Квантовая теория (1900—1927)

А.Б.Кожевников, Т.Б.Романовская

1. Историография

Сейчас уже редко пишутся всеобщие истории науки типа Ф.Даннемана (1921) и даже всеобщие истории физики типа Я.Г.Дорфмана (1979). Труды такого жанра уже не претендуют на исследовательский характер, а только на педагогический или популяризаторский. Историки науки стали профессионалами и занимаются более специальными темами. Происшедшие сдвиги хорошо иллюстрируются историографией квантовой теории. Эта область не только одна из самых разработанных в истории науки, насчитывающая сотни статей и десятки монографий, но и одна из передовых в методическом и методологическом плане, не только отражающая, но и указывающая пути развития всей дисциплины.

Приблизительно до 1960 года, пока описываемые события были сравнительно недавними, литература по этой теме была достаточно традиционно—беллетризованна, воспоминания самих участников событий рассматривались не как источники, а как исследования, а работы историков и журналистов были чаще всего описательными обзорами литературы, без внимательного вчитывания и использования неопубликованных источников, со стандартной героизирующей интерпретацией. Качественный скачок произошел в середине десятилетия сразу в нескольких направлениях.

В рамках интеллектуальной истории на совершенно новый уровень по тщательности изучения источников вывели область работы Ф.Хунда, Б.Ван дер Вардена и М.Джеммера [1—3]. Двое первых соединили преимущества непосредственного знания событий с профессиональными навыками историков, писали не по памяти, а заново внимательно перечитывая работы, которые изучали в юности. Ван дер Варден издал тексты 20 классических работ 1917—1926 гг. с подробными комментариями на 60 страницах. Хунд написал блестящую по точности и лаконичности изложения книгу, которая в силу этой самой лаконичности трудна для восприятия не очень подготовленным читателем. Для введения в исследовательскую область до сих пор непревзойденной является книга Джеммера. Наличие ее русского перевода избавляет нас от необходимости излагать в повествовательном тоне события—за всеми пояснениями читатель может обращаться к ней. Опубликованные источники изучены Джемером подробно и полно, но архивные материалы и переписка практически не привлекаются. Это стало заслугою другой группы исследователей, работавших в те же годы.

Эта группа, возглавляемая Т.Куном, в 1962—1964 гг. осуществила проект Архива истории квантовой физики. Взяв подробные интервью у ста примерно физиков, участвовавших в создании квантовой механики, они, вероятно, впервые, по крайней мере в таком масштабе, привили к истории науки методы «устной истории», весьма популярные сегодня. Но, может быть, даже более важной была их работа по выявлению и описанию архивных материалов—рукописей, черновиков, переписки физиков. Подробный отчет о работе и описание собранных материалов опубликованы в книге [4]. Копии (микрофильмы) Архива хранятся сейчас уже в десятке архивов разных стран, но пока еще отсутствуют у нас в полном виде, кроме отдельных разрозненных материалов находящихся в распоряжении нескольких исследователей. Масштабы и известность проекта, доступность материалов в сравнительно короткое время привели к новой профессиональной норме исследований—сейчас уже трудно выполнить серьезную работу ограничивая себя только опубликованными источниками. История науки XX-го века пошла в архивы, что раньше было редкостью.

В то же десятилетие стал особенно заметен еще один сдвиг профессиональных норм. История науки стала развиваться преимущественно не за счет монографий обзорного типа в повествовательном и перечислительном тоне описывающих большую предметную или хронологическую область, а за счет работ, анализирующих отдельные важные эпизоды или вопросы, но гораздо более внимательно и вдумчиво—такой жанр получил наименование «case study». Этот анализ преодолевает мифологизированные исторические версии бытующие в фольклоре самих ученых и сближает историю науки о теоретическими дисциплинами—философией и социологией науки. В жанре интеллектуальной истории он подробно, с учетом всех наличных источников реконструирует путь ученого к открытию или теории, показывая, как правило, что путь этот состоял из цепочки идей весьма далеких от окончательного результата, т.е. в обычном понимании из ряда ошибок и переинтерпретаций. Как блестящий пример такого исследования можно привести книгу того же Куна [5].

Одновременно появился и новый жанр, которого не было в традиционной истории—социальная история науки, не декларирующая, а изучающая политические, общекультурные, социальные влияния на науку, с учетом научных институтов и системы организации исследований. Поскольку такой подход противоречит стандартному позитивистскому образу науки, присущему массовому сознании ученых, он воспринимается как полемический и зачастую оспаривается. Пожалуй самой известной из-за возникшей полемики стала работа П.Формана [6], о которой мы еще будем говорить ниже.

Новое качество исследований, появившееся в 60-х годах, сохраняется и сейчас без особых изменении. Из сравнительно недавних публикаций следует упомянуть две самые важные: трехтомную переписку Вольфганга Паули [7]—эрудита и критика, бывшего в самом центре событий и высказывавшегося по всем вопросам, и объемную работу Дж.Мехры и Х.Рехенборга [8], вызвавшую серьезную критику, но уже не из-за полемичности, а из-за возвращения к старому пересказывающему стилю, игнорирующему глубокую постановку исторических проблем. Тем не менее это издание ценно обильным фактическим материалом и играет роль своеобразной энциклопедии, особенно для отечественных ученых не имеющих легкого доступа к архивным источникам, которые там обильно цитируются. Но в целом следует заключить, что новый уровень понимания, достигнутый историками квантовой физики в многочисленных статьях, еще не был воплощен в работе обобщающего, обзорного характера и в качестве таковой до сих пор используется книга Джеммера.

При наличии столь богатой литературы было бы наивно предполагать, что в рамках настоящей небольшой работы можно дать полное и оригинальное изложение вопроса. Наша цель скорее другая – не пересказывая саму историю дать обзор сравнительно недавних безусловных достижений квантовой историографии и ее же спорных вопросов, не запрещая себе высказывать собственные оценочные суждения и гипотезы.

2. Университеты и физические исследования в Германии

КМ и вообще квантовая теория возникли преимущественно в Германии. Если выражаться точнее, то в Германии и окружающих ее странах центральной Европы (Австрия, Швейцария, Голландия, Дания) образовавших единое научное сообщество, члены которого общались преимущественно на немецком языке, печатались в германских журналах, учились и замещали профессорские должности в университетах, не слишком беспокоясь о государственных границах (так немец В.Гейзенберг, голландец Х.Крамерс и швед О.Клейн долге работали в Дании, австрийцы П.Оренфест в Голландии, а Э.Шредингер – в Швейцарии, голландец П.Дебай в Швейцарии и Германии, венгры Ю.Вигнер и Я. фон Нейман в Германии).

Нисколько не принижая выдающиеся научные достижения ученых других стран – действительно, трудно представить квантовую механику без работ Дирака – можно уверенно локализовать центр мирового физического сообщества в Германии. Именно там находилась, выражаясь социологическим языком, референтное научное сообщество, задававшее уровень, направление развития, критерии оценки работ. Основные центры развития квантовой теорий – Берлин, Мюнхен, Цюрих, Геттинген, с 1920 г. Копенгаген – объединили прежде всего людей говоривших по-немецки. Из общего числа в 164 работы 1900 – 1914 года, процитированных Куном в его книге [5], издано на немецком языке 109 (66%), а из 203 работ по квантовой механике с июля 1925 по февраль 1927 г. (по достаточно полной библиографии [9]) в Германии издано 120 (59%). Значение Германии возрастет еще более, если учитывать качественные характеристики работ – важность содержания, степень влияния – отраженные, например в частоте цитирования. В составленном Ф.Хундом [3] списке 25 главных создателей КТ только 3 англичанина, 1 француз и один американец.

Учитывая сказанное, позвольте нам, описывая внешнюю сторону жизни науки в то время, сконцентрироваться прежде всего на Германии и описать действовавшую там систему организации научных исследований. Основа германского доминирования в физике была заложена еще в XIX веке. Речь идет о прусской университетской реформе, начатой В.фон Гумбольдтом в 1809 году, заложившей основы университета современного типа. Университеты были административно подчинены прусскому государству, но в содержании курсов и в научных занятиях осуществился принцип академической свободы. Уравнение в правах философского факультета о тремя остальными – теологическим, медицинским и юридическим – фактически скоро превратило его в самый крупный. Упор делался на общенаучной подготовке в духе неогуманизма («Bildung»), в отличие от узко специальной принятой во Франции; подчеркивалась связь высшего образования с наукой, государственные экзамены на чиновные должности были отделены от университетских, дававших право только на ученые степени. В результате Пруссия превратила университеты из учреждений преимущественно образовательных, готовивших кадры для государственной службы, в место где также создавались благоприятные условия для чисто научных исследований. Прусская система высшего образования была вскоре перенята другими германскими государствами, оказала сильное влияние на университетские реформы в других европейских странах и США [13].

В середине века в германских университетах утверждается так называемый «исследовательский императив» – при выборах на вакантные профессорские места (новые профессора назначались министерством, но факультет – собрание профессоров – представлял список их трех возможных кандидатур в порядке предпочтения, и министерство обычно следовало рекомендации профессоров), главным критерием стали научные труды претендента, тем самым только научные исследования открывали путь академической карьеры. Так сформировалась та норма, которую мы сейчас считаем естественной – что профессор университета не только и не столько лектор, сколько ученый. Это вылилось и во вполне материальные последствия – к середине XIX века в университетах появляются исследовательские лаборатории (обычный путь физических кабинетов: лекционные демонстрации – практикум для студентов – исследовательская лаборатория профессора – руководимый им физический институт, т.е. отдельное здание специальной конструкции с небольшим штатом ассистентов, где профессор и его ученики могли работать). Пик строительства таких институтов пришелся на 80-е годы, к началу XX века их было около 30. Именно в этих университетских институтах и делалась основная фундаментальная физика. Для прикладной науки существовали промышленные лаборатории и Имперский физико-технический институт (Physikalisch-Technische Reichsanstalt) [11 – 12].

В XX веке появляется новая тенденция: ценности науки уже достаточно укоренились в обществе и ученые начинают требовать поддержки непосредственной, а не через университеты. Желание освободить ученого от преподавания и платить ему прямо за его научную работу вылилось в создание в 1911 году Общества Кайзера Вильгельма (Kaiser Wilhelm Gesellschaft), создавшего сеть исследовательских институтов в различных областях фундаментальной науки, в том числе и физический институт. Мы не будем сейчас писать об этом подробнее, потому что основные события истории квантовой теории развивались все же в университетах и институтах при них.

