

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

530

ЖИЗНЬ В ФИЗИКЕ*)

ОТ РЕДАКЦИИ

В июне 1968 г. в Международном центре теоретической физики (Триест, Италия) был проведен симпозиум по проблемам современной физики. Большим событием симпозиума явились вечерние лекции, прочитанные крупными физиками, чей вклад в развитие науки трудно переоценить.

Содержание этих лекций, по нашему мнению, представляет интерес для широкого круга читателей, поскольку в них дается оценка современного состояния физики, рассказывается об истории возникновения и становления современных понятий и содержатся воспоминания о выдающихся физиках первой половины нашего столетия, таких как Арнольд Зоммерфельд, Альберт Эйнштейн, Нильс Бор и о многих других. Помимо этого, вечерние лекции отражают также отношение их авторов к различным аспектам научного творчества, что также представляет интерес для широкого круга людей.

Ниже читатель познакомится с лекцией Ганса А. Бете «Энергия на Земле и в звездах». Тексту этой лекции предшествует речь профессора Роберта Е. Маршака, который долгое время работал вместе с Гансом Бете.

Вслед за этим приведен текст лекции Поля Адриена Мориса Дирака «Методы теоретической физики» — рассказ о том, как работает физик-теоретик, и что он делает для того, чтобы лучше понять законы природы.

Лекции Вернера Гейзенберга «Теория, критика и философия» предшествуют два вступительных слова.

Представляя читателям перевод этих интересных материалов, редакция сохранила оригинальные портреты, сопровождавшие текст, и краткие биографические справки, в которых указаны основные даты из жизни и деятельности замечательных физиков современности Г. А. Бете, П. А. М. Дирака и В. Гейзенберга.

*) From a Life of Physics, Evening Lectures the International Centre of Theoretical Physics in Trieste, Vienna, IAIА, 1969. (Перевод В. К. Игнатовича).

ВЕЧЕРНИЕ ЛЕКЦИИ В ТРИЕСТЕ

Вступительное слово А. Салама

Цель проходящего сейчас симпозиума, по нашему замыслу, отчасти состоит в том, чтобы попытаться перекинуть мосты между многими, кто представляет здесь промежуточное поколение; приблизить к нам людей, кто воздвиг тот алтарь, на котором мы служим, и кем все мы издали восхищаемся. Было задумано проводить серию лекций «Жизнь в физике» параллельно с симпозиумом. Это дает возможность некоторым нашим великим старейшинам рассказать нам о том главным в физике, созданию чего они способствовали, и поделиться воспоминаниями о своей работе. Мы очень сожалеем, что профессор Вайскопф, который должен бы быть первым нашим оратором, по болезни не смог приехать. По этой причине начало лекций было отложено.

Сегодня мы имеем честь и удовольствие приветствовать профессора Ганса Бете. Профессор Роберт Маршак любезно согласился занять председательское место. Профессор Маршак не иностранец в Триесте. Он был одним из трех не старых, но мудрых людей, кто предпочел Триест многим другим местам для организации Центра в 1963 г. Я думаю, вы все согласитесь, что выбор комитета, состоявшего, кроме профессора Маршака, из профессора Ван Хоа и профессора Тиомно, был мудрым. Маршак является членом Ученого совета Центра.

ЭНЕРГИЯ НА ЗЕМЛЕ И В ЗВЕЗДАХ

Ганс А. Бете



Почетный Доктор наук Бруклинского политехнического института (1956), Денверского университета (1952), Чикагского университета (1953), Бирмингемского университета, Англия (1956), Гарвардского университета (1958). Преподаватель физики во Франкфурте (1928—1929) и в Штутгарте (1929); лектор в Мюнхене (1930—1933) и в Манчестере (1933—1934); сотрудник в Бристоле (1934—1935); ассистент в Корнелльском университете (1935—1937); профессор (1937); стипендиат Международного Рокфеллеровского фонда в Кембридже и Риме (1930—1932); штатный сотрудник радиационной лаборатории Массачусетского технологического института (1942—1943); руководитель теоретического отдела Лос-Аламосской научной лаборатории, Нью-Мексико (1943—1946); профессор по приглашению в Колумбии (1941—1948), в Кембридже (1955—1956), в Калифорнийском технологическом институте (1964); консультант Лос-Аламосской научной лаборатории (1947), исследовательской лаборатории Авко (1955), Ассоциации по развитию атомной энергии (1953), общего отдела атомной энергии в «Дженерал Дайнемикс» (1955); президент комитета научных консультантов (1955—1959).

Лауреат премии Моррисона Нью-Йоркской Академии наук (1938, 1940); медаль США «За заслуги» (1946); медаль Планка (1955); премия Энрико Ферми от Комиссии по атомной энергии США (1961). Член делегации США на Комитете по прекращению испытаний ядерного оружия, Женева (1958—1959). Член Национальной Академии (медаль Драйпера, 1948); член Физического общества (президент, 1954), Астрономического общества, Лондонского Королевского общества. Нобелевский лауреат (1967)

Р. Е. Маршак:

Ганс Бете родился в 1906 г. в Страсбурге, Эльзас — Лотарингия. Его отец, хорошо известный физиолог, работал в университете, а мать была музыкантом и сочиняла детские пьесы. Молодой Ганс учился в гимназии имени Гете — классическом учебном заведении для мальчиков, а затем в университете во Франкфурте, который окончил в 1926 г. Под руководством знаменитого физика-теоретика Арнольда Зоммерфельда в Мюнхенском университете Бете в 22 года защитил диссертацию на звание доктора философии.

В захватывающий поток новой физики Ганса Бете ввел Зоммерфельд, а завершил раннее образование Бете Энрико Ферми, с которым Бете работал в 1930—1932 гг. в Риме, будучи стипендиатом фонда Рокфеллера.

В 1935 г., после эмиграции из нацистской Германии, Ганс Бете начал сотрудничать в Корнелльском университете и с этих пор находился здесь почти без перерыва, за исключением нескольких лет, отданных военным исследованиям и многочисленным поездкам по приглашению.

Я очутился в Корнелле впервые в 1937 г. Здесь я должен был пройти аспирантуру под руководством профессора Бете. Попал я туда довольно случайно, оказавшись участником организованной Бете конференции по физике твердого тела. К тому времени, как я стал аспирантом, Бете уже проявил себя многосторонним исследователем, ибо как раз тогда он закончил свои монументальные статьи по ядерной физике и за один год переменял поле своей научной деятельности, углубившись в совершенно независимую область — в астрофизику. Здесь он опубликовал эпохальную работу под названием «Выделение энергии внутри звезд». Замысел этой работы возник под влиянием узкой теоретической конференции в Университете Джорджа Вашингтона, организованной Георгием Гамовым и Эдвардом Теллером. Ганс Бете вернулся с этой конференции (это было весной 1938 г.), захваченный проблемой происхождения звездной энергии. За несколько месяцев он проверил все мыслимые ядерные реакции, которые могли бы давать достаточное количество энергии в звездных условиях, и пришел к заключению, что для звезд главной последовательности имеются два источника энергии: углеродный цикл и протон-протонная серия реакций. Глубокий логический анализ термоядерных процессов, происходящих внутри звезд, снискал Гансу Бете в 1938 г. премию по астрономии имени А. Кресси Моррисона Нью-Йоркской Академии наук, в 1948 г. — медаль Драйпера Национальной Академии наук, в 1936 г. — медаль Эддингтона Королевского Астрономического общества и, наконец, в 1967 г. — Нобелевскую премию. Можно много говорить о важности вклада Ганса Бете в современную астрофизику, я здесь укажу только на тот факт, что громадные усилия, прилагаемые в наше время с целью добиться самоподдерживающихся реакций синтеза в плазме, являются героической попыткой повторить на Земле те термоядерные процессы, которые, как показал тщательный анализ Бете, происходят внутри звезд.

Когда началась вторая мировая война, Бете доказал, что в случае необходимости может свои физические знания использовать и для практических нужд. Сначала он работал в радиационной лаборатории МТИ над проблемами радиолокации, а к концу войны стал главой теоретического отдела Лос-Аламосской лаборатории. Я работал под руководством Бете в обеих лабораториях и могу засвидетельствовать чрезвычайные энергию и понимание, которые он вкладывал в самые разнообразные прикладные задачи.

После окончания войны, летом 1946 г., Бете и я — оба стали консультантами исследовательской лаборатории «Дженерал электрик» в Скенектэди, пытаясь приобщить эту лабораторию к новым чудесам атомной энергии. Среди нескольких «новичков», обученных нами в то время теории ядерных реакторов, были Гарвей Брукс и Генри Гурвиц, которым впоследствии суждено было по праву стать научными лидерами. А годом позже наши дороги вновь пересеклись на Шелтерских островах, на знаменитой конференции, которая вдохновила Бете на разработку нерелятивистской теории лэмбовского сдвига.

Два года тому назад я решил подготовить к печати небольшой том в честь 60-летия Бете, с намерением попытаться отразить и возродить в памяти тот огромный и разносторонний вклад, который он внес почти в каждую область физики. Отклик физиков превзошел все ожидания, а тематика оказалась настолько широкой, что для размещения статей в книге пришлось использовать классификацию Гаудсмита, разработанную им для «Physical Review».

РАДОСТЬ БЫТЬ ФИЗИКОМ

Когда Салам предложил мне принять участие в этих лекциях, он написал, что я должен буду говорить о том, что доставило мне в физике наибольшее удовольствие.

Именно это я и собираюсь сделать.

Первой работой, которая доставила мне огромное удовольствие, была статья о тормозной способности вещества. Только что появилась борновская теория атомных столкновений, и Эльзассер применил ее к рассеянию электронов на атомах водорода — как упругому, так и неупругому. Из его вычислений получались довольно громоздкие и труднообозримые формулы, которые становились тем сложнее, чем больше было квантовое число возбужденного состояния, и не было никакой возможности предвидеть, насколько они будут сложны при переходе к возбужденным состояниям в непрерывном спектре. Я подумал, что это не лучший путь и нужно бы найти нечто более совершенное. В той статье я, по существу, сделал две вещи, и одной из них было «открытие» уравнения Пуассона. Амплитуда рассеяния в борновском приближении дается формулой

$$\int v(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} d^3r,$$

где $v(\mathbf{r})$ — потенциал, который в случае упругого рассеяния естественно определяется распределением заряда в атоме, а \mathbf{q} — изменение импульса.

Как уже было сказано, я воспользовался уравнением Пуассона и, поскольку потенциал в конечном счете связан с распределением заряда, переписал борновское приближение для амплитуды следующим образом:

$$\frac{1}{q^2} \int \rho(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} d^3r.$$

Это выражение, конечно, гораздо более непосредственно связано с реальными свойствами атома, так как плотность выражается прямо через волновую функцию.

Второе, чем я воспользовался в той статье, было некое правило сумм. Конечно, это был не первый случай привлечения правила сумм. На правило сумм Томаса — Райхе — Куна *) несколькими годами раньше фактически опиралась вся квантовая механика, но для упрощения квантовомеханических выражений правила сумм использовались еще недостаточно широко. В данном случае с помощью правила сумм нетрудно получить полное сечение рассеяния. Для неупругого рассеяния $\rho(\mathbf{r})$, конечно, нужно заменить на

$$\psi_n^*(\mathbf{r}) \psi_0(\mathbf{r})$$

— произведение волновых функций начального и конечного состояний. Если теперь просуммировать сечение рассеяния по всем возбужденным состояниям, то в конечном счете получится квадрат модуля от оператора

$$\sum_j e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}} j,$$

равный в случае атома водорода единице; отсюда ясно, чему равно полное сечение с учетом возбуждения всех состояний.

*) Правило сумм Томаса — Райхе — Куна имеет вид

$$\frac{2m}{\hbar} \sum_n (E_n - E_0) z_{0n}^2 = 1,$$

где z_{0n} — матричный элемент z -компоненты дипольного момента: $z_{0n} = \langle 0 | z | n \rangle$. (Прим. перев.)

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ

Менее тривиальными оказались правила сумм при расчете энергетических потерь частицы. Выше я говорил об амплитуде рассеянной волны $F_n(q)$. Квадрат ее абсолютной величины равен сечению. Если вы теперь умножите полученное выражение на величину потери энергии падающей частицы и просуммируете по всем возбужденным состояниям, то получите вероятность рассеяния, помноженную на среднюю потерю энергии; это, по существу, дает величину потери энергии на каждом встречном атоме. К счастью, в этом случае мне удалось найти очень простое правило сумм: фактически оно оказалось даже проще, чем то, которое дает полное сечение. Если q очень мало, то матричный элемент сводится к произведению q на дипольный момент, поэтому сумма энергетических потерь есть не что иное, как сумма Томаса — Райхе — Куна, а та в свою очередь равна полному числу электронов. Но любопытно, что даже в случае не малых q сумма энергетических потерь все равно оказывается пропорциональной числу электронов. До сих пор я думаю, что это замечательный факт, и он в свое время доставил мне большое удовольствие. Вот так, исходя из теории Борна, мне удалось для энергетических потерь заряженной частицы на единицу длины пути в веществе получить замкнутое выражение.

