

чества. Одновременно у него нет неверного утверждения автора трактата «О широтах форм», о том что униформно-дифформно-дифформное качество изображается полукругом [19, с. 88—103]. Галилей не считал необходимым слишком вдаваться в тонкости теории интенции и ремиссии.

Галилей взял наиболее существенные идеи средневековых математических теорий, в первую очередь идею функциональной зависимости, причем для физических качеств (теплота, скорость и т. д.) эта зависимость полагалась непрерывной. Отсюда интерес Галилея к понятию непрерывности, к соотношению непрерывного и дискретного. Эти проблемы глубоко интересовали его и впоследствии. Существенны те инфинитезимальные соображения, которые имеются в этом раннем сочинении Галилея.

В средневековой литературе непрерывность величины вслед за Аристотелем понималась как бесконечная делимость [20, с. 40]. Из этого исходит и Галилей: «непрерывность понимается как бесконечная делимость, т. е., взяв какое-либо время, можно взять и меньшее, и так до бесконечности» [10, с. 118]. Сходным образом рассуждал Галилей и в трактате «О движении»: между любыми двумя неравными отрезками заключено бесконечное множество отрезков, поскольку разность между этими отрезками бесконечно делима» [10, с. 287].

С этим же связана одна из излюбленных тем средневековых комментаторов «Физики» Аристотеля — соотношение точки и континуума, например мгновения и времени: «мгновение не является само по себе непрерывным, но является границей времени (*sed intercedit tempus* — буквально: но рассекает время.— В. Ш.)» [10, с. 117]. Этот вопрос (далеко не простой и для современных физических теорий) подробно изучался в рамках средневековых теорий строения континуума, в частности в учении о «максимуме и минимуме» переменной величины [6, с. 133—168]. Она разбирается в последнем из отмеченных нами трактатов из «*Juvenilia*».

Эта теория, получившая в трудах Хейтесберга и Суисета значительное развитие (по сравнению с Аристотелем), возникла из такого вопроса: как определить способность Сократа поднять определенный вес: по максимальному весу, который он способен поднять, или же по минимальному весу из тех, которые он не способен поднять? Этот пример приводит Хейтесберг [21]. Для Галилея эта проблема имеет теоретический интерес главным образом в связи с вопросом об определении границ переменной физической величины: силы, сопротивления, скорости и т. п. Один из основных вопросов этой теории таков: принадлежит ли максимум или минимум к множеству значений самой величины или нет, т. е. является он внутренним или внешним для этого множества. Соответственно этому возможны четыре вида границ. Определения этих границ, приведенные в «*Juvenilia*», текстуально совпадают со средневековыми (например, по указанному сочинению Хейтесберга). В только что приведенном примере с Сократом, это будут соответственно внутренний максимум и внешний минимум. Определения Галилея таковы. «Внутренний максимум (*maximum quod sic*) есть наибольшая величина, которой вещь может достичь или при которой она может существовать, а при большей не может. ...Внешний минимум (*minimum quod non*) есть такая величина, которой вещь вследствие великости не может достичь и при которой она не существует, но при любой меньшей, не превосходящей внутреннего максимума, существовать может» [10, с. 139].

В этой теории особое место для понимания эволюции воззрений Галилея занимает идея представления переменной величины множеством ее значений, что он позднее при выводе законов падения тел обозначал или латинским термином *aggregatum* (собрание, совокупность), или итальянским *summa* (совокупность, сумма). Мы имеем в виду также знаменитое место из «Бесед и математических доказательств», где приведены примеры взаимно-однозначного отображения бесконечного множества на его правильную часть [22, с. 140—141]. Парадоксы бесконечного широко обсуждались в средневековой научной литературе. Отражение этих споров есть и в «*Juvenilia*». Галилей, как и многие средневековые авторы, рассматривает их в главе «Может ли мир существовать извечно (*An mundus potuerit esse ab aeterno*)» [10, с. 32—37]. Там мы читаем: «Если принять, что мир существовал извечно, то следует допустить, что была бы пройдена актуальная бесконечность дней, месяцев, лет (*infiniti dies, mensis, anni... fuissent pertransita*)» [10, с. 34]. Отсюда получается противоречие: «одна бесконечность будет больше другой, поскольку если мир существует вечно, то была пройдена бесконечность

лет (*infiniti anni fuissent elapsi*), но год содержит 365 дней, значит, число дней в бесконечности больше, чем лет» [10, с. 34]. Этот вывод повторяется затем неоднократно. Галилей в этом рассуждении ссылается на труды таких известных сторонников актуальной бесконечности в средние века, как Григорий из Римини, Уильям Оккам, Дурандо Порциано, у которых действительно имеется подобное рассуждение.