В середине 20-х годов в Германии и Австрии было 26 университетов и 13 высших технических школ (Technische Hochschule). В отличие от американских, германских университеты не были независимыми, а подчинялись Министерству Культуры в административном отношении (финансировании и кадровых назначениях, но это не затрагивало программы обучения и свободу научных исследований). Последние вопросы находились в ведении профессоров, из которых полноправными были так называемые ординарные профессора, числившиеся на государственной службе, получавшие жалование и окруженные большим почетом. Обычно был всего лишь один профессор

по каждой дисциплине, ставки эти были постоянные, утверждались министерством и замещались при высвобождении.

Кроме них существовали экстраординарные профессора с существенно меньшим жалованием и приват-доценты, вообще не получавшие жалования. Они имели право преподавать и вести научную работу в университете, получая деньги от слушателей, записавшихся на лекции. Право это присваивалось им факультетом после так называемой хабилитации (Habilitation) — экзаменов и пробной лекции. Число таких дополнительных преподавателей обычно отличалось не больше, чем в 2 раза от числа штатных профессоров, но они обладали существенно меньшими правами в управлении университетом: в совете университета и факультета заседали, как правило, лишь ординарные профессора, только они руководили институтами, а экстраординариусы и приват-доценты подчинялись им. Ординарный профессор вел, как правило, общие курсы, привлекавшие больше слушателей, и приносившие больший доход, оставляя своим младшим коллегам продвинутые специальные курсы.

Ординариус, а иногда и экстраординариус мог иметь одного-двух ассистентов для научной работы в институте. Этими людьми обычно были докторанты или готовящиеся к хабилитации молодые доктора. Этим, как правило, и ограничивался научный штат университета. Из-за практически полновластия ординариуса в институте практически вся научная работа и темы диссертаций определялась им, он же обычно имел решающее влияние на подбор приват-доцентов и ассистентов, выбирая их, как правило, из своих учеников [13, 14]. Именно в таких небольших — не больше десяти, а обычно около пяти сотрудников — институтах и происходили основные события из истории квантовой физики. Экспериментальная физика тогда еще не достигла сегодняшних размеров. Практически все приборы, кроме типовых, экспериментатор делал сам с подчиненными ему мастерами, приборы умещались в комнате или даже на столе.

3. Теоретическая физика как дисциплина

Дисциплинарное становление физики происходило в XIX века. Особую роль в процессе выделения ее из натуральной философии века предыдущего играла реорганизация и организация заново физических лабораторий, стандартизация обучению экспериментальной физике, увеличение точности лабораторных измерений. Объединяющее начало принадлежало также организованному в Кенигсберге в 1834 г. К.Г.Якоби и Ф.Нейманом семинару по математической физике, участники которого стали работать потом по всей Германии. Дисциплинарного деления между теоретической и экспериментальной физикой, как правило, не существовало — хотя уже в 1849 г. в Геттингенском физической институте В.Вебер разделил кафедру физики на теоретическую и экспериментальную, это было в то время еще исключением [15].

Сообщество физиков-теоретиков складывалось медленно и постепенно, выделяясь из двух других: математиков, занимавшихся математической физикой, и физиков-универсалов. Даже к концу XIX века физиков, занимавшихся только теорией, было еще очень мало, и докторская диссертация М.Планка 1879 г. именно в силу своего теоретического характера вызвала некоторые трудности. Впоследствии Планк вспоминал, что на него как на чистого теоретика смотрели как на некоторое загадочное существо, и это отчуждение ему еще предстояло преодолеть, когда в 1889 г. по инициативе Г.Гельмгольца он был приглашен возглавить в Берлине Теоретический физический институт. Теоретическая физика как самостоятельная дисциплина — это уже явное детище XX века и не последнюю роль в этом самоопределении сыграла квантовая теория.

Экспериментальная физика пользовалась большим почетом. В каждом университете был один (иногда — два) ординарный профессор-экспериментатор, а профессоров-теоретиков — к 1900 году было всего лишь 8, а в двадцатых годах — около 15. В остальных университетах теоретическую физику, как менее сформировавшуюся специальность, представлял экстраординарный профессор.

Таблица 1

Профессора теоретической физики в важнейших центрах квантовой физики

Копенгаген	Н.Бор 1920 – 1941
Геттинген	М.Борн 1921 – 1933
Мюнхен	А.Зоммерфельд 1906 – 1938
Цюрих университет	З.Шредингер 1921 – 1927, Г.Вентцель 1928 – 1948
политехникум	П.Дебай 1920 – 1927, В.Паули 1928 – 1935
Берлин	М.Планк 1889 – 1926, Э.Шредингер 1927 – 1933
Лейпциг	Г.Вентцель 1925 – 1927, В.Гейзенберг 1927 – 1941
Лейден	Х.А.Лоренц 1878 – 1912, П.Эренфест 1912 – 1933
Кембридж	П.Дирак 1932 – 1968

По-другому складывались отношения теории с экспериментом в собственно научной практике. Здесь в первые два десятилетия XX века к теории перешла активная роль — она не просто обобщала и объясняла результаты эксперимента, следуя за ним, а наоборот — стала опережающе выдвигать гипотетические схемы и модели, оставляя эксперименту возможность проверять и отбраковывать их. Для собственно теоретической физики это было путем к большей раскованности и абстрактности, для экспериментаторов — источником фрустраций, ибо они перестали понимать о чем пишут теоретики.

Именно теория относительности и еще больше квантовая теория зафиксировали эту перемену активных и пассивных ролей, она же служила постоянным источником неприятия новых теорий — как слишком заумных, абстрактных и оторванных от реальности (то есть от наглядной практики экспериментаторов). Обвинения такого типа, в сочетании с идеологическими, выдвигались физиками старшего поколения в самых разных странах, наиболее активно в Германии и СССР.

4. Формула Планка

Первое появление квантов, т.е. введение дискретности в физику представляется в ретроспекции реализовывавшимся по двум направлениям — представление о дискретности вещества и представление о дискретности излучения. Идея «дискретности вещества», точнее, представление о дискретности

уровней энергии вещества, развилось в результате интерпретации формулы Макса Планка для распределения плотности энергии черного тела

$$\omega = \frac{8\pi\nu^2}{c^3}\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT}-1},$$

сообщенной им в докладе немецкому физическому обществу в Берлине 14 декабря 1900 г. и тогда же опубликованной.

Введение представления о кванте энергии в работах Планка трактуется в литературе по-разному, М.Джеммер интерпретирует его как разрешение только экспериментальных противоречий: «Теория квантов в самой ранней ее формулировке возникла в связи с неспособностью классической физики объяснить экспериментально наблюдаемое распределение энергии в непрерывном спектре излучения абсолютно черного тела [3, с.13]. Несколько другой смысл несет в себе свидетельство одного из самых авторитетных современников, если не самого возникновения квантовой теории (их года рождения совпадали), то ее развития – В.Паули, написавшего в 1926 г. обзор старой квантовой теории: «Квантовая теория первоначально возникла при попытке дать молекулярно-кинетическую интерпретацию (в духе общих принципов статистической теории теплоты Больцмана и Гиббса) термодинамических свойств излучения – зависимости от частоты и температуры экспериментально полученного распределения интенсивности в спектре излучения черного тела» [16, Т.I, с.7]. Хотя это высказывание не противоречит предыдущему, но акцент здесь делается на другом – не на разрешении экспериментальных противоречий, а на использовании новых теоретических методов не только для решения экспериментальной задачи, но и для рассмотрения проблем более общего теоретического характера. Из замечания Паули следует и то, что само возникновение квантовой теории было обусловлено развитием относительно новой дисциплины – статистической физики.

Непосредственное появление двух статей Планка 1900 г. – октябрьской и декабрьской[1] – было стимулировано, как это показано Т.Куном [5], следующими обстоятельствами: октябрьская статья была действительно непосредственным откликом на доложенные в сентябре 1900 г. О.Люммером и Е.Принсгеймом результаты опытов по определению распределения частоты излучения черного тела, противоречивших закону распределения Вина, теоретическому выводу которого из соображений термодинамики и электромагнитной теории Максвелла и была посвящена серия предыдущих статей Планка. Однако, как мы покажем далее, формула Планка не была лишь попыткой разрешить экспериментальное противоречие, а имела под собой теоретическую основу. Наиболее непроясненным местом в выводе Планка была формула для энтропии.

По поводу нахождения Планком выражения для энтропии в октябре 1900 г. существуют несколько разных версий: Т.Кун считает, что уже в октябрьском варианте явно просматривался переход от термодинамического подхода к статистическому, а М.Джеммер связывает новую формулу для энтропии с попыткой удовлетворить закону излучения Рэлея, выведенному на основании теоремы о равнораспределении в июне 1900 г. Хотя версия Джеммера делает более понятным вид второй производной энтропии, $\frac{\partial^2 S}{\partial u^2} = -\frac{\alpha}{u(\beta+u)}$, объясняя его просто экстраполяцией, но отсутствие упоминаний о Рэлее в статьях Планка до 1906 г., так же как его ссылка на вероятностную трактовку энтропии Больцманом говорят в пользу гипотезы Куна.

Большинство свидетельств современников, так же как и выдержки из писем и воспоминаний самого Планка сводятся к тому, что проблема излучения черного тела интересовала Планка из общетеоретических соображений как пример универсального закона – интенсивность излучения черного тела, согласно формуле Кирхгоффа, не зависела от материала, а только от его температуры, и в этом Планку виделась универсальная закономерность, требующая своего разъяснения именно в силу своей общности: «Это распределение представляло собой нечто абсолютное, а так как поиск абсолюта мне всегда казался наиболее достойной темой исследования, то я и занялся им с восторгом» – так объяснял Планк впоследствии свое обращение к проблеме излучения черного тела [18, с.29], которая по мере ослабления новизны электромагнитной теории в размышлениях теоретиков отошла на второй план, чем и объясняется отсутствие широких откликов на работы Планка до 1905 г.

Эта тяга Планка к абсолюту имеет своим объяснением как личностные особенности ученого, так и некие причины более общего характера. Если общегуманитарное классическое образование и глубокая религиозность определяли интерес Планка к более общим проблемам и его поиску глубинных и глобальных закономерностей, что было жизненно важным для становления теоретической физики как дисциплины; то в германской науке интерес к мировоззренческим проблемам отвечал также «традиционному объединяющему императиву немецкой дисциплинарной учености» [19, p.XIX].

Второй компонентой, обусловившей именно энтропийный подход Планка к рассмотрению задачи и введение им специфических осцилляторов (вначале с затуханием), была (и этот вопрос тщательно рассмотрен у Куна) попытка объяснить некое теоретическое противоречие в рамках статистической физики, а именно обратимый характер механических процессов в кинетической теории газов и однонаправленность Н-теоремы Больцмана. Или, говоря иначе, между необратимостью второго начала термодинамики и обратимостью всех механических процессов, и следовательно обратимостью уравнений статистической механики, то есть противоречие на этот раз уже теоретического характера. И только третьей компонентой (и это независимо от того – принять подход Куна или Джеммера) было возникновение чисто эмпирических противоречий, выявившихся в результате совершенствования эксперимента. При этом сама постановка экспериментов по распределению энергии волн в спектре излучения черного тела объяснялась нуждами светотехники (обстоятельство отмеченное М.Джеммером ([3] и Я.Г.Дорфманом [20]).

