1963 г. Июнь *Т. LXXX, вып. 2*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

ВОСПОМИНАНИЯ ОБ Э. РЕЗЕРФОРДЕ — ОСНОВОПОЛОЖНИКЕ НАУКИ О ЯДРЕ. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ЕГО РАБОТ *)

Нильс Бор

Для меня было большой радостью принять приглашение Физического общества участвовать в цикле лекций, посвященных памяти Резерфорда. В этих лекциях, чтение которых происходило на протяжении ряда лет, несколько ближайших сотрудников Резерфорда излагали его основные научные достижения и делились воспоминаниями, воссоздающими его прекрасный человеческий облик. В дни далекой юности я имел счастье принадлежать к той группе физиков, которая работала под руководством Резерфорда. В течение многих последующих лет я был связан с Резерфордом тесной дружбой. Поэтому я охотно согласился на предложение изложить наиболее интересные из моих воспоминаний. Так как в одной лекции совершенно невозможно рассказать о необъятном и многостороннем жизненном пути Эрнеста Резерфорда и о далеко идущих следствиях его работ, я вынужден ограничиться лишь теми периодами, к которым относятся мои собственные впечатления, и теми исследованиями, о которых я имел сведения из первых рук.

I

Впервые мне посчастливилось видеть и слышать Резерфорда осенью 1911 г., когда, закончив университет в Копенгагене, я работал в Кэмбридже у Дж. Дж. Томсона, а Резерфорд приехал из Манчестера, чтобы выступить на ежегодном Кавендишском обеде. Хотя в этот раз мне не удалось познакомиться с Резерфордом, на меня произвели глубокое впечатление его обаяние и энергия — качества, с помощью которых ему удавалось достигать почти невероятных вещей, где бы он ни работал. Обед происходил в чрезвычайно непринужденной атмосфере, что дало удобный случай коллегам Резерфорда напомнить некоторые из многочисленных анекдотов, уже тогда связанных с его именем. Среди многих примеров того, как глубоко был поглощен своими исследованиями Резерфорд, приводилось высказывание служителя Кавендишской лаборатории. Он утверждал, что из всех самых увлеченных молодых физиков, которые на протяжении ряда лет появлялись в знаменитой лаборатории, Резерфорд мог наиболее виртуозно поносить свою аппаратуру.

---

*) Niels Bohr, The Rutherford Memorial Lecture 1958. Reminiscences of the Founder of Nuclear Science and of some Developments Based on his Work. Текст статьи представляет собой переработанную лекцию памяти Э. Резерфорда, прочитанную 28 ноября 1958 г. на заседании Лондонского Физического общества в Imperial College of Science and Technology. Лекция читалась без рукописного текста, ее рукописное оформление было завершено в 1961 г., и она была опубликована в Proc. of Phys. Soc. 78, 1083 (1961). Перевод В. А. Угарова.

Из речи, произнесенной самим Резерфордом, мне особенно запомнилась теплота, с которой он поздравлял своего старого друга Вильсона. Применив весьма остроумный метод, использующий камеру, наполненную насыщенным паром, Вильсон только что получил свои первые фотографии треков α-частиц, на которых были отчетливо видны резкие изломы, хотя обычные треки α-частиц представляли собой замечательно прямые линии. Конечно, Резерфорд исчерпывающим образом понимал, что́ это за явление, так как всего лишь за несколько месяцев именно оно привело его к открытию, с которого началась новая эпоха,—открытию атомного ядра. Однако возможность увидеть собственными глазами столь тонкие детали поведения α-лучей оказалась удивительной даже для него и доставила ему необыкновенную радость. В этой связи наибольшее восхищение у Резерфорда, как это он подчеркивал в своей речи, вызывала настойчивость, с которой Вильсон (в то время они уже были связаны тесной дружбой в Кавендишской лаборатории) продолжал свои исследования по образованию тумана со все более и более усовершенствованными аппаратами. Впоследствии Вильсон рассказывал мне, что в нем впервые пробудился интерес к этому красивейшему явлению, когда еще юношей он наблюдал появление и исчезновение туманов, по мере того как потоки воздуха поднимались на гребни Шотландских гор и затем вновь опускались в долины.

Несколько недель спустя после Кавендишского обеда я отправился в Манчестер, чтобы навестить коллегу моего отца, скончавшегося незадолго до этого. Этот коллега был близким другом Резерфорда. Здесь, в Манчестере, я снова имел возможность видеть Резерфорда. Между тем Резерфорд уже успел побывать на открытии Сольвеевского конгресса в Брюсселе, где впервые встретился с Планком и Эйнштейном. Во время беседы, в которой Резерфорд с подлинным энтузиазмом говорил о многих новых перспективах развития физики, он любезно согласился на мою просьбу о том, чтобы присоединиться к группе, работающей в его лаборатории, после того как ранней весной 1912 г. я должен был закончить свои занятия в Кэмбридже; там я был сильно увлечен оригинальными идеями Дж. Дж. Томсона, касающимися электронного строения атомов.

В это время вокруг Резерфорда группировалось большое число молодых физиков из разных стран мира, привлеченных его чрезвычайной одаренностью как физика и редкими способностями как организатора научного коллектива. Хотя Резерфорд был всегда поглощен ходом своих собственных работ, у него все же хватало терпения выслушивать каждого из этих молодых людей, если он ощущал у них наличие каких-то идей, какими бы скромными с его собственной точки зрения они ни казались. С другой стороны, будучи чрезвычайно независимым человеком, он не очень почитал авторитеты и терпеть не мог «напыщенной болтовни» («pompous talk»). В таких случаях он мог иногда говорить о достопочтенных коллегах даже совсем по-мальчишески, однако он никогда не позволял себе пускаться в споры; он любил повторять, что «никто не может лишить человека доброго имени, кроме его самого» («there is only one person who can take away one's good name, and that is oneself»).

Естественно, что в центре интересов всей манчестерской группы было исследование многочисленных следствий открытия атомного ядра. В первые недели моего пребывания в лаборатории я последовал совету Резерфорда и прослушал вводный курс экспериментальных методов исследования радиоактивности, который был организован для студентов и вновь прибывающих сотрудников под весьма квалифицированным руководством Гейгера, Маковера и Марсдена. Однако довольно быстро я оказался пол-

ностью захваченным общими теоретическими соображениями, которые следовали из новой модели атома, в особенности теми возможностями, которые открывались этой моделью для отчетливого разделения физических и химических свойств материи на те, которые непосредственно определялись самим атомным ядром, и те, которые существенно зависели от распределения электронов, связанных с ядром, но находящихся на расстояниях, весьма больших по сравнению с ядерными размерами.

Если объяснение радиоактивного распада следовало искать в особенностях строения ядра, то было очевидно также, что обычные физические и химические характеристики элементов отражают свойства окружающих ядро электронных систем. С самого начала было ясно, что благодаря большой массе ядра и его малой протяженности в пространстве сравнительно с размерами всего атома строение электронной системы должно зависеть почти исключительно от полного электрического заряда ядра. Такие рассуждения сразу наводили на мысль о том, что вся совокупность физических и химических свойств каждого элемента может определяться одним целым числом; теперь всем известно, что это число является атомным номером, выражающим заряд ядра в виде целого кратного элементарного электрического заряда.

Развивая эти взгляды, я получил значительную поддержку в беседах с Георгом Хевеши, который виделялся среди всей манчестерской группы своими необыкновенно широкими познаниями в химии. В частности, уже в 1911 г. он владел остроумным методом трассирующего состава (меченых атомов), который со временем стал столь могущественным инструментом в химических и биологических исследованиях. Как это описал не без юмора сам Хевеши, он пришел к этому методу в результате безуспешной, но чрезвычайно сложной работы, предпринятой как ответ на «вызов» Резерфорда, который как-то сказал ему, что «если он не хочет даром есть свой хлеб», то он должен помочь выделить ценный радий D из большого количества хлорида свинца, полученного из уранинита и подаренного Резерфорду правительством Австрии.

Мои взгляды приняли более определенную форму под влиянием разговоров с Хевеши, посвященных тем удивительным годам в Монреале и Манчестере, когда Резерфорд со своими сотрудниками после открытий Беккереля и мадам Кюри создавал учение о радиоактивности, последовательно распутывая непрерывный ряд взаимосвязанных радиоактивных распадов. И когда я узнал, что общее число уже обнаруженных стабильных и неустойчивых элементов превышает число мест в знаменитой таблице Менделеева, мне пришло в голову, что те неразличимые химические вещества, на существование которых недавно обратил внимание Содди и которые позже были названы им «изотопами», обладают одним и тем же зарядом ядра, а отличаются лишь массой и особенностями строения ядра. Отсюда непосредственно вытекало, что при радиоактивном распаде элемента, совершенно независимо от каких-либо изменений его атомного веса, происходит его смещение в таблице Менделеева на два номера влево или на один номер вправо, в соответствии с уменьшением или увеличением заряда ядра, сопровождающим испускание α- или β-лучей соответственно.

Когда я обратился к Резерфорду, чтобы узнать его мнение по поводу этих мыслей, то он, как всегда, проявил живой интерес к столь простым и заманчивым предположениям, однако с характерной для него осторожностью предостерег от чрезмерного доверия к модели атома и опасности экстраполяции относительно скудных экспериментальных данных. Тем не менее эти мысли, по-видимому, вновь возникавшие по различным поводам, оживленно дискутировались среди манчестерской группы,

а экспериментальные данные в их пользу быстро нарастали, особенно в результате химических исследований Хевеши, а также Рассела.

В частности, серьезным подтверждением идеи о том, что атомный номер является определяющим для общих физических свойств элементов, явились спектроскопические работы Рассела и Росси; они исследовали смесь иония и тория и обнаружили тождественность оптического спектра обоих веществ, несмотря на различие в их радиоактивных свойствах и атомных весах. На основе анализа всех доступных в то время данных поздней осенью 1912 г. на лекции в Химическом обществе Рассел указал общее соотношение между конкретными радиоактивными процессами и возникающим при этом изменением атомного номера элемента.

В связи с этим интересно отметить, что, когда после дальнейших исследований, в особенности исследований Флека, закон радиоактивного смещения в полностью завершенной форме был сформулирован несколькими месяцами позже Содди (работавшим в Глазго) и Фаянсом (работавшим в Карлсруэ), оба эти автора, не осознавали его тесной связи с основными особенностями модели атома Резерфорда; Фаянс даже считал, что изменение химических свойств, очевидно, связанное с электронным строением атомов, является сильным аргументом против этой модели, согласно которой как α-, так и β-излучение зарождается в атомном ядре. Примерно в то же самое время представление об атомном номере элемента было независимо введено ван-ден Броком из Амстердама, однако согласно его классификации элементов различные заряды ядра приписывались каждому стабильному или радиоактивному веществу.

Вплоть до этого времени доминирующим вопросом всех дискуссий манчестерской группы был вопрос о непосредственных следствиях открытия атомного ядра. Общая программа интерпретации имеющихся экспериментальных данных, касающихся обычных физических и химических свойств вещества, на основе резерфордовской модели атома представляла собой значительно более сложную проблему, которая лишь постепенно прояснялась в последующие годы. Таким образом, в 1912 г. мог лишь ставиться вопрос о предварительной ориентации в общей ситуации.

С самого начала было очевидно, что если принять резерфордовскую модель атома, характерная устойчивость атомных систем никакими способами не может быть согласована с классическими принципами механики и электродинамики. Действительно, согласно механике Ньютона никакая статическая система точечных зарядов не может находиться в устойчивом равновесии, а любое движение электронов вокруг ядра, согласно электродинамике Максвелла, связано с диссипацией энергии через излучение; диссипация энергии в свою очередь ведет к постоянному уменьшению размеров системы; в конце концов это приводит к тесному сближению ядра и электронов внутри области, размеры которой значительно меньше, чем размеры самого атома.

Однако такая ситуация не была слишком неожиданной. Существенная ограниченность классических теорий физики была уже в 1900 г. обнаружена Планком, когда им был открыт универсальный квант действия; это открытие, в особенности в работах Эйнштейна, нашло весьма перспективные приложения в теории теплоемкостей и фотохимических реакций. Поэтому совершенно независимо от новых экспериментальных данных, касающихся строения атома, существовало широко распространенное убеждение в том, что квантовые представления могут иметь решающее значение для всей проблемы атомного строения вещества.

Как я узнал позже, А. Гааз пытался на основе атомной модели Томсона определить пределы и периоды движения электронов с помощью соотношения Планка между энергией и частотой гармонического осциллятора.

Далее, Дж. Никольсон в 1912 г. использовал квантованный момент импульса с целью найти причину появления некоторых линий звездных туманностей и солнечной короны. Кроме того, заслуживает упоминания, что, следуя высказанным значительно ранее идеям Нернста относительно квантования вращения молекул, Н. Бьеррум уже в 1912 г. предсказал полосатую структуру инфракрасных линий поглощения в двухатомных газах. Тем самым был сделан первый шаг к детальному анализу молекулярных спектров, в конечном счете завершенному на основе интерпретации общего спектрального комбинационного закона квантовой теорией.

В самом начале моего пребывания в Манчестере весной 1912 г. я пришел к убеждению, что электронное строение атома Резерфорда управляется с помощью кванта действия. В пользу этого взгляда говорило не только то, что соотношения Планка представлялись примерно правильными в применении к относительно слабо связанным электронам, определяющим химические и оптические свойства элементов, но особенно и то, что действие подобных соотношений может быть обнаружено у наиболее сильно связанных электронов в атоме; это было обнаружено на примере характеристического проникающего излучения, исследованного Баркла́. Например, измерения энергии, необходимой, чтобы вызвать излучение, наблюдавшееся Баркла́ с помощью электронной бомбардировки у различных элементов (эти измерения были выполнены Виддингтоном, когда я находился в Кэмбридже), обнаружили очень простые закономерности; эти закономерности следовало ожидать, если произвести оценку энергии наиболее сильно связанных электронов, вращающихся по планковским орбитам вокруг ядра, заряд которого определяется его атомным номером. Из недавно опубликованной Резерфордовской лекции Лоуренса Брэгга я с большим интересом узнал, что Уильям Брэгг, работавший тогда в Лидсе, в своих первых исследованиях рентгеновских лучей, основанных на открытии Лауэ 1912 г., полностью отдавал себе отчет в значении результатов Виддингтона для установления связи между излучением Баркла́ и расположением элементов в таблице Менделеева; эта проблема в результате работ Мозли в Манчестере вскоре получила исчерпывающую ясность.

