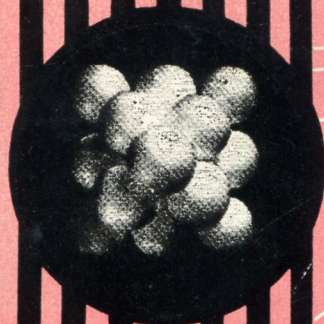


ОЧЕРКИ  
ПО ИСТОРИИ  
РАЗВИТИЯ  
ЯДЕРНОЙ  
ФИЗИКИ  
В СССР





ОЧЕРКИ  
ПО ИСТОРИИ  
РАЗВИТИЯ  
ЯДЕРНОЙ  
ФИЗИКИ  
В СССР



Strand

к 50-летию  
расщепления  
атомного  
ядра



---

АКАДЕМИЯ НАУК  
УКРАИНСКОЙ  
ССР

---

ХАРЬКОВСКИЙ  
ФИЗИКО-  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ



КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1982



---

**ОЧЕРКИ  
ПО ИСТОРИИ  
РАЗВИТИЯ**

---

**ЯДЕРНОЙ  
ФИЗИКИ  
| В СССР**

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1982



УДК 53.06; 530.1; 537.5; 539.1; 539.14; 539.16; 539.17; 620.9;  
621.039; 621.384

**Очерки по истории развития ядерной физики в СССР: —**  
Киев : Наук. думка, 1982. — 332 с.

Сборник посвящен 50-летию осуществления в 1932 г. впервые в СССР расщепления атомного ядра, выполненного учеными Украинского физико-технического института в г. Харькове К. Д. Синельниковым, А. И. Лейпунским, А. К. Вальтером, Г. Д. Латышевым путем обстрела мишени из лития ускоренными протонами с энергией 250 кэВ. В нем отражены некоторые основные этапы развития ядерной физики в СССР за прошедшие 50 лет. Представлены результаты исследований в области экспериментальных и теоретических исследований по ядерной физике, физике элементарных частиц, физике и технике ускорителей и ядерной энергетике.

Для научных работников, инженеров, преподавателей и студентов физических факультетов, а также специалистов по истории науки и техники.

---

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

*Е. В. Инопин* (ответственный редактор), *А. П. Ключарев* (зам. ответственного редактора), *Н. Г. Афанасьев*, *И. И. Залюбовский*, *В. И. Курилко*, *Ю. Н. Рашук*, *А. П. Рекало* (ответственный секретарь), *Р. П. Слабоспицкий*, *П. В. Сорокин*, *В. Е. Сторижко*, *В. М. Струтинский*, *Ю. И. Титов*

Рецензент *В. Ю. Гончар*

Редакция физико-математической литературы

О 1704070000-567  
М221(04)-82 195-82

© Издательство «Наукова думка», 1982



## ПРЕДИСЛОВИЕ

Ядерная физика относится к фундаментальным наукам и является одним из основных направлений развития естествознания. Это связано с уникальными свойствами атомного ядра. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре, а его заряд определяет строение электронной оболочки и тем самым наиболее существенные физические и химические свойства вещества. Поэтому изучение строения атомного ядра и механизма ядерных взаимодействий, что составляет предмет исследований в ядерной физике, представляет принципиальный научный интерес. Кроме того, со второй половины текущего столетия все возрастающими темпами развивается ядерная энергетика. Последние годы отмечены широким применением методов ядерной физики в смежных областях естествознания, таких, как физика твердого тела, химия, биология, медицина, материаловедение, а также в различных областях новейшей техники. Все это вызывает необходимость дальнейшего глубокого изучения свойств атомных ядер и взаимодействия различных ядерных излучений с веществом.

В истории развития фундаментальных исследований 1932 г. с полным правом можно назвать «золотым» годом ядерной физики. Открытие нейтрона, второго кирпичика в здании атомного ядра, осуществление первого ядерного превращения с помощью ускоренных частиц, открытие позитрона (первой античастицы), открытие тяжелого водорода, фундаментальные теоретические исследования, заложившие основу квантовой электродинамики, — все эти величайшие открытия и исследования датированы 1932 г.

Открытие нейтрона создало новую эпоху в ядерной физике. Осуществление ядерного превращения с помощью искусственно ускоренных заряженных частиц вызвало мощное развитие ускорителей — основы экспериментальной ядерной физики.

Систематические исследования и разработка ускорителей заряженных частиц для их использования при изучении атомного ядра в Советском Союзе начались в тридцатых годах, когда в Украинском физико-техническом институте под руководством К. Д. Синельникова была организована высоковольтная лаборатория, целью которой было создание электростатических ускорителей. В то же время в Ленинграде, в Физико-техническом и Радиовом институтах, под руководством и при непосредственном



участи И. В. Курчатова, приступили к созданию циклотрона. Результатом работы высоковольтной лаборатории была ускоряющая установка в виде разрядной трубки, высокое напряжение к которой прикладывалось от выпрямительного каскада. С помощью этого ускорителя и было расщеплено атомное ядро.

Это событие сыграло большую роль в развитии ускорительной техники и ядерной физики в нашей стране. Кроме научного интереса оно имело глубокое психологическое значение. Прошло всего 15 лет со времени установления Советской власти. В стране еще ощущались последствия хозяйственной разрухи, вызванной гражданской войной, промышленность была слабо развита. Несмотря на все это, молодые советские ученые, в короткие сроки, смогли провести фундаментальный ядерный эксперимент, спустя полгода после опытов Дж. Кокрофта и Э. Уолтона, выполненных в Кавендишской лаборатории Э. Резерфорда.

После открытий 1932 г. ядерная физика развивается в двух связанных направлениях. Одно из них — изучение взаимодействия нейтронов с атомными ядрами и веществом; другое — изучение структуры ядер и ядерных взаимодействий с помощью ускоренных заряженных частиц. Оба эти направления получили широкое развитие в Советском Союзе. За 50 лет пройден большой путь исследований во всех областях ядерной физики от первых опытов И. В. Курчатова и А. И. Лейпунского с медленными нейтронами и от расщепления лития до установления фундаментальных закономерностей в структуре атомных ядер, нейтронной физике малых и средних энергий, физике деления атомных ядер, ядерной физике тяжелых ионов, в синтезе заурановых элементов и физике элементарных частиц. Осуществление исследований такого масштаба стало возможным благодаря глубоким теоретическим исследованиям и созданию различных ускорителей, способных ускорять заряженные частицы, различной массы и заряда, сообщая им энергию от  $10^4$  до  $10^{11}$  эВ.

Следствием фундаментальных экспериментальных и теоретических исследований стала ядерная энергетика, которая прошла короткий, но бурный путь развития от первого атомного реактора и первой АЭС в Обнинске до современных АЭС на быстрых нейтронах и до термоядерных ловушек синтеза легких элементов.

Вклад советских ученых в ядерную физику как фундаментальную науку и ядерную энергетику в самом широком смысле ее прикладного значения велик. Некоторым вопросам истории и развития ядерной физики в СССР и посвящен данный сборник.



**ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

Научная общественность нашей страны отмечает в 1982 г. пятидесятилетие расщепления атомного ядра в Харьковском физико-техническом институте АН УССР. Это открытие вошло в историю советской науки как событие огромнейшего значения. В марте 1932 г. было осуществлено искусственное превращение ядра лития в две альфа-частицы в крупнейшей и лучшей в капиталистическом мире Кавендишской лаборатории в Кембридже английскими учеными Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном. В октябре того же года научные сотрудники Украинского физико-технического института К. Д. Синельников, А. И. Лейпунский, А. К. Вальтер и Г. Д. Латышев расщепили ядро лития, бомбардируя его ядрами водорода (протонами), ускоренными в разрядной трубке высоковольтного ускорителя. Сообщение об этом открытии было поистине ошеломляющим, сенсационным. Никто за рубежом не мог ожидать, что не оправившаяся от разорительных войн и экономической разрухи советская страна сумеет постичь тайны микромира, повторив опыт Кембриджа. Успех советских ученых был обусловлен тем, что с первых же дней своего существования советское государство поставило науку на службу трудящимся, создав все условия для образования и интеллектуального развития народа. В трудные годы гражданской войны и интервенции В. И. Ленин думал о новой рабоче-крестьянской стране, стране индустриальной, стране высокого

технического прогресса. Еще в 1918 г. Совнарком рассмотрел и утвердил план научно-технических работ, созданный В. И. Лениным. Именно тогда начала развиваться научная база для развития всех отраслей науки, в том числе и физической.

В числе первых физико-технических институтов был создан Украинский физико-технический институт в г. Харькове. Молодой институт сразу выдвинулся в число передовых научных коллективов страны, сконцентрировав блестящую плеяду талантливых ученых, таких, как И. В. Курчатов, И. В. Обреимов, Л. Д. Ландау, К. Д. Синельников, А. И. Лейпунский, Г. Д. Латышев, Л. Ф. Верещагин, А. В. Шубников и др. Институты и лаборатории создавались во многих промышленных и научных центрах нашей страны: Ленинграде, Москве, Харькове, Киеве, Днепропетровске, Томске, Свердловске, Ташкенте, Тбилиси, Ереване, Баку.

Советские ученые с первых дней Советской власти ведут работы в области ядерной физики, ставшей научной основой атомной науки и техники. Следствием этого было сооружение первой в мире атомной электростанции, первых в мире атомных ледоколов, крупнейших ускорителей заряженных частиц, создание научных основ управляемого термоядерного синтеза, завоевавшей мировое признание серии токамаков и т. д. Без создания в Советском Союзе национальных научных и техни-



ческих кадров и высокоразвитой крупной промышленности было невозможно овладеть атомной энергетикой. Именно расщеплением ядра лития в 1932 г. в Харькове был заложен фундамент овладения внутриядерной энергией.

К сожалению, атомная энергия через некоторое время заявила о себе чудовищным разрушением японских городов Хиросимы и Нагасаки атомными бомбами. Американская военщина решила в полный голос заявить о своем праве руководить миром, пытаясь подчинить себе устрашающим атомным ядерным оружием наше социалистическое отечество.

Однако политическое и научное предвидение нашей партии, советского правительства и народа не позволило американскому империализму взять над нами верх. Уже в 1946 г. в Советском Союзе вступил в строй первый исследовательский ядерный реактор, в 1948 г. — первый промышленный реактор, а в 1949 г. проведено испытание первого ядерного зарядного устройства. Созданию в такие короткие сроки ядерного оружия, в том числе и термоядерного, способствовала организация научных работ в области ядерной физики уже в первые десятилетия существования советского государства. Советские ученые без всякой поддержки извне, опираясь только на собственные знания и технику, создали грозное ядерное оружие для защиты отечества от всяких посягательств наших врагов.

В том же 1932 г. английский ученый Дж. Чэдвик сообщил об открытии нейтральной частицы — нейтрона, существование которого предполагалось задолго до его обнаружения. Большая эффективность нейтрона в осуществлении ядерных реакций, своеобразии взаимодействия медленных нейтронов с веществом делают нейтрон исключительно важным средством исследований в ядерной физике, физике твердого тела, важнейшим фактором в ядерной энергетике. В этом смысле роль нейтрона исключительно велика в практических приложениях деятельности человека, ядерной энергетике, производстве трансурановых элементов, получе-

нии радиоактивных изотопов (искусственная радиоактивность), прикладных применениях в промышленности, в том числе химической (активационный анализ), в геологических разведках (нейтронный каротаж), медицине, биологии и т. п.

Мощным источником нейтронов является ядерный реактор. Энергия нейтронов, возникающих в реакторе при делении ядер урана или плутония, составляет несколько мегаэлектронвольт. Наиболее широкое применение получили тепловые, медленные нейтроны, которые главным образом используются в практических приложениях атомной энергии. Хотя время жизни свободного нейтрона как нестабильной частицы сравнительно невелико — немногим более десяти минут — этого вполне достаточно, чтобы использовать его как «снаряд» для деления ядер тяжелых атомов.

Особенностью нейтрона, определяющей его исключительное значение в ядерной физике, является отсутствие у него электрического заряда, в силу чего нейтрон способен проникать в любые ядра атомов при любой энергии. Для проведения тонких исследований в области нейтронной физики, нейтронной спектроскопии ядер, физики конденсированных сред были созданы и широко используются импульсные реакторы на быстрых нейтронах. С помощью нейтронов ядерная физика получила исключительные возможности. Вот почему уже через 10 лет после открытия нейтрона стал возможным пуск первого ядерного реактора (Э. Ферми, 1942 г.).

Фундаментальные работы в области ядерной физики советские ученые начали вести еще в довоенные годы. Значение атомной энергии было понято ими на самой ранней стадии работ. Так, еще в 1922 г. академик В. И. Вернадский отметил: «...Мы подходим к великому перевороту в жизни человечества, с которым не может сравниться все им ранее пережитое. Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет... Ученые не



должны закрывать глаза на возможные последствия их научной работы. Они должны чувствовать ответственность за последствия своих открытий...»\*. Можно только удивляться мудрости и политической прозорливости советского ученого. Ведь это было сказано за 10 лет до открытия нейтронов и почти за 25 лет до создания атомных бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки!

Уже в первые годы советской власти были созданы Петроградский государственный рентгенологический и радиологический институт, затем Физико-технический институт, Московский физический институт и ряд других. Несколько позднее был создан Украинский физико-технический институт. Экспериментальные исследования деления ядер урана нейтронами заняли центральное место в лабораториях ядерной физики в Ленинградском физико-техническом институте, Физическом институте им. П. Н. Лебедева, Харьковском физико-техническом институте АН УССР, Радиовом институте, Институте химической физики и ряде других.

Было установлено число вторичных нейтронов при делении ядер урана, открыто явление спонтанного деления урана, создана теория цепной реакции деления ядер урана и др. В СССР проводились международные и всесоюзные конференции по физике атомного ядра, в частности V Всесоюзная конференция по атомному ядру состоялась в ноябре 1940 г. в Москве.

Война прервала на некоторое время все работы по атомному ядру. Работы по созданию экспериментального исследовательского ядерного реактора с самоподдерживающейся цепной реакцией деления ядер урана на тепловых нейтронах начались в трудные годы войны в середине 1943 г.

Здание для первого в СССР исследовательского атомного реактора Ф-1 было готово лишь к июню 1946 г. В ноябре 1946 г. было начато сооружение реактора Ф-1. Для него потребовалось 400 т графита и 45 т урана. Реактор

\* Вернадский В. И. Очерки и речи. Петербург, 1922 г.

собирался слоями и в 15 ч 25 декабря 1946 г. был собран последний, 62-й слой. После извлечения аварийных стержней был произведен подъем регулирующего стержня и начался отсчет плотности нейтронов. Реактор заработал впервые в 18 ч 25 декабря 1946 г. Это была волнующая победа ученых — создателей первого советского ядерного реактора и всего советского народа. А через полтора года, 10 июня 1948 г., промышленный реактор с водой в каналах достиг критического состояния и вскоре началось промышленное производство нового вида ядерного горючего — плутония.

Таким образом, ядерная физика создавала научную основу ядерной техники, а ядерная техника в свою очередь явилась фундаментом ядерной энергетики, которая, опираясь на ядерную науку и технику, стала в настоящее время развитой отраслью электроэнергетического производства.

Промышленные реакторы отличались от Ф-1 не только очень большой тепловой мощностью, но и наличием в их активной зоне различных элементов конструкций для отвода тепла от урановых блочков, аппаратурой для замены облученных высокоактивных блочков, накопивших плутоний и т. д. Для первых промышленных реакторов по получению плутония была принята конструктивно-технологическая схема с графитовым замедлителем и отводом тепла (охлаждением) с помощью обычной воды. Пуск и эксплуатация исследовательского реактора Ф-1 с получением первых очень малых, микрограммовых количеств плутония, а также пуск первого в Советском Союзе промышленного реактора были итогом огромной, титанической работы большой армии советских ученых. Так усилиями советских людей была ликвидирована фанатически оберегаемая монополия США на ядерное оружие.

Но, создавая ядерное оружие, советские ученые, следуя ленинской миролюбивой политике, одновременно стали работать над использованием атомной энергии в мирных целях, по созданию атомных энергетических установок, атомных электростанций. И такая атом-



ная электрическая станция была сооружена в СССР, что положило начало победному шествию атомной энергетики по многим странам мира.

Первая в мире атомная электростанция, построенная в г. Обнинске, выдала электрическую энергию в московскую энергосеть 27 июня 1954 г. Пуску первой АЭС предшествовал огромный комплекс исследовательских работ, решение очень большого числа физических и технических задач, которые способствовали успешному созданию и бесперебойной и безопасной работе первенца атомной энергетики.

Одна из главнейших задач, которые стояли перед физиками и конструкторами, — это вопрос создания надежного и в то же время простого по конструкции тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ). И такой ТВЭЛ типа «труба в трубе» был создан; в зазоре между трубами циркулировала охлаждающая вода. Решался вопрос, на каком топливе — природном или обогащенном изотопом  $^{235}\text{U}$  — будет развиваться атомная энергетика. Один из главных аргументов в пользу применения природного урана — возможность экономичного осуществления высокого производства вторичного ядерного топлива (плутония) в том же реакторе. В то же время использование обогащенного урана позволило повысить температуру теплоносителя, поднять энергонапряженность реактора, повысить прочностные характеристики применяемых материалов, сохранить сравнительно небольшие конструктивные размеры реактора. Эксплуатация ТВЭЛов для данного типа реактора давала возможность получить нейтронный поток плотностью  $3 \cdot 10^{13}$  нейтрон/(см<sup>2</sup> · с) при тепловых нагрузках  $1,5 \cdot 10^6$  ккал/(м<sup>2</sup> · ч).

