

формации и обеспечения возможности международного контроля за всеми работами, ведущимися в этой области, которые при отсутствии урегулирования могут стать источником катастрофы.

Национальные интересы и безопасность

Такие меры, конечно, потребуют устранения всех препятствий, которые до сих пор считались необходимыми для охраны национальных интересов, но которые сегодня стоят на пути к общей защите от беспрецедентной угрозы. Разрешение этой опасной ситуации, несомненно, требует доброй воли всех народов, однако следует понимать, что сейчас мы имеем дело с тем, что может бросить смертельный вызов самой цивилизации. Едва ли можно представить себе лучшие предпосылки для решения этой ситуации, чем искреннее стремление к поиску прочной основы для мировой безопасности, так единодушно выраженное всеми теми народами, которые только благодаря объединенным усилиям смогли защитить основные права человека. Трудно переоценить значение соглашения по этому жизненно важному вопросу для устранения препятствий взаимному доверию и установления отношений согласия между народами.

Неоценимый вклад в решение предстоящей задачи, которая налагает большую ответственность на наше поколение, могут внести ученые всего мира. Общение между учеными не только формирует прочные связи между отдельными представителями разных народов, но также все научное сообщество, несомненно, объединится в энергичной попытке шире распространить должное понимание возникшей проблемы и обратить внимание всего человечества на уже прозвучавшее предупреждение. Нужно ли говорить, что каждый ученый, принявший участие в закладывании основ нового развития или призванный участвовать в работе, которая может сыграть решающую роль в борьбе за сохранение цивилизованного мира, в котором может свободно развиваться человеческая культура, должен быть готов в любой доступной ему форме содействовать поиску выхода из современного кризиса, выхода, достойного идеалов, за которые наука боролась на протяжении многих столетий.

Перевод М. М. Калишенко

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ МЕТАЛЛОВ В РАБОТАХ Г. А. ЛОРЕНЦА И Н. БОРА

М. А. ЕЛЪЯШЕВИЧ, Т. С. ПРОТЬКО [Минск]

Основополагающим работам Н. Бора 1913 г. по квантовой теории атома предшествовали в 1909—1912 гг. его исследования по электронной теории металлов¹. При проведении этих исследований Бор пришел к убеждению, что с помощью классических представлений о структуре вещества нельзя объяснить «в обычном смысле физики» целый ряд явлений «в том смысле, что мы не можем составить себе наглядного представления об этих явлениях на основе существующих понятий физики» [2, с. 7].

Классические («наглядные») представления о структуре вещества были развиты Г. А. Лоренцем в его работах по электронной теории и составляли основу его исследований по электронной теории металлов. Критическому анализу этих исследований посвящены магистерская [3] и докторская [4] диссертации Бора.

В данных исследованиях Лоренца и Бора проявились в конкретной форме две взаимосвязанные тенденции, характерные для развития естествознания в период конца XIX — начала XX в, обусловленные процессом обобщения знаний, накопленных в смежных областях естествознания. Первая состоит в том, что создание обобщающих теорий не противоречило сложившейся системе представлений о сущности рассматриваемых явлений (картине мира) и не влекло за собой изменения этих представлений. Во второй — создание обобщающих теорий обнажало скрытые противоречия в картине мира, что в конечном итоге требовало пересмотра сложившейся системы представлений.

Представителем первой тенденции был Лоренц. Его работы по электронной теории металлов² полностью согласовывались с основными положениями классической естественнонаучной картины мира. Бор был представителем второй тенденции. Попытки применить электронную теорию металлов для описания более широкого круга явлений привели его к прочному убеждению в необходимости поиска иных подходов к решению проблем, связанных с атомами и электронами.

Электронная теория Г. А. Лоренца

Во второй половине XIX в. в различных областях естествознания — химии, физике, кристаллографии был накоплен обширный эмпирический и теоретический материал об атомах вещества и атомах электричества. Материал этот, однако, был сильно разрознен и в ряде случаев противоречив.

Попытки синтеза двух направлений в естественнонаучной атомистике осуществлялись, с одной стороны, на базе механических представле-

¹ Работы Бора по электронной теории металлов на датском и английском языках помещены в первом томе собрания его научных трудов [1]. Здесь же приведены интересные материалы из переписки Бора по этому вопросу.

² Работы Лоренца по электронной теории металлов помещены в III, V, VII, VIII, IX томах собрания его научных трудов. Основополагающей являлась написанная в 1905 г. работа «Движение электронов в металлах» [5].

ний, с другой — с помощью представлений, выработанных в теориях об электрической материи. В первом случае используемые для объяснения электрических явлений модели, разработанные в физической атомистике, являлись основополагающими. Так, в «Механическом обосновании электричества» (1882 г.) Р. Клаузиуса электродинамика рассматривалась как один из разделов молекулярно-кинетической теории, электрические процессы здесь сводились к механическому перемещению электрических масс. Во втором случае механические модели атомов играли лишь вспомогательную роль: обобщающая теория основывалась на представлениях об электрической субстанции. Наиболее характерным примером такого синтеза была теория Дж. Дж. Томсона, в которой взаимосвязь электричества с веществом выражалась с помощью механической модели трубок индукции, предложенной Фарадеем и развитой Максвеллом.