В течение последнего месяца моего пребывания в Манчестере я был занят главным образом теоретическими исследованиями тормозящей силы (stopping power) вещества для α- и β-излучения. Эта проблема впервые рассматривалась Дж. Дж. Томсоном с точки зрения его собственной атомной модели, а затем к ней снова вернулся Дарвин, уже на основе модели Резерфорда. В связи с упоминавшимися выше представлениями, рассматривающими частоты, соответствующие электронам, связанным в атоме, мне пришло в голову, что передача энергии от частиц к электронам может быть весьма просто рассмотрена по аналогии с дисперсией и поглощением излучения. На этом пути оказалось возможным интерпретировать результаты измерения тормозящей силы как дополнительное доказательство того, что водороду и гелию следует приписать атомные номера 1 и 2, в полном соответствии с общими химическими данными и в особенности с опытами Резерфорда и Ройда, доказывающими образование газообразного гелия из α-частиц; α-частицы выходили через тонкостенную трубку, содержащую эманацию, и собирались в другой трубке. Также и в более сложных случаях для тяжелых веществ было обнаружено приблизительное согласие с ожидаемыми атомными номерами и полученными значениями для энергии связи электронов; однако теоретические методы были слишком примитивными, чтобы получить более точные результаты. Как это хорошо известно, соответствующее рассмотрение проблемы методами современной квантовой механики было впервые проведено Бете в 1930 г.

Хотя Резерфорд именно в это время был сильно занят подготовкой своей большой книги «Радиоактивные вещества и их излучение» («Radioactive Substances and Their Radiation»), он тем не менее с постоянным интересом следил за моей работой; это дало мне возможность узнать, как много заботы и внимания проявлял он к публикациям своих учеников. После моего возвращения в Данию летом 1912 г. я женился, и во время свадебного путешествия в августе в Англию и Шотландию мы с женой, проезжая через Манчестер, посетили Резерфорда; я передал ему законченную рукопись своей работы о тормозящей силе. Как Резерфорд, так и его жена приняли нас с большой теплотой; эта встреча положила начало тесной дружбе, которая в течение многих лет связывала наши семьи.

II

Обосновавшись в Копенгагене, я продолжал поддерживать постоянный контакт с Резерфордом; я регулярно сообщал ему о продолжении своих работ по исследованию общих проблем атома, начатых мною еще в Манчестере. Очень характерными для ответов Резерфорда, которые всегда были весьма ободряющими, были непосредственность и увлечение, с которыми он рассказывал о работах своей лаборатории. Фактически это было начало длительной переписки, которая продолжалась свыше двадцати пяти лет; эта переписка каждый раз, когда я обращался к ней, вновь воскрешала в моей памяти энтузиазм Резерфорда к дальнейшему развитию области, которая была открыта его работами, и его сочувственный интерес, который возникал у него ко всякому, кто пытался внести свой вклад в эти исследования.

Мои письма к Резерфорду, написанные осенью 1912 г., посвящены продолжавшимся усилиям выяснить роль кванта действия в электронном строении атома Резерфорда, включая сюда проблему молекулярной связи, а также вопросы излучения и магнитные эффекты. Однако вопросы устойчивости, неизбежно возникающие при таких рассмотрениях, резко увеличивали трудности и вынуждали искать более надежную основу для решения проблемы. После многочисленных попыток использовать квантовые идеи в более строгой форме ранней весной 1913 г. мне пришло в голову, что ключом к решению проблемы атомной устойчивости, непосредственно приложимым к атому Резерфорда, являются изумительно простые законы, определяющие оптический спектр элементов.

На основе чрезвычайно точных измерений длин волн спектральных линий Роулэндом и др. и после работ Бальмера и Шустера (предшественника Резерфорда в Манчестерском отделении) общие спектральные законы чрезвычайно остроумным способом были систематизированы Ридбергом. Основным результатом тщательного анализа видимой серии линейчатых спектров и их взаимоотношений было установление того факта, что частота ν каждой линии спектра данного элемента может быть представлена с необыкновенной точностью формулой $\nu = T' - T''$, где T' и T'' —какие-то два члена из множества спектральных термов T, характеризующих элемент.

Этот фундаментальный комбинационный закон со всей очевидностью отрицал обычную механическую интерпретацию движения; интересно напомнить в этой связи, как лорд Рэлей весьма усиленно подчеркивал, что любая общая связь между частотами нормальных колебаний механической модели должна быть квадратичной и, во всяком случае, не линейной относительно этих частот. Что касается Резерфордовского атома, то для него мы не могли даже ожидать линейчатый спектр, поскольку согласно классической электродинамике частота излучения, возникающего

при движении электрона, должна была бы по мере потери энергии непрерывно меняться. Поэтому было совершенно естественно попытаться в качестве основы для объяснения спектра взять непосредственно комбинационный закон.

Действительно, если принять идею Эйнштейна о существовании световых квантов, или фотонов, с энергией $h\nu$, где h — постоянная Планка, следовало предположить, что испускание и поглощение излучения атомом представляет собой индивидуальный процесс, сопровождаемый изменением энергии $h(T'-T'')$; hT следовало интерпретировать как энергию связи электронов в некотором устойчивом, или, как говорят, стационарном состоянии атома. В частности, такое предположение давало непосредственное объяснение на первый взгляд весьма прихотливому появлению линий излучения и поглощения в спектральных сериях. Итак, в процессах излучения мы наблюдаем переход атома с высокого уровня энергии на низкий, тогда как в процессах поглощения мы имеем дело с переходом атома из основного состояния с наинизшей энергией в одно из возбужденных состояний.

В простейшем случае атома водорода значение терма с большой точностью дается формулой $T_n=R/n^2$, где n — целое число, а R — постоянная Ридберга. Таким образом, указанная интерпретация ведет к последовательности уменьшающихся значений энергии связи электронов в атоме водорода, указывая на скачкообразный процесс, с помощью которого электрон, находящийся вначале на достаточном удалении от ядра, приходит путем ряда переходов, связанных с излучением, к стационарным состояниям со все возрастающей энергией связи, характеризуемой все меньшими и меньшими значениями n; в конце концов он оказывается в основном состоянии, характеризуемом значением $n=1$. Более того, сравнение энергии связи в этом состоянии с энергиями связи электронов, движущихся по кеплеровским орбитам вокруг ядра, позволяет получить размеры орбит того же порядка величины, что и атомные размеры, определяемые с помощью кинетической теории газов.

На основе резерфордовской модели атома эта точка зрения непосредственно позволяла дать также объяснение появлению константы Ридберга в более сложных спектрах других элементов. Так, можно было сделать вывод, что мы встречаемся здесь с процессами перехода, включающими такие возбужденные состояния атома, в которых один из электронов удаляется из области, занятой другими электронами, связанными с ядром, и поэтому оказывается под действием поля сил, сходного с полем единичного заряда.

Выяснить более тесные связи между атомной моделью Резерфорда и спектральными данными, очевидно, было делом далеко не простым. Действительно, с одной стороны, само определение заряда и массы электрона и ядра полностью опиралось на анализ физических явлений на основе представлений, соответствующих принципам классической механики и электромагнетизма. С другой же стороны, так называемые квантовые постулаты, утверждающие, что всякое изменение присущей атому энергии состоит в полном переходе между двумя стационарными состояниями, исключали возможность расчета процессов излучения на основе классических принципов, точно так же как и любых других реакций, затрагивающих устойчивость атома.

Как хорошо сейчас известно, решение этой проблемы потребовало развития определенного математического формализма, тщательная интерпретация которого означала решительный пересмотр всех основ, чтобы недвусмысленно использовать элементарные физические представления; этот же формализм означал наличие соотношений дополнительности

между явлениями, наблюдаемыми в различных экспериментальных условиях. Однако уже в то время можно было достичь некоторых успехов, используя наглядные представления классической физики для классификации стационарных состояний, опирающиеся на исходные предположения Планка об энергетических состояниях гармонического осциллятора. В частности, можно было исходить из близкой аналогии между осциллятором с заданной частотой и кеплеровским движением электронов вокруг ядра с частотой обращения, определяемой энергией связи.

Действительно, в точности так же, как в случае гармонического осциллятора, простой расчет показывает, что для каждого стационарного состояния атома водорода действие, проинтегрированное по орбитальному периоду электрона, может быть приравнено величине nh; это условие в случае круговых орбит эквивалентно квантованию момента импульса в единицах $h/2\pi$. Установленное равенство означает, что постоянная Ридберга определенным образом выражается через заряд e и массу m электрона и постоянную Планка; точнее, имеет место формула

$$R = \frac{2\pi^2 me^4}{h^3},$$

которая в пределах точности, достигнутой при измерении e, m и h, хорошо согласуется с эмпирическим значением R.

Хотя такое согласие указывало на область применимости механических моделей при построении стационарных состояний, однако все трудности, возникающие при любой комбинации квантовых идей и принципов обычной механики, остались неразрешенными; поэтому было крайне желательно доказать, что общий подход к проблеме спектров удовлетворяет очевидному требованию содержать в себе классическое физическое описание в том предельном случае, когда рассматриваемое действие столь велико, что можно пренебречь величиной отдельного кванта. Такого рода подход фактически представлял собой первые наметки так называемого принципа соответствия, ставящего своей целью представить существенно статистические закономерности квантовой физики как разумное обобщение классического физического описания.

Так, в обычной электродинамике состав излучения, испущенного электронной системой, может быть определен частотой и амплитудой гармонических осцилляторов, на которые может быть разбито движение системы. Конечно, никакой такой простой связи между кеплеровским движением электрона вокруг тяжелого ядра и излучением, испущенным в результате переходов между стационарными состояниями системы, не существует. Однако в предельном случае переходов между состояниями, для которых значения квантовых чисел n значительно больше, чем их разность, можно показать, что частоты компонент излучения, возникающие в результате хаотических индивидуальных процессов перехода, асимптотически совпадают с частотами гармонических компонент электронного движения. Более того, тот факт, что на кеплеровских орбитах, в противоположность простым гармоническим колебаниям, проявляется не только частота обращения, но также и высшие гармоники, дает возможность проследить классическую аналогию неограниченной комбинации термов в спектре водорода.

Однако отчетливое установление связи между атомной моделью Резерфорда и спектральными данными было в течение некоторого времени затруднено довольно странным обстоятельством. За двадцать лет до того времени, о котором идет речь, Пикеринг наблюдал в спектрах отдаленных звезд серии линий, длины волн которых обнаруживали близкое

численное совпадение с обычным спектром водорода. Поэтому эти линии обычно приписывали водороду. Ридберг даже надеялся тем самым ликвидировать очевидный контраст между простотой спектра водорода и сложностью спектра других элементов, в том числе и спектров щелочных металлов, структура которых ближе всего подходила к структуре спектра водорода. Эта точка зрения разделялась также выдающимся спектроскопистом А. Фаулером, который в это же самое время проводил в лаборатории эксперименты по разряду через газообразную смесь водорода и гелия и наблюдал линии Пикеринга и связанные с ними новые спектральные серии.

Однако линии Пикеринга и Фаулера могли быть включены в формулу Ридберга для спектра водорода только в том случае, если число n в выражении для спектральных термов могло принимать не только целые, но и полуцелые значения; но такое предположение, очевидно, нарушало асимптотический подход к классической связи между энергией и спектральными частотами. С другой стороны, такое соответствие годилось бы для спектра системы, состоящей из электрона, привязанного к ядру с зарядом Ze, стационарные состояния которого определяются тем же самым значением интеграла действия nh. Действительно, спектральные термы такой системы даются выражением Z^2R/n^2, которое для $Z=2$ ведет к тому же самому результату, к которому приводит введение полуцелых значений n в формуле Ридберга. Следовательно, было естественно приписать линии Пикеринга и Фаулера гелию, ионизованному за счет высокого теплового возбуждения в звездах и за счет сильных разрядов, применяемых Фаулером. Если бы этот вывод подтвердился, можно было бы сделать первый шаг к установлению количественных связей между свойствами различных элементов на основе модели Резерфорда.

III

Когда в марте 1913 г. я написал Резерфорду письмо, содержавшее набросок моей первой работы по квантовой теории строения атома, я подчеркнул в нем важность решения вопроса о происхождении линий Пикеринга и воспользовался случаем, чтобы узнать, нельзя ли в его лаборатории провести эксперименты в этом направлении; со времен Шустера там была необходимая спектроскопическая аппаратура. Я мгновенно получил ответ, характерный как по острой проницательности Резерфорда в научных вопросах, так и по благожелательному отношению; я хочу привести это письмо целиком.

«20 марта 1913 г.

Дорогой д-р Бор!

Я получил в полной сохранности Вашу работу и прочел ее с большим интересом, но мне хотелось бы еще раз тщательно просмотреть ее, когда у меня будет больше времени. Ваши мысли относительно причин возникновения спектра водорода очень остроумны и представляются хорошо продуманными, однако сочетание идей Планка со старой механикой создает значительные трудности для понимания того, что же все-таки является основой такого рассмотрения. Я обнаружил серьезное затруднение в связи с Вашей гипотезой, в котором Вы, без сомнения, полностью отдаете себе отчет; оно состоит в следующем: как может знать электрон, с какой частотой он должен колебаться, когда он переходит из одного стационарного состояния в другое? Мне кажется, что Вы вынуждены предположить, что электрон знает заблаговременно, где он собирается остановиться.

Есть еще одно критическое замечание второстепенного характера, касающееся построения статьи. Мне кажется, что Ваше стремление к ясности вызывает тенденцию к излишнему увеличению объема Ваших статей; я заметил также тенденцию к повторению некоторых утверждений в различных частях статьи. Я думаю, что Вашу статью

действительно следует сократить, и я думаю, что это можно сделать без малейшего ущерба для ее ясности. Не знаю, принимаете ли Вы во внимание то обстоятельство, что большие статьи отпугивают читателей, которые чувствуют, что им не удастся вникнуть в их смысл из-за недостатка времени.

Я просмотрю со всей тщательностью Вашу статью и дам Вам знать свое мнение относительно деталей. Мне будет очень приятно направить ее в «Phil. Mag»., но я был бы еще более удовлетворен, если бы ее объем был значительно сокращен. Во всяком случае, я сделаю все исправления в английском языке, которые окажутся необходимыми.