Успешная эксплуатация первой в мире АЭС позволила развить технические идеи, заложенные в ней, при строительстве Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова. Небольшая АЭС мощностью 5 МВт открыла новую эру в технике и энергетике, эру получения электрического тока путем использования энергии, образующейся при делении ядер урана. Маленькая Обнинская АЭС, как первопроходец, открыла

широкую дорогу большой атомной энергетике. Опыт ее эксплуатации и проведенные на ней многочисленные экспериментальные работы позволили решить многие задачи по дальнейшему совершенствованию схем будущих АЭС и улучшению их технико-экономических показателей.

К двадцатилетию работы АЭС ее посетили более 60 000 человек из разных стран мира. Делегации общественных, государственных и научных деятелей многих стран мира составили внушительное число — 2200. Среди них на Обнинской АЭС побывали: Хо Ши Мин (Вьетнам), Джавахарлал Неру, Индира Ганди, Хоми Баба (Индия), Пальмиро Тольятти (Италия), Вальтер Ульбрихт, Отто Гротеволь (ГДР), И. Броз Тито (Югославия), Ф. Перрен (Франция), Г. Сиборг (США) и многие другие. Виднейшие ученые, политические и государственные деятели сполна оценили значение появления нового источника энергии, используемого в мирных целях.

С 1954 г. атомная энергетика в Советском Союзе и в ряде зарубежных стран выросла, возмужала и создала условия для широкого промышленного использования энергии атома в производстве электрической энергии. Во всем мире введено более 260 атомных электростанций (блоков) установленной мощностью около 160 млн. кВт.

Атомная энергетика вошла в жизнь многих народов и стран. Вот почему трудно переоценить значение пуска первой в мире АЭС. Простое перечисление стран, где получение электрической энергии с помощью АЭС стало на промышленный путь (Советский Союз, США, Англия, Франция, Канада, Италия, ФРГ, Нидерланды, Бельгия, Япония, Швеция, Чехословакия, ГДР, Болгария, Швейцария, Испания, Индия и др.), показывает, как быстро атомная энергетика завоевала доверие людей, стала необходимой для производства электрической энергии.

По-разному представляют себе ученые, экономисты, руководители фирм и ведомств развитие атомной энергетики, но все они сходятся в том, что атомная энергетика будет развиваться



и что в недалеком будущем она станет одним из основных источников получения энергии, главным образом электрической.

По прогнозам зарубежных и советских ученых удельный вес мировой атомной энергетики к 2000 г. достигнет порядка 25—30 и даже 40% общей выработки электрической энергии в мире. Такому росту атомной энергетики способствует ряд обстоятельств: уменьшение природных запасов органического топлива (газа, нефти, а во многих экономических районах и угля), повышенная сернистость, зольность этих видов топлива, резкое удорожание и сложность их добычи и т. д. Все это объективные факторы, с которыми нельзя не считаться, тем более что сегодня, т. е. по крайней мере до 2000 г., ядерная энергетика является единственной альтернативой всем остальным новым источникам энергии.

В некоторых странах мира уже ощущается нехватка органического топлива, и она тем ощутимее, чем выше промышленный потенциал страны. Потребление топлива за последнее десятилетие возросло в несколько раз по сравнению с прошлыми периодами и имеет тенденцию вырасти еще больше. Так, если с 1900 по 1970 г. человечество израсходовало около 250 млрд. т усл. топлива, то за 30 лет (с 1970 по 2000 г.) расход всех видов топлива по некоторым прогнозам должен возрасти до 450 млрд. т. В ряде европейских стран природные запасы топлива уже находятся на грани исчерпания.

В Советском Союзе по сравнению со многими другими странами положение значительно лучше. Наша страна богата природными запасами топлива и еще далеко не исчерпанными гидроэнергоресурсами. Однако будущее нашей энергетики тесно связано с развитием ядерной энергетики, и особенно в европейской части СССР.

Рост потребления энергии приводит к тому, что все большее число развитых стран начинает зависеть от импорта энергоресурсов. Но полагать, что все природные ресурсы в мире находятся на грани исчерпания, преждевременно. Известно, что всегда появлялись

новые методы и способы добычи и использования полезных ископаемых. В то же время рост народонаселения, промышленного производства, потребления всех видов топлива заставляет задумываться и искать новые пути обеспечения человечества всеми видами топлива. Конечно, человечеству удастся найти новые высокоэффективные методы получения энергии за счет потребления других источников энергии, ныне слабо используемых. Но главное, что является непреложным законом природы,— это очевидность исчерпаемости запасов всех видов ископаемого топлива. И, что еще важнее, в силу вступает закон невозобновимости нефти и угля. Ведь уголь представляет собой энергию органического топлива, взятую растениями от солнечной энергии примерно за 500 млн. лет. А мы расходует этот природный дар настолько быстро, что его огромные запасы в недрах земли быстро скудеют, истощаются. Казалось бы, наступает безвыходное положение.

Но выход был найден. Новый могучий источник энергии, заложенный в ядрах тяжелых атомов — урана, плутония, позволит преодолеть надвигающуюся топливную недостаточность. Впервые за все время своего существования человек сумел найти источник энергии, который по своим энергетическим возможностям превосходит все ранее найденные используемые виды энергии.

Первая АЭС произвела исключительное сильное впечатление в мире одним только фактом своего появления. И, как всегда бывает при появлении нового явления в жизни человечества, причем такого исключительного по своим последствиям, как овладение ядерной энергией, многих охватил оптимизм и ничем не сдерживаемый энтузиазм. Многим казалось, что теперь новый источник энергии решит все проблемы, что он принесет с собой все, о чем только мечтало человечество. Но, как говорится, у всякой медали есть две стороны: кроме действительно великопешных и исключительных по своим энергетическим возможностям качеств, по удобству эксплуатации (без необходимости



и синтеза легких. По существующим прогнозам ожидается, что к 1985 г. ядерная энергия будет составлять более 5% всего мирового запаса первичной энергии и с ее помощью будет производиться около 17% электричества в мире.

Следует указать, что уже в 1981 г. в ряде ведущих стран мира (капиталистических и социалистических) удельный вес ядерной энергетики составил 13—14% всего производства электроэнергии, а в таких странах, как Швейцария, Болгария, Бельгия, он превысил 25—30%. К началу 1982 г. в 22 государствах мира находилось в эксплуатации 260 ядерных энергетических установок, на которых вырабатывалось около 10% мировой электроэнергии.

В развитии ядерной энергетики очень большие успехи были достигнуты в Советском Союзе к XXVI съезду КПСС. Ядерная энергетика развивается на базе реакторов на медленных нейтронах — уран-графитовых канального типа, кипящих (РБМК) и водо-водяного типа под давлением (ВВЭР). Развитие ядерной энергетики идет также по пути создания реакторов на быстрых нейтронах как генерального направления большой ядерной энергетики СССР.

После пуска первой в мире АЭС был сдан в эксплуатацию в 1964 г. на Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова первый блок уран-графитового канального типа электрической мощностью 100 МВт, а в 1967 г. — второй блок на 200 МВт. Под Ленинградом в 1973 г. был осуществлен пуск первого блока с реактором уран-графитового канального типа электрической мощностью 1000 МВт. В конце 1975 г. вошел в строй второй блок, также мощностью 1000 МВт, в 1979 г. — третий и в 1981 г. — четвертый. Таким образом, общая электрическая мощность Ленинградской АЭС им. В. И. Ленина стала 4000 МВт (одна из крупнейших АЭС в мире).

На Украине, недалеко от Киева, построена Чернобыльская АЭС, первый блок которой пущен в 1977 г., а второй — в 1978 г., с реакторами типа Ленинградской АЭС (РБМК). В 1981 г. вошел в строй третий блок и общая мощ-

ность Чернобыльской АЭС составила 3000 МВт. Строительство следующих блоков этой АЭС продолжается.

В РСФСР введена в строй Курская АЭС, где первый блок РБМК на 1000 МВт дал энергию в 1977 г., а второй — в 1979 г. Строительство следующих блоков ведется ускоренными темпами. Идет строительство Смоленской АЭС с пуском первого блока РБМК в 1981 г.

В Литовской ССР строится крупнейшая в Советском Союзе Игналинская АЭС с несколькими реакторами уран-графитового канального типа электрической мощностью по 1500 МВт каждый. Пуск первого блока намечен на середину XI пятилетки. На далеком севере в Билибинско-Чаунском горнопромышленном районе в 1974 г. вошла в строй атомная электротеплоцентраль с реакторами уран-графитового типа. Эта АЭС обеспечивает электроэнергией и теплом прилегающий к ней район.

Недалеко от Воронежа построена крупная АЭС им. 50-летия СССР с несколькими реакторами водо-водяного типа под давлением. В 1964 г. на Нововоронежской АЭС пущен первый блок ВВЭР электрической мощностью 210 МВт, в 1969 г. — второй блок мощностью 365 МВт, в 1971 г. — третий (440 МВт), в 1972 г. — четвертый (440 МВт), а в 1980 г. был сдан в эксплуатацию пятый блок ВВЭР мощностью 1000 МВт. Общая мощность Нововоронежской АЭС — 2455 МВт.

В Армении построена в 1976 г. и работает АЭС с двумя блоками ВВЭР общей мощностью 810 МВт.

На Кольском полуострове в 1973—1974 гг. сооружена АЭС с двумя блоками ВВЭР общей электрической мощностью 880 МВт, в 1981 г. пущен также третий блок мощностью 440 МВт. Строительство этой АЭС продолжается.

На Украине, недалеко от г. Ровно, в 1980 г. пущен первый блок ВВЭР электрической мощностью 440 МВт, а в 1981 г. — второй блок такой же мощности. Строительство следующих блоков, но уже по 1000 МВт продолжается.

В г. Димитровграде Ульяновской области в 1965 г. построена опытная АЭС с реактором на медленных нейтронах



водо-водяного кипящего типа электрической мощностью 70 МВт. Однако этот тип реактора по ряду причин не получил распространения в энергетической промышленности СССР. В 1969 г. в НИИАР (Дмитровград) пущена первая в СССР АЭС электрической мощностью 12 МВт с реактором на быстрых нейтронах (БОР-60).

В 1973 г. в г. Шевченко дала электроэнергию крупная АЭС тепловой мощностью 1000 МВт с реактором на быстрых нейтронах (БН-350). Эта АЭС двухцелевого назначения: для производства электроэнергии (150 МВт) и для опреснения (120 000 т/сут) соленой воды Каспийского моря.

В 1980 г. на Урале в качестве третьего блока Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова была сдана в эксплуатацию АЭС с реактором на быстрых нейтронах электрической мощностью 600 МВт. Она является в настоящее время крупнейшей в мире АЭС подобного типа.

В создании и эксплуатации АЭС с реакторами на быстрых нейтронах Советский Союз является ведущим. СССР — единственная страна в мире, имеющая три АЭС подобного типа. Ведется подготовка к сооружению АЭС с реакторами на быстрых нейтронах на 800 МВт. Большие работы в этом направлении проводятся в Англии, где была пущена такая АЭС на 250 МВт. Во Франции в конце 1973 г. была сдана в эксплуатацию АЭС с реактором на быстрых нейтронах «Феникс» электрической мощностью 250 МВт, строится новая крупнейшая АЭС с реактором на быстрых нейтронах «Супер-Феникс» электрической мощностью 1200 МВт. Работа над созданием АЭС с реакторами на быстрых нейтронах ведется также в ФРГ, Японии и некоторых других странах.

СССР одним из первых в мире приступил к сооружению двух промышленных атомных станций теплоснабжения (АСТ) — атомных котельных. Одна из них строится в районе Горького, другая — в районе Воронежа. Пуск этих АСТ намечен на 1983—1984 гг. Тепловая мощность и энерговыделение таких АСТ — 500 МВт. В целях обеспечения

полной безопасности давление в первом контуре установлено 16 атм, во втором — 12 атм, и в третьем сетевом контуре у потребителя тепла — 16 атм. Пуск этих АСТ в XI пятилетке даст возможность получить эксплуатационный опыт в целях их дальнейшего строительства и совершенствования.

В Советском Союзе ядерная энергетика, как уже указывалось, давно нашла свое место, но строительство АЭС получило особенно широкое развитие в последние годы, поскольку для крупного строительства требовалось провести в масштабе нашей страны необходимую подготовку по реконструкции действующих предприятий, созданию атомно-энергетических мощностей (заводов типа «Атоммаш»), осуществлению международной кооперации и интеграции усилий в системе стран, входящих в Совет Экономической Взаимопомощи.

В десятой пятилетке (1976—1980 гг.) были проведены большие мероприятия по строительству АЭС, в результате которых были достигнуты значительные успехи по пуску и эксплуатации АЭС, что позволило высвободить и сэкономить органические виды топлива для других производственных целей.

Утвержденные XXVI съездом КПСС «Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 гг. и на период до 1990 г.» определили пути развития всей жизни советского народа, наметили также и направление развития советской науки, в том числе ядерной физики и ядерной энергетике. В разделе «Развитие науки и ускорение технического прогресса» сказано, что в области естественных и технических наук необходимо сосредоточить усилия на решении таких важнейших проблем, как развитие физики элементарных частиц и атомного ядра с целью дальнейшего познания строения материи. Большое внимание уделено развитию ядерной и созданию основ термоядерной энергетике, совершенствованию методов преобразования и передачи энергии.

В разделе «Развитие промышленности» предписано улучшать использова-



ние топливно-энергетических ресурсов, сократить потребление нефти и нефтепродуктов в качестве котельнопечного топлива, опережающими темпами развивать атомную энергетику. Выработку электроэнергии в 1985 г. довести до 1500—1600 млрд. кВт · ч, в том числе на атомных электростанциях — до 220—225 млрд. кВт · ч и на гидроэлектростанциях — до 230—235 млрд. кВт · ч. Прирост производства электроэнергии в европейской части СССР будет обеспечен в основном на атомных и гидроэлектростанциях. На атомных электростанциях будет введено в действие 24—25 млн. кВт новых мощностей.

Эти планы развития ядерной энергетики на XI пятилетку являются весьма впечатляющими. Мощность вводимых и строящихся АЭС в СССР в 1981—1985 гг. поражает не только своей величиной, но и масштабом грандиозных работ для атомной энергетики на XII пятилетку и до 2000 г.

Подход к оценке роли атомной энергии в электроэнергетике и топливно-энергетическом комплексе в целом определяется рядом принципиальных положений. Во-первых, основной экономический эффект от замещения органического топлива ядерным (в связи с его высокой калорийностью) народное хозяйство получает не только непосредственно на АЭС, в электроэнергетике, но и в сфере добычи и доставки органического топлива. Таким образом, эффективность внедрения ядерного топлива определяется на межотраслевой основе, а не исходя лишь из экономичности АЭС. Отсюда вытекает необходимость совместного рассмотрения вопросов экономики АЭС и их топливного цикла, тепловых электрических станций (ТЭС) и их топливной базы.

Во-вторых, капиталовложения в АЭС могут в 1,5 и более раз превышать таковые в ТЭС. Несмотря на это, АЭС экономически выгодны вследствие существенно более низких капиталовложений в предприятия топливного цикла по сравнению с капиталовложениями на расширение добычи и средств доставки твердого органического топлива. Вместе с тем технология ядерного топ-

лива и предприятий топливного цикла в инженерном отношении неизмеримо сложнее добычи и доставки органического топлива. В связи с этим возникает необходимость более высокого уровня технической и промышленной готовности в сфере строительства, производства, эксплуатации и подготовки кадров, что в конечном счете определяет экономичность и возможные масштабы развития АЭС.

В-третьих, строительство АЭС и широкое применение ядерного топлива для получения тепловых и электрической энергии позволяют в условиях нашей страны в два — три раза повысить уровень производительности труда в сфере добычи, преобразования и использования энергоресурсов по сравнению с производством энергии ТЭС на дальнепривозном твердом топливе.

В структуре себестоимости электроэнергии составляющая заработной платы равна нескольким процентам. Вместе с тем внедрение ядерного топлива влечет за собой резкое сокращение трудовых затрат в сфере добычи и доставки органического топлива и существенное повышение производительности труда на единицу производимой энергии в системе электростанция — топливо-снабжение. Поэтому трудовые затраты на производство энергии следует рассматривать не только исходя из штатного коэффициента на электростанциях, который характеризует конечный этап использования топлива для получения энергии, но и учитывая топливно-энергетический комплекс в целом.

Развитие ядерной энергетики сейчас приобрело широкие масштабы. Суммарная мощность АЭС в СССР на начало 1980 г. составила 16 млн. кВт, доля выработки электроэнергии — более 6%. Ядерное топливо вовлекается в топливно-энергетический баланс страны на первом этапе путем сооружения атомных конденсационных электростанций. В настоящее время их строительство ведется более чем на 20 площадках с постепенным вытеснением базисных электростанций на органическом топливе в районах Северо-Запада, Запада, Центра, Юга европейской части страны. Строятся АЭС в районах Кавказа,



Поволжья, Урала. Нарращивание установленной мощности АЭС в XI пятилетке будет происходить за счет преимущественного ввода энергоблоков единичной мощностью 1000 МВт с РБМК-1000 и ВВЭР-1000.

В настоящее время накоплен большой опыт эксплуатации таких блоков на Ленинградской, Курской и Чернобыльской АЭС и продолжается дальнейшее строительство атомных электростанций с доведением числа блоков на них до четырех — шести.

В XI пятилетке, как уже указывалось, начнут работать первые атомные блоки по 1500 МВт на Игналинской АЭС. В перспективе такие блоки будут сооружены также на Костромской и Смоленской АЭС.