Принципиально иной характер носило обобщение результатов естественнонаучной атомистики в классической электронной теории, основной вклад в разработку которой внес Лоренц.

В электронной теории были использованы наиболее важные результаты химической атомистики, физической атомистики и теории атомистического строения электричества. В докладе, прочитанном в 1904 г. в Берлине (русский перевод этого доклада, вышедшего отдельным изданием, называется «Электронная теория» [6]), Лоренц следующим образом охарактеризовал содержание обобщаемого материала: электронная теория имеет родство «с теорией двух электрических жидкостей, предложенной Вильгельмом Вебером», а также принимает «в полном объеме общие идеи теории Максвелла» (там же, с. 6—7). Далее Лоренц отмечает: «...мы самым тесным образом примыкаем к молекулярным теориям в физике, как и к химической атомистике и специально к теории ионов, оказавшейся столь полезной при объяснении явлений электролиза, и к учению о газовых ионах» (там же, с. 11), а также «...мы примкнем к одной теории, которая с первого взгляда ни в какой связи с нашей проблемой как будто не стоит. Я имею в виду кинетическую теорию газов» (там же, с. 34).

Отличительной чертой теории Лоренца является то, что она построена на новой атомистической концепции структуры материи. Влияние этой концепции на последующее развитие естествознания, на наш взгляд, изучено еще недостаточно. Вместе с тем именно в концепции Лоренца наиболее четко зафиксированы основные представления о структуре материи, характерные для классического периода в развитии физики.

Рассмотрим кратко основные положения модели Лоренца.

Согласно Лоренцу, вещество состоит из химических нейтральных атомов, положительно и отрицательно заряженных частиц — электронов («весомой материи»), которые погружены в неподвижный эфир («материю или среду, заполняющую поле»). Поле существует вокруг заряженных частиц, относительно его природы Лоренц не делает никаких предположений, так как «мы можем широко развить теорию и выяснить целый ряд явлений, не прибегая к умозрительным представлениям такого рода» [7, с. 20].

«...Эфир не только занимает все пространство между молекулами, атомами и электронами, но... он и проникает все эти частички» (там же, с. 33). Лоренц указывает, что основные уравнения электромагнитного поля в той форме, какую они принимают для эфира, «составляют наиболее прочно установленную часть электромагнитной теории» (там же, с. 26).

Центральное место в теории Лоренца отводится исследованию свойств заряженных микрочастиц вещества. В работах, написанных до 1900 г., Лоренц именует их ионами. Впоследствии, желая, как видно,

обратить внимание на связь заряда этих частиц с элементарным количеством электричества, численное значение которого к началу века было достаточно точно установлено, Лоренц начинает называть заряженные частицы электронами.

Существенно, что введение в теорию представления об электронах Лоренц связывает с возможностью объяснения того, «каким образом электрические и магнитные свойства зависят от температуры, плотности, химического строения или кристаллического состояния вещества» (там же, с. 28). С движением электронов и их распределением Лоренц связывает все электрические, оптические и тепловые явления, происходящие в веществе.

Электроны, по Лоренцу, бывают положительные и отрицательные. Они могут находиться в свободном состоянии или в связанном³. Под влиянием упругих сил электроны могут колебаться около положения своего равновесия; они становятся в этом случае центрами волн, которые выходят в окружающий их эфир и могут быть наблюдаемы как свет. Все отрицательные электроны одинаковы и имеют чрезвычайно малую массу, положительные — различны; массы положительных электронов сравнимы с массами химических атомов (там же, с. 79).

Электрон, по Лоренцу, имеет сферическую форму. Теоретически у него можно выделить отдельные части, однако «отдельные части электрона не могут быть оторваны друг от друга действующими на них электрическими силами» (там же, с. 77). Следует отметить, что представления о структурности электрона у Лоренца выступают в качестве вспомогательной гипотезы, которая позволяет значительно упростить систему математических уравнений, описывающих движение электрона. Поэтому в одном случае можно считать, что «у заряженной частички нет резкой границы; напротив, она окружена тонким слоем, в котором плотность (заряда.— *Авт.*) непрерывно падает от того значения, которое она имеет внутри электрона, до нуля» (там же, с. 33), а в другом — «представить себе, что заряд сосредоточен не во всем объеме частички, а только в некотором поверхностном слое, толщина которого может быть как угодно мала» (там же, с. 39).

Теория Лоренца содержала также предположение о практическом отсутствии у движущихся отрицательных электронов обычной массы (электроны характеризовались так называемой электромагнитной массой). Массы же положительных электронов сравнимы с массами химических атомов. Это делало допустимым предположение о сложности химического атома. При этом в качестве «первичных», субстанциональных атомов Демокрита можно рассматривать электроны: «...если предположить, что атомы содержат отрицательные электроны, из которых один или несколько могут быть при известных обстоятельствах вырваны из атома (как это в действительности и бывает), и если часть атома, остающуюся после потери отрицательной частички, назвать положительным электроном, тогда, конечно, можно было бы сказать, что материя состоит из электронов» (там же, с. 79). Следует отметить, что Лоренц не отвергает идею о наличии предела делимости материи — он только отодвигает этот предел «внутрь» химического атома: практически неделимыми являются части атома — положительные и отрицательные электроны.