Я буду очень рад познакомиться с Вашими последними работами, но послушайтесь моего совета и постарайтесь писать их как можно короче, не нарушая ясности изложения. Мне было приятно узнать, что Вы собираетесь в Англию; мы будем рады видеть Вас у себя в Манчестере.

Кстати, я очень заинтересовался Вашими предположениями относительно спектров Фаулера. Я рассказал здесь об этом Эвансу, который ответил мне, что этот вопрос его тоже очень занимает; я считаю вполне возможным, что он попытается поставить несколько опытов в этом направлении, когда он возвратится к следующему семестру. В целом дела идут хорошо, но я на некоторое время задержался, обнаружив что масса α-частицы оказалась несколько большей, чем ей следовало быть. Если это верно, то это настолько важно, что я не могу опубликовать результат до тех пор, пока не буду убежден в своей правоте в каждом пункте. Эксперименты забирают большое количество времени и должны проводиться с особой точностью.

Искренне Ваш

Э. Резерфорд.

P. S. Я надеюсь, что Вы не будете возражать, если я по своему усмотрению изыму из Вашей статьи те места, которые мне покажутся не необходимыми! Напишите, пожалуйста, Ваши соображения».

Первое замечание Резерфорда было, конечно, очень дальновидным; оно касалось именно того вопроса, который стал центральным пунктом длительной дискуссии, которая развернулась позже. Моя собственная точка зрения, как я изложил ее в лекции на заседании Датского физического общества в октябре 1913 г., состояла в следующем: радикальный отход от привычных требований к физическому объяснению, содержащийся в квантовых постулатах, уже сам по себе при надлежащем подходе оставляет достаточный простор для возможности объединения выдвинутых предположений в логически согласованную схему. В связи с замечанием Резерфорда особенно интересно напомнить, что Эйнштейн в своей знаменитой работе 1917 г., где выводится формула Планка для теплового излучения, исходил из тех же самых соображений относительно возникновения спектра и указывал на аналогию между статистическими законами, управляющими процессом спонтанного излучения, и основным законом радиоактивного распада, сформулированным Резерфордом и Содди еще в 1903 г. Действительно, этот закон, позволивший им сразу же распутать разнообразные явления естественной радиоактивности, известные к тому времени, одновременно оказался ключом к пониманию обнаруженного позже своеобразного ветвления процессов спонтанного распада.

Второе замечание, столь сильно подчеркнутое в письме Резерфорда, поставило меня в крайне затруднительное положение. Дело заключалось в том, что за несколько дней до получения его ответа я выслал Резерфорду существенно расширенный вариант своей первоначальной рукописи; дополнения касались в особенности взаимоотношений между спектрами поглощения и испускания и асимптотического соответствия с классическими теориями физики. Я сразу понял, что единственный способ поправить дело состоит в том, чтобы немедленно отправиться в Манчестер и переговорить обо всем с Резерфордом. Хотя Резерфорд был, как всегда, очень занят, он проявил почти что ангельское терпение и после длинных разговоров, продолжавшихся в течение нескольких вечеров (между прочим, он сказал тогда, что никогда не думал, что я окажусь столь упрямым), согла-

сился оставить все старые и новые вопросы в окончательном варианте статьи. Разумеется, и стиль и язык статьи были существенно исправлены благодаря помощи и советам Резерфорда; у меня было много случаев вспоминать о том, как он был прав, когда возражал против усложнения изложения и в особенности против многочисленных повторений, возникающих из-за ссылок на предшествующие работы. Эта лекция, посвященная памяти Резерфорда, позволяет мне дать значительно более компактный очерк постепенного развития наших идей в те годы.

В течение последующих месяцев дискуссия относительно происхождения спектральных линий, приписываемых ионам гелия, приняла совсем драматический оборот. Прежде всего, Эванс сумел воспроизвести линии Фаулера, наблюдая разряд через гелий чрезвычайно высокой чистоты, не обнаружив при этом ни малейших признаков обычных водородных линий. Однако Фаулера окончательно это не убедило: он подчеркивал обманчивый характер появления спектральных линий в смесях газов. Кроме того, он отметил, что его весьма точные измерения длин волн линий Пикеринга не совпадают в точности с длинами волн, получаемыми из моей формулы при $Z=2$. Причина последнего расхождения была, однако, довольно легко найдена: было очевидно, что масса m в выражении для постоянной Ридберга это вовсе не масса свободного электрона, а так называемая приведенная масса $mM(m+M)^{-1}$, где M — масса ядра. И действительно, с учетом этой поправки предсказанная связь между спектром водорода и спектром ионизованного гелия оказывалась в полном соответствии с результатами всех измерений. Этот результат был сразу одобрен Фаулером, который обратил внимание на то, что в спектрах других элементов также наблюдались серии, для которых обычную постоянную Ридберга следовало умножить на число, близкое к четырем. Появление таких спектральных серий, которые принято вообще относить к искровым спектрам, связано с возбуждением ионов; в противоположность этому так называемые дуговые спектры обязаны своим возникновением возбужденным нейтральным атомам.

Продолжавшиеся в последующие годы спектроскопические исследования позволили определить многочисленные спектры атомов, у которых был удален не только один, а даже несколько электронов. В частности, широко известные исследования Боуэна показали, что источники спектров туманностей, обнаруженных Никольсоном, следует искать не в новых гипотетических элементах, а в атомах кислорода и азота, находящихся в высокоионизированном состоянии. В конце концов, некоторые перспективы открылись при анализе процесса, при котором электроны последовательно связываются с ядром; этот анализ проводился для определения связи каждого электрона в основном состоянии Резерфордовского атома. В 1913 г., естественно, экспериментальные данные были еще слишком скудны, а теоретические методы классификации стационарных состояний были еще недостаточно развиты, чтобы решить до конца столь сложную задачу.

IV

Тем временем постепенно продвигалась моя деятельность, касающаяся электронного строения атома, и вскоре я снова обратился к Резерфорду за помощью и советом. Так, в июне 1913 г. я оказался в Манчестере со второй статьей, в которой, помимо продолжения дискуссии о законе радиоактивного смещения и происхождении излучения Баркла́, содержалось исследование основных состояний атомов, содержащих по нескольку электронов. Что касается последней проблемы, то я пытался расположить электронные орбиты по замкнутым кольцам, подобно тому

как впервые это сделал несколько раньше Дж. Дж. Томсон, когда он строил оболочки, пытаясь объяснить характерные периодические свойства менделеевской таблицы элементов на основе своей модели атома.

В резерфордовской лаборатории в этот раз я повстречался с Хевеши и Панетом, которые рассказали мне об успехе первых систематических исследованиях растворимости сульфида свинца и сульфида хрома методом трассирующего состава (меченых атомов); эти исследования они совместно провели в Вене в начале 1913 г. Повторяющиеся посещения Манчестера всегда были вдохновляющими для меня во всех отношениях и давали благоприятную возможность быть на уровне всей деятельности лаборатории. В это самое время Резерфорд совместно с Робинсоном усиленно занимался анализом спектров β-излучения, а вместе с Андраде исследовал спектр γ-лучей. Кроме того, Дарвин и Мозли чрезвычайно интенсивно проводили очень тонкие теоретические и экспериментальные исследования по дифракции рентгеновских лучей в кристаллах.

Вскоре я вновь получил возможность увидеть Резерфорда на заседании Британской Ассоциации содействия прогрессу в науке, которое состоялось в сентябре 1913 г. в Бирмингаме. На этом заседании, на котором присутствовала мадам Кюри, имела место, в частности, общая дискуссия по вопросам излучения с участием таких известных авторитетов, как Рэлей, Лармор, Лоренц; следует в особенности отметить Джинса, который сделал вводное сообщение, посвященное приложению квантовой теории к проблеме строения атома. Его ясное изложение фактически было первым проявлением серьезного интереса со стороны физической общественности к рассмотрению тех проблем, которые за пределами манчестерской группы были встречены в общем весьма скептически.

Один инцидент сильно позабавил Резерфорда и всех нас. Сэр Джозеф Лармор торжественно предложил лорду Рэлею высказаться по поводу последних идей. Немедленный ответ заслуженного ветерана, который в свои молодые годы так много сделал для разъяснения проблем излучения, прозвучал так: «Когда я был молод, я неукоснительно исповедывал некоторые принципы, согласно одному из которых человек, переваливший за шестьдесят, не должен высказываться по поводу новых идей. Хотя я должен признаться в том, что я теперь придерживаюсь его не столь строго, однако в достаточной степени для того, чтобы не принимать участия в этой дискуссии!»

Во время моего посещения Манчестера в июне я обменивался мнениями с Дарвином и Мозли по вопросу о том, что правильное последовательное расположение элементов должно происходить согласно их атомному номеру, и впервые услышал тогда от Мозли, что он намерен выяснить этот вопрос систематическими измерениями высокочастотных спектров элементов методом Лауэ—Брэгга. Поразительная энергия Мозли и его редкий дар ставить эксперименты с четко поставленной целью обусловили удивительно быстрое продвижение его работ; уже в ноябре 1913 г. я получил от него очень интересное письмо с описанием важнейших результатов и несколькими вопросами, касающимися их интерпретации на основе соображений, которые оправдались в применении к оптическим спектрам.

В истории современной физики и химии лишь немногие события с самого начала вызывали всеобщий интерес, как это случилось с Мозли, когда он открыл простой закон, позволяющий однозначно приписать атомный номер любому элементу на основании его высокочастотного спектра. Этот закон сразу же дал не только убедительное свидетельство в пользу атомной модели Резерфорда, но вместе с тем обнаружил потрясающую интуицию Менделеева, который в определенных местах своей

таблицы отошел от правильной последовательности возрастания атомных весов. В частности, сразу было очевидно, что закон Мозли является безошибочным ориентиром при поисках еще не открытых элементов, соответствующих вакантным местам в последовательности атомных номеров.

Что касается проблемы электронной конфигурации атома, то и для нее работа Мозли послужила началом существенного прогресса. Конечно, преобладание во внутренних частях атома притяжения, обусловленного ядром и действующим на отдельные электроны, над их взаимным отталкиванием дает основу для понимания бросающегося в глаза сходства между спектром Мозли и ожидаемым спектром системы, состоящей из отдельного электрона, связанного с «голым» ядром. Более подробное сравнение дает новую информацию, касающуюся оболочечной структуры электронного строения атомов.

Существенный вклад в эту проблему был сделан вскоре после этого Косселем, который, рассматривая механизм возникновения излучения Баркла́ K-, L- и M-типов, указал на процесс удаления электрона из какого-либо кольца или оболочки, последовательно окружающих ядро. В частности, он приписал K_α- и K_β-компоненты спектра Мозли отдельным процессам перехода, в которых электрон, недостающий в K-оболочке, замещается одним из электронов, ранее находившихся в L- и M-оболочках соответственно. На этом пути Коссель смог проследить дальнейшие связи между различными спектральными частотами, измеренными Мозли; эти связи позволили ему представить полный высокочастотный спектр элемента в виде комбинационной схемы, в которой произведение любого из термов на постоянную Планка может быть приравнено энергии, необходимой для удаления электрона из одной из оболочек атома на такое расстояние от ядра, когда он находится уже за пределами любой из оболочек.

Кроме того, идеи Косселя позволяли объяснить тот факт, что поглощение проникающего излучения по мере возрастания длины волны практически начинается на краю поглощения, соответствующего полному удалению электрона из какой-либо оболочки за один прием. Отсутствие промежуточных возбужденных состояний было отнесено за счет того, что в основном состоянии атома все оболочки полностью заполнены. Как это хорошо известно, указанная точка зрения в конце концов нашла свое окончательное выражение в 1924 г., когда Паули сформулировал общий принцип исключения для электронов в связанных состояниях; формулировка Паули была навеяна выводами Стонера, касающимися тонких деталей структуры оболочек в атоме Резерфорда, полученными из анализа закономерностей оптического спектра.

V

Осенью 1913 г. новый переполох среди физиков был вызван открытием Штарка, обнаружившего неожиданно сильное действие электрических полей на структуру линий водородного спектра. Всегда очень внимательный ко всем достижениям физики, Резерфорд, получив от Прусской академии статью Штарка, немедленно написал мне: «Я думаю, что в настоящее время скорее всего Вам следует написать что-нибудь по поводу эффекта Зеемана и действия электрического поля, если эти эффекты возможно согласовать с Вашей теорией». Откликнувшись на призыв Резерфорда, я попытался разобраться в сути вопроса и мне вскоре стало ясно, что, рассматривая действие электрического и магнитного полей, мы, по существу, имеем дело с двумя совершенно различными проблемами.

Сущность объяснения знаменитого открытия Зеемана (сделанного в 1896 г.) Лоренцем и Лармором заключалась в том, что оно непосредственно относилось к движению электронов как источнику линейчатого спектра; это объяснение в широких пределах не зависело от конкретных предположений относительно механизма связи электронов в атоме. Даже в том случае, если возникновение спектра приписывать отдельным переходам между стационарными состояниями, принцип соответствия с учетом общей теоремы Лармора приводит к тому, что нормальный эффект Зеемана следует ожидать для всех спектральных линий, испускаемых электронами, связанными полем с центральной симметрией, как это имеет место в атоме Резерфорда. Скорее открытие так называемого аномального зееман-эффекта принесло с собой новые загадки, которые оказалось возможным разрешить только более чем 10 лет спустя, когда сложная структура линий в спектральных сериях была объяснена наличием электронного спина. Самый увлекательный исторический очерк этого периода, за который важнейшие вклады были внесены с самых различных направлений, содержится в хорошо известной книге, посвященной памяти Паули и недавно вышедшей из печати*).

В случае же электрического поля, наоборот, не следовало ожидать для излучения, испускаемого гармоническим осциллятором, никаких эффектов, пропорциональных величине поля, поэтому открытие Штарка совершенно определенно исключало обычное представление об упругих колебаниях электронов как источнике линейчатых спектров. Однако для кеплеровского движения электрона вокруг ядра даже сравнительно слабое внешнее электрическое поле через секулярное возмущение может вызывать значительное изменение в форме и ориентации орбит. Изучая частные случаи, в которых орбита остается чисто периодической и во внешнем поле, оказывается возможным (используя аргументы того же самого типа, как и для стационарных состояний невозмущенного водородного атома) определить порядок величины эффекта Штарка и в особенности объяснить его быстрый рост от линии к линии в спектральных сериях водорода. Вместе с тем эти рассуждения со всей ясностью обнаружили, что для объяснения тонких деталей явления методы классификации стационарных состояний атомных систем развиты явно недостаточно.