Пожалуй, следует упомянуть, что я воспользовался этой работой, чтобы стать приват-доцентом в Мюнхене. Как вы знаете, в Германии это особый ритуал. Имея докторскую степень, вы в Германии еще не можете преподавать в университете, вам еще нужно сдать дополнительный экзамен, т. е. написать приличную статью, содержащую определенное количество утверждений, причем на обсуждение этих утверждений может собраться весь профессорско-преподавательский состав, и каждый из присутствующих имеет право опровергнуть доводы кандидата и доказать, что его тезисы никуда не годятся. Конечно, в большинстве случаев это только формальность и обычно профессора очень доброжелательны!

Через год или два я встретил в Кембридже профессора Блэккетта, и он сказал мне: «Послушайте, вы придумали теорию энергетических потерь заряженных частиц, но ваших качественных результатов мне недостаточно, мне бы хотелось знать энергетические потери количественно, и с такой точностью, чтобы я мог, измерив пробег частицы, найти ее энергию». В то время иметь в своем распоряжении достаточно хорошую электрическую аппаратуру для измерения энергии частицы по электрическому и магнитному отклонению было трудно. Поэтому представлялось наиболее доступным определять энергию частицы путем измерения величины ее пробега. Блэккетт сказал мне: «Знаете, есть статья Данкансона, который рассчитал пробег на основе старой боровской теории, но эта теория, как известно, не очень хороша. Почему бы вам не попробовать сделать то же самое с помощью квантовой механики?» Итак, мне пришлось обобщать свою теорию на случай сложных атомов. Здесь потребовалось ввести средний потенциал возбуждения атома, который был пока еще эмпирической константой, но эту константу можно было определить путем измерения пробега при какой-нибудь одной энергии. После этого соотношение между пробегом и энергией устанавливалось однозначно. Схема работала удивительно хорошо, и я много лет понемногу совершенствовал ее, т. е. вместе с моими студентами мы вычисляли поправки с учетом того, что некоторые электроны имеют большую энергию связи.

Затем через несколько лет появилась релятивистская теория столкновений Мёллера, и я применил ее к торможению частиц. Оказалось, что

она тоже очень хорошо работает и во многих отношениях подобна нерелятивистской теории. Спустя всего несколько дней я обнаружил, что и Оппенгеймер сделал те же расчеты и примерно в то же самое время. Но, пожалуй, хватит говорить о тормозной способности. Эта область доставила мне большое удовольствие, потому что здесь, исходя из первых принципов, сразу удастся получить нечто реально измеримое в эксперименте и вы оказываетесь нужными и полезными экспериментатору в его работе.

РЕШЕНИЕ В МЕТРО

Наиболее приятным периодом в моей жизни были 1930-е годы — годы становления ядерной физики. Это началось в Манчестере, когда я жил и работал с Пайерлсом, и мы оба интересовались дейтоном. В то время над дейтоном экспериментировали Чэдвик и Гольдхабер. Нас интересовало главным образом соотношение между энергией связи дейтона и рассеянием нейтронов на протонах. В то время мы нашли (это была в основном догадка Пайерлса) очень тесную связь между сечением рассеяния и энергией связи дейтона. А именно сечение рассеяния равно

$$\sigma = \frac{4\pi\hbar^2}{M} \frac{1}{E + \varepsilon},$$

т. е. постоянной, деленной на общую энергию нейтрона и протона в системе центра масс плюс энергия связи. Наша теория была прекрасна, но она, увы, не согласовалась с экспериментом! Чем лучше эксперимент, тем больше расхождение. Наконец, в 1935 г. в Нью-Йорке в поезде метро эту загадку мне разгадал Евгений Вигнер. Не знаю, может быть, я в то время слышал гораздо лучше, чем теперь, и это вполне правдоподобно, или же Вигнер говорил громче, чем теперь. Во всяком случае, я мог слышать его в метро, а он сказал: «Послушайте, все, что вы можете узнать от дейтона, это как нейтрон и протон взаимодействуют в триплетном состоянии. Но откуда вы знаете, как они взаимодействуют в синглетном состоянии? Может быть, они взаимодействуют совершенно иначе?» Итак, он решил эту задачу между Колумбийским университетом и станцией Пенсильвания, но он никогда не опубликовал ее. Ее опубликовал я, отдав ему должное, в одной из трех статей в «Reviews of Modern Physics», но мне очень жаль, что он сам ее не опубликовал.

МАССЫ АТОМОВ

Кроме энергии связи и рассеяния мы в это время занимались также фоторасщеплением дейтона. Как раз в то время этот процесс наблюдали Чэдвик и Гольдхабер. Гольдхабер и был тем человеком, который ввел меня в курс дела с атомными массами. Благодаря ему я узнал, что атомные массы находятся в страшном беспорядке. Особенно это касалось ${}^9\text{Be}$. Судя по опубликованным данным, ${}^9\text{Be}$ не должен был существовать вовсе, поскольку его масса больше, чем сумма двух α -частиц и нейтрона! Поэтому следующее, что мне предстояло сделать, это разобраться в обильном количестве экспериментального материала по энерговыделению в ядерных реакциях и навести порядок в атомных массах. При этом отбирать нужно было только самые надежные масс-спектрографические измерения. В сущности, только измерения, проведенные в Кембридже и в Гарварде, попали в эту категорию. Сопоставив значения масс и данные по реакциям, я понял, как можно составить таблицу атомных масс. Это была одна

из первых моих работ в Корнелле в 1935 г., и в составленной таблице ⁹Ве уже не имел слишком большой массы, а был абсолютно стабилен. Дейтон в то время тоже был предметом, вызывавшим удивление. Масс-спектроскопические данные указывали, что дейтон должен спонтанно распадаться на протон и нейтрон. С течением времени, однако, экспериментаторы на масс-спектрографах изменили свои показания и пришли к соглашению с результатами, полученными из ядерных реакций.

В Корнелле я работал в тесном контакте с экспериментаторами. У нас был второй циклотрон в мире. Он был построен Ливингстоном, одним из ближайших сотрудников сэра Лоуренса. Наш циклотрон был очень маленьким, потому что департамент, как мне кажется, мог позволить себе отплатить на его строительство только две или три тысячи долларов. Много лет мы гордились тем, что у нас работает самый маленький циклотрон. Мы заявляли, что имеем большее количество научных результатов на доллар и на киловатт энергии, чем какой-либо другой циклотрон.

Именно в то время я обнаружил, что экспериментаторы знают не очень много о ядерной физике. Но было чрезвычайно утомительно объяснять одни и те же вещи сначала одному экспериментатору, потом другому, поэтому я решил, что будет гораздо легче записать все на бумагу. Так появились три статьи в «Reviews of Modern Physics», которые Серге назвал Mattoncino (по-видимому, это означает «крепкий орешек»). В этих статьях я изложил большую часть того, что было известно тогда о ядерной физике. Работа оказалась очень увлекательной. У меня было два сотрудника — Конопинский и М. Е. Роуз. Они сидели вместе в одной комнате и делали все необходимые мне расчеты. Мы прерывались только тогда, когда Конопинский приходил ко мне сообщить, что пора бы и поесть.

Мы оказались в состоянии заполнить огромное количество пробелов, существовавших тогда в науке по вопросам функций возбуждения, диффузии нейтронов и энергий связи легких ядер. Кроме того, в это же время началась игра с оболочечной моделью. Оболочечная модель прекрасно работала вплоть до ⁴⁰Ca, но и только.

Было очень приятно излагать все это в обзоре, но еще большее удовольствие доставляло сознание, что проверкой изложенных нами теорий заинтересовались многие экспериментаторы. Наиболее тесное сотрудничество у нас было с Рочестерским университетом, где был большой циклотрон и поэтому можно было проверить много теоретических результатов, касающихся функций возбуждения. Примерно в это же время Бор изобрел компаунд-ядра, Брейт и Вигнер — дисперсионные формулы, а я в связи с резонансами, которые были предсказаны их теориями, сделал единственный в своей жизни собственный эксперимент. В Корнелле был тогда аспирант-экспериментатор, который измерял радиоактивность, возникающую в серебре под действием медленных нейтронов, и в нашу задачу входило доказать, что энергия этих нейтронов отличается от тепловой энергии. Мы сделали это, используя поглощение в боре. Та же методика для той же самой цели одновременно была применена и Муном с сотрудниками в Англии. Этот эксперимент фактически состоял в том, что я должен был ночью сидеть в лаборатории и считать количество отсчетов, вызванных этими нейтронами.

ТВЕРДОЕ ТЕЛО

Твердым телом мне приходилось заниматься, но должен признаться, что в то время оно было гораздо менее увлекательным занятием, чем ядерная физика. На мою долю выпало подсчитать форму ферми-поверхности

электронов в серебре или хотя бы в натрии и найти экспериментальное подтверждение своим расчетам. Сейчас мы знаем формы поверхностей Ферми для этих веществ, но в то время не было абсолютно никакого пути для их определения. Все, что мы могли измерить, были проводимость и некоторое количество термоэлектрических и магнитных эффектов, т. е. интегральные величины, которые, очевидно, не могли дать никакой нужной мне информации. К концу моей работы над твердым телом Вигнер и Зейтц изобрели мощный метод, с помощью которого можно было теоретически определять разрешенные зоны для электронов в металлах. Это был, очевидно, выход из положения, но я, к сожалению, не имел достаточной математической эрудиции, чтобы непосредственно применить их метод и получить физический результат, т. е. форму ферми-поверхности.

Есть две другие задачи в теории твердого тела, которые я решил. Первая — расщепление уровней энергии атома, когда атом помещен в кристалл с заданной симметрией. Я сделал это, в сущности, только потому, что перед этим изучил книгу по теории групп, а что-нибудь понять по-настоящему нельзя, пока не применишь это на практике и не поработаешь сам. Поскольку, однако, в теории групп Вигнер, по сути дела, уже все важное сделал, то я решил, что осталось только поместить атом в кристаллы с различного рода симметрией и посмотреть, как будут вести себя энергетические уровни. Мне говорили, что кое-кто уже использовал результаты этой статьи, но я никогда не видел, что из этого вышло.

Другая задача в теории твердого тела касалась порядка и беспорядка в сплавах. Эта проблема была предложена мне сэром Лоуренсом Брэггом во время моего пребывания в Манчестере, т. е. тогда же, когда я работал над дейтоном с Пайерлсом. Все, что мне удалось сделать в этом направлении, — это чуть-чуть усовершенствовать теорию Брэгга и Вильямса в вопросах порядка и беспорядка.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ В ЗВЕЗДАХ

Маршак упомянул одну из побочных ветвей, которая выросла из ядерной физики и из теории ядерных реакций, а именно происхождение внутризвездной энергии. Это была одна из самых увлекательных проблем, над которыми я работал. Как уже говорил Маршак, в Вашингтоне происходила маленькая конференция, организованная департаментом земного магнетизма. На этой конференции астрофизики рассказывали нам, физикам, что такое звезды, как они устроены, каковы распределения плотности и давления внутри них и т. д. А кончили они вопросом, откуда же берется энергия? Все, конечно, были согласны, что энергия берется из ядерных реакций, но из каких? От этих реакций в то время требовали слишком многого, т. е. требовали, чтобы они решали проблему образования элементов и одновременно являлись источником энергии в звездах. Только расчленив эти два требования, удалось решить проблему.

Я пришел к углеродному циклу довольно последовательно. Вейцекер первый предположил, что, по-видимому, основной реакцией в звездах является наипростейшая из всех мыслимых, а именно:



Конечно, эта реакция чрезвычайно маловероятна, поскольку составной ее частью является бета-распад, однако в звездах мы имеем почти неогра-

ниченный запас времени и к тому же очень большие плотности и достаточно высокие температуры, чтобы преодолеть потенциальный барьер. Иными словами, оказалось, что, по сути, именно эта реакция обеспечивает правильное энерговыделение внутри Солнца, и на сегодняшний день она считается основной реакцией на Солнце.

Однако астрофизики говорили, что существуют звезды гораздо более яркие, чем Солнце, температура которых немногим больше, чем солнечная. И было непонятно, откуда у этих звезд берется такое интенсивное энерговыделение. Дело в том, что протон-протонная реакция очень слабо зависит от энергии, поскольку при тех температурах, какие имеют место в центре Солнца, потенциальный барьер преодолевается довольно легко. Вероятность этой реакции ведет себя приблизительно как четвертая степень температуры, а это вряд ли может объяснить яркость, скажем, Сириуса А и более ярких звезд. Так что мне пришлось искать реакции с более высокими потенциальными барьерами. Для этого я стал систематически перебирать периодическую таблицу, по всюду получал бессмыслицу, ибо, какой бы атом я ни взял, будь то литий, бериллий и т. д., он обязательно разрушался в реакциях, и к тому же, согласно таблице распространенности, этих элементов чрезвычайно мало как на Земле, так и на звездах. Поэтому они, по-видимому, не могли дать нужного выделения энергии даже за весь промежуток времени существования Вселенной. Наконец, я подошел к углероду, и, как вы знаете, в случае углерода все оказалось, как надо. Шесть реакций происходят последовательно и в конце опять получается углерод. В ходе реакций четыре атома водорода превращаются в гелий. Конечно, эта теория была создана не в поезде по дороге из Вашингтона в Итаку (как описывается в книге Гамова). Правда, она отняла не очень много времени, пришлось потратить только около шести недель, но так много времени не отнимает даже поездка по транссибирской железной дороге.