Неоднозначность используемых в электронной теории модельных представлений о характере электронов для самого Лоренца, как видно, не имела решающего значения, поскольку измеряемые в опыте величини-

³ Первоначально Лоренц предполагал, что свободные электроны находятся только в «лучистой материи», а «весомая материя» включает связанные электроны, «которые обыкновенно называются ионами» (см., например, [7, с. 12—13]). Позже, «по нашим новейшим воззрениям», Лоренц к свободным электронам присоединяет и отрицательные электроны в проводнике [5, с. 180].

ны вызваны суммарным действием большого числа электронов. «В наших опытах, в которых мы всегда имеем дело с очень большим количеством частичек, мы не можем исследовать ни движения отдельного электрона, ни поля, им образуемого; наши органы чувств воспринимают только суммарное действие, вызываемое ими. Можно надеяться, что те неправильности, о которых я говорил, в суммарном действии исчезнут и что это действие мы будем в состоянии объяснить, если с самого начала обратим наше внимание не на все эти неправильности, а на некоторые средние значения» (там же, с. 200).

Электронная теория Лоренца имела еще одно важное отличие от других классических обобщающих теорий, например теории Клаузиуса. Согласно электронной теории, взаимодействие распространяется с конечной скоростью, как это следует из теории Максвелла. У Клаузиуса же речь идет о возмущениях, распространяющихся мгновенно.

Важное значение для формирования электронной теории и ее последующего успешного развития имело применение общих положений модели Лоренца к объяснению свойств реальных веществ. Изучение прохождения электрического тока через различные вещества вызвало у исследователей большой интерес к металлам. Н. Бор впоследствии напишет во введении к своей магистерской диссертации: «...между веществами, которые проводят ток, металлы занимают особое место не только потому, что у них высокая проводимость, но также потому, что прохождение электрического тока через них не сопровождается наблюдаемыми химическими реакциями, как в случае других хороших проводников» [3, с. 132].

В 1905 г. Лоренц пишет большую статью «Движение электронов в металлах» [5], в которой применяет свою модель для объяснения электрических, тепловых и термоэлектрических явлений в металлах.

Лоренц принимает, как и до него Дж. Дж. Томсон, что металл состоит из большого числа только одного рода свободных электронов — отрицательных электронов, которые движутся с большой скоростью в пространстве, разделяющем атомы, причем число электронов и скорость их движения зависят от температуры и природы металла.

Средняя кинетическая энергия электрона равна средней кинетической энергии молекулы газа, находящейся при той же температуре (там же, с. 180). «Но, если в случае газа движение молекул ограничено взаимными столкновениями, то мы примем, что в металле столкновение электронов с атомами металла играет более важную роль; мы предположим также, что электроны встречаются более часто с атомами металла, чем с другими электронами, и поэтому их взаимными столкновениями можно пренебречь» (там же, с. 181). Для нахождения числа столкновений Лоренц применяет модель упругих шаров, часто используемую в кинетической теории, с небольшим изменением — атомы металла он рассматривает как неподвижные совершенно упругие сферы (такими же абсолютно упругими сферами являются и электроны)⁴. Тепловое равновесие, в котором находятся атомы металла и электронный газ, описывается с помощью обычных уравнений механики. Иными словами, силы, действующие между атомами и электронами, — механические силы.

Так же как и молекулы газа, свободные электроны в металле имеют неодинаковые скорости. Лоренц считает, что распределение электронов по скоростям подчиняется статистическому закону Максвелла (там же), и полагает металл изотропным — в отсутствие внешнего поля электроны во всех направлениях имеют одинаковые скорости.

⁴ Заметим, что в общей теории электрон у Лоренца не является абсолютно твердым шариком — при движении со скоростями, сравнимыми со скоростью света, электрон деформируется в эллипсоид.

Сравнивая полученные с учетом максвелловского распределения свободных электронов по скоростям значения для коэффициентов электропроводности и теплопроводности с результатами вычислений П. Друде, Лоренц считает совпадение вполне удовлетворительным. Указывая на лучшее согласование данных Друде с экспериментом, он в примечании дает следующее объяснение: «Чтобы получить этот результат, необходимо было предположить, что столкновения между атомами металла и электронами играют более важную роль. На самом же деле, столкновения между электронами имеют большое влияние на термическую проводимость, но не имеют влияния на электрическую проводимость (так как здесь все электроны двигаются в одном направлении). Столкновения электронов друг с другом могут таким образом влиять на отношение между двумя проводимостями» (там же, с. 193) ⁵.

Следует отметить, что расхождение полученных Лоренцем результатов с экспериментом имело другое объяснение, связанное с волновой природой электрона (впервые высказанное Я. И. Френкелем в 1927 г. на Конгрессе в г. Комо в Италии). Применение в 1927—1928 гг. А. Зоммерфельдом квантовой статистики Ферми—Дирака [8] для электропроводности и теплопроводности металлов улучшило согласие теории с экспериментом.

Лоренц отмечает и другие трудности, с которыми встречается применение электронной теории при объяснении свойств металлов. Это прежде всего противоречивость предположений «о причине, которая обуславливает число свободных электронов» [5, с. 205] и эффект Холла. Если первая трудность не является существенной, особенно при вычислении электро- и термопроводимостей («что касается проводимости для электричества и для тепла, можно всегда сделать расчет экспериментальных результатов, вводя подходящие гипотезы относительно длины свободного пробега l между двумя последовательными соударениями» (там же)), то объяснение эффекта Холла с помощью модели только с одним типом свободных электронов не представляется возможным.

