поперечных сечений для захвата медленных нейтронов тяжелым водородом, гелием, углеродом, кислородом и другими легкими элементами. 4. Выяснение условий осуществления цепной реакции в смеси уран — тяжелая вода. 5. Выяснение вопроса о получении тяжелой воды в больших количествах (далее поясняется, что речь идет о нескольких тоннах). 6. Обогащение урана изотопом с атомным весом 235.

---

\*) С подробностями деятельности Вернадского, относящейся к урановой проблеме, можно ознакомиться в книге И. И. Мочалова (<sup>128</sup>, с. 330—356).

Легко заметить, что в плане, разработанном группой Курчатова, имеется в виду конкретная цель предлагаемых разделов исследований — создать теоретические и экспериментальные предпосылки для сооружения ядерного реактора.

Игорь Васильевич проявляет настойчивость и не упускает случая лишний раз попытаться ускорить события. По его инициативе во время 5-го совещания по физике атомного ядра (Москва, ноябрь 1940 г.) была составлена еще одна записка правительству, в которой подчеркивалась важность проблемы деления урана и необходимость организации широких исследований в этой области (<sup>176</sup>, с. 39). Решения совещания были обсуждены и утверждены Урановой комиссией 30 ноября 1940 г. (<sup>126</sup>, с. 338).

Начавшаяся Великая Отечественная война привела к полному прекращению всех ядерных работ в нашей стране.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По воспоминаниям товарищей Игоря Васильевича по ЛФТИ известно, что уже в первые после начала Великой Отечественной войны дни он пришел в лабораторию А. П. Александрова, занимавшуюся вопросами защиты кораблей от магнитных мин, и, отложив работы по ядру до мирных времен, с присущей ему энергией подключился к работе коллектива этой лаборатории. Об этих поистине героических работах написано в недавно вышедшей книге <sup>128</sup>, в которой scrupulously собран огромный материал, позволяющий, в частности, проследить и за «военно-морской одиссеей» Курчатова. 9 августа 1941 г. он вместе с А. П. Александровым прибыл в Севастополь и провел там в напряженной работе 3 месяца, возглавив службу размагничивания кораблей с конца августа. В ноябре — декабре эти работы были продолжены в Поти и на Каспии, так что в Казань, где размещался ЛФТИ, Игорь Васильевич приехал в январе 1942 г.

Несколько позже, во время командировки на полигон, где испытывалась разрабатываемая ЛФТИ танковая броня и методы защиты танков от прямых попаданий снарядов, заболел и умер от сыпного тифа заведующий лабораторией танковой брони В. Л. Куприенко. И. В. Курчатов замещает его на этом посту.

Дальнейшая биография И. В. Курчатова хорошо известна: вызов в Москву в конце 1942 г. <sup>\*</sup>), во время которого ему предлагают возглавить работы по проблеме урана — той самой проблеме, к решению которой настойчиво призывал он сам и некоторые его коллеги по институту и Академии наук.

Закончим нашу статью выпиской из примечательного документа — характеристики И. В. Курчатова, составленной в 1940 г. и подписанной Заместителем директора ЛФТИ В. Л. Куприенко и ученым секретарем института В. М. Тучкевичем: «Как в своей личной научной работе, так и в деле руководства молодыми научными сотрудниками, И. В. Курчатов создал особый стиль работы, характерными чертами которого являются умение сосредоточить все силы на решении поставленной задачи и быстро закончить начатое исследование. Это умение работать с большим моральным подъемом, быстрыми темпами, И. В. Курчатов передает и своим сотрудникам, чем и обеспечивает быстрое доведение до конца поставленной работы. Результатом этого метода работ и является то, что за 15 лет деятельности И. В. Курчатова им выполнена громадная по объему работа в различных областях физики» (Архив ИАЭ, ф. 2, оп. 1, ед. хр. 169, с. 33).

<sup>\*</sup>), Точной даты вызова И. В. Курчатова в Москву нет в упоминавшихся его биографиях. Мы основываемся на сведениях о командировках Игоря Васильевича в Москву, сохранившихся в приказах ЛФТИ о командировках сотрудников института.