Основной экономический эффект от внедрения АЭС народное хозяйство получает за счет сокращения масштаба прироста капиталовложений и выхода затрат в угледобывающей промышленности и на железнодорожном транспорте. В целом строительство АЭС выгодно и экономически, и по затратам трудовых ресурсов. Это является следствием двух основных факторов — особенностей размещения и потребления топливно-энергетических ресурсов в нашей стране и высокой калорийности ядерного топлива. Особенность топливно-энергетической ситуации состоит в том, что затраты на расширение топливной базы и транспорта (шахты, разрез подвижного состава, второго пути и т. п.) при развитии энергетики на органическом топливе сопоставимы по масштабу, а при дальнейшей транспортировке превышают затраты на строительство собственно ТЭС. Поэтому суммарные народнохозяйственные затраты на создание новых мощностей ТЭС и развитие топливной базы и транспорта весьма велики.

При прогнозируемом возрастании уровня капиталовложений в добычу и доставку топлива для потребителей в европейские части СССР до 40 руб/т усл. топлива, а в перспективе до 80 руб/т усл. топлива более высокая капиталоемкость АЭС по сравнению с ТЭС (300—350 руб/т усл. топлива) не выводит их за пределы экономической конкурен-

тоспособности при оценке на межотраслевой основе. Анализ показывает, что этот вывод устойчив в долгосрочной перспективе. Следовательно, более выгодно осуществлять капиталовложения в строительство АЭС, добычу урана и атомное машиностроение, чем в развитие добычи угля и его транспортировки.

Основным преимуществом ядерной энергетики по сравнению с традиционной является, как уже отмечалось, высокая калорийность ядерного топлива. В расчете на единицу массы она примерно в 2 млн. раз выше калорийности органического топлива. Объемы потребляемого и перерабатываемого в топливном цикле ядерного топлива в десятки раз меньше объемов органического топлива, добываемого, транспортируемого и сжигаемого при тех же энергетических потребностях.

Ядерная энергетика не только экономит огромное количество органического топлива, но и обеспечивает наивысшую производительность труда на единицу производимой и потребляемой народным хозяйством энергии. Повышение цен на органическое топливо еще в большей степени увеличивает преимущества АЭС по сравнению с ТЭС и соответствующую экономию трудовых ресурсов.

На протяжении всей истории человечества вплоть до 40—50-х годов XX в. главным источником получения энергии был углерод (древесное топливо, уголь). В течение второй половины XX в. происходит переход от использования углерода к преимущественному потреблению углеводородов (нефть, природный газ), а к концу XX в. — к использованию энергии атомного ядра. Главная особенность истекшего двадцатилетия (1960—1980 гг.) в СССР заключалась в быстром приросте энергетического баланса за счет нефти (45%), природного газа (39%), угля (10%) и гидроэнергии и ядерного топлива (6%). Теперь нам совершенно ясно, что неэкономично и нецелесообразно сохранять и далее такой высокий рост потребления нефти и газа. СССР располагает природными запасами нефти и газа, но их главная часть нахо-



дится в труднодоступных районах страны. Нефть надо использовать только как нефтехимическое сырье и моторное топливо. Очевидно, что период 1981—2000 гг. будет характеризоваться быстрым ростом в энергетическом балансе страны доли ядерного горючего. Использование ядерного горючего позволит уже в 1985 г. заменить около 40 млн. т усл. топлива. Доля традиционных видов энергии — гидроэнергии, а также возобновляемых — солнечной, ветровой, геотермальной — даже к концу нынешнего века в энергодобавке страны будет незначительной. Таким образом, на предстоящее двадцатилетие в приросте энергетического баланса уголь и природный газ сохраняют свое основное значение.

Особо важное значение внедрение атомной энергии имеет не только для получения электрической энергии, но и в теплофикационных целях для снабжения промышленных и жилых зданий низкопотенциальным теплом.

Кроме строительства АСТ в Горьком и Воронеже начато строительство Одесской АТЭЦ с реактором ВВЭР-1000, в перспективе намечается сооружение еще нескольких АТЭЦ подобного типа. Для теплофикации используются также нерегулируемые отборы пара на АЭС. В настоящее время теплофикационные отборы пара для теплоснабжения осуществляются на Белоярской, Курской, Чернобыльской, Нововоронежской, Кольской и Армянской АЭС. Намечено соорудить головную теплофикационную установку повышения производительности на Ростовской АЭС. Примером решения проблемы тепла и электроснабжения служит сооружение на Чукотке Билибинской АТЭЦ (1974—1976 гг.) в составе четырех блоков с канальными уран-графитовыми реакторами по 12 МВт электрической мощности

каждый и теплофикационными отборами общей мощностью 100 Гкал/ч.

Ядерные электростанции вышли на широкий путь строительства и снабжения городов электроэнергией и теплом. Прошло всего 50 лет после расщепления ядра лития и открытия нейтрона, но как много уже сделано и как много еще будет сделано в интересах мира и прогресса.

1. Александров А. П.— АЭ, 1968, 25, вып. 4, с. 356—362.
2. Петросьянц А. М., Александров А. П.— АЭ, 1971, 31, вып. 4, с. 315—323.
3. Денисов В. П., Скворцов С. А. и др.— АЭ, 1971, 31, вып. 4, с. 323—333.
4. Овчинников Ф. Я., Воронин Л. М. и др. Эксплуатация реакторных установок Нововоронежской АЭС.— М.: Атомиздат, 1972.— 54 с.
5. Доллежал Н. А.— АЭ, 1973, 44, вып. 3, с. 203—213.
6. Воронин Л. М., Сидоренко В. А., Скворцов С. А.— Теплоэнергетика, 1974, № 12, с. 13—19.
7. Игони В. В. Атом в СССР.— Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975.— 137 с.
8. Петросьянц А. М. Атомная энергетика.— М.: Наука, 1976.— 57 с.
9. Емельянов И. Я.— Изв. АН СССР, 1977, № 5, с. 14—19.
10. Казачковский О. Д., Мешков А. Г., Митенков Ф. М. и др.— АЭ, 1977, 43, вып. 5, с. 343—351.
11. Доллежал Н. А. Рождение атомной энергетика.— АЭ, 1978, 44, вып. 1, с. 14—17.
12. Александров А. П. Атомная энергетика и научно-технический прогресс.— М.: Наука, 1978.— 96 с.
13. Петросьянц А. М. Проблемы атомной науки и техники.— М.: Атомиздат, 1979.— 456 с.
14. Мелентьев Л. А. Системные исследования в энергетике.— М.: Наука, 1979.— 168 с.
15. Синев Н. М., Батуров Б. Б. Экономика атомной энергетика.— М.: Атомиздат, 1980.— 344 с.
16. Доллежал Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор.— М.: Атомиздат, 1980.— 208 с.
17. Петросьянц А. М., Батуров Б. Б. Роль атомной энергии в энергетическом комплексе страны.— АЭ, 1981, 50, вып. 6, с. 371—375.



## ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В 30-е ГОДЫ

Первая всесоюзная ядерная конференция, состоявшаяся 24—30 сентября 1933 г. на базе Ленинградского физико-технического института (ЛФТИ), подвела итоги раннего периода современной ядерной физики. Явившись, по существу, первой международной ядерной конференцией, она послужила толчком для дальнейших советских и зарубежных исследований. Вслед за ней состоялись еще четыре конференции (1936—1940 гг.) и к началу второй мировой войны советская ядерная физика сумела уже занять по ряду вопросов (установление протонно-нейтронной модели ядра, теория деления урана, открытие спонтанного деления, первая полевая теория ядерных сил, открытие ядерных изомеров, расчет цепной реакции и др.) передовые позиции. Своевременное развертывание ядерных работ стало возможным благодаря тому, что в конце 20-х — начале 30-х годов советская физика стала наукой «сплошного фронта», в которой были представлены все важные области.

После установления нерелятивистской квантовой механики (1925—1927 гг.) началась интенсивная разработка ее приложений к химии, магнетизму и т. д. Здесь уместно напомнить об успехе квантовой теории альфа-распада как туннельного эффекта (Дж. Гамов, Э. Кондон, Р. Герни). Это позволило уточнить размеры ядра и построить модель ядра как капли альфа-частиц с примесью протонов и электронов, однако успех объяснения альфа-распада

начал косвенно играть отрицательную роль, закрепляя ошибочное представление о неперменном наличии в ядрах максимального числа альфа-частиц с «примесью» протонов и электронов. Релятивистское уравнение П. Дирака и его предсказания существования позитрона, аннигиляции и образования пар частиц, а также результаты квантовой теории электромагнитного поля и вторичное квантование были первыми шагами в новой области релятивистской теории поля.

Хотя ядерная физика не находилась тогда в центре внимания, однако открытие сверхтонкой структуры в спектрах (Теренин, Добрецов, Шюлер) и вместе с тем измерение спинов, магнитных моментов и статистики ряда ядер начали в конце 20-х годов все больше привлекать внимание к принимавшейся «очевидной» протонно-электронной модели ядра, вызывая сомнения в сохранении внутриядерными электронами своего спина и магнетизма. Особенно отчетливо эти противоречия были показаны Ф. Разетти на примере ядра азота, предполагавшегося составленным из 14 протонов и 7 электронов, что не соответствовало его целому спину, равному единице, и статистике Бозе — Эйнштейна. «Азотная катастрофа» (потеря «электроном спина») подкреплялась полным непониманием бета-распада с его непрерывным спектром энергии электронов.

Прения по этим проблемам привели в 1930 г. к предложению (В. А. Амбар-



думян, Д. Д. Иваненко, несколько позднее В. Гейзенберг) перенести «вину» на структуру пространства, считая его на ядерных расстояниях дискретным. Обсуждение дискретности было полезным, так как побудило нас наиболее принципиально ставить вопрос о поведении электронов в малых областях. Согласно принципу неопределенности в области порядка примерно  $10^{-13}$  см потенциальная энергия

$$\varepsilon \simeq c p \simeq \frac{hc}{e^2} mc^2 \simeq 137 mc^2$$

будет значительно превосходить собственную энергию, иными словами — электрон будет «разорван» в поле таких сил. Возникло предположение о невозможности существования электронов в ядрах. Что же касается бета-распада, то нам представлялось заманчивым трактовать его как порождение частицы подобно испусканию фотонов, ранее не существовавших в системе.

Как нередко бывало в истории физики, наблюдение, казалось бы, совершенно незначительного эффекта, никак не предсказанного (некоторого особо проникающего излучения, открытого Боте — Бекером в мае 1930 г. при бомбардировке бериллия альфа-частицами), только через полтора года привлечшего внимание супругов И. и Ф. Жолио-Кюри, обнаруживших способность этого излучения придавать протонам значительный импульс, привело, как известно, Дж. Чэдвика к правильной гипотезе о том, что речь идет здесь о нейтронах, сталкивающихся с протонами.

Следует отметить, что открытие нейтрона (февраль 1932 г.) не произвело никакой особой сенсации. Конечно, на нейтрон было обращено внимание, но его природа и роль в ядерной физике не были быстро осознаны, как это видно, например, из дискуссии на специальной сессии Лондонского Королевского Общества 28 апреля 1932 г. Как Э. Резерфорд, вспоминая свою бэйкериянскую лекцию 1920 г., так и сам Дж. Чэдвик считали нейтрон своего рода «диполем», составленным из протона и электрона. Надо сказать, что Чэдвик, стоявший несколько в стороне

от дискуссий о структуре ядер, даже в 1933 г. в своей парадной бэйкериянской лекции снова говорил о нейтроне главным образом как диполе.

Ф. Перрен и П. Оже первые довольно подробно рассмотрели модель ядра с нейтронами, но не оставили в стороне старые представления о протонно-электронном составе: по их мнению, естественно радиоактивные ядра, например, изотоп калия, содержат кроме протонов и нейтронов также электроны, которые и испускаются при бета-распаде. Со своей стороны мы попытались решить все три вопроса (строение ядра, природу нейтрона и бета-распад), выдвинув гипотезу о том, что ядра состоят только из тяжелых частиц — протонов и нейтронов; нейтрон подобно протону является элементарной частицей со спином  $1/2$ ; бета-распад есть порождение электрона подобно испусканию фотона (ранее не существовавшего в атоме или ядре). Наша гипотеза устраняла трудности типа «азотной катастрофы», давая в соответствии с наблюдениями целые значения спинов для четных значений массовых чисел, правильную статистику и т. д. Если к объяснению бета-распада как порождения электронов добавим еще нейтрино, предсказанное В. Паули, то мы и получим выдержавшее полувековую проверку понимание основ физики ядра.

Однако, вопреки довольно распространенному мнению даже некоторых историков науки, протонно-нейтронная модель вовсе не была безоговорочно принята. Вернее, здесь следует строго различать пункт о составе ядер, что действительно было незамедлительно поддержано прежде всего В. Гейзенбергом (в статье, датированной 7 июня 1932 г. со ссылкой на нашу модель, опубликованную 28 мая), затем Ф. Перреном, отказавшимся от своей протонно-электронно-нейтронной модели, и другими авторами. (Некоторые единичные попытки защитить протонно-электронно-нейтронный состав ядер не имели, конечно, успеха; странным в связи с этим, например, было выступление П. Дирака на Седьмом сольвевском конгрессе в октябре 1933 г. Дирак под влиянием аргументов Гей-



зенберга, защищавшего нашу протонно-нейтронную модель на базе конкретных данных о спинах ядер, в итоге согласился с тем, что в самом деле ядра в основном составлены из протонов и нейтронов, а лишние электроны в небольшом количестве будто бы не играют роли.)

Вопросы об элементарности нейтрона и о бета-распаде оказались наиболее трудными. Гейзенберг предпочел начать рассчитывать свойства системы протон — нейтрон, вводя, по аналогии с квантовой химией, феноменологические обменные силы; по этому пути пошел Х. Бете при анализе модели дейтрона, вводя вместе с Р. Пайерлсом ядерный короткодействующий потенциал в виде прямоугольной ямы, а также другие авторы. Сам же нейтрон Гейзенберг, в противоположность нам, не считал элементарным, полагая внутри него наличие электрона; во второй своей работе 1932 г. (из авторитетной серии трех работ) Гейзенберг подробно подсчитывал рассеяние гамма-лучей на ядрах, как и рассеяние на подобных «внутринейтронных» электронах (конечно, безуспешно пытаясь объяснить результаты экспериментов Грея — Тарранта, Мейтнер и др.). Здесь явственно сказывалось влияние Н. Бора, допускавшего нарушение сохранения энергии при бета-распаде; от такого допущения было недалеко и до нарушения сохранения спина, поскольку спин нейтрона все же приходилось принять равным спину протона, т. е.  $\frac{1}{2}$  (не учитывая внутри него спина электрона). Весьма примечательно, что, сомневаясь в признании нейтрона элементарной частицы, имея в виду предложения (также ошибочные) Ж. Перрена и того же Н. Бора (на Седьмом сольвеевском конгрессе) считать протон составленным из нейтрона и позитрона, Гейзенберг все же уловил эквивалентность протона и нейтрона, и замечательным образом начал их рассматривать как два состояния «нуклона», различающиеся значениями изоспина  $\pm \frac{1}{2}$ . Тем самым была введена новая внутренняя степень свободы и сделан важный шаг вперед во всей физике элементарных частиц.

На наш взгляд, решающий шаг на

пути признания второй части протонно-нейтронной модели, именно порождение электрона при бета-распаде подобно фотону, а не его вылет из ядра или из нейтрона, был сделан П. Блэккетом и Дж. Оккиалини, открывшими каскадные ливни в космических лучах в начале 1933 г. (следы ливней были ранее замечены еще Д. В. Скобельцыным). Воочию была продемонстрирована цепочка пар электронов — позитронов за счет фотонов, что подтверждало гипотезу Дирака и трактовку бета-распада в протонно-нейтронной модели. В противоположность неуверенной заметке К. Андерсона осенью 1932 г. о следах позитрона, без предъявления фотографий и без всяких ссылок на предсказание Дирака и других авторов Блеккет, Оккиалини, можно сказать, убедительно доказали и существование позитрона. В опубликованной явно вне очереди статье с резюме, написанном редактором, а не автором, Андерсон тоже поспешил в феврале 1933 г. сообщить о своем открытии позитрона, снова без всяких ссылок на других авторов, указав вскользь, что результаты Блеккета — Оккиалини стали ему известны «из печати». В истории физики открытие позитрона, как позднее мюона, осталось формально за Андерсоном, что еще раз иллюстрировало трудную ситуацию того периода. Нельзя не напомнить еще раз об ошеломляющем впечатлении работы Блэккета — Оккиалини, в которой оказались связанными физика ядра, космические лучи и зарождавшаяся релятивистская квантовая теория поля.

Что же касается колебаний и ошибок в понимании природы нейтрона, протона и бета-распада Гейзенбергом, в основном определившим их только в конце 1933 г., то они были связаны, по-видимому, с общей «копенгагенской» тенденцией к преувеличению значения принципа наблюдаемости (непрерывный спектр бета-частиц!) и с исходными квантовыми, но еще не релятивистскими позициями, на которых стоял он, один из главных основателей квантовой механики. Преодолев свои колебания, Гейзенберг не только внес большой вклад в развитие теории ядра и в даль-



нейшем в релятивистскую квантовую теорию поля, но в последний период своей работы начал строить единую теорию материи, исходя из полностью релятивистских представлений (опираясь на предложенное нами ранее, в 1938 г., нелинейное обобщение дираковского спинорного уравнения непосредственно ненаблюдаемой праматерии).