ЛЭМБОВСКИЙ СДВИГ

И все же была одна работа, которую я сделал в поезде. Это было лэмбовское смещение. В 1947 г. Лэмб и Резерфорд обнаружили, что $2s$ -состояние атома водорода сдвинуто по энергии. У нас была превосходная конференция на Шелтерских островах, на которой обсуждались этот и другие экспериментальные результаты, а также состояние теоретической физики, омраченное бесконечностями собственных энергий. Конечно, борьба с бесконечностями длилась довольно долго. Ими занимались, в частности, Оппенгеймер и Крамерс. Крамерс указал, что, по существу, нужно просто перенормировать массу электрона с учетом его взаимодействия с собственным электромагнитным полем. Тогда наблюдаемыми окажутся только те части собственной энергии, которые не содержатся в массе частиц, и только они проявляются в эксперименте.

Мне это предложение показалось очень интересным, и я подумал, что с помощью идеи Крамерса можно, пожалуй, получить лэмбовский сдвиг. Поэтому по дороге с Шелтерских островов в Скенектэди, где располагалась фирма «Дженерал электрик», я в вагоне поезда набросал несколько элементарных уравнений радиационного взаимодействия и обнаружил, что поправки к $2s$ -состоянию или любому другому состоянию атома водорода содержат логарифм энергии. Под знаком логарифма стояла дробь, в числителе которой была некая неизвестная мне энергия, а знаменатель был нечто вроде энергии связи электрона в атоме водорода. Как видите, не понадобилось никаких усилий установить, что все выражение зависит только логарифмически от максимальной энергии

взаимодействующего кванта. Это уже обнадеживало, ведь я пользовался абсолютно нерелятивистской теорией, а мы знаем, что, например, электромагнитная масса в нерелятивистской теории расходится линейно, логарифмически она расходится только в релятивистской теории.

Естественно было думать, что релятивистская теория всегда дает нам одну степень выигрыша, а это означало бы, что логарифмическая расходимость может перейти в сходящееся выражение. По глупости или неразумению я положил максимальную энергию равной mc^2 и с этим предположением получил почти правильный результат. Конечно, я боялся, как бы не наврать на множитель типа 2 при записи взаимодействия между электроном и электромагнитным полем — в конце концов нельзя же требовать от человека, чтобы он в поезде помнил все множители. Поэтому на следующее утро, как можно раньше, я взял в библиотеке «Дженерал электрик» книгу Гайтлера и обнаружил у себя ошибку. И что же? Я получил в результате примерно тысячу мегагерц, и это был почти правильный ответ.

Однако я не чувствовал себя в силах закончить эту работу, т. е. применить релятивистскую теорию, это было сделано людьми, которые знали гораздо больше: Швингером, Фейнманом, Томонага и другими. Они решили эту задачу и показали, что квантовую электродинамику можно перенормировать самосогласованным образом. Как вы знаете, это дает конечные поправки в любом порядке теории возмущений и, в частности, почти правильную величину лэмбовского сдвига. Я слышал, что результаты здесь еще не полностью согласуются. Существует расхождение порядка двух десятых мегагерц, но что означает это расхождение, пока никто не знает *).

В ВОЕННЫЕ ГОДЫ

До сих пор я рассказывал только о чистой физике. Пожалуй, пора сказать и о своем удовольствии от прикладной физики. Это началось с работы над радаром в радиационной лаборатории МТИ, как и упомянул Маршак. Далее это продолжалось в Лос-Аламосе, где мы занимались довольно мрачной задачей — конструировали атомные бомбы. Но эта проблема была очень интересна в научном отношении: по-видимому, интереснее всего было то, что она требовала всевозможных знаний в различных областях. Прежде всего, мы должны были знать ядерную физику. Чтобы определять уйму сечений различных реакций при различных энергиях, надо было знать ядерную физику. Вайскопф был большим мастером этого дела, в Лос-Аламосе его звали Оракулом. Кроме того, мы должны были знать теорию диффузии нейтронов, здесь наиболее фундаментальную работу проделал Вигнер.

Затем потребовалась гидродинамика. В Лос-Аламосе почти с самого начала было решено, что лучший способ получить критическую массу вещества — это взять урановую сферу, окружить ее сферой взрывчатки и затем взорвать все таким образом, чтобы получилась сходящаяся к центру взрывная волна. Эта волна ударит одновременно по урановой сфере и сожмет ее в один кусок. Мы думали, что этот взрыв не только превратит урановую оболочку в компактный шар и, следовательно, быстро создаст критическую массу, но, кроме того, произведет сильное сжатие металла в шаре, т. е. будут достигнуты такие плотности, которые намного превосходят нормальную плотность металла.

*) Проведенные в последнее время эксперименты и уточнение постоянной тонкой структуры показали, что никакого расхождения нет. (Прим. ред.)

Чтобы оценить этот эффект, нужно было прежде всего найти уравнение состояния вещества в еще не виданных на земле условиях, а именно при давлении в несколько миллионов атмосфер, возникающем в сходящейся ударной волне. Затем нужно было, принимая во внимание уравнение состояния урана, рассчитать его движение под действием мощного взрывного импульса. Я думаю, что мы были первыми, кто начал широко использовать вычислительные машины для выполнения этих расчетов, и мы получили ответ. Было чрезвычайно интересно проверить и дополнить машинные расчеты аналитическими методами, и это мы тоже сделали. Одним словом, в моей жизни в физике прикладная работа, которая требовала знаний в стольких областях, была поистине интересным периодом.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ КОРАБЛЕЙ

С тех пор я постоянно занимаюсь какой-нибудь прикладной работой. Упомяну здесь только проблему возвращения космических кораблей в атмосферу. Из-за громадных скоростей возникает чрезвычайно сильное нагревание, и нужно выяснить, какой материал следует брать для теплоизоляции. Было предложено выбрать материалы типа стекла, например кварц. Однако со стеклом была та неприятность, что при определенной температуре оно становится текучим. Поэтому вопрос был поставлен так: не будет ли стеклоткань стекать, т. е. отбирать только то тепло, какое нужно для нагревания его лишь до температуры плавления? В этом случае вся идея никуда бы не годилась, так как стекло поглощало бы очень малую долю энергии — около тысячи калорий на грамм. Чтобы абсорбировалось больше энергии, необходимо было заставить вещество испаряться. Поэтому и нужно было выяснить, что проявится раньше — текучесть или испарение? Мы знали касательные напряжения (их можно было рассчитать методами аэродинамики), но задача о слое стекла с большой, но все же конечной вязкостью, находящемся под действием касательных сил и высокой неоднородной температуры, была слишком сложна для ортодоксальной аэродинамики. Моя идея состояла в том, что нужно отказаться от столь любимого аэродинамиками предположения о постоянстве вязкости. В данном случае вязкость следовало считать наиболее быстроменяющейся функцией точки. Это шло вразрез с аэродинамическими инстинктами, но мы решили проблему, и все оказалось в порядке, стекло действительно испаряется.

НОВАЯ РАБОТА НАД ПРОБЛЕМОЙ ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ

Позвольте мне теперь вновь вернуться к чистой физике, к проблеме, над которой я работал последние тринадцать лет, — к проблеме ядерной материи. Я пришел к ядерной материи главным образом потому, что развитие физики высоких энергий оказалось слишком быстрым для меня. К тому времени, когда я успевал усвоить новейшие методы физики высоких энергий, они устаревали, так что гнаться за ними оказалось не по зубам старому человеку, особенно если этому человеку кроме исследований приходится заниматься еще и многими другими делами. Поэтому я выбрал себе ядерную материю и начал с того, что попытался понять теории Бракнера. Они были очень туманными. Я потратил субботний выходной день, пытаясь понять, что он имел в виду; затем записал то, что, мне казалось, он имел в виду, и он согласился, что имел в виду именно это. Я также нашел себе очень способного аспиранта в Кембридже Голдстоуна, который привел теорию Бракнера к приемлемому виду. Голдстоун обратился вновь

к диаграммам Фейнмана и шаг за шагом доказал теорию Бракнера, показав, что можно получить самосогласованную систему приближений.

После этого нужно было применить теорию к чему-нибудь конкретному. Сначала мы решили получить уже известные результаты, такие, как энергию связи ядерного вещества, которая составляет 16 миллионов вольт на одну частицу, и плотность ядерной материи. Мы еще не кончили эту работу, но подошли довольно близко к правильному результату. Приписав разумное взаимодействие двум нуклонам, мы получили энергию связи около 13,5 *Мэв*. Откуда взять еще 2,5 *Мэв*, я не знаю, может быть, они получаются, если в ядерные силы ввести зависимость от скорости. По сути дела, мы считаем ядерные силы статическими всегда только потому, что это простейшее конкретное предположение, какое можно сделать, а не потому, что мы в этом уверены.

Вычисление энергии связи служит только для того, чтобы опробовать метод, т. е. показать, что с его помощью можно рассчитывать известные величины и получать правильный ответ, но на самом деле желательно было бы, конечно, получить неизвестные величины, которые не так-то легко измерить экспериментальным путем. Задача, которая меня занимала последние три года из четырех лет, состоит в том, чтобы сделать первый шаг к конечным ядрам, т. е. рассмотреть полубесконечное ядро, которое имеет поверхность. Многими различными путями мы рассчитывали форму и толщину ядерной поверхности, и я счастлив сказать, что в прошлый понедельник мой студент, занятый этим делом, получил хороший ответ. Его ответ согласуется с толщиной поверхности 2,4 *ферми*, которая наблюдалась в электронном рассеянии стэнфордской группой.

Ранее нам удалось получить правильную поверхностную энергию, т. е. константу в формуле Вейцекера, которая имеет отношение к поверхностной энергии. Мы получили для нее исключительно хороший результат, который согласуется с экспериментом в пределах точности эксперимента и теории. Теперь мы пытаемся проделать то же самое с реальным ядром типа ^{208}Pb , которое имеет разное число нейтронов и протонов и поэтому требует учета кулоновской энергии и энергии симметрии. Сейчас у нас есть некоторые указания на то, что форма зарядового распределения имеет вид бутылки. Это, кажется, хорошо согласуется с экспериментами по электронному рассеянию и по рентгеновским уровням мюонных атомов.

Кроме того, мы, конечно, занимаемся и реальными конечными атомами, пытаюсь развить методы расчета конечных ядер. Здесь можно начать либо с определения фундаментального ядерного потенциала, либо с промежуточного шага (и этот подход мне больше нравится), а именно использовать уже полученные результаты, касающиеся ядерной материи при всевозможных плотностях. Отсюда мы пытаемся получить простую и надежную теорию конечного ядра, чтобы найти ответ на вопрос, почему то или иное ядро более устойчиво в продолговатом виде, тогда как другое более устойчиво в сферическом, причем мы хотим, чтобы разность энергии между различными формами и энергетическими уровнями можно было получить из основных принципов. Большая часть из этого уже сделана Джерри Брауном в Принстоне, который много работал над взаимодействием нуклонов в замкнутых оболочках, приняв за основу реалистическое межнуклонное взаимодействие.

Вот чем приходилось мне заниматься в своей жизни, вот что доставляло мне большое удовольствие, и я хотел бы пожелать вам получать от физики такое же удовольствие, какое получал от нее и я.

МЕТОДЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Поль Адриен Морис Дирак
(Кембриджский университет, Англия)



Родился в Бристоле 8 августа 1902 г.

Образование: коммерческая средняя школа в Бристоле, Бристольский университет. Бакалавр технических наук (1921). Доктор философии (1926 г.). Профессор математики в Кембридже с 1932 г. Член Королевского общества с 1930 г. Награды: медаль Королевского общества, член Ватиканской Академии наук (1961), Нобелевская премия (1933).

Я попытаюсь дать вам некоторое представление о том, как работает физик-теоретик, т. е. о том, что он делает, чтобы попытаться лучше понять законы природы.

Он может заглянуть в прошлое и посмотреть, что было сделано раньше. При этом в глубине души он всегда лелеет надежду найти какой-нибудь намек или извлечь урок, которые помогут разрешить стоящую перед ним проблему. Проблемы, которые требовали решения в прошлом, многими нитями связаны с проблемами наших дней, и изучение плодотворных методов прошлого может оказаться полезным и для настоящего.

Можно выделить два главных подхода в теоретической физике. Один из них исходит из эксперимента. В этом случае теоретик поддерживает тесный контакт с физиками-экспериментаторами, читает обо всех полученных результатах и пытается охватить их экономной и удовлетворительной схемой.

В другом подходе главным является математика. Теоретик критически исследует существующую теорию. Он пытается выделить едва заметные дефекты и устранить их. Вся трудность заключается в том, чтобы устранить неудовлетворительные места, не причинив ущерба большим достижениям теории.

Вот таковы два основных подхода, но, конечно, жесткую грань провести между ними нельзя. Между этими двумя крайними подходами существует целая градация.

По какому пути следовать, в большой степени зависит от объекта изучения. В том случае, когда о предмете ничего не известно и требуется

осваивать абсолютно новую область, волей-неволей приходится придерживаться эксперимента. В новой области сначала просто собираешь и классифицируешь экспериментальные данные.

Посмотрим, например, как в прошлом веке была создана периодическая система элементов. Сначала происходило накопление и классификация экспериментальных фактов. Затем после того, как возникла система, началась ее проверка. К тому времени, когда система была почти завершена, вера в нее уже настолько окрепла, что стало возможным предсказывать новые элементы, которые должны были заполнить существовавшие тогда пробелы. Все эти предсказания оказались верными.