Для объяснения эффекта Холла Лоренц пробует использовать предположение о наличии свободных электронов двух знаков. Легко получив выражение для электропроводности металла в этом случае, Лоренц далее отмечает: «Я не вступаю в обсуждение термопроводности, эффекта Пельтье или явления Томсона. В теории, в которой представлены два типа свободных электронов, все вопросы, относящиеся к этим явлениям, становятся особенно сложными, что следует, на мой взгляд, учесть при изучении явления Холла и связанных явлений» (там же, с. 214).

Оценивая в 1915 г. результаты своей и предшествующих работ по применению электронной теории к объяснению свойств металлов, Лоренц напишет, что это «не более чем именно „начало“. Эта теория должна быть значительно развита, чтобы объяснить изменения в электропроводности при низких температурах, которые были обнаружены Каммерлинг-Оннесом. Другой важный вопрос — это вопрос о той доле, которую свободные электроны вносят в удельную теплоту металлов» [7, с. 110].

Однако указанные недостатки электронной теории на данном этапе ее развития казались несущественными на фоне тех результатов, которых удалось достигнуть с ее помощью. «На основе этих предположений Лоренц не только вывел выражения для электро- и термопроводности металла и для термоэлектрических явлений, но также и для испускательной и поглощательной способностей тепловых лучей с большими периодами колебаний. В качестве самых интересных результатов теории Ло-

⁵ Позже в своей знаменитой работе «Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения» Лоренц напишет, что лучшее совпадение теоретического результата Друде с экспериментом «должно приписать простой случайности» [7, с. 110].

ренца можно указать в дополнение к приближенному совпадению вычисленных и наблюдаемых совпадений для отношения между термо- и электропроводностями металлов, впервые найденного Друде, полное совпадение результатов для термоэлектрических явлений и для явлений, связанных с тепловым излучением, с термодинамическими теориями этих явлений, данными соответственно лордом Кельвином и Планком. Это совпадение, полученное при строгих расчетах и с учетом распределения Максвелла, особенно замечательно, так как его нельзя было ожидать заранее по причине сомнительных предположений, лежащих в основе этих теорий» [4, с. 299]. Так в 1911 г. в своей докторской диссертации охарактеризовал Бор основные достижения электронной теории Лоренца.

Н. Бор и электронная теория металлов

Свою активную научную деятельность Бор начал с исследования возможности применения электронной теории для единого описания всех свойств металлов. Этой проблеме посвящены его магистерская и докторская диссертации, помещенные в первом томе собрания его научных трудов.

Еще студентом Бор внимательно читал статьи и книги Томсона, Лоренца, Друде по электронной теории [9, с. 52]. Математическая полнота и строгость теории Лоренца привлекли внимание молодого ученого. (Во введении к магистерской диссертации, анализируя различные модификации электронной теории, Бор отдает предпочтение теории Лоренца прежде всего потому, что она «математически очень совершенна».)

Задачу, решаемую в магистерской диссертации, Бор, по совету проф. К. Христиансена, обучавшего его физике в университете, сформулировал следующим образом: «Исследовать приложение электронной теории к объяснению физических свойств металлов». Бор, очевидно, был очень доволен выбранной темой. 26 апреля 1909 г. он писал брату: «В настоящий момент я с фантастическим энтузиазмом отношусь к электронной теории Лоренца (Лейден)» (цит. по: [10, с. 94]).

Работа над диссертацией заняла у Бора немногим больше двух месяцев: в начале июля он уже писал брату об ее окончании.

Бор остался не очень доволен результатами своей работы. В письме к брату он дает им следующую краткую оценку: «...не берусь утверждать, как это сделал некий магистр Харальд⁶, что я полностью удовлетворен результатами. В действительности проблема настолько широка, что я с моим неуклюжим пером должен был удовлетвориться раскрытием лишь некоторых ее фрагментов. Но надеюсь, что экзаменаторы пропустят мою работу, потому что мне удалось включить в нее кое-какие мелкие детали, с которыми никто не имел дела».

«Эти детали носят в основном негативный характер (ты ведь знаешь скверную привычку думать, будто я могу обнаружить ошибки в работе других). Что же касается позитивной стороны, то полагаю, что мне удалось дать намек на причину того факта (и этого, может быть, ты еще не знаешь), что в электропроводности сплавы уступают тем чистым металлам, из которых они состоят» (цит. по: [9, с. 35—36]).

Рассмотрим подробнее, какие «негативные» детали увидел Бор в модели Лоренца.

Свою магистерскую диссертацию Бор начинает с краткого изложения и анализа различных вариантов электронной теории металлов (Лоренц, Друде, Рике, Дж. Дж. Томсон). Модель Лоренца кажется ему более предпочтительной, поскольку с ее помощью уже успешно был опи-

⁶ Младший брат Бора Харальд, к которому адресуется письмо, защитил магистерскую диссертацию в марте 1909 г.