Несомненно не являлась случайной и заслуживает более подробного анализа целая серия ошибочных воззрений Н. Бора: на элементарность протона и нейтрона, на предсказания позитрона и на теорию дырок Дирака, на гипотезу нейтрино Паули, позднее на гипотезу мезонов Юкавы. По нашему мнению, все эти воззрения крупнейшего теоретика касались именно квантово-релятивистской стороны теории ядра и элементарных частиц; как столь удачная первая квантовая модель атома 1913 г. Н. Бора, так и его теория деления ядер 1939 г. не были релятивистскими. В своих интересных воспоминаниях М. Такетани пишет, как японские теоретики, ожидавшие поддержки со стороны Н. Бора в пользу гипотезы Юкавы, были огорчены его замечанием во время визита в Киото в 1936 г.: «Зачем Вам нужна эта новая частица?». Все указанные и многие другие примеры показывают, что протонно-нейтронная модель ядра вместе с гипотезой об элементарности нейтрона вовсе не была воспринята безоговорочно, напротив, вокруг нее шли продолжительные дискуссии с участием самых авторитетных теоретиков. Дискуссии эти особенно наглядно проявлялись не только в отдельных работах, но и на конференциях начала 30-х годов. В этом отношении ряд советских историков науки (П. С. Кудрявцев, А. Н. Вьялцев и др.) вместе с исследователями справедливо подчеркивают трудности принятия протонно-нейтронной модели перед последующим безоговорочным ее признанием, подчеркнутым в историко-научных трудах М. Лауэ, Э. Сегре, Дж. Уилера, М. Льюиди и других историков науки, физиков-теоретиков и экспериментаторов, уделявших внимание истории вопроса.

Отмечая беспорность советского при-

оритета и большой вклад Гейзенберга в установление нуклонной модели ядер, следует коснуться вопроса об участии в этих работах Э. Майорана, сотрудника Э. Ферми, который, как вспоминают Э. Амальди, Э. Сегре, Б. Понтекорво, не только сообразил до Дж. Чэдвика, что в опытах Боте — Бекера и И. и Ф. Жолио-Кюри речь идет о нейтроне, а не о жестком фотоне (но ничего не публиковал по этому вопросу), но также близко подошел к идее о протонно-нейтронном составе ядер (опять-таки ничего не печатал по этой проблеме). Нам представляется, что вряд ли у Майорана были какие-то определенные аргументы по поводу строения ядра, ведь он даже прямо «запретил» Ферми говорить что-либо о его, как видно, совсем предварительных идеях в докладе на международном конгрессе электриков в Париже летом 1932 г. В этом докладе Ферми действительно обходит стороной вопрос о протонно-нейтронном строении ядер, несмотря на опубликованные уже работы по этому важнейшему вопросу. По частным сведениям, позволим себе заметить, нам тогда стало известно, что Майорана даже скептически относился к протонно-нейтронной модели и не считал очень перспективной серию советских работ в этом направлении. Вместе с тем следует отметить, что Майорана внес определенный вклад в теорию ядра своей работой по феноменологическим силам обменного типа, удачно развивая первую работу Гейзенберга и приходя тем самым к ядру гелия как насыщенной конфигурации. Но эта работа Майорана была опубликована уже в 1933 г. и никакого непосредственного отношения к установлению протонно-нейтронной модели не имеет. Подробно и положительно анализируя эту работу Майорана в своем сольвеевском докладе 1933 г., Гейзенберг, вместе с тем так же как Лауэ, итальянский историк науки Льюиди и др., никак не относит Майорана к числу соавторов протонно-нейтронной модели. Известен также вклад Майорана в теорию вещественных спиноров.

Наряду с дискуссиями вокруг строения ядер в середине 1932 г., большое



впечатление произвело сообщение о превращении ядер лития в две  $\alpha$ -частицы бомбардировкой протонами в первом давшем реальные результаты ускорителе Кокрофта — Уолтона в Кавендишской лаборатории, опубликованное в мае того же 1932 г. Вскоре эти эксперименты были подтверждены и уточнены в Харьковском физико-техническом институте А. И. Лейпунским, К. Д. Синельниковым, А. К. Вальтером и Е. Д. Латышевым. Это был первый советский эксперимент с ускоренными частицами, который содействовал привлечению внимания широкой научной общественности к совсем новой области. (Как отмечалось выше, экспериментальной ядерной физики в прямом смысле в Советском Союзе ранее не было, хотя радиохимия была значительно развита.)

В близкой области космических лучей советская наука также занимала ведущие позиции благодаря работам Д. В. Скобельцына, получившего фотографии частиц космических лучей в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле, и благодаря открытому Л. В. Мысовским барометрическому эффекту.)

В ЛФТИ в конце 1932 г. придавали серьезное значение зарождавшейся современной ядерной физике, поэтому была образована «ядерная группа» под руководством директора Института А. Ф. Иоффе, заместителем был И. В. Курчатов. В состав группы входили М. А. Еремеев, Д. В. Скобельцын, П. А. Богдзевич, С. А. Бобковский, И. П. Селинов, М. П. Бронштейн, Д. Д. Иваненко.

Не останавливаясь здесь на все более широком разворачивании ядерных работ в ЛФТИ, где в начале 1934 г. организуется целый отдел на основе четырех лабораторий (около 30 сотрудников), коротко расскажем о Первой всесоюзной ядерной конференции 1933 г., идея которой естественно зародилась в коллективе ядерщиков и участников семинара по ядру. Председателем Оргкомитета был назначен И. В. Курчатов, ученым секретарем — Д. Д. Иваненко. Был опубликован довольно интересный для историков

науки материал в виде сборника докладов. В работе конференции кроме советских ученых участвовали крупные физики-ядерщики из других стран. От них докладчиками выступили Ф. Жолио-Кюри, П. Дирак, Ф. Перрен, Ф. Разетти, С. Грей, а также В. Вайскопф и Г. Бек. Благодаря авторитетному составу участников, весьма содержательным дискуссиям были обсуждены все главные проблемы ядра, элементарных частиц и космических лучей.

Перечислим доклады конференции и дадим краткие комментарии. Ф. Жолио-Кюри сделал два сообщения: 1) о нейтроне и 2) о возникновении позитронов. Его докладом открылась конференция; показанные на большом экране треки частиц были встречены аплодисментами. Прекрасный экспериментатор, большого кругозора физик, блестящий докладчик, Ф. Жолио-Кюри занял на конференции центральное место. С этого момента начались его посещения Советского Союза. Знарок оперного искусства, страстный спортсмен, культурнейший человек, по многим вопросам ведущий французский физик, Ф. Жолио-Кюри был в числе первых среди великой когорты прогрессивных ученых нашей эпохи. Его инициатива и организационная деятельность в борьбе за исключительно мирное использование ядерной энергии хорошо известны.

В своих сообщениях на ленинградской конференции и затем в Брюсселе супруги И. и Ф. Жолио-Кюри, исследуя ядерные реакции и возникающие при этом позитроны, непосредственно уже подходили к своему самому фундаментальному открытию — искусственной радиоактивности. За этим исследовала радиоактивность, вызванная обстрелом ядер нейтронами, открытая Э. Ферми в 1934 г., побудившая, как известно, исследовать бомбардировку урана нейтронами, что в конце 1938 г. привело к открытию деления ядер О. Ганом и Ф. Штрассманом. На хорошо известном значении промежуточных экспериментов И. Жолио-Кюри и П. Савича с обнаружением лантана и на последующих работах Ф. Жолио-Кюри, близко подошедшего к идее цепной реакции, мы здесь не останавли-



ливаемся. (Отметим, что участие в ленинградской конференции Ю. Б. Харитона, очевидно, вызвало в нем интерес к ядерным вопросам и помогло осуществить фундаментальный расчет ядерной реакции, выполненный им совместно с Я. Б. Зельдовичем в 1939—1940 гг.)

С. Э. Фриш в своем докладе о сверхтонком строении спектральных линий и свойствах атомных ядер, Ф. Разетти в сообщении об определении магнитных моментов ядер по сверхтонкому строению спектральных линий касались важных вопросов определения основных характеристик ядер. Эти вопросы стали одними из главных пунктов, показавших непригодность старой протонно-электронной модели (как, в частности, заострил в свое время внимание на «азотной катастрофе» Разетти, доказавший невозможность объяснить на этом примере спин и статистику по старой модели).

Л. Грэй (Англия) в своем докладе об аномальном рассеянии гамма-лучей по существу затрагивал, как и Ф. Жолио-Кюри, вопрос обнаружения пар электронов и позитронов (как показала дискуссия с участием Дирака).

В докладах харьковских физиков (К. Д. Синельников: о методе получения быстрых ионов и электронов; А. И. Лейпунский: о расщеплении ядер), во-первых, был сделан обзор различных ускорителей того времени: типа Кокрофта — Уолтона, трансформаторов Тесла, схемы Грейнахера, генератора Ван де Граафа (о циклотронах Лоуренса, вскоре вышедших на первый план, еще не было речи), во-вторых, был дан интересный критический обзор экспериментов с расщеплением лития, бора, бериллия и других ядер элементов ускоренными протонами, впервые осуществленных в 1932—1933 гг. Кокрофтом и Уолтоном, затем Лоуренсом, Брашем и Ланге и в Харьковском физико-техническом институте. К серии докладов об экспериментальных исследованиях относилось также весьма обстоятельное сообщение Д. В. Скобельцына о проблемах космических лучей, в котором был дан подробный анализ работ автора сообщения, открытия ливней, гео-

магнитного и других эффектов; фразой «окончательное решение вопроса о природе космического излучения остается по-прежнему невозможным» был закончен этот важный доклад (как известно, проблемы первичных источников космических лучей и их ускорение, прохождение через межзвездную среду и атмосферу Земли продолжали занимать внимание еще много лет; причем, в частности, гипотеза Р. Милликена о первичных космических лучах как фотонов, испущенных в результате синтеза ядер, о которой он говорил в те же годы, например летом 1932 г. на конференции электриков в Париже, конечно, была отброшена как совершенно не соответствующая факту наличия заряженных космических лучей и подсчету их энергии).

Перейдем к теоретическим докладам. Ф. Перрен (о структурных элементах атомных ядер) и Д. Д. Иваненко (о модели ядра) обсуждали модели ядер и подходы к модели оболочек. Отказавшись от своей и протонно-нейтронно-электронной модели Оже, Перрен все же говорил, что эта модель не так сильно отличается от протонно-нейтронной или нейтронно-позитронной, что, конечно, неверно и связано с его колебаниями признать протон и нейтрон элементарными частицами. Мы отстаивали свою точку зрения, подчеркивая, что бета-распад есть порождение электрона, ранее не существовавшего в ядре. (В то же время в нашем и Перрена докладах были отмечены правильные первые шаги, сделанные по пути теории модели слоев протонов и нейтронов.) Перрен ссылаясь в связи с этим на работу В. Эльзасера, мы — на Е. Н. Гапона и нашу совместную работу, которую цитировал уже и Гейзенберг в сольвейвском докладе 1933 г. Модель оболочек в Ленинграде была энергично поддержана советским теоретиком Л. Я. Штрумом (на базе работ Бартлетта, Иваненко — Гапона), рассмотревшим построение серии изотопов. Таким образом, если протонно-нейтронная модель была уже в основном признана, то элементарность нейтрона вызвала большие споры; против нее возражал Дж. Гамов; Ф. Жолио-Кюри в своем докладе скло-



нялся к допущению, что «протон является сложной частицей, состоящей из нейтрона и положительного электрона» (11, с. 165), т. е. вполне в духе Ж. Перрена и выступления через месяц после этого Н. Бора на сольвеевском конгрессе. М. П. Бронштейн считал спор об элементарности протона и нейтрона еще «филологическим».

Фундаментальный доклад о своей теории вакуума и дырок как античастиц сделал П. Дирак. По этому важнейшему вопросу, связывавшему теорию ядра (вакуума) и релятивистскую теорию поля, также развернулась интересная дискуссия. И. Е. Тамм отметил в дискуссии связь расщепления на положительные и отрицательные частоты с предсказанием позитрона. Существенно, что участие И. Е. Тамма, как и Я. И. Френкеля, на конференции побудило их активно включиться в физику ядра и внести потом выдающийся вклад в ее развитие. В. Вайскопф и Иваненко обсуждали вопрос об измерении координаты электрона («индивидуальная» ошибка, ввиду порождения пар; даже независимо от ошибки согласно гейзенберговскому принципу неопределенности).

Как уже упоминалось, состоявшийся в Брюсселе в октябре 1933 г. Седьмой сольвеевский конгресс, посвященный ядру, во многом дублировал ленинградскую конференцию с аналогичными основными докладами Дирака, Жолио-Кюри, Перрена; в том числе большим центральным докладом Гейзенберга о полном признании протонно-нейтронной модели. В. Паули ясно изложил здесь гипотезу нейтрино, резко возражая идеям Н. Бора о несохранении энергии при бета-распаде. Этот вопрос, конечно, обсуждался и на ленинградской конференции; относительно сохранения энергии колебался Перрен; ошибочно защищал несохранение энергии в бета-распаде Г. Бек (он одно время, как и Ландау, пытался даже трактовать на этой основе горение звезд); как остроумно заметил в связи с этим Паули в письме к Бору, он рекомендует «оставить звезды спокойно гореть на базе законов сохранения»). Как мы видим, хотя ряд самых фундаментальных воп-

росов теории ядра и был фактически решен к концу 1933 г., все же их трактовка вовсе не была окончательно всеми признана.

В 1934 г. была построена теория бета-распада Ферми как испускания двух частиц (электрона и антинейтрино) и предложена наша с И. Е. Таммом первая нефеноменологическая полевая теория парных ядерных сил, реализуемых обменом электроном — антинейтрино (и позитроном — нейтрино) между протонами и нейтронами, развивая которую Юкава построил теорию мезонных сил. Эти проблемы обсуждались во время менделеевского конгресса на специальном семинаре в ЛФТИ, на который была приглашена Л. Мейтнер. По-видимому, обсуждение ядерных проблем, искусственной радиоактивности, теории Ферми и модели ядерных сил оказало влияние на Мейтнер. Во всяком случае, в своей книге воспоминаний 1978 г. Ф. Штрассман пишет о том, что Л. Мейтнер вернулась из Ленинграда очень заинтересованная проблемами искусственной радиоактивности, возможности образования трансуранов и побудила О. Гана возобновить с нею прерванное 12 лет назад сотрудничество. Как известно, через четыре года напряженная работа Гана и Мейтнер, привлечших химика-аналитика Ф. Штрассмана, привела к огромному событию — открытию деления ядер урана, бомбардируемых нейтронами, с образованием пары осколков в виде ядер элементов середины менделеевской таблицы, в том числе точно обнаруженного бария. Довольно любопытно, что на менделеевском конгрессе присутствовала также И. Ноддак, которая в печати возражала против образования трансуранов из урана под действием нейтрона и указывала, в принципе правильно, но без подсчетов и экспериментов, на возможность образования пары осколков. Мейтнер возражала своей коллеге Ноддак, но мысль о делении была опубликована и, несомненно, так или иначе осталась в памяти и способствовала позднее окончательному прояснению вопроса о работах Л. Мейтнер и ее племянника О. Фриша, после важнейшего эксперимента Гана — Штрассмана.



Важно подчеркнуть, что советские физики незамедлительно включились в теоретическую и экспериментальную работу по этой проблеме и пришли к таким фундаментальным и приоритетным результатам, как теория деления Я. И. Френкеля (параллельно и несколько раньше аналогичных работ Бора — Уилера, 1939 г.), открытие спонтанного деления ядер К. А. Петряком и Г. Н. Флеровым в 1940 г., а также расчет цепной ядерной реакции Я. В. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоном.

Начавшаяся вторая мировая война придала вопросам деления технический и военный характер. Развитие ядерных советских исследований было на некоторое время приостановлено, однако возобновленные в конце 1943 г. под руководством Курчатова работы позволили быстро наверстать упущенное благодаря достигнутому еще в предвоенные годы высокому уровню ядерных исследований. В 1946 г. был запущен первый советский реактор; в 1954 г. в Обнинске под руководством И. В. Курчатова и Д. И. Блохинцева была построена первая в мире атомная электростанция, послужившая толчком для развития мировой ядерной энергетики.

Не останавливаясь сейчас на других конференциях, выходящих за рамки «Великого трехлетия» 1932—1934 гг., укажем только на весьма любопытное продолжение дискуссий о строении ядра на Третьей американской конференции по истории ядерной физики 1977 г. на базе университета Миннесоты. В своем докладе о счастливых 30-х годах Х. Бете удовлетворялся признанием протонно-нейтронного состава, позволившего производить расчет дейтрона и т. д., и даже упрекал Ю. Вигнера (доклад о нейтроне) за критические замечания в адрес работ Гейзенберга. Однако Вигнер заявил, что история должна быть честной и мы не должны замалчивать неточностей и заблуждений даже в работах крупнейших ученых: (в работах Гейзенберга, ошибочно допустившего наличие электрона внутри нейтрона, или Н. Бора, не признававшего модели оболочек и иронически сравнивавшего ряд магических чисел 2, 8, 20, 50, 82 ... с номерами ньюйорк-

ского метро). Со своей стороны, Р. Па́йерлс в докладе о ядерных силах также указал на многие неясности в первых статьях Гейзенберга, подчеркнув, что на элементарность нейтрона и бета-распад как порождение частицы подобно фотону было впервые указано в работе советского автора (Иваненко, август 1932 г.). В конце концов, в заключение дискуссии Бете был вынужден, конечно, признать наличие атаквизмов в первоначальных концепциях Гейзенберга. Однако значение его ядерных работ конечно, никто не отрицал. Из теоретических докладов этой конференции отметим большое сообщение Дж. Уилера с интересными воспоминаниями о трудностях установления модели ядра (Иваненко — Гейзенберга) и его совместных работах с Н. Бором по теории деления (параллельно с Френкелем). Докладчиками-экспериментаторами были также авторитетные физики: Э. Сегре, О. Фриш, М. Гольдхабер, Э. Мак-Миллан.