В последнее время очень похожая ситуация имела место с новыми частицами в физике высоких энергий. Частицы удалось настолько удовлетворительно систематизировать, что там, где обнаруживался пробел, можно было предсказывать открытие частицы, заполняющей пробел.

В любой области физики, где мало что известно, приходится следовать за экспериментом, чтобы не попасть в плен безудержных спекуляций, которые почти наверняка окажутся ложными. Я не хочу полностью опорочить умозрительный образ мышления. Он может оказаться и занимательным, и полезным, даже будучи ошибочным. Необходимо всегда держать разум открытым для новых идей, т. е. нельзя полностью отвергать спекуляции, но в то же время нужно быть очень осторожным, чтобы не дать себе увязнуть в них.

КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ УМОЗРИТЕЛЬНЫЕ ТЕОРИИ

В одной области физики имеется слишком много спекулятивного — это в космологии. Здесь очень мало твердо установленных фактов, на которые можно было бы опереться, и все-таки теоретики строят всевозможные модели Вселенной и для этого используют предположения, рожденные их собственной фантазией. Вероятно, все эти модели ошибочны. Обычно предполагается, что законы природы всегда были такими, каковы они сейчас. Для этого нет никаких оснований. Законы могут меняться, и, в частности, величины, которые считаются мировыми константами, могут тоже зависеть от космологического времени. Эта зависимость была бы роковой для конструкторов моделей.

По мере роста количества знаний об объекте, когда становится крепче почва под ногами, можно все более переходить к математическому образу действия. При этом побудительным мотивом для теоретика становится жажда математической красоты. Физик-теоретик принимает требование математической красоты как символ веры. Безусловной необходимости для этого нет, но в прошлом она сослужила хорошую службу. Например, главной причиной широкой популярности теории относительности является ее красота.

При математическом подходе можно держаться двух основных направлений:

- 1) пытаться устранить несообразности теории;
- 2) пытаться объединить теории, которые первоначально были разобцены.

ПЛОДОТВОРНОСТЬ МЕТОДА

Существует много примеров, когда последователи первого направления добивались успеха. Максвелл, исследуя несогласованность электромагнитных уравнений, в свое время пришел к понятию тока смещения и к теории электромагнитных волн. Планк, изучая трудности с излучением

черного тела, пришел к понятию кванта. Эйнштейн, заметив трудности в теории равновесия атома с излучением черного тела, пришел к понятию индуцированного излучения, что привело к современным лазерам. Но наиболее яркий пример — это открытие Эйнштейном его закона гравитации, которое произошло из-за необходимости совместить ньютоновскую гравитацию со специальной теорией относительности.

Второй путь на практике не доказал своей большой плодотворности. Казалось бы, гравитационное и электромагнитное поля, два известных в физике поля с большим радиусом действия, должны быть тесно связаны, однако Эйнштейн потратил много лет на то, чтобы объединить их — и безуспешно. По-видимому, прямая попытка объединить разобщенные теории, если нет никакой несогласованности, за которую можно было бы зацепиться, сопряжена со слишком большими трудностями, и если успех в конечном счете приходит, то только косвенным путем.

Какой подход выбрать — экспериментальный или математический, — в большей мере зависит от объекта исследований, но и не только от него. Это также зависит от человека, что хорошо видно на примере открытия квантовой механики Гейзенбергом и Шрёдингером.

Гейзенберг исходил из экспериментальных данных в области спектроскопии, которые к 1925 г. были накоплены в громадном количестве. Почти весь этот материал, за исключением небольшой доли, касающейся относительных интенсивностей линий внутри мультиплетта, оказался бесполезным. Только гений Гейзенберга мог выудить необходимое из огромного избытка информации и расположить это необходимое в естественную схему. Таким путем он пришел к матрицам.

Подход Шрёдингера был совершенно иным. В его исследованиях математика была главным. В противоположность Гейзенбергу, он не очень хорошо знал новейшие спектроскопические данные, но в глубине души вынашивал идею, что спектральные частоты должны получаться из уравнения как собственные значения, так же как получаются частоты колеблющейся пружины. Он долго обдумывал эту идею, пока в конце концов ему не удалось косвенным образом найти правильное уравнение.

РОЛЬ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ТЕОРИИ

Чтобы понять атмосферу, в которой работали в то время физики-теоретики, нужно представить себе огромную притягательную силу, которой обладала теория относительности. Теория относительности буквально встряхнула научный мир, вспыхнув в конце долгой и трудной войны. Каждый хотел забыть напряжение войны и жадно примыкал к новому образу мышления, новой философии. Энтузиазм был абсолютно беспрецедентным в истории науки.

На фоне этого энтузиазма ученые пытались решить загадку стабильности атомов. Шрёдингер, как и все другие, тоже был захвачен новыми идеями, поэтому квантовую механику он пытался сформулировать релятивистски. Все должно было быть выражено в терминах пространственно-временных векторов и тензоров. К сожалению, те времена еще не созрели для релятивистской квантовой механики, и в результате открытие Шрёдингера задержалось.

Шрёдингер исходил из красивой идеи де Бройля, связывающей релятивистским образом волну и частицу. Идея де Бройля относилась только к свободным частицам, а Шрёдингер пытался обобщить ее на электрон, связанный в атоме. В конце концов ему удалось это сделать, придерживаясь релятивистских правил. Но, когда он применил свою теорию к атому водорода, оказалось, что с экспериментом она расходится. Расхождение

возникло из-за того, что он не учел спин электрона. Тогда о нем еще ничего не знали. Потом Шрёдингер заметил, что его теория правильна в нерелятивистском приближении, и ему пришлось примириться с тем, чтобы опубликовать свою работу в «неполноценном» варианте, и он сделал это только после нескольких месяцев раздумий.

Мораль этой истории такова, что не следует пытаться сделать слишком много за один присест. Нужно отделить трудности в физике одну от другой, развести их как можно дальше и затем разрешать их поодиночке.

Гейзенберг и Шрёдингер дали нам две квантовые механики, которые, как вскоре было показано, оказались эквивалентными. Они оказались двумя представлениями, связанными определенным математическим преобразованием.

Я примкнул к квантовой механике на заре ее возникновения и выбрал чисто математический подход. Исходя из крайне абстрактной точки зрения, я взял за основу новой динамики некоммутативную алгебру, которая уже была заложена в гейзенберговских матрицах, и посмотрел, как можно записать с ее помощью классическую динамику. Другие люди работали над той же проблемой с иной точки зрения, и мы получили эквивалентные результаты примерно в одно и то же время.

ПЛОДОТВОРНЫЙ ОТДЫХ

Мой опыт показывает, и мне хотелось бы об этом упомянуть, что лучшие идеи приходят в голову обычно не тогда, когда к этому прилагаешь большие усилия, а тогда, когда находишься в более расслабленном состоянии. Профессор Бете рассказал нам, как к нему приходили идеи в поезде и как он успевал обрабатывать их до конца пути. У меня было не совсем так. Я обычно по воскресеньям совершал в одиночестве далекие прогулки и во время этих прогулок стремился спокойно обдумать сложившуюся ситуацию. Это оказывалось очень плодотворным, даже несмотря на то (а может быть именно потому), что основной целью прогулки был отдых, а не работа.

Именно в одной из таких прогулок меня осенила мысль о возможной связи между коммутаторами и скобками Пуассона. Я не знал тогда достаточно хорошо, что такое скобки Пуассона, и поэтому не был уверен в справедливости этой идеи. Вернувшись домой, я обнаружил, что у меня нет ни одной книги, объясняющей скобки Пуассона. Пришлось нетерпеливо дожидаться открытия библиотек на следующее утро, чтобы проверить идею.

С развитием квантовой механики создалась любопытная ситуация в теоретической физике. Основные уравнения — уравнение движения Гейзенберга, коммутационные соотношения и шрёдингеровское волновое уравнение — были открыты, а их физическая интерпретация все еще была не ясна.

Приписывать динамическим переменным такой же смысл, как и в классической механике, оказалось невозможным из-за их некоммутативности, и найти точный смысл и способ применения новых уравнений представляло собою проблему.

Эта проблема решалась не прямым натиском. Сначала изучались примеры, такие, как нерелятивистский атом водорода и комптоновское рассеяние, и находились специальные методы для решения этих примеров. Постепенно эти методы обобщались, пока, наконец, через несколько лет не пришло полное понимание теории в ее сегодняшнем варианте с принципом неопределенности Гейзенберга и с вероятностной интерпретацией волновой функции.

На первых порах быстрый прогресс происходил только в нерелятивистской квантовой механике, но, конечно же, никто не мог оставаться довольным подобным ходом вещей. Правда, для отдельного электрона уже было известно релятивистское уравнение Шрёдингера, которое, будучи перекрыто Клейном и Гордоном, носит теперь их имя, однако общепринятой вероятностной интерпретации квантовой механики это уравнение не поддавалось.

ОТ ТЕНЗОРОВ К СПИНОРАМ

Релятивизм в том виде, как он тогда понимался, означал, что все релятивистские теории должны оперировать только с тензорами.

На этой основе нельзя было придумать ничего лучше уравнения Клейна — Гордона. Большая часть физиков приняла теорию Клейна — Гордона как лучшую из возможных релятивистскую квантовую теорию отдельного электрона, но меня не удовлетворяло противоречие теории общим принципам, и я беспокоился до тех пор, пока, наконец, не нашел решение.

Оказалось, что тензоры не являются адекватным аппаратом и нужно вместо них ввести другие, двузначные величины, называемые теперь спинорами. Те люди, которые хорошо знали тензоры, были не в состоянии порвать с ними и думать о чем-нибудь более общем, мне же удалось это сделать только потому, что общие принципы квантовой механики мне были дороже тензоров. Эддингтон был очень удивлен, когда узнал, что без тензоров можно обойтись. Нужно всегда быть начеку, чтобы не оказаться в плену одностороннего образа мышления.

Введение спиноров привело релятивистскую теорию к согласию с общими принципами квантовой механики и, кроме того, объяснило спин электрона, хотя это не входило в первоначальную цель работы. Но затем возникла новая проблема — проблема отрицательных энергий. Теория была симметрична относительно положительных и отрицательных энергий, в природе же осуществляются только положительные энергии.

Как часто случается в математическом подходе, решение одной проблемы порождает другую. Вы можете подумать, что в результате нет никакого прогресса, но это не так, потому что вторая трудность отодвинута гораздо дальше, чем прежняя. Может случиться, что вторая трудность имела всегда и с разрешением первой только всплыла на поверхность.

Именно так обстоит дело с отрицательной энергией. Все релятивистские теории были симметричны относительно положительных и отрицательных энергий, но первоначально из-за более серьезных недостатков этот факт оставался незамеченным.

Проблема отрицательных энергий разрешается, если предположить, что все состояния с отрицательной энергией в вакууме заполнены. Тогда мы приходим к совместной теории электронов и позитронов. И таким образом продвигаемся еще на один шаг в своих знаниях, но трудность возникает снова, на этот раз в связи со взаимодействием электрона с электромагнитным полем.

Если аккуратно записать уравнения, которые, как мы верим, должны описывать взаимодействие, и попытаться решить их, то для величин, которые должны быть конечными, получаются расходящиеся интегралы. Опять же эта трудность существовала все время, но до поры до времени не проявлялась в теории и только теперь обнаружилась во всей силе.

НА ЛОЖНОМ ПУТИ?

При классическом описании взаимодействия точечного электрона с электромагнитным полем трудности возникают из-за сингулярностей поля. Эти трудности были известны еще со времен Лоренца, который первым вывел уравнения движения электрона. На заре квантовой механики Гейзенберга и Шрёдингера были надежды, что в новой механике никаких подобных неприятностей не случится. Однако теперь стало ясно, что надежды не оправдались. Старые трудности перевоплотились в новые — в расходимости квантовой электродинамики, квантовой теории взаимодействия электронов с электромагнитным полем. Они только слегка модифицировались бесконечностями, связанными с морем электронов отрицательных энергий, но остались по-прежнему доминирующей проблемой.

Расходимости оказались довольно крепким орешком. Двадцать лет не удавалось достигнуть никакого прогресса. Но затем, после открытия и объяснения лэмбовского смещения, произошел некоторый сдвиг. Это привело к качественному изменению всей теоретической физики. Были созданы удивительно хорошо работающие правила вычитания бесконечностей, которые позволяли получать вполне определенные остатки и сравнивать их с экспериментом. И все же это были только правила, а не строгая математика.

Большая часть физиков наших дней кажется вполне удовлетворенной такой ситуацией, но я — нет. Я считаю, что теоретическая физика в таком виде идет по ложному пути, поэтому успокаиваться не следует. Есть некоторое сходство между ситуацией сейчас и той, которая имела место в 1927 г., когда большая часть физиков была удовлетворена уравнением Клейна — Гордона и отрицательные вероятности, возникающие в связи с этим уравнением, не беспокоили их.

Мы должны отдавать себе отчет в том, что вычитание бесконечностей из наших уравнений — это большой порок, нам следовало бы во что бы то ни стало вернуться к основным понятиям логики. Решение этой проблемы могло бы привести к существенному прогрессу. Квантовая электродинамика — это наиболее исследованная область физики, и нужно прежде всего навести порядок в ней, иначе в других полевых теориях мы не можем надеяться на успех. Другие же теории будут пока продолжать развиваться на экспериментальной основе.