Именно в этом отношении в последующие годы было достигнуто значительное продвижение вперед введением квантовых чисел, определяющих компоненты момента импульса и других интегралов действия. Методы такого типа были впервые предложены В. Вильсоном в 1915 г., применившим их к электронным орбитам в атоме водорода. Однако вследствие того что согласно механике Ньютона каждая орбита в этом случае чисто периодическая с частотой обращения, зависящей только от полной энергии системы, никаких новых физических явлений выявлено не было. Тем не менее зависимость массы электрона от скорости, предсказанная новой механикой Эйнштейна, снимала вырождение движения и вызывала появление второго периода в его фурье-компонентах за счет непрерывного медленного движения афелия кеплеровской орбиты. Как это было показано в известной работе Зоммерфельда 1916 г., раздельное квантование мемента импульса и действия в радиальном направлении позволило дать детальное объяснение наблюдаемой тонкой структуры линий в спектре атома водорода и иона гелия.

Кроме того, Зоммерфельдом и Эпштейном было рассмотрено влияние магнитного и электрического полей на спектр водорода; искусным приме-

---

*) Теоретическая физика 20 века. Сборник статей, посвященных памяти В. Паули. М., ИЛ, 1962. (*Прим. ред.*)

нением методов квантования систем со многими периодами они смогли, в полном соответствии с экспериментом, получить спектральные термы, комбинация которых определяла расщепление линий водорода. Совместимость предложенных методов с принципом адиабатической инвариантности стационарных состояний, сформулированным в 1914 г. Эренфестом для удовлетворения требований термодинамики, была обеспечена тем, что интегралы действия, к которым относятся квантовые числа, согласно классической механике не меняются при медленном (сравнительно с характеристическими периодами системы) изменении внешнего поля.

Дальнейшее подтверждение плодотворности такого подхода было получено приложением принципа соответствия к излучению систем, обладающих многими периодами; в результате удалось получить качественные выводы, касающиеся относительных вероятностей различных процессов перехода. Этот подход в неменьшей степени подтверждался объяснением на первый взгляд крайне прихотливых изменений в интенсивности штарковских компонент водородных линий (Крамерс). Оказалось даже возможным с помощью принципа соответствия объяснить отсутствие определенных типов переходов в других атомах, сверх тех, которые (как это было выяснено Рубиновичем) могут быть исключены с помощью законов сохранения энергии и момента импульса, примененных к реакции между атомом и излучением.

Благодаря быстро нараставшим экспериментальным данным относительно структуры сложных оптических спектров, а также настойчивым поискам тонких особенностей высокочастотных спектров Зигбаном с сотрудниками, классификация связанных состояний в атомах, содержащих несколько электронов, постепенно уточнялась. В частности, изучение способа, которым могут быть построены основные состояния атомов путем последовательного добавления электронов, приводило к постепенному выяснению оболочечной структуры электронной конфигурации атома. Таким образом, несмотря на то, что такие существенные для объяснения элементы, как электронный спин, были еще не известны, фактически оказалось возможным уже десять лет спустя после открытия Резерфордом атомного ядра дать общее истолкование многим наиболее характерным периодическим свойствам таблицы Менделеева.

Однако весь подход к проблеме в целом носил еще в высшей степени полуэмпирический характер, и вскоре стало совершенно ясно, что для исчерпывающего описания физических и химических свойств элементов необходим новый радикальный отход от классической механики, чтобы соединить квантовые постулаты в логически непротиворечивую схему. К этому хорошо известному пути развития квантовой механики мы еще вернемся, а пока я хочу продолжить свои воспоминания о Резерфорде.

VI

В начале первой мировой войны манчестерская группа почти полностью распалась, но мне посчастливилось оставаться в тесном контакте с Резерфордом, который весной 1914 г. пригласил меня заменить Дарвина в Шустеровской школе математической физики. По прибытии в Манчестер ранней осенью этого года после бурного плавания вокруг Шотландии, я и моя жена были очень тепло встречены теми немногими из наших старых друзей, которые остались в лаборатории после отъезда наших коллег из-за границы и ухода на военную службу большинства англичан. Резерфорд с женой были в это время еще в Америке, где они оказались на обратном пути после посещения родных в Новой Зеландии; стоит ли говорить о том, что их благополучное возвращение в Манчестер несколькими

неделями позже было встречено всеми нами с облегчением и большой радостью.

Сам Резерфорд вскоре занялся военными вопросами, в особенности задачей обнаружения подводных лодок с помощью звука, так что обучение студентов почти полностью перешло к Эвансу, Маковеру и мне. Несмотря на загруженность, Резерфорд не только находил время продолжать свои собственные исследования, которые еще до окончания войны уже привели к столь грандиозным результатам, но и с присущей ему благожелательностью не переставал следить за работами своих сотрудников. Если говорить о проблеме строения атома, то она получила новый толчок в 1914 г., когда были опубликованы знаменитые опыты Франка и Герца по возбуждению атомов электронными соударениями.

С одной стороны, эти эксперименты, выполненные с парами ртути, представляли собой наиболее яркое доказательство скачкообразности энергетических переходов в атомных процессах; с другой стороны, значение энергии ионизации атомов ртути, очевидно определяемое этими экспериментами, оказалось вдвое меньше, чем это следовало ожидать на основании интерпретации спектра ртути. Поэтому возникало подозрение, что наблюдаемая ионизация не имеет прямого отношения к электронным соударениям, а обязана побочному фотоэффекту на электродах, вызываемому излучением атомов ртути при переходе из первого возбужденного состояния в основное. По инициативе Резерфорда Маковер и я решили поставить эксперименты, чтобы выяснить этот вопрос; было задумано сложное устройство из кварцевого стекла с многочисленными электродами и сетками; эту конструкцию мы осуществляли с помощью опытного немецкого стеклодува, который в свое время изготовлял тонкие трубки с α-препаратами для исследований Резерфорда по образованию гелия.

Обладатель широких гуманистических взглядов, Резерфорд пытался получить разрешение для этого стеклодува продолжать работу в Англии и в военное время, но слабости этого человека, довольно обычные для представителей этой профессии, проявившиеся в конце концов в резких ультрапатриотических высказываниях, привели к тому, что он был интернирован английскими властями. Таким образом, когда наш чрезвычайно сложный аппарат вышел из строя из-за того, что загорелась его подставка, нам уже никто не мог помочь реставрировать его; к тому же вскоре после этого Маковер ушел добровольцем в армию, и эти эксперименты были оставлены. Едва ли следует добавлять, что эта проблема была совершенно независимо от нас разрешена (причем были получены те самые результаты, которые ожидались) блестящими работами Дэвиса и Готье, выполненными в 1918 г. в Нью-Йорке. Я вспомнил о наших безуспешных попытках лишь для того, чтобы обрисовать трудности, которые возникали в то время во время работы в Манчестерской лаборатории; эти трудности были весьма сходны с теми, которые должны были преодолевать тогда в домашнем хозяйстве женщины.

По-прежнему непоколебимый оптимизм Резерфорда чрезвычайно ободряюще действовал на всех тех, кто его окружал, и мне вспоминается, как во время серьезных военных неудач он повторял старое изречение, приписываемое Наполеону, о том, что с англичанами невозможно воевать, потому что они настолько глупы, что не понимают, когда нужно сдаваться (they were too stupid to understand, when they had lost). Для меня было приятным и поучительным раз в месяц присутствовать на беседах в группе близких друзей Резерфорда; в нее входили философ Александер, историк Тоут, антрополог Элиот Смит и химик Хаим Вейцман, которого высоко ценил Резерфорд и который тридцать лет спустя стал первым президентом государства Израиль.

Страшным потрясением для всех нас было трагическое известие о безвременной гибели Мозли в 1915 г. во время Галлипольской операции; его смерть вызвала скорбь у физиков всех стран мира; что касается Резерфорда, который в свое время пытался перевести Мозли с фронта в менее опасное место, то он принял ее совсем близко к сердцу.

Летом 1916 г. вместе с женой я покинул Манчестер и вернулся в Данию, где я был приглашен на только что открывшееся место профессора теоретической физики в Копенгагенском университете. Несмотря на все возрастающие трудности с почтовой связью, я поддерживал непрерывную переписку с Резерфордом. Со своей стороны, я писал о продвижении моей работы по обобщению квантовой теории атомного строения, которая в это время получила стимулы для дальнейшего развития благодаря успехам в классификации стационарных состояний, о которых речь шла выше. В связи с этим Резерфорд интересовался тем, какие новости я почерпнул на континенте, в частности из моих первых встреч с Зоммерфельдом и Эренфестом. В своих письмах Резерфорд давал также живое описание, как, несмотря на возрастающие трудности и тяготы различных обязанностей, он боролся за продолжение своих исследований в различных направлениях. Так, осенью 1919 г. Резерфорд писал о том, что его крайне заинтересовали некоторые удивительные результаты по поглощению жестких γ-лучей, создаваемых высоковольтными трубками, которые как раз в это время стали ему доступны.

В последующие годы Резерфорда все более и более занимала возможность ядерного расщепления с помощью быстрых α-частиц, и уже в письме от 9 декабря 1916 г. он писал: «Время от времени мне удается урвать свободные полдня, чтобы провести некоторые из моих собственных экспериментов, и я думаю, что получил результаты, которые в конце концов окажутся чрезвычайно важными. Мне очень хотелось бы обсудить все эти вещи вместе с вами здесь. Я обнаруживаю и подсчитываю легкие атомы, приводимые в движение α-частицами, и эти результаты, как мне кажется, проливают яркий свет на характер и распределение сил вблизи ядра. Я также пытаюсь этим же методом взломать атом. В одном из опытов результаты представляются обнадеживающими, но потребуется уйма работы, чтобы их подтвердить. Кей помогает мне и в настоящее время является специалистом по подсчетам». Годом позже, 17 ноября 1918 г. Резерфорд в очень характерной для него манере рассказывает о дальнейших успехах: «Я хотел, чтобы вы были здесь и мы обсудили бы значение некоторых моих результатов по соударению ядер. Я получил некоторые, как мне кажется, довольно удивительные результаты, но потребуется тяжелый и продолжительный труд, чтобы представить надежные доказательства моих выводов. Подсчет слабых сцинтилляций — нелегкая задача для старых глаз, но все же с помощью Кея я проделал за прошедшие четыре года чрезвычайно большую работу в свободное время».

В знаменитой работе Резерфорда, опубликованной в 1919 г. в «Philosophical Magazine», содержащей описание его фундаментального открытия — управляемого ядерного расщепления, упоминается посещение Манчестера в ноябре 1918 г. старым сотрудником Резерфорда Эрнестом Марсденом, который после перемирия был демобилизован во Франции из армии. Обладая большим опытом сцинтилляционных экспериментов, полученным им в прежние дни пребывания в Манчестере, когда вместе с Гейгером он ставил эксперименты, которые привели Резерфорда к открытию атомного ядра, Марсден помог выяснить некоторые очевидные аномалии в статистическом распределении протонов больших скоростей, высвобождаемых при бомбардировке азота α-частицами. Из Манчестера Марсден вернулся в Новую Зеландию, чтобы приступить к своим университетским

обязанностям, но продолжал сохранять тесную связь с Резерфордом в течение многих лет.

В июле 1919 г., когда после заключения перемирия стало возможным свободное передвижение, я отправился в Манчестер навестить Резерфорда и узнать поподробнее о его новом крупнейшем открытии — открытии управляемых, или так называемых искусственных, ядерных превращений, которыми он положил начало тому, что любил называть «современной алхимией», и которое с течением времени привело к столь ужасающим последствиям, дав в руки человека господство над силами природы. В это время Резерфорд был почти что один в своей лаборатории, и, как он и писал в своих письмах, единственным помощником в его фундаментальных исследованиях, если не считать кратковременного пребывания Марсдена, был его преданный помощник Уильям Кей, который своей добротой и готовностью помочь снискал общую любовь всех работавших за все эти годы в лаборатории. Во время моего визита Резерфорд рассказал мне также, что он должен принять важное решение в связи с предложением занять должность профессора Кавендишской лаборатории в Кэмбридже; эта должность оставалась свободной после отставки Дж. Дж. Томсона. Конечно, Резерфорду было нелегко решиться расстаться с Манчестером, где он долго и плодотворно работал, но он, разумеется, не мог не принять приглашения занять место в непревзойденной плеяде кавендишских профессоров.

VII

С первых же дней своего пребывания в Кавендишской лаборатории Резерфорд собрал вокруг себя многочисленную и блестящую группу исследователей. Наиболее заметной фигурой среди них был Астон, который в течение ряда лет работал с Дж. Дж. Томсоном и уже во время войны начал развивать масс-спектроскопические методы; его методы впоследствии позволили обнаружить существование изотопов почти у всех элементов. Этот результат, который еще раз давал убедительное подтверждение правильности атомной модели Резерфорда, не был совсем неожиданным. Уже в прежние годы в Манчестере было выяснено, что очевидные отступления от правильной последовательности атомных весов элементов, расположенных соответственно их химическим свойствам, указывают на то, что даже у устойчивых элементов не следует ожидать однозначной связи зарядов ядер с их массой. В письмах ко мне в январе и феврале 1920 г. Резерфорд выражал свое удовлетворение работами Астона, в особенности открытием изотопов хлора, которые так наглядно демонстрировали статистический характер отклонений химических атомных весов от целочисленных значений. Он не без юмора комментировал также оживленные дискуссии в Кавендишской лаборатории, посвященные относительным достоинствам различных моделей атома, которые появлялись в связи с открытием Астона.