Относительно малый резонанс формулы Планка среди физиков-теоретиков (экспериментальные работы по его проверке в рамках вое той же практически ориентированной исследовательской программы шли интенсивно) объяснялся еще и чисто формальным характером введенных Планком

дискретных порций энергии, поглощаемых и испускаемых осцилятором, поскольку только при наличии дискретного набора состояний осцилляторов могла быть использована вероятностная формула для энтропии Больцмана. Формальный характер квантования введенного Планком, как проницательно заметил И.С. Алексеев, явно следует из фразы, завершающей статью, где Планк рассматривает отношение P полной энергии E осциллятора к «элементу энергии $h\nu$» и пишет следующее: «Если указанное отношение не равно целому числу, мы берем для P ближайшее целое значение» [21, с.73]. В силу признаваемого большинством нефизического характера квантования, введенного Планком, честь открытия квантования как вещества так и излучения теперь все чаще приписывается А.Эйнштейну, и зарождение квантовой теории относят к появлению его статьи 1905 г. «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света».

5. Эйнштейн и кванты света

Четкая формулировка вывода, что в проблеме черного излучения физика столкнулась с физической дискретностью непонятной природы, принадлежит Эйнштейну (1905 г.) и Паулю Эренфесту (1906 г.). Эйнштейн пришел к этому как будто бы независимо от Планка, основав второе направление ранней квантовой теории, связанное о дискретностью излучения.

В первой его работе по этой проблеме – статье 1905 г. «Об одной эвристической точке зрения, касающейся возникновения и превращения света» – он вывел закон излучения Вина, исходя из условий максимума энтропии для рассматриваемого равновесного состояния излучения и закона сохранения энергии, а затем, сравнив полученную формулу с больцмановской энтропией идеального газа, пришел к выводу, что «Монохроматическое излучение малой плотности (в пределах области применимости закона излучения Вина) в смысле теории теплоты ведет себя так, как будто оно состоит из независимых друг от друга квантов энергии величиной $\frac{R\beta\nu}{N}/2$ ($= h\nu$) [22, с.102]. Так в физике появились кванты света и с ними неизвестная классической физике дискретность энергии.

Эта статья Энштейна часто неправильно характеризуется как «статья о фотоэффекте». «Виноват» в такой расстановке акцентов Нобелевский комитет: на момент присуждения Эйнштейну Нобелевской премии за 1921 г. его кванты света все еще считались весьма, спорной гипотезой, а формула фотоэффекта уже была подтверждена экспериментально, и поэтому она была специально отмечена в формулировке комитета как основание для награды. В действительности описание механизма фотоэффекта не было ни основным мотивом написания работы, ни самым важным ее результатом, а играло в ней лишь вспомогательную роль одного из аргументов в пользу дискретности энергии излучения. Как и Планк, Эйнштейн был движим прежде всего проблемой теоретического или даже философского характера: стремлением к единой картине мира и, в частности, к согласованию механики и электродинамики. Его знаменитая триада работ 1905 г. имеет общее основание: отбрасывание эфира в статье о теории относительности подкрепляло гипотезу о квантах света, а та вместе со статьей о броуновском движении утверждала атомизм. Именно атомистическое мировоззрение Эйнштейн стремился положить в основу и термодинамики и электродинамики. Дискретность, носившая у Планка характер формального математического приема, для Эйнштейна имела физический смысл. Образцом для его кванта света был электрон, а примером для подражания – Г.А.Лоренц, который ввел в изначально континуалистскую максвелловскую электродинамику первую дискретность: квант электричества. Квантуя еще и излучение, Эйнштейн думал продолжить начатую Лоренцем атомистическую реформу электродинамики [23].

В 1905 г. в качестве формулы для излучения Эйнштейн рассматривал закон Вина, который максимально соответствует гипотезе о квантах света. В следующем году, в статье «К теории возникновения и поглощения света», он показал, что формулу Планка нельзя интерпретировать без допущения дискретности атомных процессов. Сам он видел эту дискретность в структуре самого излучения, но основные авторитеты тогдашней теоретической физики – Планк, Лоренц, Пуанкаре – предпочли менее радикальный вариант, локализуя дискретность лишь в веществе (уровни энергии), либо в неизвестном механизме взаимодействия излучения с веществом. Введенные Эйнштейном кванты света практически никем из физиков не были поддержаны. Хотя ряд историков удивлялся впоследствии такому консерватизму и непониманию гениального новшества, на самом деле это поведение совершенно правильно – даже через десять и двадцать лет, когда корпускулярная модель уже была более развитой, она не могла полностью заменить классическую оптику и фактически обе теории существовали параллельно, объясняя каждая свой круг экспериментов при отсутствии единой полной схемы. Поэтому сам Эйнштейн снижал уровень своих притязаний, сначала, в 1909 году до признания «паритетности» волновых и квантовых структур в излучении (на основе двух соответствующих членов в формуле флуктуации), а затем, в 1911 – 1912 гг. всеобщая критика вынудила его охарактеризовать проблему структуры излучения как «неразрешимую загадку», а гипотезу квантов света как «временную попытку». Возможное решение он видел в отказе от строгого выполнения закона сохранения энергии. Через двенадцать лет это разработают Бор, Крамерс и Слэтер, а Эйнштейн уже будет резко возражать.

6. Предварительные итоги

Определение физической природы квантов, попытка их вписать в общую непротиворечивую физическую картину мира и стали одной из основных задач физиков, что было особенно ясно сформулировано в 1911 г. во время первого международного сольвеевского физического конгресса, так и называвшегося «Теория излучения и кванты».

В своей речи на Конгрессе Планк представил теорию квантов как прямой результат опытов по излучению черного тела, приводящих к противоречию с классической физикой, тогда как во всех других экспериментальных явлениях «Законы классической механики, электродинамики и электронной теории применяются с замечательной точностью» [17, с.282]. Такая точка зрения была по меньшей мере оригинальной, поскольку экспериментальные противоречия возникали и в других областях физики. Достаточно

5–3524

сослаться на статью Эйнштейна 1907 г., где он используя квантовый подход, предсказал, что удельная теплоемкость твердого тела вблизи абсолютного нуля будет отклоняться от эмпирического закона Дюлонга-Пти. Расширив применение теории квантов на новую область — молекулярно-кинетическую теорию, Эйнштейн в своей работе ввел одновременно физически интерпретируемую модель квантового осциллятора как колеблющегося атома или молекулы. Другой спецификой этой работы было введенное ограничение на механические движения ионов. Эйнштейн отмечал, что для них «множество возможных состояний уже нежели для тел, непосредственно данных в нашем обыденном опыте» (цит. по [20, с.64]).

Роль эксперимента на этой стадии развития квантовой теории однако не была превалирующей, и Кун отмечает, например, что формула предшествовала экспериментально открытому нарушению закона Дюлонга-Пти (т.е. ее стимулировало не противоречие с экспериментом), поэтому вначале работа Эйнштейна прошла почти незамеченной. Однако именно эта работа привлекла внимание В.Нернста — одного из наиболее влиятельных ученых Германии этого периода — к проблеме квантов. В.Нернст и стал инициатором Первого Сольвеевского конгресса по физике, состоявшегося в Брюсселе в октябре 1911 г.

Первый Сольвеевский конгресс сыграл роль катализатора интереса к проблеме квантов и послужил самой институализации проблемы. Еще за год до конгресса Планк в письме Нернсту выражал сомнение, что кто-нибудь кроме их двоих, а также Эйнштейна, Лоренца, Вина и Лармора, будут заинтересованы в предмете, а уже к 1912 г. вопросы квантовой теории стояли в центре внимания группы самых авторитетных физиков-теоретиков. Впрочем, сомнение Планка — свидетельство не столько отсутствия интереса к данной теории в 1910 г., сколько отсутствия контактов между учеными, занимавшимися этой проблематикой. Тем более, что к этому времени уже опубликовали свои первые квантовые работы и П.Эренфест, и П.Дебай. Преодолеть эту разобщенность и был призван конгресс собравший ученых, занимавшихся квантовой теорией. Всего в I Сольвеевском конгрессе участвовало 20 человек. Это было не первое международное собрание физического сообщества: на Всемирной выставке в Париже в 1900 г. прошел официальный I Международный конгресс физиков, где было 300 участников, однако в истории науки именно Сольвеевский конгресс оставил свой след, заложив начало многолетней традиции сольвеевских конференций и во многом определив пути развития теоретической физики на будущее [24].

Сольвеевская конференция собрала крупнейших ученых-физиков Европы, и хотя не все они занимались специально проблемой квант (как сказано выше, до конференции этой проблемой занималось только несколько человек), но сама проблема не могла пройти мимо внимания каждого, кого интересовали вопросы непротиворечивости физического знания. В приглашении на конференцию, разосланном от имени крупнейшего промышленника, пытавшегося (довольно безуспешно) развивать свои гипотезы в области теории относительности, Е.Сольвея, обращалось внимание только на экспериментальное несоответствие классических теорий и на возможное снятие всяких противоречий, если допустить ограничения на осцилляцию атомов и электронов, и ставилась задача о необходимости в связи с этим переформулировать фундаментальные понятия. Однако в самой квантовой гипотезе, помимо противоречия, содержавшегося в выводе формулы излучения Планка (между гипотезой о дискретных уровнях энергии осциллятора и основанной на уравнении Максвелла связи между средней плотностью его энергии и распределением энергии излучения в пространстве), содержался целый ряд невыясненных моментов.

Позиции участников конгресса по отношению к гипотезе квантов значительно разнились. Рэлей, приславший свое сообщение, как и Джинс пытался свести ее прежде всего к известным классическим теориям, в то время как Планк и Зоммерфельд настаивали на принципиально неклассическом характере понятия квантов и на той же точке зрения стоял и выступивший с сообщением об удельных теплоемкостях Эйнштейн. Не обращаясь в этом своем выступлении к проблеме квантов света, он говорил о необходимости изменять основные положения механики. При этом, ссылаясь как на очевидность на то, что энергия передается квантами величиной $h\nu$, от отмечает, как и все участники конференции, что механизм этого действия остается неизвестен.