сан достаточно большой круг явлений и, кроме того, она математически была более совершенна, чем другие теории (для Бора это являлось важным аргументом в пользу теории Лоренца). Отметим, что Бор ни разу не усомнился в правильности математического подхода Лоренца — по его мнению, «негативные» детали находятся в самих основных предположениях: «...мы рассмотрим более подробно допущения, сделанные Лоренцем. Действительно, его картина представляется страдающей от некоторых, по меньшей мере формальных недостатков, состоящих в том, что закон, согласно которому электроны и молекулы металла предполагаются взаимодействующими, не приводит к какому-либо тепловому равновесию. Так, можно поставить вопрос, каким образом электроны приобретают различные скорости в различных частях металла, зависящие от температуры тела в этих частях, так как электроны сталкиваются только с молекулами и, согласно закону, на котором основываются все расчеты, эти молекулы не могут ни отдавать энергию электронам, ни получать энергию от них. Поэтому может представлять интерес показать, что теория Лоренца может быть развита в случае приложений, которые будут здесь обсуждаться без каких-либо изменений в расчетах, даже если и несколько отличная картина, не страдающая от этих недостатков, будет взята в качестве основы» [3, с. 136].

Первое, в чем сомневается Бор, — является ли соударение электронов и атомов⁷ абсолютно упругим. Существенно, что свое сомнение Бор подкрепляет рассуждением, связанным с предположением о том, что атомы металла являются «сложными системами или являются системами многих частиц» (там же, с. 137). В этом случае скорость, с которой электрон отражается от атома, зависит только от внутреннего состояния атома, определяемого как температура металла в данном месте. Если после соударения скорость электрона возрастает, то металл охлаждается.

Второе замечание, которое Бор считает нужным сделать, касается анализа уравнений, полученных Лоренцем в [5, с. 190] для токов электричества i и тепла w в однородном металле. Сначала Бор получает выражения для i и w в неоднородном металле, а затем вводит предположение о том, что длина свободного пробега электрона зависит также и от его абсолютной скорости (согласно Лоренцу, длина свободного пробега электрона зависит только от природы металла и его температуры). Бор находит новое выражение для i и w . Комментируя полученные формулы, Бор замечает, что они эквивалентны отказу от предположения о том, что электроны движутся совсем свободно, а также допущению наличия произвольных сил между атомами и электронами. Полученные уравнения так же, как и уравнения Лоренца, удовлетворяют термодинамическим условиям и «могут представлять определенный интерес» [3, с. 142]. Сам Бор, однако, исследует возможность приложения к изучению свойств металлов уравнений, полученных из модели Лоренца.

Третье существенное замечание Бора вытекает из проведенного им анализа электро- и термопроводностей металла. Сравнивая полученные Лоренцем выражения с аналогичными результатами Друде, Бор отдает предпочтение Лоренцу, так как именно в этом случае можно получить формулы Планка, имеющие экспериментальное подтверждение, чего нельзя сделать исходя из модели Друде и Рике (там же, с. 144). «Однако, стремясь к более глубокому пониманию упомянутых явлений, мы должны признать, что электронная теория не дает объяснение изменения проводимости с температурой в чистых металлах» (там же, с. 149).

⁷ В тексте магистерской и докторской диссертаций Бор называет атомы металла молекулами. Позже, в 1912 г., редактируя второй английский перевод докторской диссертации, Бор заменил термин «молекула» на термин «атом».

Действительно, согласно Лоренцу (с учетом функции распределения Максвелла),

$$\sigma = \frac{4}{3} \cdot \frac{e^2 l N}{\sqrt{2\pi m \alpha T}},$$

где l — длина свободного пробега электрона, N — число электронов, T — температура металла.

Таким образом, электропроводность металла пропорциональна $T^{1/2}$. Тогда, «чтобы объяснить полученную в действительности пропорциональность T^{-1} , мы должны принять, что величина l обратно пропорциональна корню квадратному из абсолютной температуры» (там же). Однако из «обычной электронной теории» следует, что l будет возрастать с температурой частично из-за возрастающей ионизации атомов металла, а частично из-за того, что увеличивается пространство для свободного движения электронов. Следовательно, из электронной теории нельзя получить действительно наблюдаемую зависимость электропроводности от температуры.

Четвертое замечание, чрезвычайно важное для дальнейших исследований Бора по теории атома, относится к рассмотрению влияния магнитного поля на движение свободных электронов.

Бор начинает свое рассмотрение магнитных свойств металла с подробного анализа модели взаимодействия магнитного поля и электронов, предложенной Дж. Дж. Томсоном. Согласно Томсону, под воздействием постоянного магнитного поля свободные электроны перестают двигаться по прямолинейным траекториям — они движутся по спирали, ось которой параллельна оси поля. В этом случае возникает магнитное поле с направлением оси, противоположным направлению внешнего поля. Металл, содержащий свободные электроны, ведет себя, таким образом, подобно диамагнетику. «Однако этот взгляд, который, как кажется, является общепринятым, не представляется мне верным. Действительно, представляется, что свободные электроны вообще не оказывают магнитного действия; одного только факта искривления траектории недостаточно самого по себе...» (там же, с. 158) ⁸.