Давайте посмотрим, что можно предпринять для усовершенствования современной квантовой электродинамики. Мы обязательно должны придерживаться стандартного образа действия и пренебрегать только теми величинами, в которые мы верим, что они малы, даже если для веры этой имеются только довольно шаткие основания.

Чтобы как-то обходиться с бесконечностями, нам приходится пользоваться обрезанием. Нам приходится пользоваться им всюду в математике, где встречаются ряды или интегралы, которые не являются абсолютно сходящимися. После того как обрезание введено, мы можем устремлять его все дальше и дальше к бесконечности и переходить к пределу, который, вообще говоря, зависит от способа обрезания. Однако можно пойти по иному пути и оставить предел обрезания конечным. В этом случае нужно найти величины, которые нечувствительны к пределу обрезания.

Расходимости в квантовой электродинамике происходят от высокоэнергетических членов энергии взаимодействия между частицами и полем. Обрезание означает, что вводится некоторая энергия, скажем g , выше которой все члены энергии опускаются. Оказывается, что устремлять g к бесконечности без того, чтобы не разрушить всю логическую схему решения нельзя. Приходится сохранять обрезание конечным.

При этом релятивистская инвариантность теории оказывается нарушенной. Это, конечно, жаль, но все же это меньшее зло, нежели полное пренебрежение логикой. В результате наша теория оказывается несправедливой для высокоэнергетических процессов, т. е. процессов в области энергий, сравнимых с g , однако в низкоэнергетической области она все же может давать хорошее приближение.

Из физических соображений следует ожидать, что g , по-видимому, должно быть порядка нескольких сотен $M\bar{e}$, так как именно при этих значениях энергии квантовая электродинамика перестает быть внутренне замкнутой и в игру вступают другие физические частицы. Это значение g удовлетворительно для теории.

При обрезании на конечном пределе требуется найти такие физические величины, которые нечувствительны к способу и пределу обрезания. Шрёдингеровское представление в этом случае оказывается неудобным. Решения уравнения Шрёдингера (даже то, которое описывает вакуумное состояние) очень чувствительны к обрезанию. Но если все расчеты производить в гейзенберговском представлении, то можно получить результаты, которые нечувствительны к обрезанию.

Например, таким способом можно получить лэмбовский сдвиг и аномальный магнитный момент электрона. Результаты получаются такими же, как и методом вычитания бесконечностей, который для этой цели был применен примерно двадцать лет назад. Но теперь все получается логически правильно, согласно стандартному приему математики, когда отбрасываются только малые величины.

Однако поскольку шрёдингеровским представлением при этом пользоваться нельзя, то прибегать к общепринятой интерпретации квантовой механики и привлекать для этой цели квадрат модуля волновой функции тоже нельзя. Нужно проложить путь к новой физической интерпретации, которая была бы применима к представлению Гейзенберга. Нынешняя ситуация с квантовой электродинамикой напоминает мне ту, которая была в элементарной квантовой механике на заре ее становления, когда уравнения движения уже были, а общей физической интерпретации еще не было.

Следует отметить некоторые характерные особенности, возникающие при расчете лэмбовского смещения и аномального магнитного момента. В исходные уравнения входят параметры m и e , обозначающие массу и заряд, но эти параметры не равны наблюдаемым физическим величинам. Если обозначения m и e сохранить за наблюдаемыми величинами, то в исходные уравнения вместо m и e следует подставить $m + \delta m$ и $e + \delta e$, где δm и δe — малые поправки, рассчитывать которые мы умеем. Эта процедура известна под названием перенормировки.

ТРУДНОСТЬ В КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ

Производить подобное изменение в исходных уравнениях не запрещено, ибо исходные уравнения для теории могут быть выбраны какими угодно.

Вам может показаться, что работа физика-теоретика исключительно легка, если он может за исходные предположения выбирать любые, какие ему заблагорассудится, но вся трудность состоит в том, что во всех приложениях теории начальные послышки меняться не должны. Это очень ограничивает свободу действий. Перенормировка разрешается потому, что это простое преобразование можно производить универсально повсюду, где есть заряженные частицы, взаимодействующие с электромагнитным полем.

Однако в квантовой электродинамике все еще остается трудность, связанная с собственной энергией фотона. Чтобы справиться с нею,

требуется в исходных уравнениях произвести гораздо более сложное преобразование, нежели простая перенормировка.

Конечная цель состоит в таком выборе исходных уравнений, чтобы из них можно было вывести всю атомную физику. Пока что мы далеки от этой цели. Единственный путь к ее достижению лежит в усовершенствовании физики низких энергий, т. е. квантовой электродинамики, с последующим переходом ко все более и более высоким энергиям. Однако современная квантовая электродинамика не удовлетворяет строгим стандартам математической красоты, которые можно было бы предъявить к фундаментальной физической теории, и это заставляет подозревать, что основные идеи требуют еще коренного пересмотра.

ТЕОРИЯ, КРИТИКА И ФИЛОСОФИЯ

Вернер Гейзенберг

(Институт физики и астрофизики им. Макса Планка, Мюнхен, ФРГ)



Родился в 1901 г.

Образование: Мюнхенский и Гёттингенский университеты. Профессор теоретической физики в Лейпцигском университете (1924—1941). Директор Физического института им. кайзера Вильгельма и профессор Берлинского университета (1941—1945). Директор Физического института им. Макса Планка и профессор Гёттингенского университета (1946—1958). Директор института физики и астрофизики им. Макса Планка и профессор Мюнхенского университета (с 1958).

Член Лондонского Королевского общества, Лондонского физического общества, Американского философского общества, Академии Гёттингена. Упсалы, Берлина, Бухареста, Осло, Халле, Лейпцига, Мюнхена, Мадрида, Копенгагена, Рима, Амстердама, Хельсинки, Ватиканской Академии наук.

Президент фонда Александра Гумбольдта.

Нобелевский лауреат (1932).

А. Салам:

В 1748 г. шахиншах Персии Надир-Шах вторгся в Индию и устремился к Дели. Он нанес несколько жестоких поражений Великому Моголу Индии. Дели покорилось, и два короля встретились для мирных переговоров. Перед визирем возникла серьезная дилемма дипломатического этикета. Дилемма состояла в том, кому первому преподнести чашу вина. Если он поднесет ее сначала своему владыке, то взбешенный перс может выхватить свой меч и отсечь визирю голову. Если же он преподнесет чашу сперва персидскому захватчику, то будет оскорблен его собственный владыка. После минутного замешательства Великий визирь внезапно нашел блестящее решение. Он поставил золотой поднос с двумя чашами перед собственным владыкой и удалился, промолвив: «Ваше высочество, сегодня я не достоин чести разливать вино. Только король может прислуживать королю». Так же и я сегодня обращаюсь с просьбой к профессору Дираку представить профессора Вернера Гейзенберга.

П. А. М. Дирак

У меня есть наиболее веские причины быть почитателем Вернера Гейзенберга. Мы учились в одно время, были почти ровесниками и работали над одной и той же проблемой. Гейзенберг преуспел там, где у меня были неудачи. К тому времени накопилось огромное количество спектроскопического материала, и Гейзенберг нашел правильный путь в его лабиринте. Сделав это, он дал начало золотому веку теоретической физики, и вскоре выполнять первоклассные работы имел возможность даже второразрядный студент. Позднее мне выпала удача проделать с ним большое путешествие.

В Японии, где нас встречали очень гостеприимно, я был свидетелем того, какой он замечательный альпинист и каким превосходным чувством высоты он обладает. Нам нужно было взобраться на высокую башню, наверху которой была площадка, окруженная каменной балюстрадой. На каждом из четырех углов балюстрады каменная кладка слегка была приподнята, и Гейзенберг взобрался сначала на балюстраду, а затем на эту каменную кладку.

Ни на что не опираясь и не замечая громадной высоты, он стоял на площадке около шести квадратных дюймов и спокойно созерцал развернувшуюся перед ним панораму.

ПЕРВЫЕ ШАГИ В ФИЗИКЕ

Я, право, очень признателен Дираку за столь любезное предисловие. Мне бы хотелось связать воспоминания о старых временах в физике с вопросом о методах, которые используются в теоретической физике. По этому поводу существует много точек зрения: можно пытаться создавать феноменологические теории, можно размышлять над строгими математическими схемами, можно углубляться в вопросы философии и т. д. Мне бы хотелось проанализировать все эти методы на основании моего личного опыта, который я приобрел в своей жизни в физике.

Вскоре после того, как я поступил в университет, ко мне в комнату пришел Зоммерфельд, бывший тогда профессором теоретической физики Мюнхенского университета, и спросил меня: «Вы интересуетесь атомной физикой, не могли бы вы решить одну задачку?» Я очень заинтересовался, поскольку тогда ничего не знал о физике, но он сказал, что это очень просто и напоминает скорее разгадывание кроссвордов, чем занятия строгой математикой. Задача заключалась вот в чем. Зоммерфельд только что получил фотографии спектральных линий в аномальном эффекте Зеемана (кажется, спектр был сфотографирован экспериментатором Баком в Тюбингене), и Зоммерфельд сказал мне: «Вот вы имеете эти линии, теперь попробуйте с помощью теории Бора рассчитать или угадать энергетические уровни, соответствующие этим линиям, так, чтобы каждая линия выражалась разностью между двумя уровнями, а затем сопоставить этим уровням квантовые числа, тогда вы сможете воспроизвести всю картину».

Конечно, нужно было попытаться найти точную формулу, выражающую энергию в зависимости от квантовых чисел и т. п. Первая попытка быстро закончилась катастрофой, потому что оказалось невозможным приписать квантовым числам целые значения, и приходилось вводить половинки, три вторых и т. д. Зоммерфельд был страшно шокирован этим фактом. Он был убежден, что все это чепуха, а мой друг Вольфганг Паули, который посещал тот же самый семинар, сказал мне: «Если ты вводишь полуцелые квантовые числа, тогда в скором времени тебе понадобятся четверти, потом десятые доли, и в конечном счете ты придешь к непрерывной картине, т. е. снова к классической физике». Через некоторое время этими проблемами заинтересовалось большое число людей. Это были Паули, Хенль и другие, и оказалось, что, действительно, без полуцелых квантовых чисел не обойтись. У нас была чудесная группа

молодых людей, которые все вместе занимались развитием феноменологической физики, т. е. изобретали формулы, которые могли бы воспроизводить экспериментальные результаты; так были получены формула Ланде, мультиплетная формула Зоммерфельда и Хенля и т. д.

Одна из этих попыток произвела на меня наибольшее впечатление, и я думаю, что мне следует сказать о ней, хотя бы только для того, чтобы показать ограниченность феноменологических теорий.

Зоммерфельд рассказал мне о старой статье Фогта из Гёттингена, которая была написана в начале 1913 г., раньше, чем появилась атомная теория Бора. Фогт построил в ней теорию аномального эффекта D -линий натрия. В этой теории он ввел два связанных линейных осциллятора, которые давали нужные две D -линии, и предположил взаимодействие между ними таким образом, чтобы получался нужный аномальный эффект Зеемана; при этом он даже мог объяснить эффект Пашена — Бака и интенсивности линий и вообще мог чрезвычайно хорошо воспроизводить экспериментальные результаты. Зоммерфельд попросил меня перевести эту теорию на квантовый язык, и оказалось, что это совсем нетрудно сделать. Я пришел к довольно сложным длинным формулам для энергетических уровней и интенсивностей, формулам с длинными квадратными корнями, содержащими квадрат магнитного поля, константу взаимодействия и т. д., и все же экспериментальные результаты описывались очень хорошо. Я упомянул этот случай феноменологической теории, потому что здесь было достигнуто необычайно хорошее согласие с экспериментом, но было ли здесь хоть что-нибудь общее с квантовой теорией? Через 6 лет в нашем распоряжении была квантовая механика, и мы с Иорданом попытались рассчитать те же самые энергетические уровни и интенсивности, исходя из квантовой механики. Мы получили в точности те же формулы, что и Фогт, с теми же длинными корнями и теми же интенсивностями. Таким образом, вы видите, что, с одной стороны, феноменологические теории могут давать точные результаты и, следовательно, чрезвычайно хорошее согласие с экспериментом. Однако, с другой стороны, они несколько не объясняют физическую сущность явлений, не проливают свет на то, что в действительности происходит внутри атома. Конечно, в этом случае тоже можно привести объяснение, можно сказать так: в квантовой теории, чтобы рассчитать аномальный зееман-эффект, нужно с помощью «секулярного» уравнения решить задачу о внешнем возмущении. Это секулярное уравнение соответствует системе нескольких линейных уравнений с несколькими неизвестными. Но два связанных осциллятора дают то же самое, они тоже приводят к нескольким линейным уравнениям с несколькими неизвестными; поэтому естественно, что обе теории тождественны по своему формализму, однако физическое содержание их чрезвычайно различно.