Конгресс фактически подвел итоги первого этапа развития теории квант — было официально зафиксировано наличие проблемы: существование не укладывающейся в классические рамки микроскопической дискретности, проявляющейся в свойствах излучения. Были предложены методы квантования и построена модель квантованного осциллятора, представляющего колеблющиеся атомы и электроны, была упомянута непринятая сообществом гипотеза кванта излучения Эйнштейна, но не существовало механизмов, объясняющих ограничения на колебания квантов, не было никаких представлений о том, чем являлись бы кванты энергии, где они локализованы и какой природный объект им соответствует.

Отсутствие общепризнанного объекта референции лишало кванты статуса теории, и одной из тем первого Сольвеевского конгресса как раз и был поиск такого статуса понятию квантов. С этой точки зрения надо прежде всего и рассматривать выступление Планка, связавшего h с единицей площади в фазовом пространстве, отметившего тем самым, что в квантовой теории «элементарная область вероятности имеет указанную конечную величину» [17, с.287], и обратившего внимание на принципиальную неклассичность понятия кванта. Той же цели служил и доклад А.Зоммерфельда, предложившего новое математическое выражение для кванта действия Планка. В рассмотренном Зоммерфельдом интеграле от гамильтониана системы за время обмена энергией $\int_0^T H\,dt = h$ можно увидеть прообраз принципа неопределенности его будущего ученика В.Гейзенберга. А само введение представления о кванте действия позволило расширить область применения понятия квантов на непериодические движения.

Распространение применения понятия квантов могло, в принципе, реализовываться в двух направлениях: рассмотрением новых эмпирических областей, где мог бы применяться квантовый подход, и расширением

теоретических положений, связанных с понятием квантов. Сложившееся же отношение к теории кванта к моменту конгресса видно из выступления Х.Каммерлинг-Оннеса, который говорил, что он надеется преодолеть трудности объяснения экспериментов с помощью интерпретации их при помощи квантовой теории. В определенном смысле квантование рассматривалось как некое магическое средство с непонятными принципами действия (критериев, определяющих необходимость квантования, предложено не было), но достаточно эффективное для необъясненных в рамках классической физики случаев.

Сольвеевский конгресс как бы официально институциализировал проблему квантов. Ведущие физики Европы, а это означало в то время и мира, признали первоочередность этой проблемы. Были названы имена всех людей, занимавшихся квантами и дана оценка их работы. Фактически именно после Сольвеевского конгресса и начало складываться (вначале по-прежнему немногочисленное) сообщество физиков-квантовиков. Другим важным аспектом этой конференции была непосредственная связь теории с экспериментом. Половина докладов была экспериментальной и если непосредственно и не связанная с квантовыми вопросами, как, например, доклад Кнудсена, то тем не менее они расширяли возможный спектр применения квантовой проблемы.

В связи со статистическим характером квантовой гипотезы, понимавшейся окружающими как «временная попытка интерпретировать выражение для статистической вероятности излучения» [22, с.307], делались попытки расширения как экспериментальной, так и теоретической сферы применения квантовой гипотезы, с тем чтобы включить рассмотрение индивидуального акта взаимодействия. А это соответствовало прежде всего нормативам классической физики.

Подтверждением этой точки зрения может служить так называемая вторая квантовая теория Планка, развитая им в статьях 1911–1912 гг. В этой теории он предложил новый вывод своей формулы излучения черного тела, вновь как бы вернувшись в ситуацию начала века, когда он был единственным, кто занимался этой теорией. К 1911 г. при общем росте квантовых работ излучение черного тела уже почти никого не интересовало. Планк рассмотрел единичный акт поглощения излучения (которое он считает процессом непрерывным и подчиняющимся уравнениям Максвелла) и испускания излучения, для чего Планк впервые вводит представление о вероятности излучения кванта, т.е. о вероятности одного индивидуального акта для данного осциллятора.

После Сольвеевского конгресса квантовая гипотеза стала, с одной стороны, источником новых и принципиально важных теоретических противоречий между непрерывным характером электромагнитного поля и дискретностью поглощения и испускания света осцилляторами, между классической механикой и ограничением на движения, введенным в квантовой. Имелись противоречил теоретического характера и внутри самих квантовых гипотез (достаточно упомянуть, что именно закон Вина, а не Планка выводился из предположения о независимых квантах света – задача, рассмотренная в 1910 г. А.Ф.Иоффе, предложившим идею «молекул света», и решенная только в 1924 г. С.Бозе и А.Эйнштейном). С другой стороны, квантовая гипотеза была новым и эффективным инструментом разрешения противоречий, казавшихся непреодолимыми раньше, инструментом, который дозволял получать совпадающие о экспериментом результаты. Квантование дало принципиально новый метод исследования, поэтому естественно, что квантовую гипотезу пытались применить и к неизвестным новым эмпирическим областям. Одной из наиболее трудных таких областей были физические представления о строении вещества.

7. Кванты находят свое место

Статус теории квантовая гипотеза приобрела только тогда, когда от модели осциллятора, единственной функцией которой было моделирование монохроматического излучения, она перешла к полифункциональной модели квантового атома Бора[2]. Этот процесс был связан и с разработкой конкретных расчетных методов, поэтому некоторые историки и методологи науки (из тех, кто вообще использует этот термин) относят понятие отарой квантовой теории именно ко второму периоду развития квантовой гипотезы, начинавшемуся о 1913 г. – года создания квантовой модели атома Бора.

Необходимость отнесения квантовой теории к атомам была совершенно определенно выражена в энциклопедической заметке одного из невольных отцов квантовой гипотезы (что не мешало ему скептически относиться к идее квантов) В.Вина, написавшего в 1909 г. для математической энциклопедии статью о теории излучения, где он высказал предположение о том, что если квант имеет вообще физический смысл, а не есть лишь формальный прием, то смысл этот должен выявляться через свойства атома. Эта заметка вышла в год, когда атомно-молекулярная гипотеза получила и экспериментальное подтверждение в опытах Перрена и атом из некоего гипотетического умозрительного объекта (достаточно вспомнить о дискуссии с энергетистами) окончательно превратился в элемент физической реальности.

Однако вновь мы встречаем повторение ситуации с идеей квантов – первая квантовая модель атома, предложенная А.Гаазом в 1910 г., имела своей целью не описание физических экспериментальных данных, а решение теоретической задачи: Гааз пытался интерпретировать планковский квант через электродинамику, а определение радиуса водорода рассматривалось им как побочный результат подобной интерпретации. Представляется, что и это общетеоретическая направленность работы Гааза, а не только противоположность исходных посылок (попытка выразить h через атомные параметры – электронный заряд, радиус, электрона, частоту бальмеровской серии у Гааза, в отличии от боровского стремления выразить эти параметры через h) разнило эти две квантовые модели. Но если от модели Гааза, как и предшествовавших ей «теоретических» моделей Х.Нагаоки, Дж.Дж.Томсона и др., появившихся с конца XIX века, модель Бора выделяла ее направленность на эксперимент, то среди эмпирических моделей И.Старка, Дж.Никольсона и др. модель Бора выделялась разработанным теоретическим обоснованием и многофункциональностью, удовлетворяя одновременно результатам экспериментов, относившимся к разным областям физики и химии. Таким образом, уже в чисто внешнем соотношении эксперимента и

теории боровский подход был уникален, подробное рассмотрение степени автономности модели Бора от его предшественников можно найти, например, в [27].

Представляется, что решительный отход от классической физики, более того, существенное изменение стиля статьи Бора 1913 г. по сравнению с его предыдущими работами произошло под значительным влиянием стиля Эрнста Резерфорда, у которого он работал с 1912 г. Резерфорд был прежде всего экспериментатором, но экспериментатором со способностью к смелым теоретическим спекулятивным обобщениям своих результатов. Назовем его модель планетарного атома, на которую опирался Бор, но еще более впечатляющим и спекулятивно смелым был резерфордовский закон радиоактивного распада, впервые введший вероятность в физический закон. Недаром при рассмотрении вероятностной природы индивидуального акта именно на этот закон ссылались впоследствии и Планк во второй теории излучения и А.Эйнштейн в статье 1916 г., вводивший коэффициенты вынужденного и спонтанного излучения.

Трилогия Бора 1913 г. как раз и содержала спекулятивные теоретические обобщения эмпирических данных без планомерного дедуктивно обоснованного расчета, в ней были явные интуитивные «скачки», разрывы в выводах, которые вновь находили себе оправдание лишь в экспериментальных результатах.

8. Квантовый атом и стиль мышления Бора

Подробно освещенная в целом ряде историко-научных работ [27, 28, 29] «Трилогия» изначально предназначалась Бором для разрешения противоречий планетарной модели атома Резерфорда, связанных с неустойчивостью этой модели, т.е. противоречий, прежде всего, теоретического характера. Но разрешает эти противоречия Бор по меньшей мере нетрадиционным способом. Его работа — уже явный пример ассимиляции идей I сольвеевского конгресса о неклассичности понятия квант. Причем в отличие от Планка, например, Бор изначально постулирует неклассичность атомной системы в двух «допущениях» своей работы, которые превратятся впоследствии в два знаменитых постулата Бора, и последующие выводы делает уже с учетом этих постулатов.

Построенная теория основывалась на предложенной Бором аксиоматике и не противоречила рассмотренным Бором многочисленным опытным фактам. Именно после «Трилогии» Бора атом стал объектом планомерного физического теоретического исследования как некоторое определенное структурное образование и впервые была установлена совпадающая с экспериментальными данными связь между электронным строением атома и его оптическим спектром. Таким образом, Бор впервые дал теоретическое описание, устанавливающее связь между оптическими спектрами и строением вещества, а также строением атома и свойствами элемента, в том числе химическими. Внутренние противоречия модели Резерфорда как бы стали основой новой теории, поскольку именно их констатация и стала содержанием аксиоматики. Как итог уже первой работы Бора, продолженной как им самим, так и его современниками В.Косселем, А.Зоммерфельдом, А.Ланде и др., возникла и стала развиваться новая наука — теоретическая спектроскопия, во многом и сегодня использующая методы старой квантовой теории.

Помимо отмеченного выше, явно декларируемого Бором разрыва с классической теорией, который уже не преодолевается, а учитывается, стиль Бора, начиная с трилогии 1913 г., отличался отказом от дедуктивной строгости: впоследствии Бор признавал противоречия как необходимый компонент работы на этапе построения новой теории [28].

Но именно эта неформализованность, некая избыточная степень свободы в статьях Бора, начиная с трилогии 1913 г., давали его работам дополнительную эвристическую ценность. Показательна в этом плане работа 1913 г., где фактически заложены основы правил квантования, которые были получены Зоммерфельдом спустя два года, где уже предвосхищен принцип соответствия, сформулированный Бором в 1918 г., где явно обозначен и статистический, вероятностный характер квантовых законов и, более того, в части трилогии, относящейся к теории молекул, фактически намечены именно те направления, в которых и развивались впоследствии основные приближения для молекул квантовой механики и квантовой химии [30].