1. *Атомное ядро*: Сб. докл. Первой всесоюз. ядер. конф. / Под ред. М. П. Бронштейна, В. М. Дукельского, Д. Д. Иваненко, Ю. Б. Харитона. — Л.; М.: Гостехиздат, 1934.
2. *Дорфман Я. Г.* Всемирная история физики — М.: Наука, 1974—1979. — Т. 1—2.
3. *Игонин В. В.* Атом в СССР. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975.
4. *Кудрявцев П. С.* История физики — М.: Просвещение, 1971. — Т. 3.
5. *Лауэ М.* История физики. — М.: Гостехиздат, 1956.
6. *Лауэ М.* Статьи и речи. — М.: Наука, 1969.
7. *Льюис М.* История физики. — М.: Мир, 1970.
8. *Нейтрон* / Под ред. Б. М. Кедрова. — М.: Наука, 1975.
9. *Основатели советской физики.* — М.: Просвещение, 1970.
10. *Перспективы квантовой физики*: Сб. науч. тр. — Киев: Наук. думка, 1982.
11. *Развитие физики в СССР*: В 2-х кн. — М.: Наука, 1967. — Кн. 1—2.
12. *Храмов Ю. А.* Физики (биограф. справочник). — Киев: Наук. думка, 1977. — 512 с.
13. *Heisenberg W.* Rapports et Discussions. 7me Congrès Solvay, 1933, p. 289—335.
14. *Massey H., Feather N.* — James Chadwick (Biogr. Mem. Fellows Roy. Soc.), 1976, 22.
15. *Melcher H.* Zwischen Chemie und Physik: Otto Hahn. — Wissenschaft und Fortschritt., 1979, 29, N 7, S. 256; Lise Meitner, ibid. St 1.
16. *Nuclear Physics in Retrospect* / Ed. R. H. Stuewer. — Minneapolis: Univ. of Minnesota Press, 1979.



**ОТ РАДИОАКТИВНОСТИ  
К ФИЗИЧЕСКИМ ОСНОВАМ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*«Физика ядра, которая вытекала из явлений радиоактивности, не может не являться одной из основных задач Радиевого института»*

*В. И. ВЕРНАДСКИЙ*

Взятые эшиграфом слова академика В. И. Вернадского, основателя и первого директора Радиевого института, произнесены им на Сессии отделения математических и естественных наук АН СССР в марте 1936 г. и относились не только к данному институту. В этом же выступлении он сказал: «В действительности мы можем точно установить, когда началось то движение, которое преобразовало всю физику и совершенно изменило наше научное представление об окружающем. Это было в 1896 г., когда Беккерель открыл явление радиоактивности, 40 лет тому назад. Можно сказать, что только с этого времени началась новая физика. Для нас, которые все время работают в этой области явлений, совершенно ясно, что новая физика ядра атома является не венцом и не концом этого движения, а, вероятно, только его началом... Для нас было ясно, что работа в этом направлении должна идти в области физики ядра, которая должна являться одной из основ всякого радиевого института, тем более нашего».

Представляется, таким образом, абсолютно закономерным, что Радиевый институт, созданный в 1922 г. по постановлению Советского правительства и при личной поддержке В. И. Ленина специально для исследований в области радиоактивности, стоял у истоков рождения ядерной физики в нашей стране. Дальнейший путь пройден им вместе с другими отечественными центрами и привел к созданию физических основ

атомной энергетики, трудом уже технических специалистов нашей страны воплощенных в могучих атомных электростанциях и оборонной технике. Практические задачи сегодняшнего дня требуют дальнейшего развития этих основ. Вместе с тем такое развитие открывает новые, возможно, не менее богатые перспективы развития физики. О том, что было вчера, есть сегодня и будет завтра и должно обеспечить неуклонное поступательное развитие и новые успехи советской ядерной физики, на примере Радиевого института мы и хотим рассказать.

**1. Начало нейтронной физики и физики деления ядер.** В царской России наука вообще, а наука об атоме в особенности, находилась в крайне запущенном состоянии. Положение изменилось лишь после Великой Октябрьской социалистической революции. Вот как описывал это в 1937 г. академик В. Г. Хлопин, ближайший соратник В. И. Вернадского, позднее сменивший его на посту директора института: «Радиное дело в нашей стране, действительно, в полном смысле этого слова, является детищем Великого Октября 1917 г. потому, что в старой дореволюционной России радиоактивности, радиохимии, рентгенологии, как науки в нашей стране не существовало. Были отдельные, подчас крупные ученые, которые занимались отдельными вопросами радиоактивности, рентгенологии, науки как таковой, я повторяю, не было, если мы под этим понимаем определен-



ное направление работы, определенную школу, определенную лабораторию, которые работали бы по данной специальности. Ничего подобного в дореволюционной России не было...» Дело коренным образом меняется после Октябрьской революции. Весной 1918 г. Высший совет народного хозяйства обращается в Академию наук с просьбой взять на себя организацию пробного радиевого завода в нашей стране. И вот с весны 1918 г. начинается работа.

Одним из этапов этой работы явилось и создание Радиевого института (тогда Государственного Радиевого института) в составе Радиевого отделения Государственного Рентгенологического и Радиологического института, Радиевого отдела Комиссии по изучению естественных и производственных сил Академии наук и упомянутого радиевого завода. На этом заводе в конце 1921 г. и был получен первый отечественный радий. Тем самым была создана база для исследований радиоактивности в нашей стране.

Но завод и интересы ставшей реальной научной работы требовали специалистов-радиологов и приборов для измерений радиоактивности. Это и стало ближайшей основной задачей физического отдела Радиевого института, который возглавил профессор Л. В. Мысовский. Еще в 1914 г., заканчивая физико-математический факультет Петербургского университета, Мысовский представил опытные исследования «По поводу электрического счета  $\alpha$ -частиц», и с 1918 г. работал под руководством одного из первых русских радиологов, ученика М. Кюри — Л. С. Коловрат-Червинского. При институте был создан практикум по радиоактивности, который за время его существования прошло около 300 человек. В 1931 г. Л. В. Мысовский организывает и возглавляет в Ленинградском университете новую кафедру — радиологии, наиболее способных выпускников которой он приглашает в аспирантуру Радиевого института. При деятельном участии Мысовского в институте создаются и оснащаются оборудованием механическая, столярная и стеклодувная мастерские. В них изготавливаются при-

боры, необходимые для организации контроля производства в зарождавшейся радиевой промышленности и для изучения радиоактивности, — электроscopes, электрометры и различные счетчики.

В середине 20-х годов в институте осваиваются и развиваются основные в то время методы экспериментального изучения заряженных частиц — метод сцинтилляции и метод камеры Вильсона. В 1927 г. Л. В. Мысовский предлагает использовать (а в дальнейшем и использует) для регистрации  $\alpha$ -частиц фотографические пластинки с толстым слоем светочувствительной эмульсии. Таким образом, уже к началу 30-х годов Радиевый институт располагал широким арсеналом методических средств изучения и измерения радиоактивных излучений.

Но Мысовский занимался не только методиками. В двадцатые годы им написаны теоретические работы, касавшиеся фундаментальных вопросов — энергии  $\alpha$ -частиц и связи между энергией  $\alpha$ -частиц и постоянной радиоактивного распада. В 1925 г. он первым в стране начал заниматься изучением космических лучей, само существование которых в те годы еще подвергалось сомнению, и установил ряд их существенных свойств. Однако одна из самых больших заслуг Л. В. Мысовского перед советской наукой, возможно, та, что был он пионером искусственного ускорения заряженных частиц.

Задача ускорения частиц родилась с открытием Э. Резерфордом искусственного расщепления ядра (1919 г.). С момента этого открытия обладание ускорителем заряженных частиц (все больших энергий, масс и интенсивностей ионов) стало, и, по-видимому, навечно, «голубой» мечтой физиков-ядерщиков. Сам Резерфорд считал, что искусственно ускоренный пучок частиц будет гораздо более эффективным средством осуществления ядерных реакций, чем  $\alpha$ -частицы естественных радиоактивных источников, которые им использовались. Его сообщения о наблюдении «трансмутации ядер» заканчивались словами: «Результаты в целом указывают на то, что, если  $\alpha$ -частицы или подоб-



ные им быстро движущиеся частицы с значительно большей энергией могли бы применяться для опытов, то можно было бы ожидать разрушения ядерных структур у многих легких атомов». Имея в виду расщепление ядер атомов, Н. Бор писал: «Хотя в этих исследованиях было получено много важных новых данных, становилось все более и более ясным, что для подлинного решения проблемы ядра недостаточно источников естественных  $\alpha$ -частиц и что желательнее иметь в своем распоряжении интенсивные пучки частиц высокой энергии, полученные искусственным ускорением ионов». И у Л. В. Мысовского в монографии «Космические лучи», изданной в 1929 г., есть фраза: «Получение высокого потенциала для воздействия на ядро атома является мечтой многих физиков». Для Мысовского это было не столько мечтой, сколько действием. Уже в 1922 г. в «Докладах Российской академии наук» появилась статья Л. В. Мысовского и В. Н. Рукавишников «Ускорение положительных и отрицательных ионов полем переменного тока высокой частоты». В институте Рукавишниковым была собрана установка, действовавшая по принципу трансформатора Тесла. Позднее усовершенствованием этого прибора занимался Д. Г. Алхазов, так же как и Рукавишников, работавший в институте под руководством Мысовского. Мысовский внимательно следил за всеми попытками получения высоких потенциалов, о чем свидетельствует его обзор на тему «Лабораторные методы получения быстрых электронов и протонов», опубликованный в журнале «Успехи физических наук» за 1932 г.

Однако первые десять лет со дня открытия расщепления ядер не принесли заметных успехов в этих методах. Сами физики больше интересовались строением атома, а не атомного ядра. Физический мир находился под впечатлением более раннего открытия Резерфорда — открытия ядра атома (1911 г.) и создания на его основе планетарной модели атома Бора (1913 г.). К тому же школа Резерфорда (лаборатория в Манчестере, а затем Кавендишская лаборатория), задававшая тон в на-

уке о радиоактивности того времени, исповедовала принцип простых приборов — «из воска и веревочек». «Несмотря на уговоры Чэдвика приступить к конструированию подходящего ускорителя, Резерфорд несколько лет противился тому, чтобы в его лаборатории начали такое большое и дорогостоящее предприятие. Легко понять позицию Резерфорда: стоит лишь вспомнить тот удивительный прогресс, который был им достигнут в прежние времена с помощью очень скромного экспериментального оборудования» — писал Н. Бор.

Положение изменилось в 1928—1929 гг. Работы по созданию ускорителей были стимулированы Г. А. Гамовым, бывшим тогда сотрудником Радиевого института. Гамов применил принципы волновой механики к  $\alpha$ -распаду и объяснил  $\alpha$ -распад эффектом проницаемости потенциального барьера ядра. На этой основе он, а также Кондон и Герни не только дали общую интерпретацию  $\alpha$ -распада, но и обосновали количественную связь между временем жизни ядра и энергией  $\alpha$ -частицы, выражаемую законом Гейгера — Нэттола. Гамов же рассчитал вероятность проникновения заряженной частицы в ядро за счет обратного туннельного эффекта. Вот как описывает события один из учеников Резерфорда Т. Аллибон: «Как раз в то время, зимой 1928/29 г., в Кембридж приехал русский ученый Гамов и выступил с лекцией о новых идеях в квантовой механике — о существовании энергетического барьера вокруг ядра. Помню, как после лекции вместе с Уолтоном мы спустились вниз по лестнице, в нашу лабораторию и подошли к Кокрофту, который работал в той же комнате. Кокрофт как раз подставлял в формулу Гамова цифры, которые можно было получить в то время для ионного тока, — это 1,0 мкА протонов ускоренных до энергии 0,5 МэВ — чтобы выяснить вероятность проникновения протонов через энергетический барьер ядра бора. Даже после учета возможных потерь эти цифры казались вполне приемлемыми, и через некоторое время он подал Резерфорду объяснительную за-



писку с предложением строить трубку напряжением 0,5 мВ для ускорения протонов, подобно моей, но питаемую постоянным током (я работал с переменным током). Уолтон прекратил свои попытки ускорить электроны и присоединился к Кокрофту. Как известно, через три года они достигли успеха». В 1932 г. Кокрофт и Уолтон, бомбардируя литий протонами, впервые осуществили расщепление атомного ядра с помощью искусственно ускоренных заряженных частиц. В этом же году впервые в СССР опыт по расщеплению ядра ускоренными протонами был осуществлен в Харьковском физико-техническом институте К. Д. Синельниковым, А. И. Лейпунским, А. К. Вальтером и Г. Д. Латышевым.

Достигнутый успех вдохновил ученых на дальнейшее развитие ускорительной техники. В ядерной физике начался «машинный век». Если одним из начал этого века были ускорители прямого действия, и это начало приняли в Харькове, то другим началом был резонансный ускоритель — циклотрон, или, как тогда говорили, установка Лоуренса, также примененная для расщепления ядер в 1932 г. По этому пути пошел Радиевый институт. Проанализировав все существующие методы ускорения, Л. В. Мысовский остановился на приборе Лоуренса. Он писал: «Синхронный ускоритель ионов выгодно отличается от других ускорителей тем, что он не требует специально разработанной трубки и особенно высокого вакуума, так как вся его работа протекает при потенциалах всего в несколько тысяч вольт. Другое весьма важное преимущество синхронного ускорителя — это почти идеальная фокусировка ионного пучка».

В 1932 г. ученый совет института по предложению Мысовского и Гамова принимает решение о строительстве циклотрона, специальным правительственным постановлением выделяются ассигнования для этой цели. Время принятия этого решения далеко не случайно. 1932 г. называют «годом чудес» (*annus mirabilis*) ядерной физики. Помимо упоминавшегося уже наблюдения трансмутации легких ядер под действием

ускоренных протонов следует назвать по меньшей мере еще три великих открытия этого года: обнаружение позитрона (К. Андерсеном), получение тяжелого водорода (Г. Юри, Ф. Брикведе и Г. Мэрфи), открытие нейтрона (Дж. Чэдвигом). К этим экспериментальным достижениям добавляются успехи теории: подтверждение теории  $\alpha$ -распада Гамова в результате установления соответствия между энергией  $\gamma$ -излучения и  $\alpha$ -частиц (тонкая структура  $\alpha$ -спектра) и объяснение природы линейчатого спектра  $\beta$ -лучей (внутренняя конверсия  $\gamma$ -излучения). Первой по времени (февраль) и наиболее поразительной «новинкой» года было открытие нейтрона. Это открытие и предложенная через три месяца после этого независимо друг от друга Д. Д. Иваненко и В. Г. Гейзенбергом протонно-нейтронная модель ядра, по существу, определили лицо современной ядерной физики. Вырисовывались огромные внутренние резервы и большие перспективы физики ядра.

Как уже упоминалось, именно в этом году появилось сообщение о первых экспериментах на ускорителе Лоуренса в Беркли. Эти мощные «информационные импульсы» были мгновенно «приняты» Радиевым институтом, так как почва для них — моральная и техническая база — готовилась в институте уже 10 лет — практически со дня его основания.

Циклотрон Радиевого института начал строиться. Магнитные полюсы ускорителя было решено делать диаметром 1000 мм. В 1933 г. на ленинградском заводе «Большевик» специально была выплавлена высококачественная мягкая сталь, приближающаяся по характеристикам к известной марке «армко», и произведена поковка станин и полюсных сердечников. По личному указанию С. М. Кирова на другом ленинградском заводе «Электросила» была произведена высокоточная механическая обработка поволоков и изготовлена обмотка возбуждения. Большую поддержку этим работам оказал Д. В. Ефремов, будучи заведующим лабораторией завода. В августе 1934 г. циклотрон был установлен в институте. Был собран



высокочастотный генератор, изготовлена вакуумная камера и началась наладка. В марте 1937 г. получен протонный пучок с энергией 2,1 МэВ, а в июле протоны — 3,2 МэВ и гелиевые ионы с энергией выше 1 МэВ. Сооружение циклотрона было осуществлено «бригадой» Л. В. Мысовского, основными специалистами в которой были В. Н. Рукавишников и Д. Г. Алхазов.

Циклотрон института создавался в «бурные» для ядерной физики годы. Ведь 1932 г. был только началом «золотого века». В следующем, 1933 г. в Кавендише П. Блекетт и Г. Оккиалини наблюдали космические ливни положительных и отрицательных электронов, в 1934 г. в Париже супруги Ирэн и Фредерик Жолио-Кюри, бомбардируя алюминий  $\alpha$ -частицами полония, открыли явление искусственной радиоактивности. В том же году в Риме Э. Ферми наблюдал подобную радиоактивность под действием нейтронов. Продолжение этих опытов в Берлине привело О. Гана и Ф. Штрассмана в 1938 г. к открытию вынужденного деления урана.

И хотя ни одно из упомянутых открытий не потребовало ускорителя (все они были сделаны «старым способом» — с использованием «естественных» источников: космических лучей и радий-бериллиевых нейтронов), было ясно, что для глубокого и быстрого изучения всех только что обнаруженных новых явлений без ускорителей попросту не обойтись. Таким образом, «физика» заставляла циклотронную «бригаду» очень спешить и непрерывно совершенствовать введенный в строй ускоритель.