Таким образом, многие основные понятия, необходимые для изучения движения — одного из главных интересов Галилея, были им достаточно четко сформулированы в самом начале его научной деятельности. Эти понятия и принципы Галилей продолжал уточнять и развивать на протяжении всей своей жизни.

Литература

1. *Maier A.* Die Vorläufer Galileis im 14. Jahrhundert. Roma, 1949.
2. *Григорьян А. Т., Зубов В. П.* Очерки развития основных понятий механики. М., 1962.
3. *Duhem P.* Etudes sur Léonard de Vinci. v. 3. Paris, 1913.
4. *Clagett M.* The science of mechanics in the middle ages. Madison, 1959.
5. *Koyré A.* Etudes galiléennes. Paris, 1966.
6. *Зубов В. П.* Развитие атомистических представлений до начала XIX в. М., 1965.
7. История математики с древнейших времен до начала XIX столетия. Т. I/Под ред. Юшкевича А. П. М., 1970.
8. *Wulf M.* Histoire de la philosophie médiévale. v. 3. Louvain — Paris, 1947.
9. *Широков В. С.* Идеи и методы анализа бесконечно малых в западноевропейской средневековой математике: Автореф. дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. М.: ИИЕТ, 1979.
10. *Galilei G.* Le Opere. Firenze. v. 1, 1929.
11. *Giacomelli.* Galileo Galilei giovane e il suo «De motu». Pisa, 1949.
12. *Suisset.* Calculator. Venetiis, 2га, 1520.
13. *Широков В. С.* О «Книге вычислений» Ричарда Суисета. — В кн.: Ист.-мат. исследования. Вып. XXI, 1976.
14. *Wilson C.* Pomponazzi's criticism of calculator. — Isis, 1953, v. 44, pt. 4, № 138.
15. *Зубов В. П.* Из истории средневековой атомистики. — В кн.: Труды Ин-та истории естествознания. Т. 1. М., 1947.
16. *Зубов В. П.* Калориметрическая формула Рихмана и ее предыстория. — Тр. Ин-та истории естествознания. Т. 5. М., 1955.
17. *Maier A.* An der Grenze von Scholastik und Naturwissenschaft. Essen, 1943.
18. *Clagett M.* Nicole Oresme and the medieval geometry of qualities and motions. Madison, 1968.
19. *Широков В. С.* Галилей и средневековая математика. В кн.: Ист.-мат. исследования. Вып. XXIII, 1979.
20. *Аристотель.* Физика (Пер. Карпова). М.: Соцэкгиз, 1936.
21. *Nentisberus.* Regule solvendi sophismata. Venetiis, 1494.
22. *Галилей Г.* Избр. тр. в 2-х томах. Т. 2. М., 1964.

К ИСТОРИИ ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ КВАНТОВЫХ ПРИНЦИПОВ В ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МЕТАЛЛОВ

Г. А. СУЛЕЙМАНИЯ

Классическая электронная теория металлов правильно предсказывала закономерности их изменения на качественном уровне, а для некоторых электрофизических характеристик металлов и на уровне количественных закономерностей. Однако основы электронной теории металлов содержали принципиальные противоречия. Эти противоречия привели к скептицизму по отношению к гипотезе свободного электронного газа, пошатнули ее основополагающие допущения. Хорошо известно, что так называемая «катастрофа теплоемкости» надолго подорвала доверие к гипотезе существования электронного газа проводимости в металлах, и не только к этой гипотезе, но и вообще ко всей классической электронной теории металлов в целом.

Когда наступил кризис электронной теории проводимости металлов, возникли разного рода полуклассические или полуквантовые теории электропроводности, в которых делались попытки сохранить общую гипотезу свободного электронного газа и объяс-

нить «катастрофу теплоемкости» новыми дополнительными предположениями. В теориях другого рода возникли попытки выдвинуть новые предпосылки для объяснения электропроводности металлов, отказываясь полностью или частично от гипотезы свободного электронного газа.