Отмеченные в характеристике особенности стиля работы Курчатова определялись его исключительным по масштабу врожденным талантом организатора. Укрепившиеся за 15 лет работы в замечательном коллективе ЛФТИ эти особенности, в сочетании с талантом Курчатова-физика и выдающимися его личными качествами, обеспечили быстрое и успешное доведение до конца имевших первостепенное значение для страны работ по проблеме урана.

Игорь Васильевич — гордость ленинградской физической школы, гордость советской физики, замечательный ученый и гражданин страны Советов.

\* \* \*

Мы с признательностью вспоминаем помощь, оказанную нам покойными соратниками И. В. Курчатова — Д. Г. Алхазовым, М. А. Еремеевым и Л. М. Неменовым. В статье использованы, далее, материалы, любезно сообщенные П. Я. Глазуновым, Г. А. Гринбергом, Б. С. Дзелеповым, Н. Н. Лебедевым, Т. И. Никитинской и В. К. Федотовым. Очень ценной была для нас поддержка этой работы, оказанная сотрудниками ИАЭ им. И. В. Курчатова А. И. Васиным и И. Н. Головиным. Наконец, мы хотели бы поблагодарить работников архивов: Н. М. Митрякову (Архив АН СССР), З. А. Гульцеву (Архив ИАЭ им. И. В. Курчатова), Н. А. Варназову и Е. П. Степанову (Архив ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР).

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

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Курчатов: персональный указатель литературы. — М.: Атомиздат, 1977. — (а) Работы акад. И. В. Курчатова, с. 5—16; б) Литература об акад. И. В. Курчатове, с. 19—31).
2. Головин И. Н. И. В. Курчатов. — М.: Атомиздат, 1978.
3. Астапенков П. Т. Курчатов. — М.: Молодая гвардия, 1968.
4. Курчатов И., Синельников К. — Тр. ЛФТИ, 1926, вып. 3, с. 67.
5. Hartig Н. Е. — Phys. Rev., 1925, v. 25, p. 11, v. 26, p. 221.
6. Курчатов И., Синельников К. — ЖРФХО. Ч. физ., 1927, т. 59, в. 3—4, с. 327.
7. Ioffe A., Kurchatov I., Sinelnikov K. — ДАН СССР. Сер. А, 1927, № 4, с. 65.
8. Landau L., Rosenkevitch L. — Zs. Phys., 1932, Bd. 78, S. 847, Phys. Zs. Sowjetunion 1932, Bd. 2, S. 200.
9. Александров А. П., Иоффе А. Ф. — ЖТФ, 1933, т. 3, с. 32.
10. Робекко П., Курчатов И. — ДАН СССР. Сер. А, 1928, № 11, с. 187.
11. Вул Б. М., Шотов А. П. — В кн.: Проблемы современной физики. — Л.: Наука, 1980. — С. 93.
12. Робекко П. П., Курчатов И. В. — Физ. и производство, 1930, № 2—3, с. 61.
13. Робекко П., Курчатов И. — ЖРФХО. Ч. физ., 1928, т. 60, с. 145.
14. Робекко П., Курчатов И., Синельников К. — ЖРФХО. Ч. физ., 1929, т. 61, с. 459.
15. Курчатов И. В., Синельников К. Д. — ЖТФ, 1931, т. 1, вып. 1, с. 655.
16. Курчатов И. В., Ковалев Н. А., Костина Т. З., Русинов Л. И. — ЖТФ, 1933, т. 3, с. 1163.
17. Кикоин И. К. — а) Природа, 1974, № 1, с. 102; б) Квант, 1974, № 5, с. 36.
18. Курчатов И. В. Сегнетоэлектрики. — Л.—М.: Гостехиздат, 1933.
19. Иоффе А. Ф. — УФН, 1961, т. 73, с. 611.
20. Робекко П. П., Курчатов И. В. — ЖРФХО. Ч. физ., 1930, т. 62, с. 251.
21. Anderson J. A. — Rept. Nat. Res. Council, April 1918.
22. Cady W. G. — Ibid., May 1918.
23. Valasek J. — Phys. Rev., 1920, v. 15, p. 537.