Реальная польза от этих феноменологических теорий пришла с несколько иной стороны. По ходу дела мы во многих случаях пытались сравнивать формулы, которые мы получали из эксперимента, с теорией Бора. Происходили довольно забавные вещи. Ни одну из этих формул нельзя было воспроизвести с помощью теории Бора. Но все же формулы, которые мы получали из теории Бора, в некотором отношении походили на реальные формулы; различие состояло, например, в следующем: где по теории Бора требовалось поставить квадрат углового момента, нам приходилось брать $J(J+1)$. Теперь это совершенно очевидно, так как следует из теории представлений групп. Но в те времена это выглядело довольно странно и наводило на мысль, что теория Бора в чем-то правильна, а в чем-то неправильна, и мы абсолютно не знали, что делать. Ведь в конце концов квантовое число, например угловой момент, было

определено как величина углового момента, и по классической физике казалось абсолютно невозможным, чтобы появлялось такое число, как

$$\sqrt{J(J+1)}.$$

Мы были весьма обескуражены этими результатами, но одновременно с громадным интересом изучали последние работы Бора.

Бор как раз к этому времени опубликовал работу по поводу периодической таблицы элементов, и мы узнали о сложной структуре всех элементов с десятью, двадцатью и тридцатью электронами, расположенными на разных орбитах, но нам никак не удавалось понять, каким образом Бор сумел получить эти результаты. Нам казалось, что он должен быть беспредельно гениальным математиком, чтобы решить такую невероятную проблему классической астрономии. Известно, что лучшие астрономы мира не могут решить даже проблему трех тел, а Нильс Бор в состоянии решить проблему 30 электронов или что-то вроде этого.

ПРЕДПОЛОЖЕНИЕ БОРА

После двух лет обучения, весной 1922 г., Зоммерфельд спросил меня, не хотел ли бы я сопровождать его в поездке в Гёттинген, где он должен был излагать свою теорию Бору. Эти дни в Гёттингене мы все теперь называем «фестивалем Бора». Здесь я в первый раз узнал, как человек, подобный Бору, работает над проблемами атомной физики. После того как Бор прочел свои первые две лекции, я набрался смелости выступить в дискуссии с некоторым замечанием; я просто высказал сомнение по поводу того, являются ли формулы Крамерса, выписанные на доске, точными. Из наших обсуждений в Мюнхене я знал, что мы всегда имеем дело с формулами, которые точны только наполовину, т. е. частично справедливы, а частично нет, поэтому я чувствовал, что здесь никогда нельзя быть слишком уверенным. Бор был очень благожелателен, и несмотря на то, что я был совсем молодым студентом, он, чтобы обсудить этот вопрос, пригласил меня на длительную прогулку в Хайнберг неподалеку от Гёттингена. Мне кажется, именно тогда я понял, что значит работать в совершенно новой области в теоретической физике. Первое, что я узнал, — и это буквально потрясло меня, — что Бор ничего не вычислял. Он просто угадывал свои результаты. Он знал экспериментальную ситуацию в химии, знал валентности различных атомов и знал, что его идея квантования орбит или, скорее, идея стабильности атомов, объясняемая с помощью явления квантования, согласовывалась в какой-то мере с экспериментом в химии. Исходя из этого, он просто угадывал то, что преподносил нам потом как свои результаты. Я спросил его, действительно ли он верит, что эти результаты можно получить с помощью вычислений, основанных на классической механике? Он ответил: «По этому поводу я думаю, что моя классическая модель атомов — наилучшая из возможных классических моделей». И он объяснил это следующим образом. Он сказал: «Мы проникли в новую область физики, в которой мы знаем, что старые понятия, по-видимому, не работают. Мы видим, что они не работают, так как иначе атом не был бы стабильным. С другой стороны, если мы хотим говорить об атомах, мы должны употреблять слова, а эти слова можно брать только из старых понятий, из старого лексикона. Поэтому мы находимся перед безнадежной дилеммой, мы как матросы, попавшие на далекий неизвестный берег. Они видят незнакомую страну и людей, чей язык они никогда не слышали, и поэтому не знают, как вступить с этими людьми в контакт. В той мере, в какой классические концепции работают, т. е. в той мере, в какой мы можем говорить о движении электронов, об их скоростях, энергии и т. п.,

мои модели, я думаю, корректны, или, во всяком случае, я надеюсь, что они корректны. Но никто не знает, как далеко справедлив наш язык».

Для меня это был совершенно новый образ мышления, и он изменил все мое отношение к физике. В Институте Зоммерфельда всегда казалось очевидным, что вычисления необходимы и что можно получить хорошие результаты только путем строгих расчетов.

Но вернемся к вопросу о феноменологических теориях. Беседа с Бором произвела на меня сильное впечатление. Итак, от таких классических понятий, как электронная орбита, нужно отказаться. Неважно, что мы можем воочию наблюдать электронные треки в камере Вильсона, все равно говорить о скорости, координате и т. п. не имеет смысла. Да, но если вы отказываетесь от этих слов, то больше у вас ничего не остается. Так что положение было действительно странным, но и чрезвычайно интересным. Нужно было решать: «Что же в такой ситуации делать?»

Очень скоро после беседы с Бором, кажется через полгода, я переехал в Копенгаген. Здесь я работал вместе с Крамерсом над дисперсионной теорией, и снова мы обнаружили забавное явление: формулы, которые мы выводили из теории Бора, оказывались почти правильными, но все же не совсем правильными. Постепенно вырабатывалось нечто вроде опыта, как обращаться с этими формулами, как переходить от классической физики к этим феноменологическим формулам. В то время уже возникло ощущение, что на смену классической механике должно в конце концов прийти нечто вроде квантовой механики. Квантовая механика может не очень отличаться от классической механики, но должна пользоваться совершенно иными понятиями.

В такой вот ситуации часто высказывалось мнение, что, пожалуй, теорию нужно строить, опираясь только на наблюдаемые величины. Это была вполне естественная мысль, потому что наблюдались ведь частоты и амплитуды, и эти частоты и амплитуды могли каким-то образом заменить электронную орбиту классической физики. Их полный набор дает ряд Фурье, а ряд Фурье описывает орбиту. Поэтому естественно было думать, что нужно использовать скорее эти наборы амплитуд и частот, чем орбиты.

Когда я вернулся из Копенгагена в Гёттинген, я решил снова попытаться поработать, что называется, на интуиции, а именно угадать интенсивности в водородном спектре. Теория Бора не очень хорошо предсказывала интенсивности. Но почему их нельзя предугадать? Это было ранним летом 1925 г., и я потерпел полное поражение. Формулы вышли очень сложными, и не было видно, как из них извлекать пользу. В то же самое время я чувствовал, что если бы механическая система была проще, то амплитуды можно было бы найти аналогично тому, как мы это делали с Крамерсом в Копенгагене. Поэтому я перешел от атома водорода к ангармоническому осциллятору — к очень простой модели. Именно в это время я заболел и поехал лечиться на остров Гельголанд. Здесь у меня было много времени, чтобы проделать свои вычисления. Оказалось, что перевести классическую механику в квантовую действительно очень просто. Но я должен отметить один очень важный пункт. Совсем не просто было сказать: «Давайте вместо величин, описывающих орбиты, возьмем некоторые частоты и амплитуды и для расчета будем пользоваться той рецептурой, какой мы пользовались в Копенгагене и которая впоследствии оказалась эквивалентной матричному умножению».

Было совершенно очевидно, что при этом мы имели бы схему, возможности которой гораздо шире, чем у классической теории. Она содержала бы в себе как классическую, так и квантовую теорию, но пока что она была еще слишком недоопределена и требовала дополнительных ограничений.

Оказалось, что можно заменить квантовые условия теории Бора формулой, которая по существу эквивалентна правилу сумм Томаса и Куна. После этого добавления схема неожиданно оказалась самосогласованной. Положенная в основу система постулатов стала работоспособной, энергии, как можно было видеть, оставались постоянными и т. д. Однако я был не в состоянии развить строгую математику на этой основе. Прошло немного времени, и Борн совместно с Иорданом в Гёттингене и Дирак в Кембридже сумели изобрести совершенную, замкнутую математическую схему. Дирак — очень изобретательными новыми методами с q числами, а Борн и Иордан — более каноническими матричными методами.

ЭЙНШТЕЙН О ТЕОРИИ И НАБЛЮДЕНИИ

Мне бы не хотелось сейчас говорить об отдельных деталях, пожалуй, лучше всего было бы остановиться на следующем вопросе: какие идеи оказались наиболее важными в этом научном прогрессе? Сначала я думал, что, возможно, наибольшую роль сыграла мысль об описании явлений только с помощью наблюдаемых величин. Но когда в 1926 г. в Берлине мне пришлось делать доклад о квантовой механике, Эйнштейн выслушал меня и внес поправки.

Чтобы продолжить обсуждение, Эйнштейн пригласил меня к себе домой. «Что за идеология лежит в основе вашей столь странной теории? Теория довольно привлекательна, но что вы подразумеваете под «только наблюдаемыми величинами?» Я ответил ему, что, несмотря на треки в камере Вильсона, я больше не верю в электронные орбиты. Мне кажется, что следует вернуться к тем величинам, которые реально можно наблюдать, и мне также кажется, что это именно та идеология, которой он сам придерживался в теории относительности, поскольку он отказался от абсолютного времени и ввел только время данной координатной системы и т. д. Выслушав меня, он рассмеялся, а затем сказал: «Но вы должны понимать, что это абсолютно неверно!» Я ответил: «Да, но разве не верно то, что вы сами придерживаетесь этой идеологии?» — «Конечно, — сказал он, — возможно, что я пользовался ею, и все же это чепуха!»

Эйнштейн объяснил мне, что в действительности это обходной маневр. Он сказал: «Можно ли наблюдать данное явление или нет — зависит от вашей теории. Именно теория должна установить, что можно наблюдать, а что нельзя». Его аргументы были примерно таковы: «Наблюдение означает некоторую связь между явлением и нашим пониманием явления. Что-то произошло с атомом, он излучил свет, свет попал на фотопластинку, мы видим фотопластинку и т. д., и т. п. Во всей этой цепочке событий от атома до вашего глаза и до вашего сознания вы должны предполагать, что все происходит, как в старой физике. Если вы измените теорию относительно хода этих событий, тогда, конечно, изменятся и наблюдения». Таким образом, он настаивал на том, что именно теория должна решать, какие величины наблюдаемы, а какие — нет. Это замечание Эйнштейна сильно помогло мне в дальнейшем, когда я вместе с Бором пытался обсуждать физическую интерпретацию квантовой теории, к этому я еще вернусь позже.

Еще несколько слов о моей беседе с Эйнштейном. Эйнштейн заметил, что говорить о том, будто следует принимать во внимание только наблюдаемые величины, даже опасно. Потому что каждая разумная теория должна позволять измерять не только прямо наблюдаемые величины, но и величины, наблюдаемые косвенно. Мах, например, всегда считал, что понятие атома приемлемо только с точки зрения удобства, с точки

зрения экономии мышления, он никогда не верил в реальное существование атома. В наше время каждый скажет, что это чепуха, т. е. реальное существование атома стало вполне очевидно. Более того, я думаю, что наши знания не станут богаче, если мы будем рассматривать атом просто как удобное понятие, хотя логически такая точка зрения вполне допустима. Таково было кредо Эйнштейна. В квантовой механике, например, это означало, что доступными для наблюдения являются не только частоты и амплитуды, но также, в частности, и амплитуды вероятности, и волны вероятности, и т. д., которые, конечно же, представляют собой объекты совершенно другой природы.

Мне следует еще добавить, что при изобретении новой схемы решающим является вопрос: от каких старых концепций вы можете, по существу, отказаться? В случае квантовой теории было более или менее очевидно, что вы можете отказаться от понятия электронной орбиты.

СТАБИЛЬНОСТЬ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА

Но позвольте мне оставить феноменологические теории и перейти к совершенно другому вопросу: какова польза строгих математических методов? Вы, наверное, знаете, что я отнюдь не влюблен в строгие математические методы, и мне бы хотелось объяснить, почему это так. В течение некоторого времени накануне рождения квантовой механики мне пришлось готовить докторскую диссертацию. Так как Зоммерфельд был хорошим учителем, он понимал, что мне не следует заниматься только атомной теорией. Он говорил мне: «Ничего хорошего нет в том, чтобы шлепать все время по грязи, вам обязательно нужно сделать приличную математическую работу из теоретической физики». Поэтому он предложил мне гидродинамическую задачу. Мне нужно было исследовать стабильность ламинарного потока. Он сам уже опубликовал одну работу по этому поводу. Один из его учеников даже рассматривал ламинарный поток между покоящейся и движущейся стенками, но Зоммерфельд не был удовлетворен. Этому ученику, Хопфу, не удалось найти предел стабильности.

Из опыта каждый знает, что если скорость становится слишком большой, то ламинарный поток жидкости переходит в турбулентный, хаотически возникают завихрения, и это выглядит как нарушение стабильности. Нужно было рассчитать этот предел стабильности. Зоммерфельд предложил мне рассчитать стабильность потока воды между двумя неподвижными стенками. Это была моя докторская диссертация, и я получил хороший результат, т. е., как я и думал, здесь действительно имеется предел стабильности. При достижении определенных чисел Рейнольдса поток, в согласии с экспериментом, становится нестабильным, и возникает турбулентность.

ДВАДЦАТЬ ЛЕТ СПУСТЯ

Ну что ж, я защитил докторскую диссертацию по этой теме, а через год блестящий математик Нётер опубликовала другую статью, в которой строгими математическими методами доказала, что моя задача вообще не имеет нестабильных решений; поток должен быть стабильным всюду. Это было, конечно, очень печально, особенно учитывая мою степень, и я всегда надеялся, что мне удастся опровергнуть результаты Нётер. К сожалению, я был не в состоянии сделать этого, мне только оставалось надеяться на эксперименты, поскольку эксперименты подтверждали существование предела стабильности.