Чрезвычайно существенное значение для продолжения собственных изыскательских работ Резерфорда, касающихся строения и расщепления атомных ядер, а также руководства обширной лабораторией имело то, что с самого начала его деятельности к нему присоединился Джеймс Чадвик, работавший в старой манчестерской группе и вернувшийся после длительного пребывания под арестом в Германии: он работал вместе с Гейгером в Берлине, и там его застало начало войны. Среди сотрудников Резерфорда в первые годы его работы в Кэмбридже были также Блэккет и Эллис, оба отказавшиеся от военной карьеры; к занятиям физикой Эллиса привлек Чадвик, с которым он подружился, находясь под арестом у немцев. Дальнейшим пополнением кавендишской группы было прибы-

тие, несколькими годами позже, Капицы, который привез с собой разнообразные остроумные проекты, в частности проект создания магнитного поля неслыханной в то время величины. В своей работе он с самого начала получал помощь Джона Кокрофта, обладавшего незаурядным сочетанием понимания научных и инженерных вопросов и ставшего впоследствии выдающимся сотрудником Резерфорда.

Сначала руководство теоретической деятельностью Кавендишской лаборатории возглавляли Чарльз Дарвин (математические способности которого оказались весьма полезными в манчестерские годы) вместе с Ральфом Фаулером. Их содружество в это время позволило сделать ценный вклад в статистическую термодинамику и ее приложения к астрофизическим проблемам. После отъезда Дарвина в Эдинбург главным теоретическим консультантом и наставником вплоть до второй мировой войны был Фаулер, который стал зятем Резерфорда. Фаулер не только с энтузиазмом и энергией принимал участие в работе Кавендишской лаборатории, в скором времени он нашел многочисленных одаренных учеников, на которых благотворно сказывалось его влияние. Лучшими из них были Леннард-Джонс и Хартри; оба они вложили свою долю, каждый в своем направлении, в развитие атомной и молекулярной физики. Особенно следует отметить Дирака, который с юношеских лет выделялся необыкновенной силой своей логики.

Уже с тех пор, как я покинул в 1916 г. Манчестер, я, естественно, пытался использовать опыт, приобретенный мною в Манчестерской лаборатории. Я с благодарностью вспоминаю о том, как Резерфорд с самого начала проявлял внимание и оказывал эффективную поддержку моим попыткам создать в Копенгагене институт, призванный установить тесную связь между физиками-теоретиками и физиками-экспериментаторами. Особо важное значение имело то, что уже осенью 1920 г., когда сооружение института приближалось к концу, Резерфорд нашел время, чтобы приехать в Копенгаген. В знак признания его заслуг университет присвоил ему почетную степень, и по этому поводу он произнес пронизанную юмором вдохновенную речь, которая надолго осталась в памяти всех присутствовавших.

Для работы вновь созданного института оказалось очень благотворным то, что вскоре после войны к нам присоединился мой старый друг с манчестерских времен, Георг Хевеши; в течение более чем двадцати лет, проведенных в Копенгагене, он выполнил там многие из своих хорошо известных физико-химических и биологических исследований, используя метод меченых атомов. Особый интерес Резерфорда вызвало применение метода Мозли (Костер и Хевеши, 1922 г.) в успешных поисках одного недостающего элемента, ныне известного под именем гафния; свойства этого элемента еще раз подтвердили правильность интерпретации периодической системы элементов. Удачное начало общей экспериментальной работы было положено посещением института Джеймсом Франком во время открытия лаборатории; в течение последующих месяцев он любезно знакомил своих датских коллег с очень тонкой техникой возбуждения атомных спектров электронной бомбардировкой, тщательно разработанной им совместно с Густавом Герцем. Первым среди многих выдающихся теоретиков, которые оставались у нас длительное время, был Ганс Крамерс, который совсем юным приехал в Копенгаген во время войны и оказался неоценимым приобретением для нашей группы в течение всех тех десяти лет, которые он работал с нами; в 1926 г. он оставил преподавание в институте и стал профессором в Утрехте. Вскоре после появления Крамерса в Копенгагене прибыли двое подающих надежды молодых людей — Оскар Клейн из Швеции и Свен Росселанд из Норвегии; уже в 1920 г. их имена

стали всем известны после того, как они указали на так называемые столкновения второго рода, при которых в результате электронной бомбардировки атомы переходят из высшего стационарного состояния в низшее, сообщая дополнительную скорость электрону. Фактически наличие таких процессов играет решающую роль в установлении теплового равновесия, вполне аналогичную роли индуцированных радиационных процессов, имеющих существенное значение для вывода формулы теплового излучения Планка методом Эйнштейна. Учет соударений второго рода оказался чрезвычайно важным для выяснения радиационных свойств звездных атмосфер, особенности которых были рассмотрены в фундаментальных работах Саха́, работавшего в это время вместе с Фаулером в Кэмбридже.

К группе Копенгагенского института присоединился в 1922 г. Паули, а двумя годами позже Гейзенберг; оба они были учениками Зоммерфельда и, несмотря на свою молодость, уже имели в своем багаже великолепные работы. Я познакомился с ними обоими летом 1922 г. во время моего посещения Гёттингена, где я читал лекции: у меня сразу возникло ощущение их незаурядной одаренности. Моим посещением Гёттингена было положено начало длительной и плодотворной совместной деятельности группы под руководством Борна и Франка, работавшей в Гёттингене, и копенгагенской группы. С самых первых дней наша тесная связь с сильнейшей кэмбриджской группой поддерживалась, в частности, длительным пребыванием в Копенгагене Дарвина, Дирака, Фаулера, Хартри, Мотта и других.

VIII

Те годы, когда неповторимое объединение целого поколения физиков-теоретиков многих стран шаг за шагом создавало логически непротиворечивое обобщение классической механики и электродинамики, иногда принято называть «героической» эрой квантовой физики. Любому, следившему за этим процессом, незабываемым воспоминанием остается картина того, как в результате сочетания самых различных подходов и использования адекватных математических методов возникал новый взгляд на содержание физического опыта. Пришлось преодолеть многочисленные препятствия на пути к этой цели, но прошло время и, как это всегда бывает, решающий успех был достигнут самыми молодыми из нас.

Общей исходной точкой было признание того, что несмотря на известный смысл временного использования механической картины для классификации стационарных состояний изолированных атомов или атомов, находящихся в поле постоянных внешних сил, совершенно несомненна (как это уже упоминалось) необходимость нового фундаментального отхода от классической картины. Дело заключалось не только в том, что трудности определения электронного строения химических соединений на основе атомной модели Резерфорда становились все более и более очевидными, помимо этого непреодолимые трудности возникали и при любой попытке описать в деталях сложные атомные спектры; особенно отчетливо это было видно в странном дуплетном характере дугового спектра гелия.

Первый шаг к обобщению формулировки принципа соответствия был сделан при решении проблемы оптической дисперсии. Действительно, тесная связь между атомной дисперсией и спектральными линиями селективного поглощения, столь ярко продемонстрированная в остроумных экспериментах Р. В. Вуда и П. Бивена по поглощению и дисперсии в парах щелочных металлов, с самого начала подсказывала подход в духе соответствия. Исходя из предположения Эйнштейна о статистическом характере возникновения индуцированных излучением переходов между стационарными состояниями атомных систем, Крамерс в 1924 г. сумел устано-

вить общую дисперсионную формулу, включающую только энергию этих состояний и вероятности спонтанных переходов между ними. Эта теория, получившая дальнейшее развитие в работах Крамерса и Гейзенберга, содержала в себе даже новые дисперсионные эффекты, связанные с тем, что под действием излучения возникает вероятность переходов, не осуществляющихся в невозмущенном атоме; раман-эффект в молекулярных спектрах является аналогом этого явления.

Вскоре после этого шаг фундаментального значения был сделан Гейзенбергом, который в 1925 г. ввел чрезвычайно остроумный формализм, в котором исключалось всякое использование наглядной орбитальной картины, если не считать общего асимптотического соответствия. В этой смелой концепции сохранялась гамильтоновская форма канонических уравнений механики, однако сопряженные величины заменялись операторами, подчиняющимися некоммутативному алгорифму, содержащему постоянную Планка и символ $\sqrt{-1}$. И действительно, представив механические величины в виде эрмитовских матриц, элементы которых относятся ко всем возможным процессам перехода между стационарными состояниями, оказалось возможным без малейшего произвола получить энергии этих состояний и вероятности связанных с ними процессов перехода. Эта так называемая квантовая механика, в развитие которой с самого начала внесли важный вклад Борн, Иордан, а также Дирак, открыла путь непротиворечивого статистического рассмотрения многих атомных проблем, которые до этого допускали лишь полуэмпирический подход.

Для завершения этой грандиозной задачи оказалось очень полезным и поучительным опереться на формальную аналогию между механикой и оптикой, впервые указанную Гамильтоном. Так, указав на тождественную роль, которую играют в механической картине квантовые числа при классификации стационарных состояний и числа узлов, характеризующих возможные стоячие волны в упругой среде, Луи де Бройль еще в 1924 г. пришел к сопоставлению поведения свободных материальных частиц и свойств фотонов. Особенно поучительным было обнаруженное им совпадение скорости частицы с групповой скоростью волнового пакета, образованного из компонент, длины волн которых заключены в узком интервале и каждая из которых связана со значением импульса эйнштейновским уравнением, связывающим импульс фотона и длину волны излучения. Как известно, целесообразность такой аналогии вскоре получила убедительное подтверждение открытием селективного рассеяния электронов в кристаллах Дэвиссоном и Джермером, а также Джорджем Томсоном. Кульминационным событием этого периода было установление Шрёдингером в 1926 г. более объемлющей формы волновой механики, в которой стационарные состояния представляли собой собственные решения фундаментального волнового уравнения, получаемого представлением гамильтониана заряженных частиц в виде дифференциального оператора, действующего на функцию координат, определяющих конфигурацию системы. В случае водородного атома этот метод не только давал замечательно простой способ определения энергий стационарных состояний, но, как это было также показано Шрёдингером, суперпозиции любых двух собственных решений соответствуют такому распределению электрического заряда и тока в атоме, которое, согласно классической электродинамике, обусловливает испускание и резонансное поглощение монохроматического излучения с частотой, совпадающей с определенной линией спектра водорода.

Шрёдингер смог объяснить также основные особенности дисперсии излучения атомами, представив распределение заряда и тока в атоме, возмущенном падающим излучением, в виде суперпозиции собственных

функций, определяющих множество возможных стационарных состояний невозмущенной системы. Особенно поучительным было объяснение на той же основе законов комптон-эффекта, которые, несмотря на очевидное подтверждение ими исходной идеи Эйнштейна о фотонах, на первых порах создавали очевидные трудности для их рассмотрения в духе соответствия, так как приходилось сочетать сохранение энергии и импульса с разбиением процесса на два отдельных этапа, состоящих в поглощении и испускании излучения, напоминающих радиационные переходы между стационарными состояниями атомной системы.

Такое осознание широты аргументации, заключенной в использовании принципа суперпозиции, сходного с принципом суперпозиции в классической теории электромагнитного поля,— принципа, который только неявно содержался в матричной формулировке квантовой механики, означало крупный успех для трактовки атомных проблем. Однако с самого начала было очевидно, что волновая механика указывает на не менее радикальное видоизменение классического физического подхода, чем статистическое описание, выдвинутое принципом соответствия. И я вспоминаю, как во время посещения Шрёдингером Копенгагена в 1926 г., когда он рассказывал о своей замечательной работе, оставившей у нас самое сильное впечатление, мы убеждали его, что любая процедура, пренебрегающая индивидуальным характером квантовых процессов, не может привести к фундаментальной формуле Планка для теплового излучения.

Несмотря на замечательную аналогию между характерными особенностями атомных процессов и классическими резонансными проблемами, необходимо принимать во внимание, что в случае волновой механики мы имеем дело с функциями, которые, вообще говоря, не являются действительными, но подобно матрицам квантовой механики существенным образом содержат символ $\sqrt{-1}$. Кроме того, при рассмотрении атомов, содержащих более одного электрона, или столкновений между атомами и свободными заряженными частицами функции состояний задаются не в обычном пространстве, а в конфигурационном, число измерений которого равно числу степеней свободы всей системы. Принципиально статистический характер физических выводов волновой механики был в конечном счете выяснен Борном в его блестящей работе, посвященной проблеме соударений.

Эквивалентность физического содержания двух различных математических формализмов была исчерпывающим образом доказана на основе теории преобразований, независимо сформулированной Дираком в Копенгагене и Иорданом в Гёттингене, которые указали на возможность замены переменных в квантовой физике, подобную той, которая допускается симметрией уравнений движения классической динамики в канонической форме Гамильтона. Аналогичная ситуация возникает при формулировке квантовой электродинамики, сочетаемой с представлением о фотонах. Эта задача была впервые решена Дираком в квантовой теории излучения, где фазы и амплитуды фурье-компонент поля рассматривались как некоммутирующие переменные. После дальнейших остроумных находок Иордана, Клейна и Вигнера этот формализм получил, как это всем известно, окончательное завершение в работах Гейзенберга и Паули.

Характерной иллюстрацией мощи и широты применимости квантовой физики служат специфические квантовые статистики, относящиеся к системам тождественных частиц, где мы встречаемся с особенностями, столь же чуждыми классической физике, как и сам квант действия. Действительно, любая проблема, которая требует для своего рассмотрения статистик Бозе — Эйнштейна или Ферми — Дирака, в принципе исключает наглядное представление. В частности, эта ситуация делает возможной

подходящую формулировку принципа исключения Паули, который позволил не только окончательно объяснить периодические соотношения в таблице Менделеева, но оказался чрезвычайно плодотворным для понимания многочисленных и разнообразных аспектов атомного строения вещества в последующие годы.

Фундаментальный вклад в разъяснение принципов квантовых статистик был сделан в 1926 г. Гейзенбергом изящным объяснением дуплетности спектра гелия. Действительно, как было им показано, совокупность стационарных состояний атомов с двумя электронами распадается на две некомбинирующиеся группы, соответствующие симметричной и антисимметричной пространственным волновым функциям, связанным соответственно с противоположной и параллельной ориентациями электронных спинов. Вскоре после этого Гайтлер и Лондон, действуя в том же направлении, сумели объяснить механизм связи молекулы водорода и тем самым наметили путь к пониманию гомеополярных химических связей. Даже знаменитая резерфордовская формула для рассеяния заряженных частиц атомными ядрами, как это было показано Моттом, должна была быть изменена, если рассматривать соударения между тождественными частицами, например протонами и ядрами водорода или α-частицами и ядрами гелия. Однако в тех экспериментах по рассеянию быстрых α-частиц тяжелыми ядрами на большие углы, которые проводил Резерфорд и на основании которых он сделал свои фундаментальные выводы, мы заведомо находимся в пределах применимости классической механики.