Принцип соответствия Бора давал новую возможность реализации конкретных расчетов, например определение интенсивности излучения, и Бор, неоднократно подчеркивающий неприменимость классических методов для атомных систем, отдавал явное предпочтение этому «пограничному» методу. Именно в Копенгагене использование принципа соответствия в диссертации ученика Бора Г.Крамерса 1919 г. позволило ему впервые рассчитать эффект Штарка для водорода.

В ретроспекции историкам науки представляется, что за первыми успехами квантовой модели атома Бора последовал кризис теории. При этом не учитывается, что сами участники событий, такие, например, как Ф.Хунд, о кризисе и не вспоминают. Эти идеи кризиса кажутся результатом некой предустановленной заранее идеи о том, что смене парадигм неизбежно должен предшествовать кризис старой теории. Однако, как показывает даже самый краткий анализ событий в квантовой физике начала 20-х годов, ощущение кризиса современники не испытывали.

После первых статей Зоммерфельда с правилами квантования при помощи фазовых интегралов начинают совершенствоваться методы расчета стационарных состояний атомов, определяются энергии, частоты переходов и т.д. в работах Е.Фюсса, Р.Линдсея и других. Эти расчеты носят полуэмпирический характер, т.е. в них подставляются данные из экспериментов, однако после того, как в рамках старой квантовой теории Л.Томас предложил статистическую модель атома, подобные расчеты, в принципе, могли осуществляться уже и теоретически [31].

Трудности в интерпретации мультиплетов, аномального эффекта Зеемана и другие спектральные сложности преодолевались при помощи введения новых квантовых чисел, построения векторной модели атома, а в 1925 г. введением гипотезы о собственном моменте электрона. Тогда как принцип соответствия Бора (несмотря на вое неоднозначности в его применении) позволял рассчитывать интенсивности излучения, а несовпадения результатов расчетов с результатом экспериментов объяснялись не исходным несовершенством модели, а лишь необходимостью дальнейшего ее уточнения.

Явным успехом квантовой теории была теория периодической системы Бора 1920–23 гг. с его предсказанием и затем экспериментальным открытием гафния [30, 31]. Явно полуэмпирический характер теории был, во-первых, не так очевиден ввиду того, что многие предполагали, что за ней лежат не опубликованные Бором расчеты. В 1922 г., приехав в Геттинген – математический центр Германии. Бор счел необходимым привести и некоторые математические доказательства своих положений и провел сравнения главных квантовых чисел орбит внутренних электронов и проникающей орбиты, использовав фазовые интегралы Зоммерфельда, что вполне отвечало духу Геттингена с его призывом «долой принцип соответствия! Да здравствуют фазовые интегралы!», понимая под этим стремление к более строгой дедуктивной теории, но никак не подразумевая сотрясения основ этой теории.

Представляется, что специфика творчества Бора как раз и состояла в преднамеренном отказе от требований дедуктивной строгости, тот «мистицизм», т.е. интуитивные «скачки» в изложении, имевшие эмпирическое оправдание, лишенные формальной и формализованной твердой платформы, которые были свойственны подходу Бора и которые обладали огромной чисто эвристической силой и предопределили в будущем роль Бора как аккумулятора идей и несомненного лидера квантового переворота в науке.

В то же время первые статьи Бора – это классические формально дедуктивные работы, степень математической строгости обоснования которых удовлетворила бы самого ярого пуриста. Разрыв со старой теорией, впервые явно положенный именно Бором в фундамент квантового атома в момент, когда новая «замкнутая теория» в определении Гейзенберга еще не создана, предопределяет как неизбежность наличие интуитивных скачков, дедуктивно не выводимых еще в рамках возникающей новой теории, постулаты аксиоматики которой и были предложены Бором. Эпоха становления квантовой теории дала как раз многочисленные примеры таких интуитивных скачков. Упомянем принцип запрета Паули 1924 г. Сошлемся для подтверждения этого утверждения на Джолка Слэтера – выпускника Гарварда 1923 г., впоследствии проработавшего вою жизнь в МИТе и известного своими сложными расчетами многоэлектронных систем и работами по физике твердого тела. Надо отметить, что Слэтер – один из редких недоброжелателей Бора. Объяснение следует искать в их совместной с Крамерсом статье 1924 г., где в противовес желанию Слэтера, Бор и Крамерс отказались от предложенного Слэтером соединения волны с фотоном как развития идеи виртуального поля осцилляторов, вместо этого, не принимая фотон как таковой, использовали концепцию несохранения энергии в индивидуальных актах, что было опровергнуто последующими опытами. Кроме того, Слэтер всю жизнь считал, что его работы не достаточно оценены, в противовес работам таких «мистиков» как Бор или Паули, предлагавших смелые спекулятивные идеи, имевшие широкий резонанс. Однако и сам Слэтер в интервью Т.Куну в рамках программы «Архива квантовой механики» признавался (интервью от 3 и 8 октября 1963 г.), что и он выпускал «спекулятивные работы», в частности, по векторной модели атома до 1928 г. Последняя дата названа не случайно. Как мы уже упоминали, к 1927 г. основа аппарата квантовой механики была заложена, что не означает, что впереди не было открытий, но только, что они уже были более систематизированы.

Старая квантовая теория, просуществовав 25 лет и уступив Формально права квантовой механике, оказалась гораздо более жизнеспособной, чем это можно было ожидать от теории, в которой было столько прямых противоречий и несостыковавшихся между собой частей. Однако, как подход Бора, не смягчавший противоречия, не уничтожавший их, а включавший все разнообразие взглядов на самое структуру теории, оказался одним из наиболее плодотворных в физике XX века, так и старая квантовая теория не ушла в прошлое, а осталось работающим инструментом. Ею по-прежнему пользуется современная спектроскопия. Объяснения, принятые в старой квантовой теории для явления периодичности, переведены на язык квантовой механики и по-прежнему активно используются. Именно сегодняшние квантовомеханические приближения подгоняются под интерпретацию, данную в рамках старой квантовой теории [30]. Точность расчетов, выполненных в квазиклассическом приближении, к которому, как выяснилось, сводятся интегралы Бора-Зоммерфельда, намного превосходит ожидавшиеся пределы, а идеи принципа соответствия еще помогают структурировать новые физические теории. Хотя и снабженная эпитетом «старая» квантовая теория первой четверти XX века еще далеко не исчерпала свои эвристические возможности.

9. На подходе

Даже в бурной истории квантовой физики два года с середины 1925 по середину 1927 гг. резко выделяются по глубине и интенсивности перемен в фундаментальной теории.

Фактически КМ родилась дважды почти независимо с интервалом в полгода. Обе эти линии тянутся от проблем теории излучения. Вообще в истории КТ механика и электродинамика тесно переплелись, в разные периоды то одна, то другая выступали на первый план. Электродинамика (теория излучения) явно доминировала до 1912 года, затем после боровской теории главные события смещаются к механике электрона в атоме, а в начале 20-х годов опять на первый план выступают вопросы, связанные с изучением. Основной конфликт тех лет, символически задаваемый оппозицией Эйнштейн-Бор, связан с представлением о структуре света. Эйнштейн, несмотря на серьезную критику, похоже никогда не оставлял свою идею о квантах света, Бор до последнего момента старался сохранить классическую волновую теорию, а квантовую дискретность приписать либо атому, либо взаимодействию излучения с ним.

Начальной точкой удобно взять знаменитую работу Эйнштейна 1917 г. – «К квантовой теории излучения» – новый вывод формулы Планка на основе представления о дискретности уровней энергии в атоме (теория Бора) и о дискретности обмена энергией между полем и атомом. Эта та самая работа, где вводятся коэффициенты спонтанного и вынужденного излучения А и В. Хотя Эйнштейн остерегается упоминать в ней о квантах света, эта статья многими воспринималась как связанная с этой концепцией и содействовала росту ее популярности. Отношение к корпускулярной модели

излучения достаточно резко изменилось после второй мировой войны – почти никем не признаваемая раньше, она начинает часто появляться в статьях молодого поколения физиков, хотя соображения в ее пользу и возражения против нее оставались прежними. Закрепило эту тенденцию открытие комптон-эффекта в 1923 году, после него кванты света были вполне признаны и даже такой скептик как Паули поддержал их.

Среди новых работ с использованием фотонов два важнейших достижения принадлежат провинциалам, далеким от места основных событий – французу Л.де Бройлю и индийцу М.Бозе. И та и другая работа прошли бы, вероятно, незамеченными, если бы их не процитировал и положительно не оценил сам Эйнштейн. Де Бройлю фактически принадлежит аналогия материя – излучение, в ряде статей 1923 – 1924 годов он развивал идею о том, что с электроном, так же как и с фотоном, должна быть связана волна. Бозе в статье 1924 года вывел из гипотезы квантов света формулу Планка, что раньше не удавалось. Как известно, строго корпускулярной модели соответствует закон Вина. Бозе получил свой результат благодаря счастливой ошибке, которая, как оказалось, имела принципиальное значение. Ни он, ни сам Эйнштейн поначалу не заметили, что фактически была введена новая, отличающаяся от классической статистика – статистика Бозе-Эйнштейна, соответствующая неразличимым частицам (первым обратил на это внимание П.Эренфест, возражая против работы Бозе) [32, с.113]. Эйнштейн же поддержал метод Бозе и распространил новую статистику на материальный газ, а то, что частицы не были статистически независимы в классическом понимании, попытался объяснить о помощью дуализма – предполагая, что как излучение, так и материальный газ совмещают волновые и корпускулярные свойства. Так, в самом начале 1925 года гипотеза о волновой природе материи стала широко известной. В конце того же года Шредингер развил идеи де Бройля и нашел волновое уравнение для электрона в атоме водорода,

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar}\left(E - U(\mathbf{r})\right)\Psi = 0,$$

из которого выводились дискретные уровни энергии. В январе 1926 года он отдал в печать свою статью «Квантование как задача о собственных значениях (первое сообщение)», которой было положено начало волновой механики. Одновременно по похожему пути шел О.Клейн в Копенгагене, но он работал с релятивистским уравнением, которое сейчас называется уравнением Клейна-Гордона. Свою работу он отправил в печать в апреле, уже успев сослаться на статью Шредингера.