В действительности понадобилось много лет, прежде чем проблема обрела ясность, и я могу упомянуть только несколько этапов. Пять лет спустя Толмин изучил другого рода поток и тоже получил предел стабильности; правда, у него был несколько иной случай, и он мог утверждать, что его задача отличается от той, которую рассматривала Нётер; поэтому математические соображения Нётер здесь неприменимы. Затем в 1944 г., т. е. через двадцать лет после моей докторской диссертации, Драйден с сотрудниками в Америке произвел очень тщательное измерение ламинарного потока между двумя стенками и перехода к турбулентности. Они обнаружили, что мои расчеты хорошо согласуются с экспериментом. В МТИ за эту задачу взялся Линь и, используя новые, более совершенные методы, он подтвердил старые результаты. Все же некоторые математики продолжали сомневаться, у нас были долгие дискуссии по этому поводу в МТИ. Тогда фон Нейман решил, что нужно использовать для этой задачи электронно-вычислительную машину. И вот была пущена самая большая вычислительная машина того времени, и оказалось, что мои старые приближенные вычисления отличаются от точного результата самое большее на 20%, и возникал вопрос: как же быть со строгой математикой? Увы, я думаю, что даже и теперь никто не знает, какая ошибка содержится в работе Нётер.

ЕЩЕ ОДНА МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОШИБКА

Но у меня был еще один случай, в котором, однако, ошибку удалось отыскать. Это было примерно в то время, когда Эдвард Теллер приехал в мой институт в Лейпциге и собрался писать докторскую диссертацию. Я не заставлял его работать над турбулентностью, так как занятие квантовой механикой к этому времени было уже почтенным делом, и предложил ему заняться ионом молекулы водорода — два протона и один электрон. Я сообщил ему, что один из учеников Бора, Буррб, опубликовал только что хорошую статью по поводу нормального состояния иона этой молекулы и полученное им значение энергии связи находится в хорошем согласии с экспериментом. Теллер должен был исследовать возбужденные состояния этой молекулы.

Несколько недель спустя Теллер зашел ко мне в комнату и сказал, что совсем недавно появилась новая статья Вильсона, в которой использовались гораздо более совершенные методы, чем у Буррб, — совсем точная математика, и Вильсону удалось доказать, что нормального состояния иона молекулы водорода не существует. Это было печально, но я сказал Теллеру, что результат должен быть ошибочным, поскольку ведь на самом-то деле молекула существует и с этим ничего не поделаешь. Однако Теллер сомневался: «Ведь вы же ничего не можете возразить против столь превосходной математики Вильсона». Мы довольно долго спорили с Теллером по этому поводу, но примерно через два месяца, как мне кажется, Теллер все же нашел ошибку в статье Вильсона, и оказалась она чрезвычайно поучительной. Ошибка состояла в следующем. Математические методы были и впрямь превосходны, но Вильсон утверждал: «Мы знаем, что шрёдингеровская функция на больших расстояниях от двух центров должна стремиться к нулю». Это правильно. «Поэтому наша аналитическая функция должна быть регулярна и иметь нуль на бесконечности» — а это уже не было верно, поскольку достаточно было, чтобы она стремилась к нулю только вдоль действительной оси, а не мнимой. Вот какого рода ошибку можно допустить, и я надеюсь, что в проблеме турбулентности у Нётер имеется ошибка такого же типа. Но этого я не знаю.

СТРОГАЯ И ГРУБАЯ МАТЕМАТИКА

Я думаю, вам теперь стало понятно, почему я всегда настроен несколько скептически по отношению к строгой математике. Может быть, нужно дать более серьезное обоснование: когда вы слишком много времени уделяете строгой математике, ваше внимание сосредоточивается на тех вопросах, которые не очень существенны с точки зрения физики, и поэтому вы отвлекаетесь от экспериментальной ситуации.

Если вы пробуете решить проблему с помощью относительно грубой математики, как мне приходилось большей частью делать, вы всегда вынуждены думать об эксперименте. И какую бы формулу вы ни написали, вы стараетесь так или иначе сопоставить ее с реальностью, тем самым вы стоите ближе к природе, чем при строго математическом подходе. Но это может быть по-разному у разных людей.

Давайте теперь вернемся назад к квантовой механике, к тому разделу новой теории, который больше всего захватывал мое воображение. Когда вы попадаете в такую новую область, то при феноменологическом подходе вы всегда вынуждены пользоваться старыми понятиями, потому что у вас нет других понятий, и развитие теории означает применение старых методов к новой ситуации. Решительный же шаг всегда довольно скачкообразен. Вы не можете рассчитывать на то, что будете приближаться к истине небольшими порциями, шаг за шагом; в некотором месте вам придется прыгнуть, вам придется отбросить старые понятия и подыскать что-нибудь новое, а затем проверить, можете ли вы плыть, стоять или что-нибудь в этом роде, но уж во всяком случае придерживаться старых понятий вам нельзя.

Это и произошло в квантовой механике. Сначала у нас была математическая схема, потом нужно было подыскать связанный с ней разумный язык. И наконец, мы могли задаться вопросом: какие понятия адекватны этой математической схеме и как нам следует описывать природу?

ОТКАЗ ОТ СТАРЫХ ПОНЯТИЙ

Самое трудное на этой стадии развития — это отказаться от некоторых важных старых понятий. Любой хороший физик охотно принимает новые концепции, но даже лучшие физики иногда неохотно расстаются с некоторыми из старых, кажущихся надежными, понятий. Это ощущение невозможности расстаться со старыми понятиями было чрезвычайно сильно и при становлении теории относительности, и даже теперь то тут, то там появляются статьи, в которых люди просто отказываются понимать специальную теорию относительности. Они не могут понять ее, потому что не в состоянии отказаться от старого понятия одновременности событий. В квантовой теории случилось примерно то же самое и наиболее ярко проявилось в дискуссиях о волновой механике Шрёдингера и квантовой механике. Я помню одну лекцию Шрёдингера и последовавшую за ней дискуссию летом 1926 г. По-видимому, мне следует упомянуть о ней, конечно же, не для того, чтобы критиковать Шрёдингера, который был первоклассным физиком, но просто для того, чтобы показать, как невероятно трудно отказываться от старых понятий. Шрёдингер читал лекцию о волновой механике. Он был приглашен Зоммерфельдом. Здесь же присутствовал физик-экспериментатор Вильгельм Вин. К этому времени не было еще общепринято, что теория Бора недостаточно удовлетворительна. Экспериментаторам в Мюнхене, например, очень не нравилась игра в квантовые уровни, квантовые скачки, они называли ее атомистикой, т. е. мистикой атома, и она им казалась столь непохожей на класси-

ческую физику, что и не стоило ее принимать всерьез. Поэтому Вильгельму Вину было очень приятно услышать новую интерпретацию Шрёдингера.

Вы знаете, Шрёдингер одно время верил, что может использовать в своей волновой механике примерно те же самые понятия, что и в теории Максвелла. Он предполагал, что волны вещества — такие же трехмерные волны в пространстве и во времени, как и электромагнитные волны, и, следовательно, собственное значение энергии является частотой собственных колебаний, а не энергией. Поэтому он верил, что можно обойтись безо всяких квантовых скачков и всего прочего, по его мнению, мистицизма. После лекции Шрёдингера я принял участие в дискуссии и высказал свое мнение, что при такой интерпретации нельзя понять даже закон Планка. Ведь, в конечном счете, закон Планка основан на настоящей квантовой теории, на прерывном изменении энергии и т. п. При этом Вин настолько рассердился на мое замечание, что среагировал следующим образом: «Мы понимаем, молодой человек, ваше сожаление по поводу необходимости забыть квантовую механику, квантовые скачки и остальное, но вы увидите, как очень скоро Шрёдингер решит все эти проблемы!»

Я упомянул этот эпизод только для того, чтобы показать, как страстно бывает отношение физиков к подобного рода вещам. Конечно, мне абсолютно не удалось убедить ни Вина, ни Шрёдингера, но в результате Бор пригласил Шрёдингера в Копенгаген. В 1926 г. Шрёдингер приехал в Копенгаген. Бор, очень благожелательный, чуткий человек, самый обходительный во всех отношениях, иногда мог быть почти фанатиком. Я помню, что, где бы Шрёдингер ни появлялся, здесь же обязательно стоял и Бор, убеждавший: «Нет, Шрёдингер, вы обязательно должны понять, обязательно!» Через два дня Шрёдингер заболел. Ему пришлось лечь в постель, жена Бора приносила ему чай, пирожки и т. п., а Бор все время сидел у его постели: «Нет, Шрёдингер, вы должны понять».

После этого Шрёдингер, наконец, понял, что с интерпретацией квантовой механики дело обстоит гораздо сложнее, чем он думал.

В Копенгагене мы тоже не очень были довольны интерпретацией. Отказаться от понятия электронной орбиты в случае атома было нетрудно, но что делать с камерой Вильсона? В камере Вильсона вы видите движение электрона вдоль трека, спрашивается, орбита это или нет?

КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОНЯТА

Много, много ночей обсуждали мы с Бором эти проблемы и часто приходили в отчаяние. Бор большей частью пытался подойти со стороны дуальности волна — частица, я же в поисках адекватной интерпретации предпочитал исходить из математического формализма. Наконец, чтобы обдумать ситуацию наедине, Бор уехал в Норвегию, а я остался в Копенгагене. Тогда-то я и вспомнил замечание Эйнштейна во время нашей беседы. Я вспомнил, как Эйнштейн сказал: «Именно теория должна решать, что может быть измерено». Отсюда легко можно было обратить вопрос и вместо «Как можно представить в квантовой механике орбиту электрона в камере Вильсона?» сказать иначе: «Не правда ли, что в природе, включая камеру Вильсона, происходят только такие события, которые можно описать с помощью математического формализма квантовой механики?» Задав себе такой вопрос, я должен был посмотреть, что же можно описать с помощью этого формализма: и тогда с легкостью выяснилось, особенно с помощью новых математических методов Дирака и Иордана в теории преобразований, что электрону нельзя приписать одновременно и точную координату, и точную скорость; между ними есть соотношение

неопределенности. Таким образом, все стало ясно. Когда Бор вернулся в Копенгаген, у него была эквивалентная интерпретация с его принципом дополнительности, и мы пришли к заключению, что теперь квантовую механику мы наконец поняли.

МЫСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ЭЙНШТЕЙНА

В 1927 г., когда Бор и Эйнштейн обсуждали эти вопросы, на Сольвеевском конгрессе нам снова пришлось туго. Почти каждый день события развивались следующим образом. Мы все жили в одном и том же отеле. Утром за завтраком появлялся Эйнштейн и предлагал Бору новый мысленный эксперимент, который мог опровергнуть соотношение неопределенности и, значит, нашу интерпретацию квантовой теории. Затем Бор, Паули и я приходили в сильное волнение, далее мы отправлялись за Бором и Эйнштейном на конгресс и там весь день обсуждали предложенную проблему. Но вечером, за ужином, большей частью Бор находил решение и давал Эйнштейну ответ, так что мы снова чувствовали себя уверенно, а Эйнштейн слегка огорчился и говорил, что он должен все это обдумать. На следующее утро он преподносил новый мысленный эксперимент, и мы снова должны были обсуждать его и т. д. Это длилось довольно много дней, и в конце конгресса копенгагенские физики стали чувствовать, что они выиграли сражение, ибо фактически Эйнштейн не мог выдвинуть ни одного серьезного возражения. Мне кажется, наиболее ярким аргументом Бора против Эйнштейна была его ссылка на общую теорию относительности. Эйнштейн изобрел эксперимент, в котором вес прибора должен был быть определен гравитационным путем, и, чтобы показать справедливость соотношения неопределенности, Бору пришлось привлечь общую теорию относительности. После этого Эйнштейн уже не мог ничего возразить.

ЭЛЕКТРОНЫ И ЯДРО

Теперь я перейду к менее отдаленной истории. По-видимому, прежде чем переходить к релятивистской квантовой теории, нужно сказать несколько слов о ядерной физике.

Единственно, что мне в связи с этим хотелось бы еще раз отметить, — это то, что гораздо легче принять новые концепции, чем отказаться от старых. По правде говоря, после того как нейтрон был открыт Чедвиком в 1932 г., было почти тривиально, как мне кажется, сказать, что ядро состоит из протонов и нейтронов. Гораздо менее тривиально было исключить из ядра электроны. До того времени все полагали, что в ядре есть электроны, ведь иногда же они оттуда вылетают, и поэтому отрицать их наличие в ядре было бы довольно странным. Суть, конечно, состояла в том, что короткодействующие силы между протоном и нейтроном могут порождать электроны в ядре. Мне лично казалось, что предположение об отсутствии в ядре таких легких частиц по крайней мере приблизительно верно. Я помню, что за это предположение меня довольно сильно критиковали самые крупные физики. Я получил одно письмо, в котором говорилось, что, мол, это прямо-таки скандал — утверждать, будто в ядре нет электронов, когда каждый может видеть, как они вылетают из ядра, мол, я создаю настоящий хаос в физике, выдвигая такие неразумные предположения, и мою позицию просто нельзя понять. Я упомянул этот маленький инцидент, для того чтобы показать, как на самом деле трудно отказаться от вещей, которые кажутся настолько очевидными, что принимаются априори. Мне кажется, наибольшие усилия в развитии теоретической физики нужны в те моменты, когда требуется отказаться от старых понятий.