Все возрастающее использование более и более рафинированных математических абстракций обеспечивало непротиворечивость описания атомных явлений. В 1928 г. это нашло свое наивысшее выражение в виде релятивистской квантовой теории Дирака. Представление об электронном спине, в трактовке которого важную роль сыграли Дарвин и Паули, получило гармоническое выражение в дираковском спинорном анализе. Кроме всего этого, в связи с открытием позитрона Андерсоном и Блэккетом, теория Дирака подготовила почву для признания существования античастиц с массой, равной массе самой частицы, но с противоположным электрическим зарядом и противоположной ориентацией магнитного момента относительно спиновой оси. Как известно, мы сталкиваемся здесь с идеями, которые на новый лад возрождают и расширяют представления об изотропии в пространстве и обратимости во времени, и которые всегда были одной из основ классического физического подхода.

Удивительный прогресс наших знаний об атомном строении вещества и тех методов, с помощью которых приобретаются и увязываются эти знания, в действительности увели нас далеко за пределы наглядного детерминистического описания, доведенного до высокого совершенства Ньютоном и Максвеллом. Пристально наблюдая за этими успехами, я часто думал о решающем значении открытия атомного ядра Резерфордом; это открытие на любой стадии исследований властно звало нас вперед.

IX

Все эти долгие и богатые событиями годы, в течение которых Резерфорд работал с неутомимой энергией в Кавендишской лаборатории, я часто посещал Кэмбридж, где по предложению Резерфорда читал несколько курсов лекций по теоретическим проблемам, в том числе по эпистемологическим вопросам развития квантовой теории. В этих случаях всегда было большой поддержкой ощущать ясный ум и острый интерес Резерфорда, внимательно следившего за успехами в той самой области исследований,

в которой он сам был пионером и рост которой увел нас так далеко за те горизонты, которые открывались в начале ее развития.

И действительно, широкое использование абстрактных математических методов помогало осваивать быстро нарастающие данные относительно атомных явлений, но вместе с тем все более и более выдвигало на первый план проблему наблюдения. Своими корнями эта проблема уходит в глубь веков, так же как и сама физика. Так, философы Древней Греции, которые для объяснения характерных свойств вещества предполагали ограниченную делимость всей материи, считали очевидным, что грубость наших органов чувств полностью исключает возможность прямого наблюдения отдельных атомов. В этом отношении в наше время положение коренным образом изменилось в связи с разработкой специальных устройств, таких, например, как камера Вильсона и счетные механизмы, первоначально разработанные Резерфордом и Гейгером для измерений чисел и зарядов α-частиц. Однако исследования мира атомов, как мы это уже отмечали, обнаружило присущие этому миру ограничения в способе его описания, воплощенном в разговорном языке, развившемся для ориентации в окружающем нас мире и приспособленном к описанию событий повседневной жизни.

Словами, выражающими общую позицию Резерфорда, можно сказать, что цель эксперимента состоит в том, чтобы задавать вопросы природе; и конечно, Резерфорд преуспел в этой задаче благодаря своей интуиции, с помощью которой ему всегда удавалось ставить такие вопросы, которые обеспечивали получение самых нужных ответов. Для того чтобы исследование расширяло и углубляло наши общие познания, очевидно, нужно потребовать, чтобы при описании наблюдений, конструкций и способов управления аппаратурой, необходимом для однозначного определения экспериментальных условий, можно было бы пользоваться обыкновенным языком. В реальных физических исследованиях это требование с избытком удовлетворяется указанием экспериментальных устройств, в которых используются, например, такие приспособления, как диафрагма и фотографические пластинки, настолько большие и тяжелые, что все манипуляции с ними могут быть описаны в терминологии классической физики, хотя, конечно, свойства вещества, из которого изготовлены инструменты (а также и наши собственные тела), существенным образом зависят от строения и стабильности входящих в них атомных систем, отвергающих подобное описание.

Описание обычных явлений заведомо предполагает неограниченную делимость хода явления в пространстве и времени и возможность связи всех его ступеней в неразрывную цепь на языке причины и следствия. В конечном счете эта точка зрения опирается на тонкость наших чувств, хотя нашим чувствам для познания требуется взаимодействие с изучаемым объектом, но столь незначительное, что в обычных условиях оно не оказывает заметного влияния на ход явлений. В схеме классической физики такое положение вещей находит свое идеализированное выражение в предположении, что взаимодействием между объектом и прибором, с помощью которого производится наблюдение, можно пренебречь или что по крайней мере его можно скомпенсировать.

Элемент цельности, олицетворенный квантом действия и совершенно чуждый принципам классической физики, повлек за собой то, что при изучении квантовых процессов любое экспериментальное исследование включает в себя взаимодействие между атомным объектом и измерительными приборами; хотя это взаимодействие является существенной характеристикой явления, оно вместе с тем не поддается раздельной оценке, если эксперимент ставится с целью получить однозначные ответы на поставлен-

ные вопросы. И именно осознание такого положения вещей вынудило обратиться к статистическому способу описания, определяющему математическое ожидание обнаружения различных квантовых эффектов при одних и тех же экспериментальных условиях; такой статистический подход устранил все кажущиеся противоречия между явлениями, наблюдаемыми во взаимно исключающих друг друга экспериментальных условиях. Какими бы противоположными ни казались на первый взгляд эти явления, следует отдавать себе ясный отчет в том, что они являются дополнительными в том смысле, что рассматриваемые совместно они дают исчерпывающую информацию об атомном объекте, которую вполне однозначно можно изложить обычным языком.

Идея дополнительности вовсе не подразумевает какого-либо отказа от детального анализа, ограничивающего область наших исследований, она просто подчеркивает особенности объективного описания, независимого от субъективного суждения, в любой области познания, где для плодотворного обмена данными существенно указание на условия получения этих данных. В логическом отношении эта ситуация хорошо известна из рассмотрения психологических и социальных проблем, где многие слова с самого момента зарождения языка используются типично дополнительным способом. Безусловно, здесь мы часто сталкиваемся с такими качествами, которые не подходят для количественного анализа, характерного для так называемых точных наук, задачей которых, согласно воззрениям Галилея, является основывать всякое описание на четко определенных измерениях.

Несмотря на всю ту пользу, которую нам всегда приносит в этих вопросах математика, следует помнить, что всякое определение математических символов и операций основывается на простом логическом применении обычного языка. В самом деле, математика никогда не рассматривалась как отдельная отрасль знания, основанная на совокупности опытных данных, а скорее считалась рафинированием общего языка с прибавлением к нему соответствующих добавок, позволяющих описывать такие взаимоотношения, для которых обычные словесные средства общения либо недостаточно точны, либо слишком неудобны. Говоря точнее, математический формализм квантовой механики и квантовой электродинамики попросту устанавливает правила подсчета математических ожиданий для наблюдений, производимых в хорошо определенных экспериментальных условиях, описанных с помощью представлений классической физики. Исчерпывающий характер такого описания определяется не только допускаемой формализмом свободой выбора этих условий любым возможным способом, но в равной степени и тем, что само определение рассматриваемого явления для его окончательного завершения подразумевает элемент необратимости в процессе наблюдения; тем самым выявляется существенно необратимый характер самого понятия наблюдения.

Конечно, все противоречия, связанные с дополнительным описанием в квантовой физике, заранее сняты логически согласованной математической схемой, удовлетворяющей всем требованиям соответствия. Тем не менее осознание взаимного произвола при определении любой пары канонически сопряженных величин, выражаемой принципом неопределенности Гейзенберга, сформулированного им в 1927 г., явилось решающим шагом к разъяснению проблемы измерения в квантовой механике. Действительно, с этого момента стало очевидным, что формальное представление физических величин некоммутирующими операторами непосредственно отражает взаимно исключающие взаимоотношения между операциями, с помощью которых соответствующая физическая величина определяется и измеряется.

Чтобы возникшая ситуация стала совсем ясной, следовало на основе этой аргументации разобраться в разнообразных примерах. Несмотря на то, что в квантовой физике принцип суперпозиции уже получил широкое признание, существенную направляющую роль для пристального изучения проблем наблюдения неоднократно играл классический анализ Рэлея, касающийся взаимообратных соотношений между точностью построения изображения в микроскопе и разрешающей силой спектроскопических инструментов. В связи с этими вопросами отнюдь не последнюю роль сыграло отличное знание Дарвином методов математической физики.

Отдавая должное удачной терминологии Планка, который ввел представление об универсальном «кванте действия», а также наводящему значению идеи «внутреннего спина», тем не менее следует признать, что такие представления просто относятся к взаимоотношениям между хорошо определенными экспериментальными данными, которые не могут быть выражены на основе классической манеры описания. Например, числа, выражающие квант или спин в обычных физических единицах, вовсе не имеют отношения к непосредственным измерениям классически определенного действия или момента импульса, а возможность их логической интерпретации возникает лишь при непротиворечивом использовании математического формализма квантовой теории. В частности, столь много обсуждавшаяся невозможность измерения магнитного момента свободного электрона обычным магнетометром непосредственно очевидна из того факта, что в теории Дирака спин и магнитный момент не являются результатом какого-либо изменения основного гамильтоновского уравнения движения, а появляются как следствие характерных особенностей некоммутативного операторного исчисления.

Правильная интерпретация вопросов дополнительности и индетерминизма едва ли была бы достигнута без оживленных дискуссий, в частности на Сольвеевских конгрессах 1927 и 1930 гг. На этих конгрессах Эйнштейн вызывал нас на дискуссию очень изощренной критикой, которая имела особое значение, заставляя нас глубже анализировать роль измерительных приборов в процессе измерения. Критическим пунктом, совершенно исключавшим возможность возврата к наглядному причинному описанию, было признание того, что область однозначного применения общих законов сохранения импульса и энергии принципиально ограничена; ее ограничение связано с тем обстоятельством, что любое экспериментальное устройство, позволяющее определить положение атомного объекта в пространстве и времени, подразумевает в принципе неконтролируемую передачу импульса и энергии неподвижным шкалам и синхронизованным часам, совершенно необходимым для определения системы отсчета. Физическая интерпретация релятивистской формулировки квантовой теории в конечном счете опирается на возможность осуществления всех релятивистских процедур с помощью макроскопических измерительных приборов.

Это обстоятельство особенно отчетливо выявилось в дискуссии об измеримости компонент электромагнитного поля, начатой Ландау и Пайерлсом. Этот вопрос был поднят в качестве серьезного аргумента против состоятельности квантовой теории поля. И в самом деле, детальное исследование, проведенное мной в сотрудничестве с Розенфельдом, показало, что все предсказания теории в этом отношении могут быть осуществлены, когда будет должным образом учтено то, что определение значений электрического и магнитного полей и точное знание фотонного состава поля взаимно исключают друг друга. С аналогичным положением мы встречаемся в теории позитрона, согласно которой любое устройство, способное измерить распределение заряда в пространстве, неизбежно влечет за собой неконтролируемое образование электронных пар.

Типично квантовые особенности электромагнитных полей не зависят от масштабов, поскольку две фундаментальные константы, скорость света c и квант действия h, не позволяют каким-либо образом построить величины с размерностями длины или времени. Релятивистская теория электрона включает в себя значение заряда электрона e и его массы m, и существенные характеристики явления ограничены пространственной протяженностью порядка h/mc. То обстоятельство, что эта величина все еще велика по сравнению с «радиусом электрона» e^2/mc^2, ограничивающим однозначное использование представлений классической электромагнитной теории, наводит на мысль о том, что имеется еще достаточно широкая область применимости квантовой электродинамики, хотя многие ее следствия не могут быть проверены практически существующими экспериментальными устройствами, включающими в себя столь большие измерительные приборы, что при операциях с ними и конструировании их можно пренебречь статистическими элементами. Эти же самые трудности, конечно, также не дают возможности никакого прямого исследования близких взаимодействий между фундаментальными составляющими вещества, число которых сильно возросло в результате последних открытий; исследуя взаимосвязи этих составляющих, мы должны быть поэтому готовы к новому подходу, выходящему за пределы существующей квантовой теории.

Едва ли есть необходимость подчеркивать, что все эти проблемы не возникают при описании обычных физических и химических свойств вещества, основанном на атомной модели Резерфорда; при анализе этих свойств используются только хорошо определенные свойства частиц, входящих в эту модель. Однако и здесь дополнительное описание дает адекватный подход к проблеме устойчивости атома, с которой нам пришлось сталкиваться с самого начала. Так, интерпретация спектральных закономерностей и химических связей относится к таким экспериментальным условиям, которые исключают экспериментальные условия, допускающие точный контроль за положением и смещением отдельных электронов в атомных системах.

В связи с этим важнейшее значение имеет понимание того, что плодотворное использование структурных формул в химии основано единственно на том, что атомные ядра настолько тяжелее электронов, что по отношению к молекулярным размерам неопределенностью в положении ядра можно в широких пределах пренебречь. Оглянувшись на всю историю вопроса, мы убеждаемся в том, что именно открытие того факта, что вся масса атома сконцентрирована внутри небольшой (по сравнению с протяженностью атома) области, дало ключ к пониманию совершенно необъятного экспериментального материала, охватывающего как кристаллическую структуру твердых тел, так и комплексные молекулярные системы, несущие в себе генетические признаки живых организмов.

Как известно, методы квантовой теории оказались также решающими и для выяснения многих проблем строения и устойчивости самих атомных ядер. К некоторым, возникшим в предыдущие годы аспектам таких проблем я буду еще иметь случай вернуться, когда я продолжу свой рассказ о Резерфорде; но выходило бы уже совсем за пределы этой лекции, посвященной памяти Резерфорда, подробное изложение чрезвычайно быстрого проникновения в тайны ядерного строения, обусловленного работами современного поколения физиков, как теоретиков, так и экспериментаторов. Этот процесс очень напоминает (в особенности старшим среди присутствующих здесь) постепенное раскрытие электронного строения атома в течение первых десятилетий после фундаментального открытия Резерфорда.

X

Каждый физик, конечно, знает о серии блестящих исследований Резерфорда, которые проводились им до конца своих дней с целью расширения наших сведений о свойствах и строении атомных ядер. Поэтому я упомяну здесь лишь о нескольких впечатлениях тех лет; в это время я часто имел возможность знакомиться с работами Кавендишской лаборатории, а из разговоров с Резерфордом узнавать общее направление его мыслей и проблем, занимающих как его самого, так и его сотрудников.