Другой путь к квантовой механике прослежен Ван дер Варденом в его книге [2], его тоже можно начать со статьи Эйнштейна 1917 года. Уже в следующем году Бор переинтерпретировал подход Эйнштейна из полукорпускулярного в волновой и развил методы вычисления интенсивностей излучения спектральных линий (т.е., по современному – вероятностей переходов) с помощью принципа соответствия. Метод соответствия давал в целом разумные результаты и позволял формулировать правила отбора, кроме некоторых выделенных случаев. Ситуация для Бора осложнилась после открытия комптон-эффекта и взлета популярности квантов света. В 1924 году Бор делает последнюю попытку спасти классическую оптику в статье «О квантовой теории излучения», известной как теория Бора-Крамерса-Слэтера. Обычно принято говорить о ней в извиняющемся тоне, поскольку основное положение теории (что энергия и импульс сохраняются не в каждом индивидуальном акте взаимодействия, а только статистически) было опровергнуто экспериментом. Между тем, эта статья может рассматриваться как образцовый пример физической теории, несмотря на отсутствие формул, по четкости постановки вопроса, позволившей практически сразу проверить ее в опыте. «В истории физики трудно найти другую такую теорию, которая была бы столь быстро отвергнута, и все же оказалась столь важной для будущего развития ..., как теория Бора-Крамерса-Слэтера», – пишет Джеммер [3, с.187]. Действительно, эта теория не только открыла путь к матричной механике, но и предвосхитила новое, утвердившееся потом в КМ использование статистики.

Теория Бора-Крамерса-Слэтера создала основу для нескольких других работ 1924 – 1925 годов, опирающихся на те ее тезисы, которые оказались правильны, в первую очередь это теория дисперсии Крамерса и переносящая ее методы из электродинамики в механику статья М.Борна. Она, кстати, и называлась «квантовая механика», зафиксировав название будущей теории раньше ее рождения. В статьях Крамерса и продолжившей их статье Крамерса-Гейзенберга рассматривалось взаимодействие атома с излучением, и атом представлялся в виде набора виртуальных осцилляторов с определенными частотами и амплитудами, соответствующими переходам между уровнями энергии. Именно эти частоты и амплитуды станут основными величинами новой квантовой механики. Но пока еще этого не произошло, а наоборот, попытка Бора и соавторов отказаться от строгого выполнения законов сохранения рухнула под прямыми экспериментами Боте-Гейгера и Комптона-Саймона летом 1924 года. Это заставило Бора наконец-то признать, что «желаемое обобщение классической электродинамики потребует решительной ломки понятий, на которых до сих пор было основано описание природы» [34, т.1, с.560]. Для него развитие вступило в критическую стадию ожидания нового поворота в физике. В духе куновской модели научной революции ряд авторов писали о кризисе старой квантовой теории накануне 1925 года. Такое восприятие ситуации, вероятно, подправляет ситуацию в угоду последующим событиям. Тогда же, в 1924 году, оказалась в затруднении и искала радикально новых путей весьма маленькая группа физиков в Копенгагене и Геттингене, включающая Бора, М.Борна и двух молодых ассистентов последнего – В.Паули и В.Гейзенберга.

10. Буря и натиск

Основных создателей квантовой механики можно разбить на три поколения: старшее: – Эйнштейн, и Бор, среднее – Борн и Шредингер и младшее, буквально накануне вступившее в науку – де Бройль, Паули, Гейзенберг, Дирак и Йордан. Первые к 1925 году были уже всемирно известными научными лидерами, вторые – не слишком известными профессорами, третьи – недавними студентами только что защитившими или готовящими к защите диссертации. Двое из них – Паули и Гейзенберг – сыграли в данный

момент решающую роль. Оба они учились квантовой теории у Зоммерфельда в Мюнхене, после защиты работали ассистентами у Борна в Геттингене и одновременно попали под влияние Бора. На пересечении этих традиций и влияний и родилась квантовая механика, причем Гейзенберг играл роль генератора сумасбродный идей, а Паули (всю свою жизнь) – скептика и критикана.

С сегодняшней точки зрения поразительно, как велики претензии статьи Гейзенберга «О квантовотеоретическом переопределении кинематических и механических соотношений», написанной в июне 1925 года, в уединении на острове Гельголанд, и как мало в ней реально достигнуто. Фактически она представляет собой лишь проект будущей теории, а доказательства ее плодотворности появились позже. И удивительно при этом, что уже в этом первом наброске и Борн, и Паули, и Дирак увидели решающий прорыв. То, чему сам Гейзенберг придавал главное значение – отказ от использования представлений об орбитах электрона в атоме и замена их величинами электродинамического происхождения (наблюдаемыми в эксперименте частотами и амплитудами излучения) – впоследствии оказалось не самым важным и подверглось корректировке. То, что он сам отметил как недостаток своей теории – некоммутативность умножения введенных им величин – оказалось богатой математической идеей за которую ухватились Борн и Дирак и развили в настоящую теорию. Бори описал некоммутирующие переменные матрицами – отсюда и пошло название «матричная механика», кстати очень не нравившееся Гейзенбергу [35]. В статье Борна с Йорданом «О квантовой механике» появились канонические коммутационные соотношения.

$$pq - qp = -i\hbar$$

– другой (наряду о уравнением Шредингера) символ КМ.

Матричной механике суждено было прожить недолго – через год она была фактически вытеснена появившейся на полгода позже волновой механикой, всего за это время было опубликовано приблизительно 50 развивающих ее статей. Матричная механика успела решить простейшие задачи о квантовании ангармонического осциллятора, ротатора, атома водорода и подступила к двухатомной молекуле и анализу непериодических движений. В литературе высказывались разные мнения относительно причин победы волновой механики, одной из них называлась ее наглядность и большая традиционность по сравнению с абстрактной и заумной матричной механикой. В действительности решающую роль в этой победе сыграли сами авторы матричной механики – Паули, Борн и Гейзенберг, которые были в числе первых, кто начал использовать методы Шредингера – а их не упрекнешь ни в непонимании собственной теории, ни в стремлении к традиционности [9]. Наоборот, подвергая критике шредингеровскую интерпретацию и философию, отрицая наглядность, они развили прежде всего математические методы его теории.

Шредингер написал свою первую работу в январе 1926 года, и еще пять в последующие пять месяцев. Они составили классическое введение в волновую механику и уже через год были изданы отдельной книгой. Он же быстро доказал эквивалентность двух новых механик, несмотря на разительную противоположность философских установок и исходных принципов, его интерпретация первоначально сводилась к тезису о волновой природе электрона (с использованием оптико-механической аналогии), в июне он выдвинул новое понимание волновой функции как плотности электрического заряда. Такая интерпретация позволила рассчитывать интенсивности спектральных линий, что, впрочем, могла делать и матричная механика, только более сложным образом. Естественно, что «непрерывная» механика Шредингера с мощнейшим аппаратом уравнений в частных производных создавала большие удобства при вычислениях, чем «дискретная» матричная механика, но дело не только в этом.

Решающее преимущество волновой механики проявилось в ее способности к серьезным обобщениям. При этом произошло пересечение ее подходов с традицией матричной механики. Борн, Гейзенберг, Йордан и Дирак обобщили шредингеровский формализм на случай многих частиц (пси-функция тогда становилась функцией не трех координат, а значительно большего их числа) и на случай непериодического движения (рассеяния). При этом фактически опровергалась первоначальная философия Шредингера – из трехмерной волны, связанной с электроном, волновая функция превращалась в первом случае в абстрактную математическую функцию в многомерном пространстве, во втором случае – в функцию, задающую вероятность атомных переходов (Борн) или вероятность пространственного распределения заряда (Паули). Неудивительно, что для такого обобщения теории потребовались люди, несогласные с ее изначальной интерпретацией. Именно на этом направлении появились первые варианты законченной теории – в декабре 1926 года Дирак и Йордан независимо завершили статьи, содержащие так называемую «теорию преобразований Дирака-Йордана» – в ней уже было все самое нужное: математический формализм теории Шредингера со статистической интерпретацией, методы решения с возможностью перехода из одного представления в другое, правила сравнения результатов вычислений о экспериментом.

Собственно на этом Дирак мог посчитать основную работу завершенной – да он и писал в начале 1927 года: «Новая квантовая теория, основанная на предложении, что динамические переменные не удовлетворяют коммутативному закону умножения, развилась к настоящему времени достаточно для того, чтобы образовать вполне законченную теорию динамики [36, с.246]. Но для его философствующих немецких коллег необходим был еще один шаг – нужно было не только создать формализм и применить его к описанию экспериментов. Им еще хотелось «понять» построенную теорию, т.е. дать ей философскую интерпретацию. Это было сделано в 1927 году Гейзенбергом и Бором, предложившими соответственно то, что теперь называется принципами неопределенности и дополнительности.

11. Философские предпосылки и следствия квантовой механики

Революция в физике начала XX века была связана со столь же радикальными изменениями в гносеологии и философии науки. Начало им положил еще Эрнст Мах. В своей борьбе против всякой метафизики он не просто противопоставлял ей науку, но и обнаружил метафизические понятия

в самих основах науки, обратив тем самым критику на нее. Его тезисы против понятий об абсолютном пространстве, времени, причинности, казалось, были блестяще подтверждены теорией относительности, в которой определения фундаментальных величин фактически вводились операциональным способом, заданием метода измерения, а эфир изгонялся как принципиально ненаблюдаемый.

«Формулировка квантовой механики... была бы невозможна без этого общего критического подхода, в котором предпочтение отдается концептуальному анализу соответствия между экспериментальными данными и математическими величинами в формализме теории перед наивными наглядными представлениями» – писал в конце своей жизни Паули о эпистемологических уроках теории относительности [37, с.11]. И действительно, именно ее пример стоял перед глазами Гейзенберга, когда он в 1925 году изгонял из квантовой теории представления об электронных орбитах в атоме – ненаблюдаемые величины необходимо убрать из теории, оставив только данные в эксперименте частоты и интенсивности спектральных линий.

Но при создании квантовой механики философский сдвиг оказался еще радикальнее. Когда Гейзенберг в 1926 году поделился изложенной выше идеей с Эйнштейном, тот неожиданно отреагировал:

«Но неужели Вы всерьез думаете, что в физическую теорию можно включать лишь наблюдаемые величины?

– А разве не Вы сами положили именно эту идею в основу своей теории относительности? Вы ведь подчеркивали, что нельзя говорить об абсолютном времени потому что это абсолютное время невозможно наблюдать.

– Возможно я и пользовался философией этого рода, – отвечал Эйнштейн, – но она тем не менее чушь. ... с принципиальной точки зрения желание строить теорию только на наблюдаемых величинах совершенно нелепо. Потому что в действительности все ведь состоит как раз наоборот. Только теория решает, что именно можно наблюдать» [38, с.191].