Кроме физики спешить «заставлял» И. В. Курчатов, в августе 1937 г. ставший заведующим циклотронной лабораторией\*. Но еще до этого он был консультантом института. И хотя статус «постоянного консультанта» (по документам) он имел только с ноября 1935 г., фактически И. В. Курчатов был тесно связан с Л. В. Мысовским и другими

\* С апреля 1939 г. в связи с болезнью Л. В. Мысовского И. В. Курчатов назначается заведующим физического отдела института, в который входила лаборатория, и занимает эту должность до октября 1940 г.

физиками Радиевого института с самого начала своих занятий атомным ядром — с конца 1932 г. Примечательно, что в приказе по физико-техническому институту, датированному 15 декабря 1932 г., его директор академик А. Ф. Иоффе, «образуя особую группу по ядру в составе: 1. Академик А. Ф. Иоффе, — начальник группы, 2. И. В. Курчатов — заместитель начальника группы...» (в состав группы входили также Д. В. Скобельцын, И. П. Селинов, Д. Д. Иваненко и др. — всего 10 человек), следующим пунктом ставит: «Г. А. Гамова и Л. В. Мысовского числить консультантами группы».

Помимо общности научных интересов И. В. Курчатова и Л. В. Мысовского объединяла и техническая база начавшихся экспериментов с нейтронами. Уже в 20-е годы Мысовским была создана оригинальная эманационная установка для добычи радона («эманации радия») из раствора радия. Эти препараты радона находили широкое применение в медицинской практике, а с открытием нейтрона ампулы с эманацией и порошком бериллия как источники нейтронов по реакции  ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$  (в которой нейтроны и были открыты) приобрели неопределимое значение. На этих радон-бериллиевых источниках и были выполнены первые отечественные работы по взаимодействию нейтронов с ядрами. Кроме того, как упоминалось, в Радиевом институте уже к началу 30-х годов были созданы разнообразные приборы для измерения радиоактивных излучений — счетчики Гейгера, ионизационные камеры, камера Вильсона, толстослойные фотопластинки. Опыты с нейтронами начались практически сразу же после появления сообщения об обнаружении Ферми навведенной нейтронами радиоактивности. Примерно за год (с середины 1934 г. до середины 1935 г.) сотрудниками Физико-технического и Радиевого институтов были описаны результаты десяти совместных исследований\*\*, касав-

\*\* Две из этих публикаций представлены от трех учреждений: Радиевого института, Ленинградского физико-технического института и Харьковского физико-технического института (тогда УФТИ).



шихся как наведенной радиоактивности, так и вопросов рассеяния и поглощения нейтронов ядрами. О широте затрагиваемых проблем свидетельствуют сами названия работ, например «Эффект Ферми в фосфоре», «Энергия нейтронов и эффект Ферми», «Рассеяние нейтронов водой и свинцом», «Поглощение медленных нейтронов». Описанными в этих работах экспериментами И. В. Курчатова и Л. В. Мысовского и их сотрудников было положено начало нейтронной физике как одной из научных основ атомной энергетики в СССР.

В своем выступлении на сессии АН СССР в марте 1936 г. И. В. Курчатов говорил: «Изучение взаимодействия нейтрона с ядром позволяет осветить существенные вопросы структуры ядра. Особенно много дали в этом отношении опыты с исследованиями медленных нейтронов. Другим возможным путем исследования структуры ядра является путь изучения природы тех превращений, которые испытывают ядра. В этом направлении работа развивалась первые годы после открытия нейтрона. Я расскажу сейчас о результатах тех работ нашей лаборатории в Физико-техническом институте, которые относятся именно к этому направлению. Большая часть этих работ велась нами совместно с лабораторией проф. Мысовского в Государственном Радиевом институте». Среди этих работ отмечены исследования активности фосфора, облученного нейтронами, в которых устанавливалась возможность «разветвления» ядерных реакций с нейтронами, и опыты по облучению брома. «У элементов с большим атомным номером, чем у цинка, обычно нет разветвления ядерных реакций: при захвате нейтроном ядро испускает лишь гамма-излучение, и таким образом здесь возникают радиоактивные изотопы облучаемого элемента. Число типов радиоактивных ядер, которые должны образовываться при облучении нейтронами тяжелых элементов, должно быть, следовательно, или равно или меньше числа устойчивых изотопов, и, следовательно, при облучении этого элемента нейтронами должно было бы образовываться два и только два новых ядра брома, обладаю-

щих радиоактивными свойствами. Ферми была показана справедливость этого заключения, обнаружена искусственная радиоактивность брома, установлен период полураспада двух возникающих при этом ядер. В прошлом году у нас было обнаружено, однако, что при облучении нейтронами брома образуются не два, а три радиоактивных ядра. Рядом опытов было показано, что все три радиоактивных ядра по своим химическим свойствам являются ядрами брома», — так описывал И. В. Курчатов исследования, выполненные им, Л. В. Мысовским, Б. В. Курчатовым и Л. И. Русиновым в 1935 г. Это было открытие нового явления — ядерной изомерии у искусственно создаваемых радиоактивных ядер. Опыты, о которых идет речь, начинались в Радиевом институте. В. Г. Хлопин вспоминал: «Я помню, что однажды ночью я застал Льва Владимировича за изучением в камере Вильсона излучений искусственно радиоактивного брома; он поделился со мной удивительным наблюдением, что старый препарат радиоброма, который должен был бы уже практически распастись нацело, обнаруживает заметную активность, за изменением которой он предполагал проследить. Как мы теперь знаем, это его наблюдение было совершенно правильно и привело в дальнейшем к установлению наличия третьего, более долго живущего радиоактивного изотопа брома».

Объяснение природы изомерии было дано немецким физиком Вайцзеккером. Опираясь на идеи Н. Бора, он предположил, что изомерия обусловлена наличием метастабильных возбужденных состояний ядер. Идея требовала экспериментальной проверки. И Курчатов с сотрудниками продолжает опыты по изомерии. Однако для этих и других нейтронных исследований нужны мощные потоки нейтронов, которые может дать только циклотрон. Циклотрон стал совершенно необходимым, и Курчатов решает им заняться вплотную. Сохранился документ тех лет, показывающий большие трудности первых шагов и многообразие забот В. Г. Хлопина и И. В. Курчатова по



развитию циклотрона. 17 июля 1938 г. из института в Президиум АН СССР была отправлена записка, в которой говорилось: «Государственный Радиевый институт располагает весьма ценным прибором — циклотроном — для ускорения ионов. О проделанной работе по настройке этого прибора и полученных результатах Радиевый институт в марте 1938 г. докладывал Президиуму АН СССР: «За истекший промежуток времени институт добился еще ряда успехов в освоении циклотрона и располагает сейчас всеми данными для использования полной проектной мощности установки». Далее высказывается просьба: «учитывая, что циклотрон ГРИ является первым действующим циклотроном в Европе и что этот аппарат имеет большое значение для советской науки» в срочном порядке провести мероприятия по укреплению штатами ускорителя и механической мастерской, повышению окладов сотрудников, оснащению мастерской станками, получению фондов на цветные металлы, размещению заказов, связанных с постройкой новой большой камеры на заводах, строительству новой трансформаторной будки. Документ был подписан и. о. директора профессором Хлопиным и заведующим циклотронной лабораторией профессором Курчатовым.

Совершенствование циклотрона велось непрерывно, наряду с его использованием в экспериментах. В результате в первой половине 1941 г. были получены пучки дейтронов с энергией около 5,0 МэВ при токе на пробнике до 40 мкА. Но уже в начале 1939 г. при облучении литиевой мишени дейтронами устойчиво получались нейтроны с интенсивностью, эквивалентной нескольким килограммам радия, смешанного с бериллием, т. е. в тысячи раз более высокой, чем у имевшихся  $Ra + \alpha$  источников.

Наличие столь мощного источника нейтронов, разнообразных методик, опыта и знаний, накопленных в предыдущих исследованиях по естественной и искусственной радиоактивности, позволило физикам и химикам Радиевского института так же быстро включиться

в изучение деления ядер, как до того в изучение нейтронов. Об открытии деления ядер стало известно в начале 1939 г. А уже 7 марта в печать были направлены работы Л. В. Мысовского и А. П. Жданова о наблюдении ядер отдачи при расщеплении урана нейтронами в толстослойных фотоэмульсиях. На совещании по физике атомного ядра, состоявшемся 15—20 ноября 1939 г. в Харькове, кроме обзорного доклада А. И. Лейпунского (УФТИ), были представлены четыре экспериментальные работы по делению ядер. Одна от Физико-технического института — «Опыты по делению ядер урана» Л. И. Русинова и Г. Н. Флерова — и три от Радиевского института: «Наблюдение следов ядер отдачи, получающихся при делении урана под действием нейтронов, в камере Вильсона с пониженным давлением» Н. А. Перфилова, «Пробеги и энергии осколков при делении урана быстрыми нейтронами» К. А. Петряка и «Химическая природа продуктов деления тяжелых ядер» В. Г. Хлопина. Названия докладов говорят сами за себя.

Исследования по делению ядер развивались вообще исключительно быстро. За первые несколько месяцев после открытия самого явления стали известны (качественно) почти все основные характеристики этого типа ядерного расщепления: сечения деления и их зависимость от энергии нейтронов, равенство масс и зарядов осколков, большая кинетическая энергия осколков, эмиссия нескольких нейтронов в одном акте деления, испускание запаздывающих нейтронов. Большой вклад в это внесли советские ученые, в том числе сотрудники Радиевского института. Кроме уже упоминавшихся работ можно указать первые экспериментальные определения эффективного заряда осколков методом отклонения в магнитном поле (циклотрона), выполненные Перфиловым; первые наблюдения деления ядер урана, помещенных внутри эмульсии и подвергнутых бомбардировке нейтронами, проведенные Ждановым и Мысовским; обнаружение ряда неизвестных до этого продуктов деления урана и тория, сделанное Хло-



пиним, Волковым и Пасвик-Хлопиной, а также Полесицким, Орбели и Неме-ровским; поиски трансурановых эле-ментов, образующихся при захвате ней-тронов ураном, предпринятые Хлопи-ным, Волковым, Полесицким и Петр-жаком.

В июле 1940 г. в «Журнал экспери-ментальной и теоретической физики» была направлена статья К. А. Петржа-ка и Г. Н. Флерова «Спонтанное деле-ние урана», в которой сообщалось об открытии нового явления — спонтан-ного деления тяжелых ядер. Статья заканчивалась словами, которые один из авторов настоящей публикации К. А. Петржак вспоминает с особым удовольствием: «Мы приносим искрен-нюю благодарность за руководство работой проф. И. В. Курчатову, наме-тившему все основные контрольные эксперименты и принимавшему самое непосредственное участие в обсужде-нии результатов исследований». Рабо-та была выполнена в Радиевом и Физико-техническом институтах.

Так начинались отечественные экс-периментальные исследования по фи-зике деления ядер. В то же время в других институтах развивались теоре-тические представления о самом про-цессе (Я. И. Френкелем) и об услови-ях самоподдерживающейся, цепной ре-акции деления (Я. Б. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоновм), а также продол-жалось изучение вопросов рассеяния, замедления и поглощения нейтронов в различных веществах, потенциально пригодных для осуществления цепной реакции (И. В. Курчатовым с сотру-дниками). В области нейтронной фи-зики в Радиевом институте продолжа-ли работать И. И. Гуревич и М. Г. Мещеряков. В результате были созданы научные предпосылки и подго-товлены кадры для решения атомной проблемы в нашей стране в военные и послевоенные 40-е годы. В сборни-ке «Радиевский институт им. В. Г. Хло-пина к 50-летию со дня основания» эта мысль выражена словами: «Успеш-ное и быстрое развитие отечественной атомной промышленности в значитель-ной степени обусловлено тем, что в Ра-диевом институте имелись кадры высо-

коквалифицированных радиохимиков и специалистов по ядерной физике, ко-торые не только оказались способны-ми решать на высоком научном уров-не возникшие практические пробле-мы, но и смогли в короткий срок под-готовить необходимые кадры для про-изводства».

Так на примере Радиевого институ-та отразился путь советской физики от первых измерений излучения радия и других естественных радиоактивных элементов к вопросам ядерных реакций и искусственной радиоактивности, вы-зываемой пучками ускоренных час-тиц, к получению с помощью ускорит-елей мощных источников нейтронов, к исследованиям различных реакций с нейтронами, в том числе реакции де-ления ядер, составляющей фундамент современной атомной энергетики.

**2. Физика деления в ряду других областей ядерной физики и ее прило-жения.** В конце 40-х — начале 50-х годов физики Радиевого института, про-должая участвовать в решении важ-нейших практических задач, возобно-вили фундаментальные исследования, направив главные усилия на детальное изучение механизма процесса деления тяжелых ядер.

Достигнутое на основе капельной мо-дели ядра понимание явления деления ядер было лишь качественным. Все более явно вырисовывалась необхо-димость учета сложной структуры ато-мных ядер. В физику деления вливались идеи оболочечной модели, несколько обособленная на первых порах она быстро «срасталась» с физикой ядра вооб-ще. На выяснение роли ядерных структур в процессе деления и были на-целены многие эксперименты физиков института — измерения распределения масс и зарядов осколков урана и тран-сурановых элементов, измерения кин-етических энергий осколков различных масс, определение выходов длиннопро-бежных частиц при делении и другие..

В результате полученных опытных данных сотрудниками института были сделаны важные заключения, что обо-лочечные эффекты определяют не толь-ко асимметрию масс и зарядов оскол-ков, но и распределение их кинети-



ческих энергий и энергий возбуждения.

В 60-е годы благодаря работам В. М. Струтинского с сотрудниками стало ясно, что ядерные оболочки могут играть большую роль и в свойствах поверхности потенциальной энергии делящихся ядер, приводя к сложной структуре барьера деления. Вместе с более ранними идеями О. Бора о возможности существования на барьере деления системы квазистационарных уровней, подобных уровням слабо возбужденных недеформированных ядер, эти представления составляют основу нашего современного понимания характеристики процесса деления вблизи порога. Выполненные в институте измерения сечений деления, как полных, так и дифференциальных, при бомбардировке нейтронами различных энергий разных ядер, в том числе радия, явились существенным подтверждением и экспериментальным обоснованием указанных представлений.

В последнее десятилетие все большее внимание вызывают динамические эффекты, возникающие при делении. Без учета динамики, причем на всех стадиях процесса деления, начиная с момента прохождения барьера и кончая точкой разделения, по-видимому, невозможно адекватно описать процесс деления. В связи с этим возникают вопросы определения таких «макроскопических» свойств ядерного вещества, как вязкость, теплопроводность и т. д. В институте проводятся эксперименты по изучению спонтанного деления и влияния энергии возбуждения на массовые, зарядовые, угловые и энергетические распределения, ведутся теоретические исследования начальной стадии разлета осколков, которые могут пролить свет на эту кардинальную проблему теории деления.

Исследования механизма процесса деления при спонтанном и низкоэнергетическом делении тесно смыкаются с работами в области физики деления и других ядерных реакций при высоких энергиях (до нескольких гигаэлектронвольт), а также с работами по ядерной спектроскопии. И физика ядерных реакций и ядерная спектроскопия

также имеют в институте глубокие «исторические» корни — можно сказать, берут начало от работ Л. В. Мысовского по космическим лучам и ядерной изомерии (или относительно спектроскопии еще раньше — с изучения свойств излучения естественных радиоактивных элементов, в частности, с первых попыток Мысовского систематизировать энергии  $\alpha$ -частиц этих элементов и теоретически обосновать закон Гейгера — Нэттола еще в 1922 г.).

Систематические исследования высокоэнергетических ядерных процессов начались в институте с 1949 г., сразу же после ввода в действие первого в стране синхроциклотрона на 480 МэВ в Дубне, и продолжают на ускорителях ОИЯИ, ИТЭФ и ЛИЯФ. В работах наших сотрудников была получена обширная информация об особенностях неупругих ядерных взаимодействий частиц промежуточных и высоких энергий, которая имела существенное значение для формирования представлений о природе процессов, определяющих неупругие взаимодействия. Многие особенности данных взаимодействий были впервые обнаружены в работах Радиового института, к ним, например, относятся: образование многозарядных частиц ( $Z > 2$ ) при расщеплении космическими лучами (1938 г.), полное расщепление ядер серебра в эмульсии (1943 г.), деление ядер урана при захвате медленных  $\pi$ -мезонов (1950 г.), открытие изотопа  ${}^8\text{He}$  среди продуктов фрагментации (1960 г.), установление экспоненциальной зависимости делимости ядер от параметра  $Z^2/A$  при высоком возбуждении (1961 г.), обнаружение изотопных эффектов в сечениях фрагментации (1973 г.).

Работы по ядерной спектроскопии, также как многие эксперименты по ядерным реакциям при промежуточных и высоких энергиях, ведутся совместно с ОИЯИ. Под руководством члена-корреспондента АН СССР Б. С. Джебелова, возглавляющего эти направления, впервые разработана и осуществляется широкая программа исследований схем распада нейтрондефицитных нуклидов. Характерен высокий технический уровень ядерноспектроскопичес-



ких исследований — сотрудникам института трижды удавалось создавать приборы, не имевшие равных в мире по некоторым качествам. Такими приборами были созданный в 1948 г. магнитный спектрометр для  $\gamma$ -лучей, построенный в 1959 г. магнитный  $\alpha$ -спектрометр типа  $\pi \sqrt{2}$ , имевший самую высокую светосилу среди приборов этого класса, и начавший эксплуатироваться в 1969 г. шестизазорный  $\beta$ -спектрометр, отличающийся очень низким фоном. В настоящее время измерения проводятся на Ge (Li)-спектрометрах высокого разрешения. О высоком классе и авторитете работ этой школы свидетельствует то, что Радиевый институт является одним из организаторов всесоюзных совещаний по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра. Ведущиеся в институте исследования по физике деления, ядерным реакциям и спектроскопии тесно связаны между собой и обогащают друг друга как идейно, так и методически.