Период с 1905 по 1927 г. богат выдвижением различных промежуточных теорий электропроводности металлов. Отдельные результаты современной теории были получены в этих промежуточных теориях, хотя иногда и не на основе верных предположений; в этих теориях некоторые следствия современных представлений просто постулировались.

Теория квантов Планка и ее успешное применение к вопросам тепловых свойств твердых тел (А. Эйнштейн [1], П. Дебай [2]) обеспечили новые возможности быстрого развития теории металлической проводимости. Изучение зависимости проводящих свойств металлов от кристаллического строения, от взаимодействия атом — электрон привели к новому этапу в развитии теории электропроводности.

Из классического выражения удельного сопротивления

$$\rho = \frac{m_e v}{ne^2 l}, \quad (1)$$

где n — плотность электронов проводимости, e , m_e , l и v — соответственно заряд, масса, длина свободного пробега и скорость электрона, следовало, что $\rho \sim \sqrt{T}$, а между тем эксперименты показали, особенно при низких температурах, что нет такой единой температурной закономерности; эксперименты показали, что при высоких температурах $\rho \sim T$, а при низких — более быстрое падение, т. е. $\rho \sim T^m$, где $m > 1$.

В 1911 г. В. Нернст (1864—1941) [3] и Г. Камерлинг-Оннес [4] (1853—1926) независимо друг от друга заметили, что кривая изменения сопротивления металла с температурой похожа на кривую излучения черного тела (в приведенном виде). Исходя из этого внешнего сходства, Нернст сделал смелое обобщение и без конструктивного доказательства, выдвинул следующую эмпирическую формулу для сопротивления металла:

$$\rho = \frac{A}{\exp(av/T) - 1} + B, \quad (2)$$

где A и B — эмпирические постоянные для данного металла; $a = h/k$ (h и k — соответственно постоянные Планка и Больцмана); v — частота планковского осциллятора.

В данном случае выражение (2) правильно отражало для некоторых металлов ход кривой сопротивления как при высоких, так и при низких температурах, вплоть до водородных, т. е. $T \sim 10$ — 20°K . Так, например, для свинца в интервале температур от $14,39^\circ \text{K}$ до $68,57^\circ \text{K}$ разность

$$\rho_{\text{выч}} - \rho_{\text{изм}} = 1,5 - 3,0 \cdot 10^{-5} \rho_{\text{изм}}.$$

В своей работе Нернст приводит для некоторых металлов численные значения параметра $\beta = av$. Эти значения Нернст сравнивал с известной тогда «характеристической температурой Эйнштейна» из [1]. Как явствует из результатов, приводимых Нернстом, между ними нет удовлетворительного согласия. Но после появления работы Дебая [2], когда была заменена простая модель твердого тела Эйнштейна более правдоподобной квантовой моделью, естественно встал вопрос о соотношении между характеристическими температурами Дебая и Нернста. Этот анализ на основе своих измерений произвел Шиманк (1914) [5]. Им было обнаружено принципиальное согласие, почти численное совпадение между ними.

Подход Камерлинг-Оннеса [4] к проблеме проводимости при низких температурах был более конструктивным, чем подход Нернста. Исходя из полуклассических представлений об энергии колеблющегося атома и принимая, что длина свободного пробега электрона

$$l \sim \frac{1}{a} = \frac{\text{const}}{\sqrt{E}}, \quad (3)$$

где a — амплитуда колебания атома, E — энергия атома, для которой Камерлинг-Он-

нес использует выражение Планка, он получает:

$$\rho = A \left[\frac{Th\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где A — эмпирическая постоянная для данного металла, ν — частота планковского осциллятора. Выражение (4) довольно удовлетворительно описывало экспериментальные данные, если удачно подобрать параметры A и ν .

Успех эмпирических или полуэмпирических формул представляет большой интерес для теоретической физики; под этим согласием экспериментальных данных и эмпирических выражений лежат глубокие физические связи. В частности, успех формулы Нернста (2) пытался теоретически обосновать Линдеман [6], но эта работа, во-первых, очень поверхностная, а во-вторых, полученное им выражение не точно совпадает с выражением (2). В этой связи особо нужно отметить работу Э. Грюнайзена (1913) [7] об эмпирической связи сопротивления и теплоемкости металла:

$$\rho(T) \sim TC_p. \quad (5)$$

Как показывает конкретными вычислениями Грюнайзен, выражение (5) значительно лучше согласуется с экспериментом, чем выражения Нернста или Камерлинг-Оннеса. Интервал температур, для которых справедлива формула (5), больше, чем у выражений (2) или (4). На основе обобщения многочисленных экспериментов Грюнайзен приходит к весьма верному заключению, что удельное сопротивление металлов наподобие теплоемкости во всем интервале изменения температуры подчиняется универсальной функции от T/θ (θ — характеристическая температура Дебая). Если использовать теорию Дебая, согласно которой $C_p \sim T^3$, то для сопротивления получается:

$$\rho(T) \sim (T/\theta)^4, \quad (T \ll \theta). \quad (6)$$

Хотя (6) не передает полную картину температурного изменения сопротивления металла, но она играла большую роль в деле становления современных представлений. Нужно еще добавить, что зависимость (6) более близка к современной формуле сопротивления металла (общезвестная «формула Блоха — Грюнайзена»)

$$\rho(T) \sim (T/\theta)^5, \quad (T \ll \theta), \quad (7)$$

чем все другие до этого.

Строго научная теория проводимости металлов в принципе должна удовлетворять всем имеющимся экспериментальным фактам, а также предсказывать новые, дотоле не известные эффекты. В области теории металлической проводимости одним из центральных вопросов было получение более точной закономерности изменения сопротивления с температурой, разрешение «катастрофы теплоемкости» и др. Впервые этот вопрос на основе новых квантовых принципов теоретически конструктивно рассмотрел В. Вин в работе «Относительно теории электрической проводимости в металлах» (1913) [8]. Нужно отметить, что многие теоретические исследования этого времени были стимулированы историческими экспериментами Камерлинг-Оннеса по сверхпроводимости (1911), хотя последнее явление не укладывалось ни в какую классическую или квантовую теорию проводимости. Многим исследователям представлялось возможным соединение электронной теории проводимости с квантовой теорией Планка, на основе чего получит разрешение температурная закономерность изменения сопротивления и заодно скачкообразное исчезновение его при температурах ближе к абсолютному нулю, т. е. сверхпроводимость.

Вин свою работу начинает с критики существующих теорий и предлагает учитывать успехи, достигнутые физикой для новой, более логической постановки старых вопросов металлической проводимости: «Данные теории излучения (т. е. квантовая теория. — Г. С.) и новейшая теория теплоемкости (т. е. теория Дебая. — Г. С.) доказали, что электронная теория металлов должна быть построена на существенно новой основе» [8, S. 184]. Вин не только «декларировал» несостоятельность классической теории электропроводности металлов, но и установил в своей работе ряд важных положений, которые и в настоящее время существенны для понимания механизма распространения электронов в металле. В своей работе он показал, что говорить о наличии эффективно свободных электронов в атомной решетке можно только в том случае, если эти элект-

роны обладают скоростью v , которая не зависит от температуры и остается неизменной вплоть до абсолютного нуля. Фактически Вин берет под сомнение применимость принципов кинетической теории Максвелла — Больцмана для электронов в металле. Отсюда вовсе не следует, что Вин отрицает классическую теорию электропроводности; просто Вин отвергает второй шаг на этом пути, когда за скорость электрона принимается ее значение по кинетической теории.

Согласно основополагающему допущению Вина, энергия электрона в металле не изменяется от температуры, она остается постоянной для данного рода металла. Из представлений Вина вытекает, что расположение положительных атомных остовов не должно препятствовать движению электронов, хотя ему и не было ясно, каким образом эти условия могут быть выполнены в металле. Для вычисления коэффициента электропроводности Вин одновременно допускает, что плотность электронов проводимости не зависит от температуры. Вся температурная зависимость коэффициента электропроводности, согласно Вину, падает на зависимость от температуры средней длины свободного пробега электрона. По мнению Вина, сопротивление возникает от колебания атомов в решетке и их амплитуда растет с температурой. Это последнее в конечном счете приводит к зависимости свободного пробега электрона от температуры. По Вину, энергия, выделяемая в проводнике, есть энергия, теряемая решеткой при столкновении с электроном.