По воспоминаниям Гейзенберга, именно этот диалог послужил для него исходным пунктом в переосмыслении интерпретации возникающей КМ, итогом чего стала его мартовская статья 1927 года «О наглядном содержании квантово-теоретической кинематики и механики» (о принципе неопределенности). В ней уже выводы о наблюдаемости или измеримости величин делались не из обыденных рассуждений, а из аппарата квантовой механики. В частности, получилось, что координата и импульс частицы не могут быть одновременно измерены сколь угодно точно, а только с условием:

$$\Delta p\, \Delta q \sim \hbar.$$

Происходит это из-за того, что в процессе измерения прибор, сама экспериментальная ситуация, оказывает неконтролируемое воздействие на микрообъект, и это воздействие нельзя сделать пренебрежимо малым, как было в классической физике.

Принцип неопределенности – одна из трех основ копенгагенского истолкования квантовой механики. Другой, не менее важной, является статистическая интерпретация волновой функции, и связанный с ней отход от классических представлений о причинности. Автором этой идеи и ее самым активным проповедником был Борн. В классической физике все события в принципе считались причинно обусловленными и детерминированными и даже статистическая физика Больцмана-Максвелла не опровергала это. Статистика использовалась, как считали, там, где субъекту не хватает знаний либо возможности полностью учесть ситуацию – т.е. обусловлена неполнотой знания, окажем, о миллионах молекул газа. В квантовой механике даже индивидуальное микроскопическое событие не является детерминированным, мы можем вычислять лишь вероятности определенных процессов. Так, пси-функция определяет вероятность нахождения электрона в данном объеме пространства dυ:

$$d\omega = \Psi^*(r)\, \Psi(r)\, d\upsilon.$$

Статистика укоренена на самом фундаментальном уровне, «природа делает выбор» по словам Дирака. (Эйнштейн, напротив, с этим не смирился, продолжая верить, что «Бог не играет в кости»).

Третьей компонентой является боровский принцип дополнительности, который даже более радикален в смысле прямого философского значения, выходящего за рамки физики. В отличие от первых двух составляющих «копенгагенского духа», принцип дополнительности не связан с какой-то формулой и иногда опускается при изучении квантовой механики – так, по идеологическим причинам, нет его в курсе Ландау-Лифшица. Большинство ныне работающих физиков обходится без него и многие даже его не знают.

Высказанный впервые осенью 1927 года, этот принцип может быть кратко сформулирован в следующем виде: в КМ разработан изощренный математический аппарат, позволяющий полно описать явления на атомном уровне. Однако эту теорию весьма трудно понять, т.е. интерпретировать с помощью наглядных моделей, суть дела в том, что эти модели (частицы, волны) почерпнуты нами из повседневного опыта, пригодного для классической физики, но оказавшегося неподходящим для описания микроскопических явлений. В то же время нельзя и отказаться от этих наглядных понятий, поскольку они лежат в основе всякой физической интуиции, поскольку для изучения микрообъектов мы неизбежно используем классические приборы и классические теории, поскольку отдельные квантовые эксперименты вполне описываются классическими картинками. Сложность состоит в том, что для описания одного и того же объекта в разных экспериментах – электрона в камере Вильсона или его же в атоме водорода – нам требуются совершенно разные модели – в первом случае корпускулярная, а во втором – волновая. Ответ по Бору не в том, чтобы объявить лишь одну из них правильным представлением, и не в том, чтобы заявить, что электрон есть одновременно и волна и корпускула (дуализм в философском смысле ущербен, потому что не может быть строго сформулирован), а в том, чтобы допустить использование обеих не доводя до прямого противоречия – считая, что в микроскопическом эксперименте на деле мы имеем результат, относящийся не к объекту как таковому, а к его взаимодействию с прибором. Таким образом, различные экспериментальные ситуации требуют различных наглядных интерпретаций, единое и полное описание возможно с помощью абстрактного математического аппарата.

Боровская «философия» придает гораздо более активную роль субъекту познания, чем классическая метафизика и даже позитивизм. В строгом смысле нельзя говорить, что имеется законченная копенгагенская интерпретация КМ – даже в самой общепринятой физической теории обычно имеется полное согласие относительного определенного центрального ядра – уровня основных уравнений. Что же касается как отдельных следствий и приложений, так и самих основ интерпретации и логической структуры – тут никогда не бывает консенсуса и расхождения всегда сохраняются. И все-таки можно сказать, что относительно завершенную форму копенгагенская философия приобрела вскоре после завершения создания самой теории. Любопытно, что на первых ее стадиях руководящие философские идеи были другими – для волновой механики это была идея преодоления дискретности с помощью волновой теории всего – и излучения и материи. Но и в матричной механике, как показало исследования М.Беллер [39] – первоначальная философия концентрировалась вокруг идеи отказа от пространственного описания. Утверждалось, что в микромире перестают работать наши привычные представления о пространстве – на это опирался Гейзенберг отказываясь от использования понятия об электронных орбитах. Матричная механика провозглашалась принципиально не наглядной теорией. Впоследствии сам Гейзенберг от этой идеи отказался. Но и итоговая философия квантовой механики вовсе не была прямым следствием физической теории. Ее культурным предпосылкам посвящена работа П.Формана «Веймарская культура, причинность и квантовая теория, 1918 – 1927: адаптация немецких физиков и математиков к враждебному им интеллектуальному окружению» [6].

12. Веймарский антисциентизм

Культурологическая история XX века начинается с мировой войны, ниспровергнувшей благодушное прогрессистское настроение века предыдущего. Экономическая и интеллектуальная атмосфера в Германии в первые годы Веймарской республики во многом напоминает наш нынешний кризис. Поражение в войне, огромная инфляция, становление непрочных демократических институтов, пессимистические и иррационалистические настроения публики. В культурной жизни эти сдвиги отражены в популярности философии жизни и шпенглерианства, живописи и кинематографе экспрессионистов, увлечении мистикой и астрологией.

Конец 1918 года означал для Германии крах веры в победу и национального гонора. Ученые, и физики среди них, еще недавно самодовольные, гордящиеся своей наукой и приносимой ей пользой для техники, войны и государства, ощутили резкое изменение отношения к ним в обществе. «В Германии сейчас мы опять страдаем от воинствующего мистицизма, который, как и в прежнее время, поворачивается против науки и разума как самых опасных врагов» – писал Вильгельм Оствальд [6, с.12 – 13]. Даже в апологиях науки того времени отражено это общее разочарование: «Кто сегодня, кроме некоторых взрослых детей еще верит в то, что знание астрономии, биологии, физики или химии может – хоть в малейшей степени – объяснить нам смысл мира» – говорил в 1920 г. в речи «Наука как призвание и профессия» Макс Вебер [40, с.306 – 307].

В 1918 году вышел первый том Шпенглеровского «Untergang des Abendlandes», прочитанный, вероятно, почти каждым образованным немцем и вышедший за пять лет в тридцати изданиях. В этой организмической теории культур, их роста и упадка, рациональному XIX веку была отведена следующая роль: «Тирания рассудка, которая мы не ощущаем, так как сами являем ее кульминацию, представлена в каждой культуре эпохой, занимающей промежуточное состояние между мужем и старцем, не более того ее наияснейшее выражение – это культ точных наук, диалектики, доказательства, опыта, каузальности» [41, с.624]. Доминировавшая философия жизни утверждала, что наука находится в кризисе, куда ее завел материализм и позитивизм XIX века , а вывести сможет лишь новая наука, базирующаяся не на рациональности, а интуиции, чувстве, ценностях.

Вообще смакование кризиса – характерная черта эпохи. «На протяжении всего веймарского периода в академических кругах часто утверждалось, что происходит кризис, никто не утруждал себя точным определением его природы... В любом случае кризис существовал хотя бы в силу того, что почти каждый образованный немец верил в его реальность» [13, с.245]. Действительно был кризис экономический и политический, но говорилось также и о общем культурном, моральном кризисе – хотя, с сегодняшней точки зрения, Веймарская Германия представляется в культурном отношении поразительно творческой. Ощущение кризиса было тогда модой, частью тогдашней германской ментальности.

Физики, конечно не могли в полной мере разделить антиинтеллектуальные настроения времени, но и они испытали на себе их влияния. Форман исследовал адаптацию идеологии ученых к враждебному окружению по текстам популярных речей, с которыми профессора обращались к более широкой публике. Из их выступлений исчезли аргументы об утилитарной пользе физики для техники, промышленности, о науке как «господстве человека над непокорными силами природы», заменившись подчеркивавшем связи физики с философией (немецкой идеалистической – Вильгельм Вин сожалел, что в начале века гегелевская философия перестала быть одним из обязательных экзаменов на любую докторскую степень в немецких университетах), отрицанием утилитаризма в пользу понимания науки как воплощения «чисто человеческого инстинкта к исследованию». Решительно отвергался механицизм и материализм, меньше стало положительных упоминаний Маха и позитивизма. Даже предисловие к квалифицированнейшей энциклопедии «Handbuch der Physik», написанное позитивистски мыслящим Рейхенбахом утверждает, что занятия физикой «вырастают из самого человеческого существования подобно воле к жизни, к игре, к общению с другими» (цит. по [6, с.43 – 45]).

В напряженной политической атмосфере Веймарской республики, с ее правыми и левыми путчами, университеты и профессура в целом заняли весьма консервативную позицию. Поражение в войне не отменило, а может быть даже в чем-то укрепило националистические настроения. Оказавшись в культурной изоляции после войны, исключенная победившими державами из международных научных организаций (таких как International Research Council) (в частности, немецкие физики до лета 1926 года не приглашались

6–3524

на Сольвеевские конгрессы, пропустив три из них) германская наука ответила встречным бойкотом и обратила свой культурный империализм на нейтральные страны (т.е. в основном – страны центральной и северной Европы) – и на Россию.

Профессора с лево-либеральными взглядами типа Эйнштейна или Борна были редки. Большинство исповедовало умеренный национализм в консервативно-романтическом духе, с его оппозицией демократической Веймарской республике в пользу старой Германской империи. И это не только будущие нацисты Ф.Штарк и Ф.Ленард, не только консервативные профессора О.Винер и В.Вин. Даже весьма умеренный по тогдашним стандартам Зоммерфельд был поражен, узнав, что Эйнштейн «верит в новую эру и желает сотрудничать в ней ... Я же нахожу все печальным и глупым» (письмо Эйнштейну 3 дек. 1918, цит по [6, p.41]). Эти политические взгляды коррелировали с антисциентизмом и антирационализмом тех лет.