24. Valases J.— Ibid., 1921, v. 17, p. 422.
25. Valases J.— Ibid., p. 475.
26. Valases J.— Ibid., 1922, v. 19, p. 478.
27. Eggera I.— J. de Phys. et Radium, Ser. VI, 1924, t. 5, p. 304.
28. Эррера И.— ЖЭТФ, 1933, т. 3, с. 31.
29. Курчатов И., Щепкин Г.— ЖЭТФ, 1932, т. 2, с. 245.
30. Курчатов И., Бернашевский В.— ЖРФХО. Ч. физ., 1930, т. 62, с. 477.
31. Вальтер А. К., Курчатов И. В., Синельников К. Д.— ЖТФ, 1931, т. 1, с. 121.
32. Курчатов И., Щепкин Г.— ЖЭТФ, 1931, т. 1, с. 164.
33. Еремеев М. А., Кобеко П. П., Курчатов Б. В., Курчатов И. В.— ЖЭТФ, 1932, т. 2, с. 102.
34. Курчатов И. В.— ЖЭТФ, 1933, т. 3, с. 181.
35. Курчатов И. В. Ibid., с. 537.
36. Курчатов Б. В., Курчатов И. В.— ЖЭТФ, 1932, т. 2, с. 319.
37. Курчатов И. В.— В кн. Проблемы современной физики в работах Физикотехнического института академика А. Ф. Иоффе.— Л.: Изд-во АН СССР, 1936.— с. 36.
38. Kourtschatov I. V. Le Champ Moléculaire dans les Diélectriques (Le sel de Seignette).— Paris: Hermann, 1938.
39. Курчатов И.— В кн. Физический словарь.— М.: Гл. ред. техн. и энц. слов., 1938, т. 4, с. 796.
40. Смоленский Г. А., Крайник Н. Н. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики.— М.: Наука, 1968.
41. Желудев И. С. Электрические кристаллы.— М.: Наука, 1979.
42. Струков Б. А. Сегнетоэлектричество.— М.: Наука, 1979.
43. Иона Ф., Ширани Д. Сегнетоэлектрические кристаллы.— М.: Мир, 1965.
44. Japies E. T. Ferroelectricity. Princeton: Princeton Univ. Press, 1953.
45. Курчатов И. В. Расщепление атомного ядра.— М.—Л.: Гостехиздат, 1935.
46. Курчатов И. В. Электрическая прочность вещества.— М.: Московский рабочий, 1930.
47. Курчатов И. В., Наследов Д. Н., Семенов Н. Н., Харитон Ю. Б. Электронные явления.— Л.: ОНТИ Химтеорет., 1935.
48. Курчатов И. В., Семенов Н. Н., Харитон Ю. Б. Курс физики. Молекулярная физика (Газы и рідини).— Харьков; Київ: Держ. наук.-техн. вид. 1935.
49. Иоффе А. Ф., Семенов Н. Н. Курс физики. Т. 4. Молекулярная физика (Газы и жидкости).— Л.—М.: ГТТИ, 1932.
50. То же.— Изд. 2-е.— 1933.
51. Курчатов И. В.— ЖТФ, 1931, т. 1, с. 723.
52. Курчатов И. В.— ЖТФ, 1931, т. 3, с. 664.
53. Skobelzyn D.— Zs. Phys., 1924, B. 28, S. 278.
54. Kapitza P. L.— Proc. Cambr. Phil. Soc., 1923, v. 21, p. 511.
55. Skobelzyn D.— Zs. Phys., 1927, B. 34, S. 354.
56. Вклад академика А. Ф. Иоффе в становление ядерной физики в СССР.— Л.: Наука, 1980.
57. Lawrence E. O., Livingston M. S.— Phys. Rev., 1932, v. 40, p. 19.
58. Курчатов И., Щепкин Г., Вибе А., Бернашевский В.— ДАН СССР, 1934, т. 1, с. 486.
59. Курчатов И., Синельников К., Щепкин Г., Вибе А.— ЖЭТФ, 1934, т. 4, с. 545.
60. Курчатов И., Синельников К.— Ibid., с. 548.
61. Fermi E.— Ric. Scient., 1934, t. 5 (1), p. 283.
62. Fermi E.— Ibid., p. 330.
63. Fermi E.— Nature, 1934, v. 133, No. 3368, p. 757.
64. Joliot F., Curie I.— C.R. Ac. Sci., 1934, t. 198, p. 254.
65. Курчатов И., Мысовский Л., Щепкин Г., Вибе А.— ДАН СССР, 1934, т. 3, с. 221.
66. Curie I., Joliot F.— C. R. Ac. Sci., 1934, t. 198, p. 559.
67. Curie I., Joliot F., Preiswerk P.— Ibid., p. 2089.
68. Курчатов Б., Курчатов И., Щепкин Г., Вибе А.— ДАН СССР, 1934, т. 3, с. 226.
69. Курчатов И., Мысовский Л., Курчатов Б., Щепкин Г., Вибе А.— Ibid., с. 422.
70. Kourtschatov B., Kourtschatov I., Mysowsky L., Rousinow L., C. R. Ac. Sci., 1935, t. 200, p. 1201.— Перевод: Курчатов Б. В., Курчатов И. В., Мысовский Л. В., Русинов Л. И.— УФН, 1967, т. 93, с. 399.