Более привлекательной кажется Бору модель П. Ланжевена. Бор ссылается на основополагающую работу Ланжевена 1905 г. «Магнетизм и теория электронов» [12], в которой тот «полностью отошел от последовательной классической теории и ввел допущения, соответствующие неким „квазиквантовым“ представлениям» [13, с. 174]. В магистерской диссертации Бор подробно не анализирует достоинства и недостатки модели Ланжевена; это он сделает позже, в докторской диссертации. Здесь же он полностью принимает основные положения Ланжевена и пытается с их помощью объяснить магнитные свойства «реальных металлов».

В теории Ланжевена диамагнетизм и парамагнетизм объяснялись внутримолекулярным движением электронов. Бор в магистерской диссертации рассматривает только один случай — гальваномагнитные явления в металле при постоянной температуре. Он находит, что эффект действия поля состоит в создании поперечной разности потенциалов в определенном направлении относительно электрического тока и магнитного поля, а также в том, что оно вызывает уменьшение электропроводности. «Однако вычисленные результаты не согласуются с результатами, полученными экспериментально; действительно, есть металлы, такие как висмут, дающие эффект Холла в том же направлении, что и рассчитано, и для которых электропроводимость в магнитном поле умень-

⁸ В докторской диссертации Бор еще более тщательно рассмотрел модель Томсона, где указал на ошибки, содержащиеся в его рассуждениях. В 1911 г., приехав в Кембридж на стажировку, Бор надеялся сразу обсудить их с Томсоном, однако не встретил со стороны знаменитого ученого интереса к своей работе.

шается, но есть также и другие металлы, такие как железо, которые имеют эффект Холла в противоположном направлении и проводимость которых в магнитном поле увеличивается. Для термомагнитных эффектов обнаружены точно такие же различия между теорией и экспериментом» [3, с. 161].

Как известно, объяснение Ланжевеном на основе электронной теории (хотя и с небольшим отступлением от ее «классической» формы) магнитных свойств вещества было важным аргументом в пользу электронной теории. Поэтому, получив противоречивые результаты по исследованию магнитных свойств металлов, Бор не рискует сразу отказаться от применения электронной теории в этой области. Свой вывод он формулирует весьма осторожно (не в этом ли крылась причина неудовлетворенности Бора своей магистерской диссертацией?): «Следовательно, оказывается, что по крайней мере часть обсуждаемых эффектов вызвана не движением свободных электронов, а должна происходить из движений электронов, связанных в молекулах металла» (там же).

Таким образом, уже в магистерской диссертации, обобщая различные исследования по электронной теории металлов, Бор путем последовательного логического анализа, основанного на фундаментальных положениях модели Лоренца, поставил ряд вопросов, принципиально важных для дальнейшего развития электронной теории.

Глубоко аргументированные ответы на некоторые из этих вопросов содержатся в докторской диссертации Бора. Полученными в докторской диссертации результатами Бор, как видно, остался доволен. В письме к брату в июле 1910 г. он, еще не завершив работу, писал⁹: «Я провел несколько месяцев, спекулируя о глупом вопросе о некоторых глупых электронах, и мне удалось написать лишь примерно четырнадцать более или менее расходящихся между собой грубых черновиков. Тем не менее я боюсь, что не смог также скрыть от умных глаз доцента¹⁰ то, что мое настроение в конечном счете не было таким плохим; и опять, это не так удивительно, так как я полагаю, что, наконец, победил глупый вопрос об этих глупых электронах; во всяком случае, я чувствую себя на этот раз по крайней мере „на круг“ увереннее, чем в другие времена. Решение, о котором я говорю, является наполовину статистическим и наполовину прямым и не включает вероятностных задач. Оно займет лишь пару строк и так просто, что никто, сколько бы ни пытался, не сможет понять, что оно представляло какую-либо трудность» [10, с. 95].

Докторская диссертация, которую Бор с успехом защитил 13 мая 1911 г., называлась «Исследования по электронной теории металлов». В ней Бор уделил основное внимание «выполнению расчетов для различных явлений, которые объясняются присутствием свободных электронов в металлах, с наиболее возможной общностью при сохранении основных принципов, лежащих в основе теории Лоренца» [4, с. 299—300]. Как и в магистерской диссертации, его интересовало, можно ли «развить теорию более общую и исследовать, какие результаты остаются неизменными при принятии более общих предположений, в частности что произойдет с согласием с термодинамическими теориями» (там же, с. 299).

В основе рассуждений Бора лежала следующая модель: в металле имеются свободные электроны, одни и те же для любого металла. Число свободных электронов зависит от природы металла и его температуры. Между электронами и атомами в однородном металле, в отсутствие внешнего поля, при одинаковой температуре существует механическое

⁹ При переводе мы старались сохранить шутивно-радостный тон письма Бора.

¹⁰ Харальд к этому времени уже получил звание доцента по математике в Копенгагенском университете.

тепловое равновесие. При этом «под механическим равновесием будем понимать динамическое равновесие, которое будет, если атомы действуют друг на друга так, что их движение соответствует уравнениям Гамильтона» (там же, с. 300). Однако, как указывал Бор, предположение о механическом характере межатомного взаимодействия не является «заранее очевидным».