Для всех работ Радиевого института, как и для спектроскопических, всегда была характерна высокая степень совершенства применяемых методик, когда техническая изобретательность сочетается с искусством воплощения. Счастливым началом этому было заложено более 50 лет назад изобретением и первым применением толстослойных фотоэмульсий. К настоящему времени в институте разработаны и изготавливаются особо мелкозернистые фотоэмульсии более десяти различных сортов, различающихся по чувствительности к регистрации заряженных частиц — от осколочных до релятивистских. Фотометодом был открыт изотоп  $^8\text{He}$  и исследовано великое множество самых различных ядерных реакций. Благодаря полноте картины реакций — возможности увидеть почти все заряженные продукты в полном телесном угле — толстослойные фотоэмульсии широко используются в самых современных экспериментах. Естественным развитием этого метода являются кристаллические хлорсеребряные детекторы, активированные кадмием, регистрационными способностями которых можно

управлять с помощью внешнего источника света. Работа над такими детекторами также ведется в институте.

Как правило, именно совершенствованием методик достигаются принципиально новые результаты. Так было и с открытием спонтанного деления ядер, ставшим возможным только благодаря тому, что чувствительность ионизационной камеры была повышена в 30—40 раз по сравнению с камерами обычной конструкции. Это было достигнуто путем изготовления многослойной камеры, имеющей большую общую площадь электродов. Сейчас у нас работает ионизационная камера с электродом площадью около 10 000 см<sup>2</sup>, на который можно нанести десятки граммов анализируемого вещества.

В институте был разработан и широко применялся метод клиновидного фильтра, позволивший с невысокой точностью, но весьма оперативно изучать энергетические и угловые распределения частиц — продуктов ядерных реакций. В 1949 г. этим методом впервые была доказана возможность протекания ядерных реакций без образования составного ядра. Впервые был осуществлен многоугловой магнитный анализ продуктов реакции, с помощью которого при изучении реакции типа  $d, p$  были получены данные об уровнях возбуждения нескольких десятков ядер со средними массовыми числами, найдены спектроскопические множители и выяснена последовательность заполнения нейтронных оболочек.

Около 20 лет назад, вскоре после появления первых полупроводниковых (кремниевых и германиевых) детекторов, работы над этими важнейшими сегодня инструментами ядернофизических измерений начались и в Радиевом институте. Сотрудникам института удалось во многом улучшить способы их изготовления, разработать новые технологические приемы и конструкции. В результате мы располагаем сегодня поверхностнобарьерными детекторами заряженных частиц больших площадей и высокой разрешающей способности, очень тонкими кремниевыми детекторами для  $\Delta E$ -измерений, отдельными счетчиками и мозаиками из них самой



разной конфигурации, а также кремниевыми детекторами электромагнитного излучения.

В институте отработаны и впервые применены детекторы нового типа — тонкопленочные пробойные счетчики тяжелых ионов и осколков деления, имеющие (подобно твердотельным детекторам) исключительно высокие дискриминирующие свойства по отношению к слабоионизирующим частицам и способные (в отличие от твердотельных) работать в реальном масштабе времени.

Знания, опыт и большой арсенал тончайших физических методик, накопленные в процессе фундаментальных исследований, дают институту возможность успешно решать постоянно возникающие практические задачи. Быстрый рост атомной энергетики вызывает необходимость развития и промышленного освоения реакторов на быстрых нейтронах, повышает требования к экономичности строящихся АЭС. В связи с этим растут требования к точности элементарных данных, так называемых ядерно-физических констант, закладываемых в расчет. Одной из важнейших констант является сечение деления нейтронами для изотопов урана, плутония и других тяжелых элементов. Поэтому измерение сечений деления стало целым направлением работ института по ядерно-физическим константам. На спектрах нейтронов деления  $^{252}\text{Cf}$  и на нейтронах с энергией 14 МэВ определены сечения для многих наиболее важных для топливного цикла нуклидов. Особое значение имеет то, что измерения носят абсолютный характер — проводятся безотносительно к другим сечениям деления. Это наиболее сложные и важные эксперименты.

Другие существенные ядерные константы — число и спектр нейтронов деления. В институте получены точные значения этих параметров для нейтронов спонтанного деления  $^{252}\text{Cf}$  — параметров, имеющих характер эталонов. Работы имеют большой практический интерес и проводятся по контракту с Международным агентством по атомной энергии.

Одной из важнейших проблем ядерной энергетики, от решения которой в

значительной степени зависит задача оптимизации топливного цикла, является определение выгорания и накопления нуклидов трансурановых элементов в тепловыделяющих сборках. Выбор топливных загрузок реакторов ВВЭР и РБМК и прогнозирование выгорания и изотопного состава топлива в этих реакторах основаны на расчетных методах, для проверки которых требуется большой объем экспериментальных данных. Наиболее точные результаты по выгоранию и накоплению элементов получают при использовании радиохимических методов в сочетании с масс-спектрометрией. Однако применение этих методов для массовых анализов представляется нереальным ввиду их трудоемкости, а также невозможности в большинстве реальных ситуаций разрушать исследуемые топливные сборки. Поэтому в 1973 г. в институте началось изучение возможностей использования ядерно-физических методов для измерения выгорания и изотопного состава отработавшего ядерного топлива, которые могут быть достаточно экспрессными и не требуют разрушения тепловыделяющихборок. В короткий срок методы неразрушающего контроля были разработаны и создана необходимая аппаратура. Методы основаны на регистрации собственного и индуцированного нейтронного излучения и гамма-излученияборок. Созданная аппаратура внедрена на АЭС, ее использование дало большой экономический эффект.

**3. Перспективы развития.** Безусловно, значение только что рассмотренных прикладных работ, определяемое быстро развивающейся атомной энергетикой, будет неуклонно возрастать. Для укрепления их материальной базы в институте будет осуществлено строительство малогабаритного изохронного циклотрона МГЦ-20, на котором могут быть получены нейтроны большей энергии и интенсивности, чем на существующем в институте электростатическом генераторе ЭГ-5.

Но в конечном счете те же практические интересы требуют дальнейших фундаментальных исследований. Как уже упоминалось, кардинальной проб-



лемой физики деления ядер является сегодня понимание динамики процесса превращения крупного «куска» ядерной материи в два более мелких. Динамика же играет, по-видимому, решающую роль и в реакции, обратной делению — реакции слияния двух «тел» в одно более тяжелое, с которой связываются надежды на получение сверхтяжелых элементов. Таким образом, вопросы физики деления оказываются частью более общих проблем физики тяжелых ионов, как ядерной «макрофизики», имеющей дело с такими свойствами ядерного вещества, как вязкость, теплопроводность, сжимаемость и другие. На изучение этих свойств, во многом определяющих динамические эффекты, на установление уравнения состояния ядерного вещества нацелены сейчас национальные программы ядерной физики ряда ведущих стран.

Для обеспечения этих программ проектируются и строятся ускорители тяжелых ионов на энергии в области 10—1000 МэВ/нуклон. Они должны заполнить существующий в этой области пробел. В нашем институте строится ионный синхротрон — ускоритель протонов до энергии 150—200 МэВ и тяжелых ионов до энергии 40—50 МэВ/нуклон. Этим энергиям соответствуют такие важные «рубежи» ядерной физики, как энергия Ферми (30—40 МэВ/нуклон), скорость звука в ядерном веществе (15—20 МэВ/нуклон), при переходе через которые может измениться механизм взаимодействия ядер друг с другом и могут возникнуть совершенно новые особые, или экстремальные, состояния ядер и ядерного вещества. Это могут быть и «сверхплотные» изомеры, и «кипящие» ядра, в которых энергия возбуждения превышает полную энергию связи нуклонов, и «бешеновращающиеся» ядра, которые могут рассыпаться под действием одних центробежных сил, и другие не менее экзотические образования, к изучению которых намечено приступить.

Ускоритель разработан и изготовлен Институтом ядерной физики СО АН СССР. Он включает источник протонов и тяжелых ионов, линейный ускоритель — инжектор для получения

ионов с энергией около 1—1,5 МэВ/заряд и основное, синхротронное, кольцо. Каждый из этих элементов общей системы представляет и самостоятельный интерес. Для прикладных задач, которые также планируется решать на ускорителе, особенно интересен разработанный с участием наших сотрудников инжектор синхротрона — уникальная многопучковая ускорительная установка. Она позволит получать мощные пучки различных излучений — ионов и электронов (а следовательно, и нейтронов),  $\gamma$ -лучей отдельно и вместе. Последнее необходимо для создания «комплексных» полей излучений и проведения с их помощью радиационных исследований в условиях наибольшего приближения к практике. На источнике многозарядных ионов могут быть получены давно ожидавшиеся в ядерной и атомной физике «объекты» — «голые» и почти «голые» ядра, изучение которых может открыть новые страницы в фундаментальной физике и в таких ее приложениях, как астрофизика, физика плазмы и термоядерная энергетика.

Управление ускорителем автоматизируется на основе ЭВМ. Создаются крупные установки для будущих экспериментов на нем: универсальная камера ядерных реакций «Глобус» — для изучения механизма взаимодействия сложных ядер при энергии выше 10 МэВ/нуклон и свойств ядерных систем в критических условиях их существования; масс-спектрометр высокого разрешения «в линию» с синхротроном — для измерения масс нейтронодефицитных нуклидов и определения выходов продуктов в реакциях деления, отщепления и фрагментации; двойной  $\beta$ -спектрометр со сверхпроводящим магнитом соленоидального типа — для исследования  $\beta$ -спектров и спектров конверсионных электронов, а также  $e^-$  —  $e^-$ -совпадений от мишени, расположенной непосредственно на пучке тяжелых ионов; специальная высоковакуумная камера для изучения радиационных воздействий тяжелых ионов на вещество. Создаваемые приборы, сбор, накопление и обработка получаемой с них информации также автомати-



зируются с помощью ЭВМ. Все указанные элементы рассматриваются как часть единого комплекса «ускоритель плюс экспериментальные установки, плюс ЭВМ», представляющего собой, по существу, непрерывную «технологическую» линию современных фундаментальных и прикладных исследований.

Нет сомнений, что в результате этих исследований будут получены новые весьма существенные сведения о строении ядер и свойствах ядерных сил, которые увеличат нашу «власть над материей». Залог тому вся история советской ядерной физики и, в частности, описанный выше путь Радиевого института.

1. Мысовский Л. В., Рукавишников В. Н.— Докл. Российской Академии наук. Сер. А, 1922, с. 53.
2. Мысовский Л. В.— УФН, 1932, 12, с. 580.
3. Курчатов И. В., Курчатов В. В., Мысовский Л. В., Русинов Л. И.— Compt. Rend., 1935, 200, p. 1201.
4. Рукавишников В. Н., Алхазов Д. Г.— В кн.: Тр. Радиевого ин-та, М.; Л.: Гл. ред. хим. лит., 1938, 4, с. 171.
5. Мысовский Л. В., Жданов А. П.— Докл. АН СССР, 1939, 23, с. 136.
6. Курчатов И. В.— Изв. АН СССР. Сер. физика, 1940, 4, с. 372.
7. Петржак К. А., Флеров Г. Н.— ЖЭТФ, 1940, 10, с. 1013.
8. Перфилов Н. А.— Докл. АН СССР, 1940, 28, с. 425.
9. Дзеляпов Б. С., Жуковский Н. Н., Хольнов Ю. В.— Изв. АН СССР. Сер. физика, 1954, 18, с. 599.
10. Перфилов Н. А., Иванова Н. С., Ложкин О. В. и др.— В кн.: Сессия АН СССР по мирному использованию атомной энергии, 1955, 7, 79.
11. Петржак К. А., Дмитриев В. Н., Драпчинский Л. В., Романов Ю. Ф.— ЖЭТФ, 1960, 38, с. 998.
12. Петржак К. А., Флеров Г. Н.— УФН, 1961, 23, с. 665.
13. Перфилов Н. А., Ложкин О. В., Остроумов В. И. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. Л.: Изд-во АН СССР, 1962.
14. Физика деления атомных ядер/Под ред. Н. А. Перфилова, В. П. Эйсмонта. М.: Госатомиздат, 1962.
15. Адамов В. М., Драпчинский Л. В., Коваленко С. С. и др.— ЯФ, 1970, 11, с. 1001.
16. Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, к 50-летию со дня основания / Под ред. Б. П. Никольского. Л.: Наука, 1972.
17. Перфилов Н. А., Обухов А. И., Шигаев О. Е., Дмитриев В. Д.— ЯФ, 1974, 20, с. 270.
18. Богатин В. И., Ложкин О. В., Литвин В. Ф. и др.— Nucl. Phys., 1976, A260, с. 446.
19. Беляев Б. Н., Домкин В. Д., Коробулин Ю. Г., Крижанский Л. М.— ЯФ, 24, 1976, с. 1177.
20. Смирнов А. П., Эйсмонт В. П.— Nucl. Instr., 1978, 154, p. 471.
21. Беляев Б. Н., Домкин В. Д., Коробулин Ю. Г. и др.— Nucl. Phys., 1980, A348, с. 479.
22. Карасев В. М., Королева Р. А., Ласточкин Н. К., Тюрин А. В.— В кн.: Управляющие системы и машины, 1980, № 6, с. 108—110.
23. Богатин В. И., Ганза Е. А., Ложкин О. В., Муринов Ю. А., Оплавинов В. С.— ЯФ, 1980, 32, с. 27.
24. Ауслендер В. Л., Баранов И. А., Лазарев В. П. и др.— АЭ, 1981, 51, с. 106.



Харьковский  
физико-технический институт АН УССР

## ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ ХАРЬКОВСКОГО ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

Организованная в 1930 г. высоковольтная лаборатория ХФТИ уже с середины 1931 г. начала работы по подготовке исследований атомного ядра с помощью заряженных частиц, ускоренных в электрическом поле. Ее руководитель К. Д. Синельников вместе со своим ближайшим другом и помощником А. К. Вальтером активно искал наилучший вариант научно-технического решения задачи получения сверхвысоких напряжений для ускорения частиц.

В 1932 г., используя трансформаторный каскад из двух звеньев общим напряжением 250 кВ с кенотронными выпрямителями, ускорительной трубкой и источником ионов, К. Д. Синельников, А. К. Вальтер, А. И. Лейпунский, Г. Д. Латышев провели ряд экспериментов по бомбардировке ядра лития протонами и впервые в СССР расщепили атомное ядро.

Отдав дань традиционному в то время способу получения высоких напряжений с помощью умножительных схем, в результате тщательных поисков они пришли к выводу о том, что наиболее экономичен и технически осуществим способ получения сверхвысоких потенциалов (порядка нескольких миллионов вольт) с помощью электростатического генератора с ленточным транспортером зарядов, описанного в публикации Ван де Граафа в 1931 г. Появлению этой публикации предшествовало сообщение профессора Высшего московского технического училища Б. Н. Угрюмова, осу-

ществившего в 1926 г. идею использования ленточного транспортера для переноса зарядов и создания высокого напряжения на катоде разрядной трубки с целью получения жестких рентгеновских лучей.

В 1933 г., когда в ХФТИ строился новый корпус с большим залом, предназначенным для размещения высоковольтной установки постоянного напряжения и ускорения частиц, в высоковольтной лаборатории велись широкие исследования по решению основных вопросов, связанных с конструированием большого высоковольтного генератора. Исходя из размеров зала, представлявшего собой прямоугольник ( $35 \times 25$  м) с полукруглой кровлей высотой в высшей точке 25 м, был разработан эскизный проект большого электростатического ускорителя. Для разработки проекта этого ускорителя необходимо было решить значительное количество вопросов в области техники высоких напряжений, вакуума, получения потока заряженных частиц, зарядки и перезарядки транспортеров зарядов. Для проведения этих обширных исследований в течение нескольких лет было построено 11 моделей генераторов различной конструкции — от первой модели с цилиндрическим высоковольтным электродом (рис. 1) к лабораторному генератору напряжением 700 кВ и, наконец, к двухполюсному ускорителю заряженных частиц напряжением  $2 \times 0,75$  МэВ с тороидальными кондукторами, снабженному источником ионов и горизон-



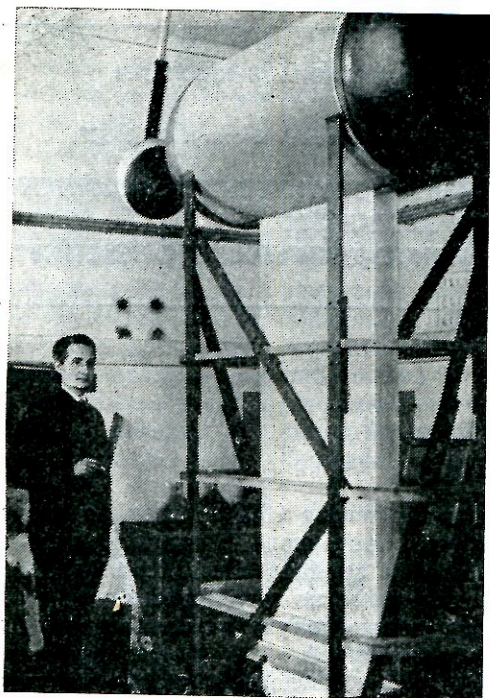


Рис. 1. Первый электростатический генератор ХФТИ, 1933 г. (у генератора — К. Д. Синельников).

тальной ускорительной трубкой (рис. 2).

Следует отметить, что даже на начальном уровне электростатические генераторы нашли практическое применение. Так, четыре генератора лабораторного типа были переданы для практического использования в Научно-исследовательский институт дирижаблестроения и лаборатории физического отделения ХГУ.