НОВЫЙ ОБЛИК АТОМНОЙ ФИЗИКИ

Позвольте мне теперь вернуться к проблеме элементарных частиц. Я думаю, что поистине решающим открытием, проливающим свет на свойства и природу элементарных частиц, было открытие Дираком антивещества. Это была абсолютно новая сторона дела, которая, очевидно, имела тесную связь с теорией относительности, с заменой группы Галилея группой Лоренца. Я считаю, что это открытие частиц и античастиц полностью изменило наше представление об атомной физике. Я не знаю, было ли это изменение осознано в то время сразу, возможно, осознание произошло постепенно, но мне хотелось бы объяснить, почему я считаю это открытие столь фундаментальным.

Мы знаем из квантовой теории, что, например, молекула водорода может состоять либо из двух атомов водорода, либо из одного положительного и одного отрицательного ионов водорода. Вообще говоря, каждое состояние можно рассматривать как совокупность всевозможных виртуальных конфигураций, осуществляющих симметрию одного и того же типа. И поскольку, согласно теории Дирака, частицы можно рождать парами, то элементарную частицу следует считать сложной системой, так как виртуально она может быть этой частицей плюс пара или же она сама плюс две пары и т. д., таким образом, внезапно полностью изменилось представление об элементарной частице. До того времени каждый физик, как мне кажется, подходил к элементарным частицам с позиций философии Демокрита, а именно считал эти элементарные частицы неизменными единицами, раз навсегда данными от природы на все времена, они никогда не меняются и не могут преобразовываться во что-нибудь другое. Они не являются динамическими системами и существуют просто сами по себе.

После открытия Дирака все стало выглядеть совсем по-иному, поскольку возникал естественный вопрос: почему протон должен быть просто протоном, почему он не может быть протоном плюс пара электрон и позитрон и т. д.? Это новое представление об элементарной частице как о сложной системе сразу показалось мне чрезвычайно многообещающим. Когда впоследствии я вместе с Паули работал над квантовой электродинамикой, я никогда не терял эту мысль из виду.

РОЖДЕНИЕ ПАР

Следующим шагом в этом направлении была идея о множественном рождении пар; когда две частицы сталкиваются, они могут рождать пары. Нет никаких оснований запретить рождение двух пар. Если энергия столкновения достаточно высока и взаимодействие достаточно сильное, то в подобного рода событии может родиться какое угодно число частиц. При этом вся проблема деления вещества приобретает новый смысл. До сих пор считалось, что существуют только две альтернативы. Либо вы можете делить вещество снова и снова на все более мелкие порции, либо вы не можете делить его до бесконечности, и тогда вы приходите к наименьшим частицам. Теперь же внезапно открывается новая возможность: вы можете делить вещество снова и снова, но вы никогда не будете получать более мелких частиц, поскольку новые частицы вы создаете только посредством энергии, кинетической энергии; таким образом, рождая пары, вы можете продолжать процесс до бесконечности. Возникло естественное и вместе с тем парадоксальное представление об элементарной частице как о сложной системе элементарных частиц. Конечно, было еще неясно, какого рода математика может описывать подобную ситуацию. К этому времени из теории излучения Дирака и из работ Паули, Вайскопфа

и моих стали известны огромные трудности, связанные с бесконечностями в квантовой электродинамике и вообще в квантовой теории взаимодействующих полей. Я полностью согласен с Дираком о неприемлемости бесконечностей в том смысле, что если вы вводите бесконечности в физику, вы просто говорите чепуху, этого нельзя делать. Поэтому я попытался найти математическую схему, в которой от бесконечностей можно избавиться с самого начала. Снова я вспомнил старую историю о наблюдаемых величинах и подумал, не полезно ли будет задаться вопросом: что в столкновении между элементарными частицами мы, по существу, можем наблюдать? Отсюда было естественно прийти к S -матрице и сказать, что S -матрица, или матрица рассеяния, является разумной основой для теории.

И опять же, конечно, гораздо легче сделать этот первый шаг, т. е. сказать, что наблюдать можно то и то, чем сделать второй шаг и сузить предположения. Но в конце концов вы должны ввести новые предположения, т. е. закончить такими словами: «То-то и то-то больше наблюдать нельзя». Отсюда возникает вопрос: каким образом можно так сузить понятие S -матрицы, чтобы получить работающую схему, в которой было бы ясно, что мы имеем в виду, в которой можно было бы формулировать законы природы? В это время я узнал, снова от Дирака, что, по-видимому, можно работать с теорией поля в гильбертовом пространстве с индефинитной метрикой. Конечно, мне было известно обычное и часто довольно справедливое критическое отношение Паули к этому подходу. Он просто утверждал, что индефинитная метрика в гильбертовом пространстве означает отрицательные вероятности, поэтому такая схема не должна работать.

Естественно было думать, что в асимптотической области вероятности должны быть положительны, поэтому асимптотически S -матрица должна быть унитарной. Но в то же время локально можно отказаться от понятия вероятности, можно сказать: «Локально вероятности могут быть отрицательными, потому что локально мы не можем ничего измерить тем же способом, как и в асимптотической области». Понятие вероятности может не иметь места за некоторой универсальной длиной. Поэтому я попытался сузить схему следующим утверждением: «Должны существовать локальные операторы поля, но эти операторы могут действовать в гильбертовом пространстве не с обычной метрикой, а с индефинитной». Преимуществом такой схемы было отсутствие бесконечностей, но, конечно, за очень высокую плату, а именно за отказ от положительно определенной метрики в гильбертовом пространстве. С другой стороны, поскольку к тому времени эксперименты подтвердили множественное рождение частиц, вся схема начала казаться мне убедительной.

МНОЖЕСТВЕННОЕ РОЖДЕНИЕ

Ситуация здесь была довольно запутанной в течение более чем десяти лет, потому что, с одной стороны, ливни космических лучей были известны всем еще примерно с 1936 г., но, с другой стороны, эти ливни хорошо объяснялись каскадной теорией Баба и Гайтлера, и поэтому доказательств множественного рождения частиц не было никаких. Только лишь к 1950 г. удалось получить свидетельства в пользу множественного рождения. С этих пор явление было твердо установлено, и я решил, что теперь в этом направлении можно действовать и попытаться сформулировать нечто вроде теории поля. Мне казалось, что с точки зрения математической схемы будет полезной модель Ли, но, конечно, мне было хорошо известно, что в теории поля у нас нет строгой математической схемы. Я решил, что пока будет достаточно найти хотя бы такую математическую схему, которая как-то объясняла бы эксперимент.

Сначала не было никакого хорошего уравнения поля, которое объясняло бы ситуацию и эксперименты. Но в 1957 г. после лекции, прочитанной мною в ЦЕРНе, я встретил Паули, и мы обсудили с ним новые возможности. Мы узнали от Ли о несохранении четности в β -распаде и, следуя тому же ходу рассуждений, пришли к уравнению поля, которое, как оказалось, содержало группу $SU(2)$, т. е. изоспин. Паули пришел от этого в такой энтузиазм, в каком я его никогда раньше не видел. Я получал от него письма, в которых говорилось о новой заре в физике, о решении всех наших трудностей и т. д. Мне всегда приходилось удерживать его, приговаривая: «Да, но это не так все просто». Но он был настолько вдохновлен и полон энергии и энтузиазма, что работа над этими проблемами стала для него интереснее всего на свете.

В течение этого времени я несколько раз встречался с ним в Цюрихе, но затем ему пришлось уехать в Штаты. Когда он читал там лекции по этому поводу, то старался обосновать свои чувства, но обосновать их было довольно трудно. Он начинал видеть, что проблема отнюдь не так проста, как ему сначала казалось. Надо сказать, что важным вкладом Паули в нашу общую статью была (высказанная в несколько предварительном виде) идея о вырожденности основного состояния, которая впоследствии, в связи с теоремой Голдстоуна ^{*}), сыграла значительную роль в физике элементарных частиц.

КРИТИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАТЕЛЬНОСТЬ ПАУЛИ

Характер Паули был полностью противоположен моему. Он был гораздо более критичен и пытался делать две вещи сразу, в то время как мне это казалось слишком трудным делом даже для лучших физиков. Он старался прежде всего исходить из эксперимента и более или менее интуитивным путем находить связь между явлениями, и в то же самое время он пытался обосновать свою интуицию и найти строгую математическую схему, способную доказать все его предсказания. Мне лично кажется, что это слишком много, поэтому Паули в течение своей жизни опубликовал гораздо меньше того, что он мог бы опубликовать, отказавшись от одного из своих требований. Бор отваживался публиковать статьи, которые он не мог доказать, но которые все же оказывались правильными. Другие достигали многого с помощью рациональных методов и строгой математики, но и то и другое сразу мне кажется слишком многим для одного человека. Паули был ужасно разочарован, когда увидел трудности, и бросил дело довольно печальным образом. Он говорил мне, что не уверен в силе своего мышления и, более того, что он вообще плохо себя чувствует; и все же он подбадривал меня даже после того, как отказался одобрить публикацию. Он говорил, что я должен продолжать, хотя он сам и не может, и, как вы знаете, к несчастью, через полгода он умер. Это был очень печальный конец моей долгой дружбы с Паули, и я могу только сказать, что даже теперь не проходит дня, чтобы я не почувствовал, как мне недостает его строгой критики, столь помогавшей мне в течение всей моей жизни в физике.

^{*}) Теорему Голдстоуна можно пояснить следующим образом. Если основное состояние динамической системы (в теории поля — вакуум) вырождено относительно непрерывного преобразования симметрии, то из-за наличия дополнительной степени свободы, отличающей различные основные состояния, в системе оказывается возможным появление возбуждений (в теории поля — частиц), спектр энергии которых начинается с нуля. Например, в модели Гейзенберга основное состояние вырождено относительно направления спонтанной намагниченности; это приводит к возможности появления квазичастиц — магнонов. См. Н. Н. Боголюбов, Препринт ОИЯИ, R-1451; Н. Реех, Fortschritte der Phys. 16, 68, (1968). (Прим. перев.)

Но давайте вернемся к будущему прогрессу в физике. Я думаю, мы теперь больше знаем о вырождении основного состояния, и, возможно, большинство из вас узнает гораздо больше подробностей и математики, чем знаю я теперь. Я могу только надеяться, что картина по-прежнему останется замкнутой. Я не могу сомневаться, что весь спектр элементарных частиц можно описать таким же образом, как, скажем, спектр атома железа в квантовой механике, т. е. с помощью единого закона природы. Этот закон, конечно, будет чем-нибудь вроде итога, вроде резюме многих подробностей, которые обсуждаются сейчас.

МОЯ ОБЩАЯ ФИЛОСОФИЯ

Очень соблазнительно закончить рецептом, как следует работать в теоретической физике. Однако это было бы очень опасно, так как для разных физиков правила должны быть разными. Поэтому я могу говорить только о правиле, которым я руководствовался сам, а именно: не следует быть слишком связанным одной группой экспериментов, скорее, следует все время иметь в виду все развитие всех относящихся сюда экспериментов, чтобы, прежде чем окончательно записывать теорию в математическом или другом языке, всю картину можно было бы охватить в уме целиком.

Мне, по-видимому, следует проиллюстрировать свою точку зрения следующими двумя историями. Когда я был мальчиком, мой дедушка, который был ремесленником и знал, как делать практические вещи, однажды застал меня за приколачиванием крышки к деревянному ящику с книгами или к чему-то вроде этого. Он видел, как я взял крышку, взял гвоздь и попытался вбить один гвоздь до конца. «О,— сказал он,— да это же абсолютно неверно, что ты здесь делаешь. Никто не делает так, мне просто стыдно смотреть на такую работу». Я не знал, чего же он стыдился, но он сказал: «Я покажу тебе, как это следует делать». Он взял крышку и взял один гвоздь, вбил его немного в крышку, так, чтобы гвоздь чуть-чуть вошел в ящик, затем таким же манером вогнал второй гвоздь, третий и так далее, пока не установил все гвозди. Только когда все было ясно, когда можно было видеть, что все гвозди попадут в ящик, только тогда он начал заколачивать их по-настоящему. Я думаю, что это хорошая иллюстрация к тому, как надо работать в теоретической физике.

Другая история касается моих бесед с Дираком. Дирак часто любил повторять (и мне всегда слышалась в этом некоторая доля критики), что, по его мнению, за один раз можно расправиться не больше чем с одной трудностью. Может быть, это и правильно. Но я подходил к проблемам иначе. Я помню, как Нильс Бор любил говорить: «Если вы высказываете правильное утверждение, то утверждение, противоположное правильному, конечно, неправильное, ложное утверждение. Но если вы имеете дело с глубокой истиной, то противоположное этой глубокой истине снова может быть глубокой истиной». Поэтому мне кажется, что не только слова: «За один раз можно расправиться только с одной трудностью» — являются глубокой истиной, но что истиной являются также слова: «Никогда нельзя за раз расправиться с одной трудностью, приходится расправляться сразу со многими трудностями». По-видимому, этим замечанием и следует закончить мое выступление.