В датском тексте диссертации Бора содержалось интересное предположение о характере взаимодействия связанных электронов, ставшее впоследствии основой его исследований по теории атома. Бор писал во введении: «...надо предположить, что в природе имеются силы, характер которых совершенно отличен от обычных механических сил; хотя, с одной стороны, кинетическая теория газов получила необычайные результаты, допуская, что силы между индивидуальными молекулами являются механическими, имеется, с другой стороны, много свойств тел, которые невозможно объяснить, если принять, что силы, действующие внутри индивидуальных молекул (которые, согласно обычной точке зрения, состоят из систем, содержащих большое число „связанных“ электронов), также являются механическими» (цит. по: [14, с. 215]; см. также датский текст в [1, с. 175]). В качестве примеров, вызывающих серьезные сомнения в правильности описания взаимодействия связанных электронов с помощью механических законов, Бор приводит несогласие с экспериментом расчетов теплоемкости для связанных электронов и закона излучения для больших частот (закон Рэлея — Джинса), а также магнитных свойств тел. Следует отметить, что при редактировании английского перевода Бор изъяснял данный раздел текста, видимо, считая сделанное предположение недостаточно аргументированным.

Бор заменяет высказывание о немеханическом характере сил внутриатомного взаимодействия более сдержанным выражением: «...мы просто примем, что между свободными электронами (в противоположность электронам, связанным в атомах), имеющими скорости меньшие по сравнению со скоростью света, будет иметься статистическое равновесие, подобное указанному ранее. Мы примем также, что движение этих электронов может быть рассчитано в среднем как движение материальных точек с постоянными массами, подверженных силам, подчиняющимся обычным законам электродинамики» [4, с. 300].

Так же как Друде и Лоренц, Бор сначала предполагает, «что свойства индивидуальных атомов металла одинаковы во всех направлениях» и эта изотропия сохраняется независимо от присутствия внешних сил. Действие внешних сил Бор видит в их влиянии на движение свободных электронов, которое состоит из свободных пробегов и столкновений с атомами металла. Относительно характера столкновений Бор допускает, что молекулы взаимодействуют с электронами не как упругие тела, а как центры сил, действие которых определяется n -й степенью расстояния.

Таким образом, Бор в целом придерживался основных положений электронной теории Лоренца. Однако в отличие от Лоренца, для теории которого наличие или отсутствие в атоме металла связанных электронов практически не имело значения, для Бора наличие внутри атомов связанных электронов являлось чрезвычайно важным, поскольку именно они отвечали за магнитные свойства.

Наиболее значительным результатом, полученным в диссертации, Бор, по-видимому, считал вывод о том, что «на настоящем этапе развития электронной теории объяснить магнитные свойства тел на основе этой теории не кажется возможным» (там же, с. 395). Этот вывод, непосредственно относящийся к электронной теории, Бор вынес на защиту.

Рассмотрению влияния магнитного поля на движение свободных электронов посвящена IV глава диссертации, которую Бор начинает с исследования состояний статистического равновесия в металлах. Эти

исследования приводят Бора к выводу о том, что «образец металла в электрическом и термическом равновесии не будет обладать какими-либо магнитными свойствами, обязанными присутствию свободных электронов» (там же, с. 382). Когда же электрическое и тепловое равновесие нарушается, как это имеет место для гальвано- и термомагнитных явлений, свободные электроны будут приобретать «коллективное движение в определенном направлении» (там же, с. 383).

Влияние магнитного поля на это движение проявится в возникновении гальвано- и термомагнитных явлений.

Бор ставит задачу получить уравнения коллективного движения электронов под действием внешней магнитной силы. Из этого уравнения он находит выражение для электропроводности, отмечая, что «кроме эффекта Холла магнитное поле вызывает изменение электропроводности» (там же, с. 387).

Полученные формулы Бор использует для исследования «простейших случаев»: рассматривая силы взаимодействия атомов и электронов зависящими от n -й степени расстояния, Бор подробно рассматривает три случая, отличающиеся значениями n .

Первый случай, когда $n = \infty$, соответствует рассмотренной в теории Лоренца модели упругого соударения: атомы металла и электроны являются твердыми упругими сферами. Из полученных формул следует, что проводимость металла в магнитном поле должна уменьшаться. Но, как замечает Бор, «эти результаты, однако, не находятся в согласии с экспериментом» (там же, с. 389). Для некоторых металлов, таких, как, например, висмут, получается хорошее согласие эксперимента и расчета. Но есть металлы (такие, как железо), у которых электропроводность в магнитном поле возрастает. «Необходимо подчеркнуть, — пишет Бор, — что это расхождение вычисленных и экспериментальных результатов не является следствием специальных предположений (предположений Лоренца), поскольку результаты, выведенные выше (знак эффекта Холла и убыль электрической проводимости ($\sigma_n < \sigma$)), будут справедливы во всех случаях, удовлетворяющих фундаментальные предположения, сделанные во введении» (там же, с. 399). Вместе с тем положение несколько улучшается, если, отбросив специальные предположения Лоренца об упругом характере взаимодействия атомов и электронов, не предполагать атомы и электроны твердыми упругими сферами. При этом необходимо правильно выбрать зависимость силы от расстояния.

Для второго случая, когда $n = 5$ (атомы металла действуют на электроны как элементарные магниты), и для третьего, когда $n = 3$ (атомы металла являются электрическими диполями), можно получить «правильные результаты». Однако тогда надо признать, что «величина атомов металла не предполагается малой по сравнению с их взаимными расстояниями» (там же, с. 391). Это противоречит основным положениям электронной теории; для описания взаимодействия атомов и электронов нельзя в этом случае использовать представления молекулярно-кинетической теории.