Глубокая интуиция Резерфорда позволила ему очень рано отдать себе полный отчет о новых необычных проблемах, связанных с существованием и устойчивостью ядер, образованных несколькими составляющими. И действительно, уже в манчестерские дни он указывал, что любой подход к этим проблемам связан с предположением о наличии между ядерными составляющими короткодействующих сил совершенно иного типа, нежели электрические силы, действующие между заряженными частицами. Поставив своей целью пролить некоторый свет на специфические ядерные силы, Резерфорд и Чадвик уже в первые годы своей работы в Кэмбридже провели обширные исследования аномального рассеяния α-частиц при близких ядерных соударениях.

Хотя в этих исследованиях было получено много важных и новых данных, становилось все более и более ясным, что для подлинного решения проблемы ядра недостаточно источников естественных α-частиц и что желательно иметь в своем распоряжении интенсивные пучки частиц высокой энергии, полученные искусственным ускорением ионов. Несмотря на уговоры Чадвика приступить к конструированию подходящего ускорителя, Резерфорд в течение нескольких лет противился тому, чтобы в его лаборатории начали такое большое и дорогостоящее предприятие. Легко понять эту позицию Резерфорда; стоит лишь вспомнить тот удивительный прогресс, который был им достигнут в прежние времена с помощью очень скромного экспериментального оборудования. Вообще попытка соревноваться с естественными радиоактивными источниками в то время должна была представляться довольно безнадежной. Однако по мере развития квантовой теории и в связи с ее первыми успешными приложениями к ядерным проблемам перспективы существенно изменились.

Сам Резерфорд уже в 1920 г. в своей второй Беккерианской лекции ясно указал на трудности объяснения испускания α-лучей из ядер на основе простых механических соображений, которые оказались очень полезными для объяснения рассеяния α-частиц ядрами; трудность состояла в том, что скорость испущенных частиц была недостаточной, чтобы позволить этим частицам при изменении направления движения на обратное снова вернуться в ядро, преодолев электрическое отталкивание. Однако вскоре выяснилась в качестве простого следствия волновой механики возможность прохождения частицы под потенциальными барьерами, и в 1928 г. Гамов, работавший в Гёттингене, а также Кондон и Герни в Принстоне на этой основе сумели дать не только общее объяснение α-распада, но даже подробно выяснить связь между временем жизни ядра и кинетической энергией испускаемых α-частиц, в полном соответствии с эмпирическими закономерностями, обнаруженными в ранние манчестерские дни Гейгером и Наттолом.

Когда летом 1928 г. Гамов присоединился к нам в Копенгагене, он был занят исследованием проникновения заряженных частиц в ядра за счет обратного туннельного эффекта. Он начал эту работу в Гёттингене и рассказал о ней Гоутермансу и Аткинсону; последние пришли к предположению о том, что источники солнечной энергии могут быть сведены

к ядерным превращениям, вызываемым ударами протонов, обладающих большими тепловыми скоростями; наличие таких протонов, согласно представлениям Эддингтона, следовало ожидать во внутренней части Солнца.

Во время короткого визита в Кэмбридж в октябре 1928 г. Гамов обсуждал экспериментальные перспективы, вытекающие из его теоретических работ с Кокрофтом, который, выполнив более подробные расчеты, убедился в возможности достижения заметных эффектов бомбардировкой легких ядер протонами с энергией значительно меньшей, чем энергия α-частиц естественных радиоактивных источников. Так как результаты казались обнадеживающими, Резерфорд принял предложение Кокрофта построить для таких экспериментов высоковольтный ускоритель. Работа по конструированию аппаратуры была начата Кокрофтом в конце 1928 г. и продолжалась в течение следующего года в сотрудничестве с Уолтоном. Первые эксперименты с ускоренными протонами они выполнили в марте 1930 г; в этих опытах они пытались обнаружить γ-лучи, испущенные в результате взаимодействия протонов с ядрами мишени, однако безрезультатно. Затем аппаратура была перестроена в связи с переходом в другую лабораторию, и, как известно, в марте 1932 г. в результате соударений протонов с ядрами лития были получены α-частицы высоких скоростей.

Эти эксперименты положили начало новой стадии чрезвычайно важных исследований, результатом которых было быстрое нарастание от года к году как наших сведений о ядерных реакциях, так и совершенства ускорительной техники. Но уже первые опыты Кокрофта и Уолтона принесли в нескольких отношениях результаты большого значения. Они не только подтвердили во всех деталях предсказания квантовой теории относительно зависимости сечения реакции от энергии протонов, но и дали возможность увязать кинетическую энергию α-частиц с массами реагирующих частиц, которые к этому времени были известны с достаточной точностью благодаря блестяще развитой Астоном масс-спектроскопии. Такое сравнение позволило впервые дать экспериментальную проверку знаменитого соотношения Эйнштейна между энергией и массой, к которому он пришел за много лет до этого на основании релятивистских аргументов. Едва ли нужно напоминать, насколько важным оказалось это соотношение при дальнейшем развитии ядерных исследований.

История открытия нейтрона Чадвиком носит на себе очень сходные драматические черты. Широту взглядов Резерфорда характеризует то, что он давно предчувствовал присутствие в ядрах тяжелой нейтральной составляющей с массой, близкой к массе протона. Как это постепенно выяснилось, эта идея могла дать объяснение открытию Астоном изотопов почти всех элементов с атомными массами, близкими к целым кратным атомного веса водорода. В связи с изучением многочисленных типов α-излучения, вызывающего ядерные расщепления, Резерфорд и Чадвик провели тщательные поиски данных, касающихся существования частиц такого сорта. Однако вся эта история достигла наивысшей точки, когда Боте и Жолио-Кюри обнаружили проникающее излучение, возникающее при бомбардировке бериллия α-частицами. Сначала это излучение было принято за некоторое излучение γ-типа, но великолепное знакомство Чадвика с многочисленными аспектами радиационных явлений позволило ему совершенно отчетливо понять, что экспериментальные данные несовместимы с этой точкой зрения.

Замечательными исследованиями, которые выявили большое количество новых черт явления, Чадвик сумел доказать, что мы наблюдаем обмен импульсом и энергией с нейтральной частицей, массу которой он определил отличной от массы протона менее чем на одну тысячную. Учитывая

ту легкость, с которой нейтроны (если их сравнивать с заряженными частицами) могут проходить через вещество без обмена энергией с электронами и проникать в атомные ядра, было ясно, какие широкие возможности создавало открытие Чадвика для наблюдения новых типов ядерных превращений. Некоторые чрезвычайно интересные случаи таких новых явлений были немедленно продемонстрированы в Кавендишской лаборатории Физером, который получил в камере Вильсона снимки, на которых было видно расщепление ядра азота в процессе выбивания α-частиц нейтронной бомбардировкой. Как известно, подхваченные многими лабораториями исследования в этом направлении привели к быстрому нарастанию наших знаний о строении ядра и процессах ядерных превращений.

Весной 1932 г. на одной из наших ежегодных конференций в Копенгагенском институте, где, как всегда, мы были рады встретить многих из наших бывших сотрудников, одним из главных обсуждавшихся вопросов был, разумеется, вопрос о значении открытия нейтрона; кроме того, особо был поднят вопрос об очевидно загадочном обстоятельстве: на великолепных снимках Ди, полученных в камере Вильсона, не наблюдалось никакого взаимодействия между нейтронами и связанными в атомах электронами. В связи с этим обстоятельством указывалось, что из-за того, что сечение рассеяния в квантовой физике зависит от приведенной массы сталкивающихся частиц, сам факт не был бы даже несовместим с предположением о короткодействующем взаимодействии между нейтроном и электроном с силой, примерно равной силе, действующей между нейтроном и протоном. Несколькими днями позже я получил письмо от Резерфорда, отчасти касающееся именно этого вопроса. Я не могу не привести это письмо целиком.

«21 апреля 1932 г.

Дорогой Бор!

Мне было очень приятно услышать о всех вас от Фаулера, когда он вернулся в Кэмбридж, и узнать о замечательной встрече старых друзей. Я с интересом узнал о вашей теории нейтрона. Я познакомился с ней в очень удачном изложении научного обозревателя «Манчестер Гардиан» Кроузера, человека вполне квалифицированного в этих вопросах. Я очень рад, что вы благожелательно относитесь к нейтрону. Я считаю, что данные в его пользу, полученные к настоящему времени Чадвиком и другими, в существенном исчерпывающе полны. Остается еще спорный вопрос о том, в какой степени производимая ионизация (или ионизация, которая могла бы производиться) может объяснить поглощение, если пренебречь столкновениями с ядрами.

Беда не приходит одна, и у меня есть для вас еще интересные новости, краткое сообщение о которых должно появиться в «Nature» на следующей неделе. Вы знаете, что у нас есть лаборатория высоких напряжений, где устойчивое постоянное напряжение может быть доведено до 600 000 вольт и выше. Там недавно исследовались эффекты бомбардировки легких элементов протонами. Протоны падали на поверхность материала, расположенную под 45° к оси трубки, а вызываемые ими эффекты наблюдались сбоку сцинтилляционным методом — экран из сернистого цинка был покрыт достаточно толстым слоем слюды, чтобы задержать протоны. В случае лития наблюдались яркие сцинтилляции, начиная примерно с 125 000 вольт, которые быстро нарастали с ростом напряжения вплоть до многих сотен в минуту при значениях протонного тока в несколько миллиампер. α-частицы, по-видимому, имели определенную длину пробега, практически не зависимую от напряжения и равную в воздухе около 8 *см*. Самое простое предположение, которое можно было сделать, состояло в том, что литий-7, захватывая протон, разламывается и при этом испускает пару обычных α-частиц. Принимая эту точку зрения, можно показать, что полное значение высвобождаемой энергии составляет около 16 миллионов электрон-вольт, и это дает правильный порядок для происходящих изменений в массах, если допустить справедливость закона сохранения энергии.

Позже будут поставлены специальные опыты, чтобы проверить природу частиц, но по яркости сцинтилляций и следам в камере Вильсона представляется весьма вероятным, что это α-частицы. В опытах, проведенных в самые последние дни, аналогичные эффекты наблюдались у бора и фтора, однако пробег частиц меньше, хотя они также похожи на α-частицы. Возможно, бор-11 захватывает протон и раскалывается на три α-ча-

стицы, тогда как фтор разламывается на кислород и α-частицу. Баланс энергии находится примерно в соответствии с этими выводами. Я не сомневаюсь, что вас очень заинтересуют эти новые результаты, которые мы надеемся в ближайшем будущем расширить.

Совершенно ясно, что α-частица, нейтрон и протон, по-видимому, будут вызывать различные типы расщепления, и возможно, что очень показательно то, что до сих пор наблюдались результаты только для $4n + 3$ элементов. Все выглядит так, как будто добавление четвертого протона ведет к немедленному образованию α-частицы и последующему распаду. Я думаю, тем не менее, что вопрос в целом скорее следует рассматривать в виде единого процесса, чем в виде отдельных ступеней.

Не могу не радоваться тому, что силы и деньги, затраченные на создание высоких напряжений, вознаграждены вполне определенными и интересными результатами. Фактически они должны были наблюдать эти эффекты на год или что-нибудь вроде этого раньше, но избрали неправильное направление. Вы легко можете представить себе, какие широкие горизонты открывают эти результаты для исследования превращений вообще.

У нас дома все благополучно, завтра я начинаю лекции. С наилучшими пожеланиями Вам и миссис Бор

всегда Ваш Резерфорд.

Бериллий обнаруживает некоторые странные явления, но это еще нужно выяснить. Возможно, я буду рассказывать об этих экспериментах на заседании Королевского общества, посвященного ядрам, во вторник 25 апреля».

Конечно, читая это письмо, нужно иметь в виду, что во время моих поездок в Кэмбридж я познакомился с ходом всех работ в Кавендишской лаборатории, так что Резерфорду не было необходимости указывать на деятельность отдельных его сотрудников. Это письмо представляет собой непосредственное выражение его бурной радости за крупные успехи тех лет и его страстное желание выяснить все их следствия.

XI

Как подлинный исследователь, Резерфорд никогда не полагался на одну интуицию, как бы далеко она его ни вела, а всегда искал новые источники познания, которые могли бы привести к неожиданным результатам. Так и в Кэмбридже Резерфорд и его сотрудники продолжали весьма энергично и на все более совершенной аппаратуре исследования по процессам α- и β-распадов. Важная работа Резерфорда и Эллиса по изучению спектров β-излучения предоставила возможность отчетливо различать между внутриядерными явлениями и взаимодействием β-частиц системой внешних электронов; это в свою очередь привело к выяснению механизма внутренней конверсии.

Кроме того, обнаруженное Эллисом непрерывное распределение электронов, непосредственно выброшенных из ядра, по энергетическому спектру поставило весьма загадочный вопрос о сохранении энергии; в конце концов ответ на этот вопрос был дан смелой гипотезой Паули об одновременном испускании нейтрино; эта гипотеза явилась предпосылкой для остроумной теории β-распада, разработанной Ферми.

Значительное увеличение точности измерений спектра α-излучения, достигнутое Резерфордом, Винн-Уильямсом и другими позволило пролить больший свет на тонкую структуру этих спектров и их связь с энергетическими уровнями остаточного ядра, образующегося после α-распада. Особым событием на ранней стадии этих исследований было открытие захвата электронов α-излучением: это явление, вслед за тем, как его впервые в 1922 г. наблюдал Гендерсон, было тщательно изучено Резерфордом в одной из его самых блестящих работ. Сейчас все знают, что эта работа, в которой содержалось много сведений о процессе электронного захвата, вновь привлекла к себе внимание несколько лет спустя после смерти Резерфорда — это произошло после открытия процессов деления тяжелых ядер под действием нейтронов, когда на первый план выступил вопрос о прохождении

ядерных осколков с большими зарядами, через вещество, для которого доминирующей особенностью является захват электрона.