В ноябре 1935 г. в высоковольтном зале на три изолирующих колонны высотой 10 м и диаметром 2 м был установлен высоковольтный электрод (кондуктор) большого ускорителя — пустотелый шар диаметром 10 м и массой около 6 т. Ускорительная трубка, собранная из 10 фарфоровых цилиндров, была расположена в центре между колоннами, 18 ленточных транспортеров зарядов шириной 1 м располагались внутри изолирующих опорных колонн. Внутри шара находились генератор переменного тока мощностью 8 кВт и генератор постоянного тока мощностью 3 кВт, которые приводились в движе-

ние ременным приводом от двигателя (расположенного на уровне пола зала), источник ионов со схемами питания и схемы перезарядки транспортеров зарядов. Обслуживание источника ионов и всего электрооборудования шара осуществлялось дежурными, находившимися во время работы ускорителя внутри шара, куда они могли попасть через специальный люк в оболочке шара по передвижной лестнице высотой 12,5 м. Ускорительная трубка обслуживалась с помощью облегченной передвижной лестницы высотой 10 м. Первое время внутри шара дежурили два лаборанта, после постановки конечных выключателей на ленты — один, а после установки управления ионным источником в измерительное помещение необходимость присутствия дежурных внутри кондуктора совсем отпала.

Ускоритель был изготовлен и смонтирован сотрудниками высоковольтной лаборатории, инженерами и рабочими мастерских института (рис. 3). Некоторые крупные детали, каркас кондуктора, изолитовые секции колонн и фарфоровые изоляторы ускорительной трубки изготовлялись на заводах.

В 1936—1937 гг. был достигнут предельный потенциал на кондукторе, равный 4,0 МВ. «Потолок» потенциала ограничивался электрическим разрядом на перекрытие зала. В конце 1937 г. был получен первый ток ускоренных частиц (протонов и электронов) в несколько микроампер при энергии 2,6 МэВ. Над созданием ускорителя вместе с К. Д. Синельниковым и А. К. Вальтером работали В. А. Петухов, А. Я. Таранов, В. С. Гуменюк, С. Н. Водолажский, И. Я. Вермель, А. В. Иванов.

Первым исследованием, выполненным на этом ускорителе, было изучение взаимодействия быстрых электронов и жестких гамма-квантов с веществом. Затем исследовалось взаимодействие нейтронов с атомными ядрами. Для этого в 1939—1941 гг. был разработан и сооружен источник нейтронов на основе электростатического генератора с энергией ускоренных дейтронов 1,2 МэВ.

Одновременно в лаборатории про-



должались интенсивные поиски способов повышения мощности и предельной энергии частиц, ускоренных в электростатических ускорителях, путем коренного изменения конструкции транспортеров зарядов (жидкостной, пылевой) и погружения генератора в жидкую, твердую среду или в сжатый газ. Эти работы были прерваны Великой Отечественной войной.

По возвращении в Харьков (1944 г.) К. Д. Синельников и А. К. Вальтер организуют работы по восстановлению большого электростатического ускорителя. С ними активно работали А. Я. Таранов, Н. Г. Афанасьев, А. П. Ключарев, Т. И. Ляшенко, Я. И. Каган, А. А. Цыгикало, К. К. Чернявский. Была заново собрана ускорительная трубка, изготовлены источник ионов со схемой питания и ленточные транспортеры, проведен капитальный ремонт высоковольтного кондуктора и опорных колонн. В 1946 г. ускоритель дал первый пучок при напряжении 2,5 МВ на кондукторе и при токе ускоренных протонов около 40 мкА.

Под руководством К. Д. Синельникова, с участием А. К. Вальтера и группы сотрудников, в которую входили Б. С. Акшанов, П. М. Зейдлиц, А. М. Некрашевич, П. И. Стрельников, А. М. Смирнов и др., в 1946—1949 гг. разработан и сооружен горизонтальный электростатический ускоритель под давлением с энергией 2,0 МэВ и током ускоренных протонов 3 мА в импульсе длительностью 500 мкс, использовавшийся в качестве инжектора линейного ускорителя протонов с энергией 20 МэВ.

В 1948—1951 гг. под руководством А. К. Вальтера был разработан и изготовлен вертикальный электростатический прецизионный ускоритель в сжатом газе с энергией 4,5 МэВ (ВГ-4) (рис. 4). В разработке его проекта, изготовлении и монтаже активно участвовали А. А. Цыгикало, А. Я. Таранов, С. П. Цитко, П. С. Маркин, В. С. Гуменюк, А. П. Ключарев. В 1953 г. для него строится специальное здание, в котором этот ускоритель проработал до его модернизации (1978 г.).

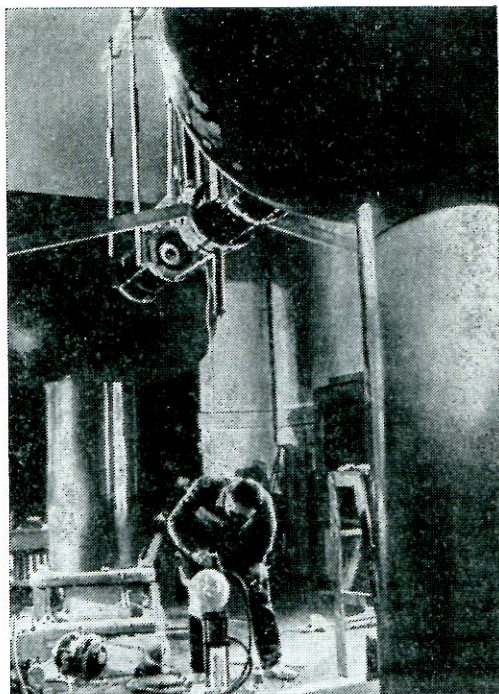


Рис. 2. Двухполюсный электростатический ускоритель с тороидальными кондукторами и горизонтальной ускорительной трубкой.

От обычных ускорителей ВГ-4 отличался тем, что в его колонну были установлены две ускорительные трубки. Одна из них ускоряла рабочий пучок ионов, который после магнитного анализа использовался в различных ядерных экспериментах. Пучок ионов, ускоренный второй трубкой, попадал в электростатический анализатор полуметрового радиуса, где отклонялся на  $90^\circ$ , после чего проходил узкую щель, краевые пластины которой являлись датчиками схемы стабилизации. Исполняющим элементом этой схемы стабилизации была электронная «пушка», стрелявшая в сторону высоковольтного электрода. Следует особо отметить высокую точность изготовления электростатического анализатора. Так, при радиусе отклонения частиц 1500 мм ( $\pm 0,1$ ) зазор между пластинами в 5 мм сохранялся на всей длине 90-градусной дуги в пределах двух микрон. Эта сложнейшая ювелирная работа была выполнена замечательным механиком института И. М. Королевым. С помощью такого устройства удалось стабилизи-



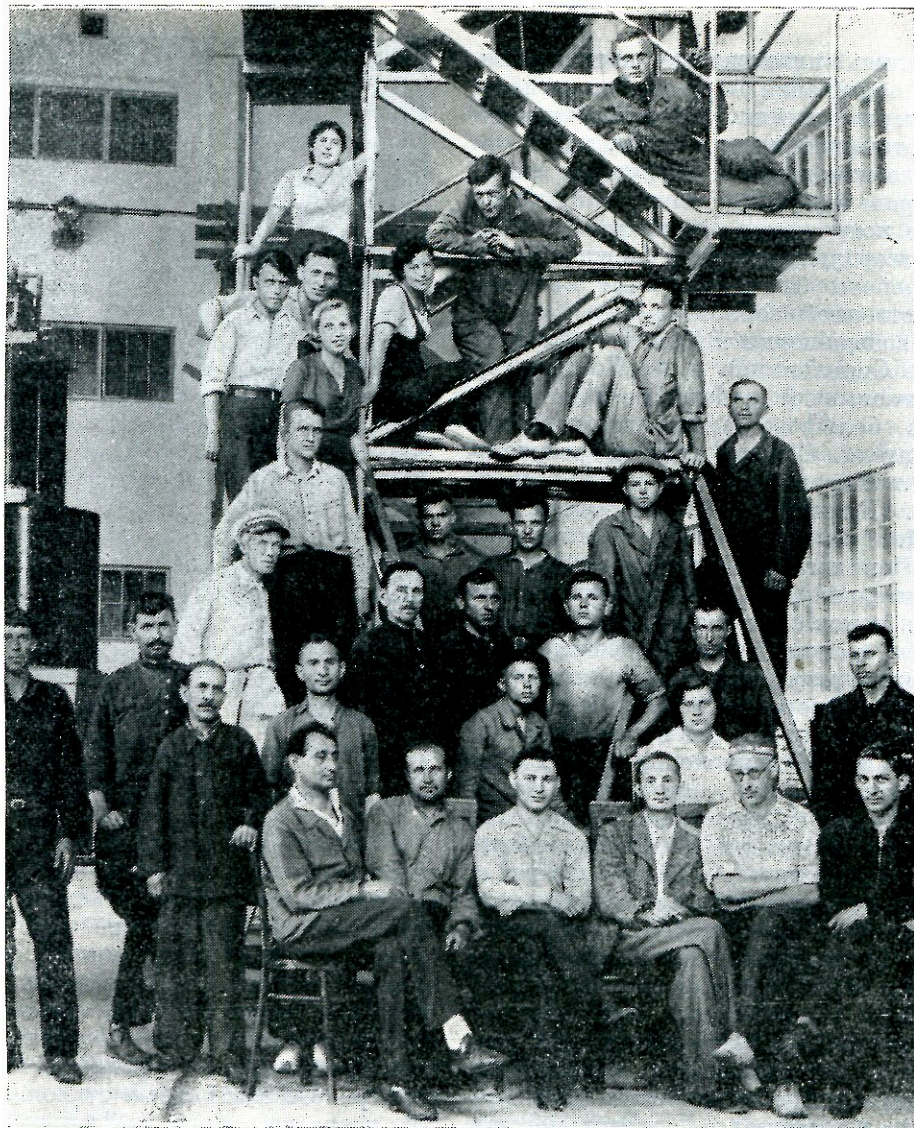


Рис. 3. Коллектив строителей большого электростатического генератора, 1936 г. (первый ряд третий справа — К. Д. Синельников).

ровать и измерить энергию частиц до  $\pm 2 \cdot 10^{-2}\%$ . Такая степень монохроматичности ускоренных частиц позволила выполнить обширные исследования возбужденных состояний атомных ядер методом изучения резонансных ядерных реакций.

В 1955 г. чертежи и описание технологии производства ВГ-4 были переданы СКБ завода «Электросила», где вскоре было организовано производство ускорителей типа ВГ-4, работающих и в настоящее время в различных научно-

исследовательских организациях Советского Союза.

Техника ядерного эксперимента на ускорителе ВГ-4 постоянно совершенствовалась. В 1964 г. на базе управляющей ЭВМ типа УМШН «Днепр» С. П. Цытко и В. А. Ямницким была разработана первая в СССР система автоматизации ядерного эксперимента с выходом на цифропечать и графико-построитель. Это позволило не только во много раз увеличить точность измерений и эффективность исследований,



но и значительно их расширить.

Кроме описанных выше установок, созданных в институте группой М. И. Корсунского при участии Я. М. Фогеля и Л. И. Пивовара, в 1949—1952 гг. разрабатываются и сооружаются несколько горизонтальных электростатических ускорителей под давлением с энергией 2,0 МэВ для ФИАН, ОИЯИ и ХГУ.

В 1958—1962 гг. Л. Пивовар разработал и построил малогабаритный вертикальный электростатический ускоритель в сжатом газе с энергией 2,0 МэВ, использующийся и сейчас для решения задач прикладной физики.

В ХФТИ ясно понимали большие перспективы развития ядерных исследований с помощью электростатических ускорителей на более высокие энергии. Поэтому еще в 1952 г. приступили к разработке проекта перезарядного электростатического ускорителя энергией до 20 МэВ. Этим проектом, законченным в 1953 г., предполагалось сооружение вертикального перезарядного ускорителя с размерами сосуда высокого давления и самого ускорителя, во много раз превосходивших существовавшие в то время. Так, диаметр сосуда был принят равным 7,5 м, высота — 35 м, объем — 1500 м<sup>3</sup>, давление газа — 16 атм. Ускоритель предполагалось разместить в шахте, а ускоренный пучок должен был выходить вверх в здание, расположенное над ускорителем. Появление такого проекта свидетельствует о смелом развитии идей конструирования электростатических ускорителей в ХФТИ.

Для изучения процессов перезарядки ионов при высоких энергиях и отработки конструкции отдельных узлов в 1957—1964 гг. был разработан и сооружен опытный образец горизонтального перезарядного электростатического ускорителя с энергией  $2 \times 2,5$  МэВ (А. К. Вальтер, А. Я. Таранов). Этот первый в СССР перезарядный ускоритель, оборудованный источником поляризованных ионов (А. Я. Таранов, Р. П. Слабоспицкий, И. М. Карнаухов), успешно используется и сейчас для выполнения ядерно-физических исследо-

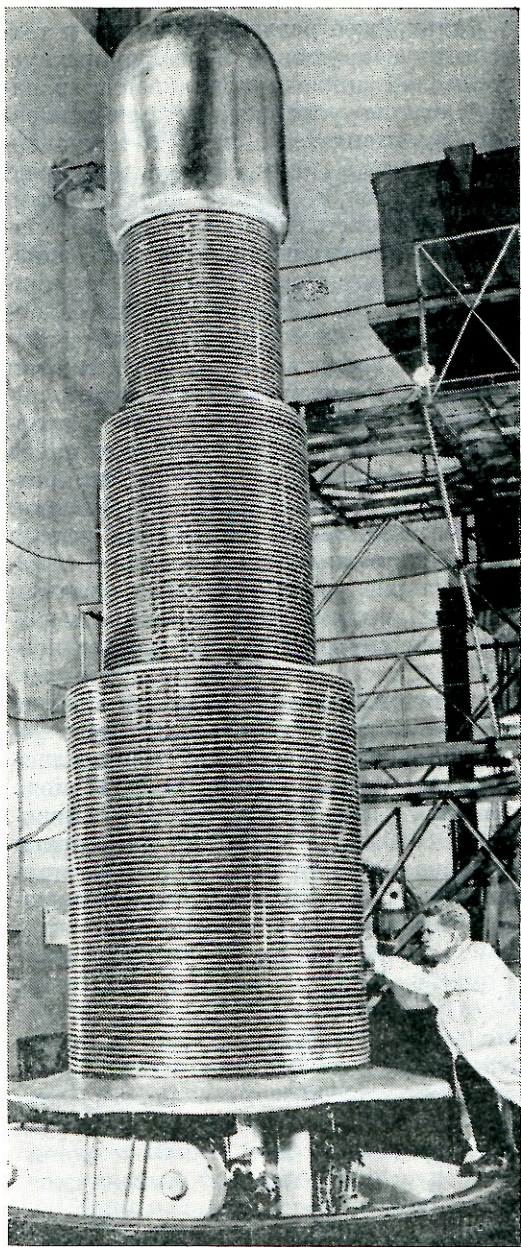


Рис. 4. Электростатический ускоритель в сжатом газе с энергией 4,5 МэВ (ВГ-4).

ваний. Перезарядные ускорители способны ускорять ионы практически всех элементов периодической системы, обеспечивая фундаментальные исследования по ядерной физике в широком диапазоне энергии с точностью, необходимой для самых тонких спектроскопических измерений.



Дальнейшее развитие техники и технологии сооружения перезарядных ускорителей привело к появлению в нашей стране ускорителей промышленного производства типа ЭГП-10 с энергией  $2 \times 2,5$  МэВ. Кроме глубоких исследований по физике ядра в институте все электростатические ускорители широко используются в радиационном материаловедении. По инициативе В. Ф. Зеленского был реконструирован электростатический ускоритель с энергией 2,0 МэВ в сжатом газе, построенный как инжектор к линейному ускорителю протонов с энергией 20 МэВ, с целью ускорения ионов группы железа и облучения ими различных материалов ядерной техники. Отличительной чертой этого ускорителя является расположение ионного источника вне ускорителя, под нулевым потенциалом, а облучаемая мишень размещается внутри высоковольтного конденктора.

Активная позиция института по внедрению научно-технических достижений в народное хозяйство заключалась в том, что на протяжении всего периода существования отдела ядерной физики в ХФТИ все новейшие разработки передавались для практического применения. Так было с первыми электро-

статическими генераторами на заре их развития, так было с ускорителем ВГ-4 и другими. В качестве примера можно вспомнить, что параллельно с наладкой перезарядного ускорителя ПГ-5 ученые и инженеры отдела ядерной физики оказали существенную помощь ИАЭ им. И. В. Курчатова в конструировании вертикального перезарядного ускорителя с энергией  $12 \times 4,0$  МэВ. По чертежам малогабаритного вертикального ускорителя с энергией 2,0 МэВ был изготовлен ускоритель-инжектор кибернетической модели циклического ускорителя Радиотехнического института АН СССР. Институт передал материалы по ускорителю ВГ-4 НИИЭФА им. В. Д. Ефремова и постоянно оказывал научно-техническую помощь в разработке серии ускорителей типов ЭГ-1, ЭГ-5, ЭГП-10. Ряд сотрудников этого института прошел подготовку и практику в лабораториях ХФТИ, изучая ионные источники, вакуумную технику и электростатические ускорители.

В последние годы на электростатических ускорителях ХФТИ проводятся обширные исследования, связанные с решением задач радиационного материаловедения, элементного анализа веществ, биологии и медицины.