Германские академические круги противопоставляли себя западноевропейским с помощью оппозиции «Цивилизация-Культура». Первая мыслилась как утилитарная, индивидуалистская и поверхностная, тогда как вторая – духовная, глубокая и идеалистическая. Физика и математика естественно были подозрительны, общественное мнение больше симпатизировало гуманитарным наукам. В их пользу были изменены программы средних школ – гимназий и реальных училищ. Но в целом эта враждебность по отношению к точному знанию имела скорее моральное значение и не привела к уменьшению числа студентов в университетах и к свертыванию материальной поддержки науки. Наоборот, общественное отчуждение скорее подстегивало интенсивные физические исследования, несмотря на трудные экономические условия того времени. «Это место и время глубокой враждебности к физике и математике было также одним из наиболее творческих во всей их истории... Объяснение (этому).. можно найти по крайней мере частично, в самой этой враждебности. ...Готовность, желание немецких физиков пересмотреть основания своей науки тогда реконструируется как реакция на их негативный престиж» [6, p.4 – 7]. При этом окружающая интеллектуальная атмосфера отразилась не только на высказываемых ими идеологических тезисах, но и на развитых научных концепциях.

13. Революционное поколение и квантовая причинность

Квантовая механика была построена буквально в считанные месяцы после статьи Гейзенберга, переформулированы на новый язык все предыдущие результаты, разрешены многие затруднения – практически без сопротивления и борьбы, обычно сопровождающих смену научных теорий. Взрывной характер возникновения новой теории отражают результаты библиометрических исследований – экспоненциальный рост числа публикаций по КМ в первые полтора года происходил с характерным временем удвоения 2 – 4 месяца [9], а в двух других важнейших теориях XX века – теории относительности и старой квантовой теории – в несколько раз медленнее. Причины этого в обоих случаях различны. Создание КМ означало переворот в уже сложившемся и работающем научном сообществе, занимающемся старой квантовой теорией. Практически все эти теоретики моментально переключились на новый язык, этот переход естественно намного легче давался начинающим ученым – и действительно, из приблизительно 80 авторов начального периода КМ больше половины не достигло к тому времени 30 лет – Паули называл новую теорию «Knaberphysik» (мальчишеская физика). При возникновении квантовой теории в начале века было не так – тогда возникала совершенно новая область и новое сообщество, что требует существенно большего времени. Труднее объяснить отличие в быстроте распространения в случае с теорией относительности – она тоже означала переворот в актуальной исследовательской области – теории электрона. Объяснение, вероятно, лежит в том, что переворот квантовой механики был ожидаем, а теория относительности поначалу не воспринималась как важное новшество.

Это различие в восприятии связано о общей оценкой ситуации в физике. Если в начале века она была разумно консервативной, то в двадцатые годы – гиперкритической. В обычных условиях ученые осторожно сопротивляются новшествам, стараясь извлечь максимум из старых признанных концепций – в двадцатые годы штампом были наоборот высказывания о необходимости радикальной ломки принципов недавних концепций. Отношение к отарой квантовой теории – только один из многочисленных примеров. В обстановке, скажем, современной ее тогдашние трудности не смогли бы вызвать распространенного мнения о необходимости новой механики. Тогда же физиками, подобно многим другим, овладело желание кризиса и стремление к революции.

Общественное мнение, дух времени характеризуется скорее не готовыми ответами на определенные вопросы, сколько самимй вопросами, привлекающими повышенное внимание. Одним из таких вопросов в веймарский период был закон причинности, понимаемый обычно как принципиальное признание строгого детерминизма. Этот детерминизм подвергался тогда многочисленным идеологическим атакам на общефилософском уровне. Не обошли его стороной и физики. Принцип причинности стал объектом дискуссии еще до появления квантовой механики – в 1921 г. С критикой его выступили Г.Вейль, В.Шомки, В.Нернст, несколько позже временно Э.Шредингер, напротив, в защиту – Й.Цетцольд, М.Планк, А.Эйнштейн. Дискуссия в основном имела квазифилософский характер и отрицание строгой причинности еще не имело мощной поддержки на собственно физическом уровне.

Ситуация изменилась с квантовой механикой – введение статистики на уровне индивидуальных событий знаменовало отказ от строгого детерминизма на микроуровне и тем самым отказ от классического понимания причинности. Другое дело, что этот отход скорее преувеличивался, чем замалчивался в популярных и полупопулярных выступлениях физиков, как будто они с радостью ухватились за возможность продемонстрировать публике, что и они не чужды интеллектуальным настроениям эпохи. Эта «адаптация физиков к враждебному окружению» наверняка повлияла на восприятие и распространение копенгагенской интерпретации, которая вскоре стала ортодоксальной.

То, что это вытекало не только из физической теории показывает пример нашей страны, где такой выдающийся физик как В.А.Фок серьезно занимался разработкой более материалистической интерпретации квантовой механики и даже порвал в связи о этим отношения с Йорданом. Еще один аргумент представляют события послевоенных лет, когда центр физического сообщества сместился в Америку, время и культурный климат которой весьма отличны от вейсмаровской: Германии. В эти годы мы имеем обратный отток популярности к более реалистическим, классическим интерпретациям квантовой механика и в настоящее время копенгагенская интерпретация, несмотря на ее красоту и оригинальность, уже не может считаться абсолютно доминирующей, скорее имеется примерное равенство сил ее критиков и защитников. Ее возникновение – пример того как идеологические и культурные влияния внедряются и превращаются в научные концепции.

Примечания

[1] См. русский перевод в [17, с.249–257].

[2] Эта проблема с точки зрения смены идеализированного объекта «частной теоретической схемы» проанализирована в книге Алексеева, Овчинникова и Печенкина [21]. Там содержатся и важные замечания по поводу статистического характера квантовой теории.

Список литературы

1. *Хунд Ф.* История квантовой теории. Киев, 1980. 244 С. (1966).
2. Sourcer for history of quantum mechanics with the historical Introduction by B.L. van Waerden. Amsterdam, 1967, 430 p.
3. *Джеммер М.* Эволюция понятий квантовой механики. М., 1985. 380 С. (1967).
4. *Kuhn T.S., Heilbron J.L., Forman P., Allen L.* Sources for History of Quantum Physics. An Inventory and Report. Phaildelphia, 1967. 176 p.
5. *Kuhn T.S.* Black body theory and the quantum discontinuity, 1894–1912. Oxford etc., 1978. 356 p.
6. *Forman P.* Weimar culture, causality and quantum theory, 1918–1927. Adaption by German physicists and mathematicians to a hostile intellectual environment // Historical Studies in the physical sciences. 1971. Vol.3, P.1–115.
7. *Pauli W.* Wissenschaftliche Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.a. NY etc, 1979–1985. Vol.1–2.
8. *Mehra J., Rechenberg H.* The historical development or quantum theory. Vol.1–5. NY etc, 1982–1986.
9. *Kozhevnikov A.B., Novik O.I.* Analysis of informational ties in early quantum mechanics (1925–1927) // Acta historiae rerum naturalim necnon technicarum. Iss.20. Prague, 1989. p.115–160.
10. *Паульсен Ф.* Германские университеты. СПб., 1904.
11. *Turner R.S.* The growth of proresional research in Prussia, 1818–1848. Causes and context // Historical Studies in the physical sciences. Vol.3. 1971. P.137–182.
12. *Cahan D.* The institutional revolution in German physics, 1865–1914. // Historical Studies in the physical sciences. Vol.15(2). 1985. P.1–65.
13. *Ringer F.K.* The decline of German mandarins. The German academic community, 1890–1933. Cambridge, 1969.
14. *Forman P.* The environment and practice of atomic physics in Weimar Germany: a study in the history of science. Dissertation. Berkeley, 1967. 489 p.
15. *Jungnickel Ch., McCormmach R.* Intellectual mastery of nature: treoretical physics from Ohm to Einstein. V.1–2. Chicago, 1986.
16. *Паули В.* Труды по квантовой теории. М., 1975. 688 с.
17. *Планк М.* Избранные труды. М., 1975. 788 с.
18. *Hermann A.* Max Planck. Paris, 1971.
19. *McCormmach R.* Editor's foreword // Historical studies in the physical sciences. Vol.3. 1971. p.IX–XXIV.
20. *Дорфман Я.Г.* Всемирная история физики. XIX–XX вв. М., 1979.
21. *Алексеев И.С., Овчинников Н.Ф., Печенкин А.А.* Методология обоснования квантовой теории. М., 1984. 332 с.
22. *Эйнштейн А.* Собрание научных трудов. Т.3. М., 1965.
23. *Kozhevnikov A.* Light-quanta and waves: Einstein's reputation as a dualist. // Preprint MPI-Ph/92-63. 17 p.
24. *Mehra J.* The Solvay conferences on physics. Dordrecht, 1975. 415 p.
25. *Франкфурт У.И., Френк А.М.* Истоки теории излучения Эйнштейна // Эйнштейновский сборник, 1969–1970. М., 1970. С.270–300.
26. *Hermann A.* The Genesis of quantum theory: 1899–1913. Cambridge (Mass), 1871. 165 p.
27. *Дынич Е.И., Ельяшевич М.А., Томильчик Л.М.* Роль принципа соответствия в становлении квантовой теории атома // Нильс Бор и наука XX века. Киев, 1988. С.55–65.
28. *Heilbron J.L.* Lectures on the history of atomic physics: 1900–1922 // History of twentieth century physics. NY, L, 1977. P.40–108.
29. *Heilbron J.L., Kuhn T.S.* The genesis of the Bohr atom // Historical studies in the physical sciences. Vol.1. 1969. P.211–290.
30. *Дмитриев И.С., Романовская Т.Б.* Из истории электронных представлений о природе химической связи // Нильс Бор и наука XX века. Киев, 1988. С.66–80.
31. *Романовская Т.Б.* История квантовомеханической интерпретации периодичности. М., 1986.
32. *Kragh H.* Niels Bohr's second atomic theory // Historical studies in the physical sciences. Vol.10. 1979. P.123–186.
33. *Кожевников А.Б.* Эйнштейновская формула флуктуаций и корпускулярно-волновой дуализм // Эйнштейновский сборник, 1986–1990. М., 1990. С.102–124.
34. *Бор Н.* Избранные научные труды. М., 1971. Т.1–2.
35. *Кожевников А.Б.* Электродинамика в матричной механике: разногласия в интерпретации теории. Препринт ИИЕТ АН СССР. 1987. №1. 16 с.
36. *Дирак П.А.М.* К созданию квантовой теории поля. Основные статьи 1925–1958 гг. М., 1990. 307 с.
37. *Паули В.* Теория относительности. М., 1983. 241 с.
38. *Гейзенберг В.* Физика и философия. Часть и целое. М., 1989. 400 с.
39. *Beller M.* Matrix theory before Schrodinger: philosophy, problems, consequences // ISIS. Vol.74. 1983. P.469–491.
40. *Вебер М.* Наука как призвание и профессия // Избр. произв. М., 1990. С.707–735.
41. *Шпенглер О.* Закат Запада. Очерки морфологии мировой истории. М., Мысль. 1993.