Заметный прогресс как с точки зрения общей перспективы, так и с точки зрения развития экспериментальной техники был обусловлен открытием так называемой искусственной β-радиоактивности, сделанным в 1933 г. Фредериком Жолио-Кюри и Ирэн Кюри; это явление связано с ядерными превращениями, вызванными бомбардировкой α-частицами. Едва ли есть необходимость напоминать, как блестящими систематическими исследованиями Энрико Ферми по ядерным превращениям, вызываемым нейтронами, были обнаружены радиоактивные изотопы у большого числа элементов; кроме того, было получено большое количество информации, касающейся ядерных процессов, вызываемых захватом медленных нейтронов. Стоит особенно отметить, что продолжавшееся изучение этих процессов позволило выявить наиболее замечательные резонансные явления с остротой резонанса, намного превосходящей остроту пиков в сечениях реакций, вызываемых α-частицами и наблюдавшихся впервые Позе; объяснение этого явления на основе модели потенциальной ямы было дано Герни, а Гамов сразу же обратил на него внимание Резерфорда.

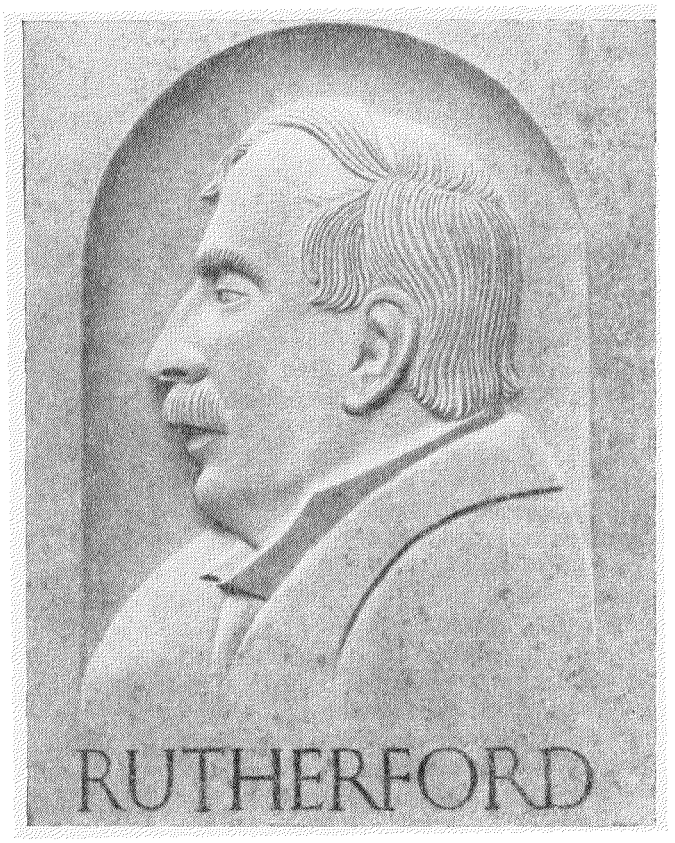
Уже наблюдения Блэккета, выполненные с помощью автоматической камеры Вильсона, показали, что во всех процессах, изученных в оригинальных опытах Резерфорда по искусственному расщеплению ядер, падающие α-частицы остаются в соединении с остаточным ядром, образующимся после вылета протона. Сейчас известно, что все типы ядерных превращений, охватывающих широкий интервал энергий, происходят двумя четко выраженными ступенями. Первая из этих ступеней — образование относительно долго живущего компаунд-ядра, а вторая — высвобождение энергии возбуждения ядра в процессе конкуренции между различными возможными способами распада и возможными процессами излучения. Эта точка зрения, к которой Резерфорд проявил самый живой интерес, была темой последнего курса лекций, который, по приглашению Резерфорда, я прочел в Кавендишской лаборатории в 1936 г.

Не прошло и двух лет после смерти Резерфорда в 1937 г., как события получили новый драматический ход после открытия процессов деления самых тяжелых элементов; это открытие принадлежало старому другу и сотруднику Резерфорда в Монреале Отто Гану, работавшему вместе с Фрицем Штрассманом в Берлине. Сразу же после этого открытия Лизе Мейтнер и Отто Фриш, работавшие тогда в Стокгольме и Копенгагене, а теперь работающие оба в Кэмбридже, сделали важный для понимания этого явления вклад, указав на то, что критическое снижение устойчивости ядра с большим зарядом является простым следствием уравновешивания сил сцепления между ядерными составляющими и силами электростатического отталкивания. Подробное исследование процессов деления, проведенное мною вместе с Уилером, показало, что многие особенности этих процессов могут быть объяснены с помощью механизма ядерных реакций, включающего в качестве первого шага образование компаунд-ядра.

В последние годы своей жизни Резерфорд нашел друга и сотрудника в лице Марка Олифанта, общий склад и работоспособность которого очень напоминали его самого. В это время открылись новые возможности для исследований, связанные, с одной стороны, с открытием тяжелого изотопа водорода ^{2}H, или дейтерия, а с другой — созданием циклотрона Лоуренсом; уже в своих первых исследованиях по ядерным расщеплениям в пучках дейтеронов Лоуренс получил много новых эффектных результатов. Классические эксперименты Резерфорда и Олифанта, в которых они бомбардировали выделенные изотопы лития протонами и дейтеронами, привели их к открытию ^{3}H, или трития, а также ^{3}He; этим самым было

положено подлинное начало интенсивным поискам приложения термоядерных реакций к реализации многообещающих источников атомной энергии.

С самого начала своих исследований радиоактивности Резерфорд ясно сознавал широкие перспективы, которые открываются этими исследованиями во многих направлениях. В частности, он давно проявлял



Барельеф Резерфорда работы
Э. Хилла в Мондской лаборатории.

глубокий интерес к возможности оценки возраста Земли и выяснению причин, обусловливающих тепловое равновесие в земной коре. Если даже освобождение ядерной энергии для технических целей оставалось делом будущего, то большим удовлетворением для Резерфорда должно было быть выяснение совершенно неизвестного до того времени источника солнечной энергии; это объяснение стало возможным в результате развития начатых им работ и было достигнуто при его жизни.

XII

Когда мы окидываем взором жизнь Резерфорда, мы видим ее, конечно, на неповторимом фоне его научных достижений, открывших новую эпоху; вместе с тем наша память навсегда сохранит обаяние его личности. В предыдущих лекциях, посвященных памяти Резерфорда, некоторые из его ближайших сотрудников вспоминали о том вдохновляющем влиянии, которое оказывали на всех его энергия, энтузиазм и очарование его порывистой манеры действия. Несмотря на обширный и все время возрастающий

объем научной и административной деятельности Резерфорда, в Кавендишской лаборатории царил тот же самый дух, который мы все так радостно ощущали в предыдущие манчестерские годы.

Очень точный очерк богатой событиями жизни Резерфорда, начиная с его детства и до последних дней, написан его старым другом еще монреальского периода, А. С. Ивом (A. S. Eve). Большое количество выдержек из поразительно большой переписки Резерфорда, приведенных в книге Ива, дает особенно яркое представление о взаимоотношениях Резерфорда со своими коллегами и учениками, рассеянными по всему свету. Ив не упустил также случая рассказать о некоторых забавных историях, которые непрерывно появлялись в связи с Резерфордом и на которые я ссылался в своем выступлении (воспроизведенным в книге Ива), когда Резерфорд во второй и последний раз посетил нас в Копенгагене в 1932 г.

Очень характерным для Резерфорда был благожелательный интерес, который он проявлял ко всем молодым физикам, с которыми ему приходилось долго или коротко иметь дело. Я очень хорошо помню подробности моей первой встречи с юным Робертом Оппенгеймером в кабинете Резерфорда в Кавендишской лаборатории; впоследствии нас с Оппенгеймером связывала очень тесная дружба. До того как Оппенгеймер появился в кабинете, Резерфорд, отличавшийся великолепной способностью угадывать талантливых людей, рассказал мне о богатом даровании молодого человека, который с течением времени завоевал себе выдающееся положение в научном мире Соединенных Штатов.

Все хорошо знают, что Оппенгеймер после недолгого пребывания в Кэмбридже, во время своих занятий в Гёттингене обратил внимание на явление прохождения частиц через потенциальный барьер, это явление послужило затем основой для объяснения α-распада Гамовым и другими.

Пробыв некоторое время в Копенгагене, Гамов в 1929 г. перебрался в Кэмбридж; здесь Резерфорд высоко ценил его многочисленные работы по интерпретации ядерных явлений и неизменно радовался необычному и тонкому юмору, который повседневно сопровождал Гамова и позже нашел свое выражение в его хорошо известных популярных книгах.

Среди многих молодых физиков, приехавших из-за границы и работавших в Кавендишской лаборатории, одной из наиболее колоритных фигур был Капица; его фантазия и талант инженера-физика вызывали у Резерфорда восхищение. Взаимоотношения между Резерфордом и Капицей были очень характерными для них обоих и были с самого начала до конца проникнуты глубокой взаимной любовью, несмотря на неизбежные резкие столкновения. Именно эти чувства были заложены в усилиях Резерфорда, направленных на поддержку работ Капицы после его возвращения в Россию в 1934 г.; со стороны Капицы они наиболее ярко выразились в письме, которое я получил от него после смерти Резерфорда.

Когда в начале тридцатых годов по инициативе Резерфорда в рамках Кавендишской лаборатории организовывалась новая Мондская лаборатория с целью осуществления некоторых обнадеживающих проектов Капицы, Капица хотел выразить свои чувства к Резерфорду в ее оформлении. Однако резной крокодил на внешней стене порождал комментарии, которые можно было умерить лишь ссылками на особенности русского фольклора в отношении жизни животных. Кроме того, барельеф Резерфорда, великолепной работы Эрика Хилла, помещенный в холле, вызывал немалое недовольство многих друзей Резерфорда. Я должен сознаться, что, оказавшись в Кэмбридже, не смог разделять недовольства, и это настолько обрадовало Дирака и Капицу, что они подарили мне точную копию барельефа; помещенный над камином моего кабинета в Копенгагенском институте, этот барельеф с тех пор каждый день радует мой глаз.

Когда в знак признания его научных заслуг Резерфорд получил звание пэра, он сразу проявил живой интерес к своим новым обязанностям члена палаты лордов, однако прямота и простота его поведения нисколько не изменились. Я не могу вспомнить случая более резкого обращения Резерфорда со мной, чем случай на обеде в клубе Королевского общества; в разговоре с одним из его друзей я упомянул его в третьем лице как лорда Резерфорда; он круто повернулся ко мне с гневным возгласом: «Вы величаете меня лордом?» («Do you lord me?»)

В течение почти двадцати лет, в течение которых Резерфорд, вплоть до самой смерти, работал с неуменьшающейся энергией в Кэмбридже, мы с женой были очень близки с ним и его семьей. Почти каждый год они радушно принимали нас в поселке Ньюгем в своем уютном домике, расположенном неподалеку от домов их старых друзей; около домика был разбит очаровательный сад, где отдыхал Резерфорд и уход за которым доставлял много радости Мэри Резерфорд. Мне вспоминаются многие тихие часы, проведенные в кабинете Резерфорда когда разговор шел не только о новых перспективах физики, но и о других вопросах, касающихся самых разнообразных сторон человеческой деятельности. В этих разговорах никто никогда не пытался преувеличить интерес своих собственных речей, потому что Резерфорд, усталый после напряженного рабочего дня, почувствовав бесплодность разговора, просто засыпал. Тогда приходилось ждать, пока он не проснется и не возобновит беседу с прежней энергией, как будто бы ничего и не произошло.

По воскресеньям Резерфорд регулярно играл по утрам в гольф с некоторыми из своих близких приятелей, а вечером обедал в Trinity College, где встречался со многими выдающимися учеными и с удовольствием вел беседы на самые разнообразные темы. Обладая ненасытным интересом ко всем проявлениям жизни, Резерфорд с большим уважением относился к своим ученым коллегам; однако мне вспоминается, как однажды, возвращаясь из Trinity, он заметил, что, по его мнению, представители так называемых гуманитарных наук заходят уж слишком далеко, когда гордятся своим полным неведением того, что происходит между моментом, когда нажимают кнопку у двери и моментом начала сигнала звонка.

Некоторые высказывания Резерфорда привели к ошибочному заключению о том, что он недооценивал значение математического аппарата для развития физики. Наоборот, по мере бурного развития той отрасли физики, изрядная часть основ которой была заложена им самим, Резерфорд часто выражал свое восхищение новыми теоретическими методами и даже проявлял интерес к философским вопросам квантовой теории. Мне особенно памятно, как в нашу последнюю встречу за несколько недель до его смерти он был захвачен новым подходом к биологическим и социальным проблемам с позиций дополнительности; с большим оживлением он обсуждал возможность опытного доказательства причин национальных традиций и предрассудков довольно необычным способом взаимообмена новорожденными между различными нациями.

Несколькими неделями позже, во время празднования столетия со дня рождения Гальвани, в Болонье мы были потрясены известием о смерти Резерфорда. Я немедленно отправился в Англию, чтобы присутствовать на похоронах. Совсем недавно я был здесь, видел Резерфорда, полного сил, бодрого как всегда, и вот теперь я снова встретился с Мэри Резерфорд при таких подлинно трагических обстоятельствах. Мы говорили с ней о замечательной жизни Эрнеста, на всем протяжении которой она была ему верным товарищем с их ранней юности, и о том, как для меня Резерфорд стал вторым отцом. В один из следующих

дней Резерфорд был похоронен в Вестминстерском аббатстве, недалеко от саркофага Ньютона.

Резерфорд не дожил до того, чтобы увидеть величайшую технологическую революцию, вызванную его открытием атомного ядра, а также его другими фундаментальными исследованиями. Однако он всегда сознавал возрастающую ответственность ученых в связи с любым увеличением наших знаний и возможностей. Сегодня мы лицом к лицу столкнулись с самой серьезной угрозой всей нашей цивилизации, чтобы серьезно подумать о том, как предотвратить гибельное использование грозных сил, оказавшихся в руках человека, и о том, как превратить это величайшее достижение в нарастающее благосостояние всего человечества. Некоторые из нас, принимавшие участие в военных исследованиях, часто вспоминали Резерфорда и по мере своих сил пытались поступать так, как он, по нашему мнению, должен был бы поступить на нашем месте.

Память, которую оставил Резерфорд о себе, служит для всех, кто имел счастье близко знать его, неиссякаемым источником мужества и стойкости. Для новых поколений, которым в грядущие годы суждено продолжать изучение атомного мира, жизнь и деятельность этого великого исследователя всегда будет служить источником вдохновения.