Не менее значительны и результаты, полученные Бором в III главе диссертации, которую он посвятил анализу закона теплового излучения. Бор выступает против гипотезы Рэлея — Джинса о всеобщности открытого ими закона. Бор считал, что закон излучения Рэлея — Джинса (для свободных электронов в металле, полученный на основе классической теории Лоренцем) неприменим для коротковолновой области спектра. Бор сделал следующий вывод: «Причина неудачи, весьма вероятно, в том, что электромагнитная теория не согласуется с действительными условиями в веществе и может дать правильные результаты только в применении к большому числу электронов (как в обычных телах) или для определения средней скорости отдельного электрона за сравнительно большое время (как при расчете движения катодных лучей), но

не может применяться для исследования движения отдельного электрона за короткое время» (там же, с. 378). Напомним, что Лоренц (см. выше) не считал нужным учитывать индивидуальное движение электронов, так как «наши органы чувств воспринимают только суммарное действие, вызываемое ими» [7, с. 200].

* * *

Рассмотрение электронной теории металлов Лоренцем и Бором имело различное значение для последующего развития физического знания. Электронная теория металлов Лоренца служила важным аргументом в пользу выдвинутых им общих положений в строении материи в рамках классических представлений. Электронная теория металлов Бора, наоборот, свидетельствовала о недостаточности классических представлений для объяснения многих свойств металлов.

Диссертация Бора получила некоторую известность — Бор разослал копии своей работы многим ведущим физикам. Их отклики на диссертацию и переписка Бора по возникшим вопросам приведены в собрании его сочинений [1].

Главное значение работ Бора по электронной теории металлов, однако, на наш взгляд, заключается в другом. Внимательно изучив основополагающие работы по электронной теории и выполнив собственные расчеты, Бор убедился в невозможности получить непротиворечивые следствия из фундаментальных положений классической электронной теории. Кроме того, изучение магнитных свойств металлов показало, что необходимо учитывать структуру атома для объяснения свойств вещества. Для молодого ученого (в момент защиты докторской диссертации Бору шел 26-й год) это оказалось существенным при выборе направления его научной деятельности¹¹ и явилось одним из истоков результатов, полученных им в дальнейшем в области квантовой теории атома¹².

Литература

1. Bohr N. Collected Works. V. 1. Early Work (1905—1911)/Ed. Nielsen J. R. Amsterdam: North-Holland, 1972.
2. Бор Н. Предисловие к кн.: Три статьи о спектрах и строении атомов. М., П.: ГИИ, 1923.
3. Bohr N. Misc. Examination Paper.— In: Bohr N. Collected Work. V. 1. Amsterdam: North-Holland, 1972, p. 131—161.
4. Bohr N. The Doctors Dissertation.— In: Bohr N. Collected Works. V. 1. Amsterdam: North-Holland, 1972, p. 131—161.
5. Lorentz H. A. Le mouvement des électrons dans les métaux. Collected. Papers. V. III. Hague: Nijhoff, 1936.
6. Лоренц Г. А. Электронная теория. Доклад, прочитанный 20 декабря 1904 г. в электротехническом фрейе в Берлине. СПб.: Образование, 1910.
7. Лоренц Г. А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. М.: ГИТ—ТЛ, 1953.
8. Зоммерфельд А. Электронная теория металлов на основе волновой статистики.— УФН, 1928, т. 8, вып. 6.
9. Мур Р. Нильс Бор — человек и ученый. М.: Мир, 1969.
10. Nielsen J. R. Introduction. In: p. 93—130.
11. Кляус Е. М., Франкфурт У. И., Френк А. М. Нильс Бор. М.: Наука, 1977.
12. Ланжевен П. Магнетизм и теория электронов.— В кн.: Поль Ланжевен. Избр. труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
13. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с начала XIX до середины XX в. М.: Наука, 1979.

¹¹ Известно, что в лаборатории Дж. Дж. Томсона, куда он приехал на стажировку, Бор собирался продолжить свои исследования по классической электронной теории. Последующий его переход к Резерфорду нельзя считать полной случайностью, как иногда указывается в его биографиях. Разрешение проблем электронной теории Бор уже видел в исследованиях структуры атома.

¹² См. об этом в [15].

14. Heilbron J. L., Kuhn T. S. The Genesis of the Bohr Atom.— In: *Histor. Studies in the Phys. Sciences*. V. 1. Philadelphia: Univ. Pennsylvania Press, 1969.
15. Ельяшевич М. А. Развитие Нильсом Бором квантовой теории атома и принципа соответствия.— УФН, 1985, т. 147, вып. 2.

ELECTRONIC THEORY OF METALS IN THE WORKS OF H. A. LORENTZ AND N. BOHR

M. A. ELYASHEVITCH, T. S. PROTOKO (Minsk)

The article is devoted to the important and insufficiently explored period of N. Bohr's activity, which immediately preceded the beginning of his studies on the quantum theory of atom. The authors compare the studies of Lorentz and Bohr and emphasize the classical character of Lorentz's studies and the non-classical character of Bohr's studies.