71. Szilard L., Chalmers T. A.— *Nature*, 1935, v. 135, № 3403, p. 98.
72. Fermi E., Amaldi E., D'Agostino O., Rasetti E., Segre E.— *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, 1934, v. 146, p. 483.
73. Курчатов И. В.— Расщепление ядер нейтронами: (Университет физико-химии и энергетики им. акад. Н. Д. Зелинского при Всесоюзном совете научн. инж.-технич. обществ. Физ.-хим. факультет).— М., 1936.— Лекция перепечатана в кн.: Курчатов И. В.— *Ядерную энергию — на благо человечества*.— М.: Атомиздат, 1978.— С. 209.
74. Курчатов И. В.— *Изв. АН СССР. ОМЕН. Сер. физ.*, 1936, № 1/2, с. 339.
75. Bothe W., Gentner W.— *Naturwissenschaften*, 1937, Bd. 25, S. 284; *Zs. Phys.*, 1937, Bd. 106, S. 236.
76. Snell A.— *Phys. Rev.*, 1937, v. 52, p. 1007.
77. Русинов Л. И., Юзефович А. А.— *ДАН СССР*, 1938, т. 20, с. 647.
78. Русинов Л. И., Юзефович А. А.— *Ibid.*, 1939, т. 22, с. 580.
79. Русинов Л. И., Юзефович А. А.— *Ibid.*, 1939, т. 24, с. 128.
80. Гринберг А. П., Русинов Л. И.— *Ibid.*, 1940, т. 27, с. 649; *ЖЭТФ*, 1940, т. 10, с. 1018; *Phys. Rev.*, 1940, v. 58, p. 181.
81. Гринберг А. П.— *УФН*, 1980, т. 132, с. 663.
82. Будницкий Д. З., Курчатов И. В., Латышев Г. Д.— *ЖЭТФ*, 1935, т. 5, с. 360.
83. Kourtchatov B., Kourtchatov I., Latyshev G.— *C.R. Ac. Sci.*, 1935, t. 200, p. 1199.
84. Курчатов И., Морозов А., Щенкин Г., Короткевич П.— *ЖЭТФ*, 1938, т. 8, с. 885.
85. Arzimowitsch L., Kurtschatow I., Latyschew G., Chromow W.— *Phys. Zs. Sowjetunion*, 1935, Bd. 8, S. 472.
86. Арцимович Л., Курчатов И., Мысовский Л., Палибин П.— *ЖЭТФ*, 1935, т. 5, с. 659.
87. Будницкий Д. З., Курчатов И. В.— *Ibid.*, с. 671.
88. Artsimovitch L., Kourtchatov I., Missovskii L., Pali bin P.— *C.R. Ac. Sci.*, 1935, t. 200, p. 2159.
89. Szilard L.— *Nature*, 1935, v. 136, p. 950.
90. Amaldi E., Fermi E.— *Ric. Scient.*, 1935, t. 6 (2), p. 344.
91. Fermi E., Amaldi E.— *Ibid.*, p. 443.
92. Bohr N.— *Nature*, 1936, v. 137, No. 3461, p. 344.
93. Breit G., Wigner E.— *Phys. Rev.*, 1936, v. 49, p. 519.
94. Лейпунский А. И., Русинов Л. И.— *Изв. АН СССР. ОМЕН. Сер. физ.*, 1938, № 1/2, с. 177.
95. Рукавишников В. Н., Алхазов Д. Г.— *Тр. Гос. рад. Ин-та*, 1938, т. 4, с. 171.
96. Алхазов Д. Г., Курчатов И. В., Мещеряков М. Г., Рукавишников В. Н.— *ДАН СССР*, 1939, т. 24, с. 31.
97. Курчатов И. В.— *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, 1940, т. 4, с. 372.
98. Гринберг Г. А., Конторович М. И., Лебедев Н. Н.— *Расчет электромагнита для установки типа Лоренса*.— *ЛИИ, научн. отдел*, Н 883, Р 2515, февраль 1938.
99. Электромагнит для циклотрона. Ч. 1: Нейман Л. Р., Блохин А. И., Кельзон Е. И. Экспериментальное исследование модели электромагнита; ч. 2: Гохберг С. М. Расчет электромагнита; ч. 3: Гохберг С. М., Федоров В. К. Описание конструкции.— *ЛИИ, научн. отдел*, Р. 2500, 1938.
100. Нейман Л. Р., Блохин А. И., Кельзон Е. И.— *Тр. Ленингр. индустр. ин-та*, 1939, № 5. Раздел электротехники, вып. 1, с. 37.
101. Воспоминания об А. Ф. Иоффе.— *Л.: Наука*, 1973.
102. Советский циклотрон.— *Правда*, 22 июня 1941 г.— (См. <sup>56</sup>, с. 28).
103. Неменов Л. М.— *Техника — молодежи*, 1975, № 6, с. 18.
104. Гохберг Б. М.— *УФН*, 1940, т. 24, с. 11.
105. Hahn O., Strassmann F.— *Naturwissenschaften*, 1939, B. 27, S. 11.
106. Meitner L., Frisch O.— *Nature*, 1939, v. 143, No. 3615, p. 239.
107. Frisch O., — *Ibid.*, No. 3616, p. 276.
108. Gerlach W.— *Deutsches Museum. Abhandlungen und Berichte*, 1969, Bd. 37, S. 45.— Частичн. перевод в кн.: *Нейтрон. Предыстория. Открытие. Последствия*.— М.: Наука, 1975.— С. 53.
109. Русинов Л. И., Флеров Г. Н.— *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, 1940, т. 4, с. 310.
110. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б.— *ЖЭТФ*, 1939, т. 9, с. 1425.
111. Никитин С. Я.— *УФН*, 1940, т. 23, с. 196.
112. Лейпунский А. И.— *Изв. АН СССР. Сер. физ.*, 1940, т. 4, с. 291.
113. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б.— *УФН*, 1940, т. 23, с. 329.
114. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б.— *ЖЭТФ*, 1940, т. 10, с. 29.

115. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б.— Ibid., с. 477.
116. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б.— УФН, 1941, т. 25, с. 381; 1983, т. 139, с. 501 (ч. II — в данном номере УФН).
117. Никитинская Т. И., Флеров Г. Н.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1941, т. 5, с. 603.
118. Вестн. АН СССР, 1940, № 6, с. 55 (см. с. 56 и 60).
119. Петржак К. А., Флеров Г. Н.— ДАН СССР, 1940, т. 28, с. 500.
120. Петржак К. А., Флеров Г. Н.— ЖЭТФ, 1940, т. 10, с. 1013.
121. Реформатский И. А.— АЭ, 1981, т. 51, с. 132.
122. Панасюк И. С., Флеров Г. Н.— ДАН СССР, 1941, т. 30, с. 699.
123. Петржак К. А., Флеров Г. Н.— УФН, 1961, т. 73, с. 655.
124. Курчатов И. В.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1941, т. 5, с. 578.
125. Сивинцев Ю. В.— И. В. Курчатов и ядерная энергетика.— М.: Атомиздат, 1980.
126. Мочалов И. И. Владимир Иванович Вернадский (1863—1945).— М.: Наука, 1982.
127. Снегов С. А. Творцы.— М.: Сов. Россия, 1979.
128. Ткаченко Б. А. История размагничивания кораблей советского военно-морского флота.— Л.: Наука, 1981.