Для вычисления электропроводности металлов Вин исходит из следующих важных допущений: а) энергия атома в решетке квантована согласно формуле Планка, б) спектр колебания атомов в решетке подчиняется теории Дебая. В своей работе Вин на основе квантовых представлений довольно подробно рассмотрел температурную зависимость рассеяния электронов от амплитуды рассеяния атома в решетке. Вин показал, что если n квантов с энергией $\epsilon = h\nu$ распределены среди некоторого числа атомных осцилляторов, то рассеяние электронов на этих осцилляторах не должно зависеть от конкретного вида распределения энергии между осцилляторами. Такое заключение справедливо, если рассеяние пропорционально квадрату амплитуды осциллятора. Далее, исходя из квантовых представлений, Вин предполагает, что электрон в решетке рассеивается благодаря излучению и поглощению кванта колебательной энергии. Вероятность такого перехода пропорциональна концентрации квантов с данной колебательной частотой. Следовательно, рассеяние энергии атомами (т. е. выделенное тепло) по всем возможным частотам в решетке, и соответственно пропорциональное ей сопротивление проводника, согласно Вину, будет:

$$\rho(T) = A \int_0^{\nu_D} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1} d\nu, \quad (8)$$

где ν_D — характеристическая частота Дебая, A — постоянная, не зависящая от температуры.

Как видно из (8), при $T > 0$ (т. е. при высоких температурах): $\rho(T) \sim T$, что согласуется с экспериментом и с результатами классических теорий. Но в данном случае важно поведение формулы Вина при низких температурах, т. е. при $T \ll \theta$. Как видно из (8)

$$\rho(T) = \frac{\pi^2}{6} A (T/\theta)^2, \quad (T \ll \theta). \quad (9)$$

Закономерность (8), хотя качественно верна, так как дает более быстрое падение сопротивления, что и наблюдается в эксперименте, но количественно не отражает полную картину сложных процессов, происходящих в металле.

Как явствует из вышеизложенного, в рамках теории Вина разрешается основное противоречие классической электронной теории металлов — «катастрофа теплоемкости», так как с самого начала постулируется независимость энергии электронов от температуры. В этом отношении система электронов Вина в металле имеет много общего с вырожденным газом Паули — Зоммерфельда (1927); то, что вытекает на основе статистики Ферми, у Вина просто постулируется.

В работе Вина впервые конструктивно применяются (правда, непоследовательно) квантовые представления об электропроводности металлов, имеющие много общего с

современным подходом в данном вопросе; температурная зависимость сопротивления в виде так называемой «соответственной температуры» (т. е. в виде функции от T/θ) впервые входит в теорию проводимости именно через работу Вина [8]; она прочно закрепилась во всех последующих квантово-механических теориях, став достоянием общей физической науки.

В исследуемый период развития теории электропроводности металлов появились и работы других физиков: Бернулли (1911) [9], Кёнигсбергера (1911) [10], Яффе (1912) [11], Кеезома (1913) [12], Герцфельда (1913) [13]. Но в этих работах новые квантовые принципы применялись формально, иногда даже искусственно (как в [11—13]).

Как видно из вышесказанного, первоначальные применения квантовых принципов к металлической проводимости привели к верным качественным (для некоторого интервала температур) и количественным результатам.

Литература

1. *Einstein A.* «Ann. Phys.», 1907, B. 22, S. 180.
2. *Debye P.* «Ann. Phys.», 1912, B. 39, S. 789.
3. *Nernst W.* «Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.», 1911, S. 310.
4. *Kamerlingh-Onnes H.* «Proc. Roy. Acad. Amsterd.», 1911, v. 11, p. 168.
5. *Schimank H.* «Ann. Phys.», 1914, B. 45, S. 706.
6. *Lindemann F. A.* «Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.», 1911, S. 316.
7. *Grüneisen E.* «Verhandl. Dtsch. phys. Ges.», B. 15, S. 186.
8. *Wien W.* «Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.», 1913, B. 7, S. 184.
9. *Bernoulli A. L.* «Verhandl. Dtsch. phys. Ges.», 1911, B. 13, S. 573.
10. *Koenigsberger J.* «Verhandl. Dtsch. phys. Ges.», 1911, B. 13, S. 931.
11. *Jaffé G.* «Phys. Z.», 1912, B. 13, S. 284.
12. *Keesom W. H.* «Phys. Z.», 1913, B. 14, S. 670.
13. *Herzfeld K. F.* «Ann. Phys.», 1913, B. 41, S. 27.

ФАРАДЕЙ, ГЕНРИ И ОТКРЫТИЕ ИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ

Г. К. ЦВЕРАВА [Бокситогорск]

История открытия электромагнитной индукции — явления, техническое использование которого составляет основу современной электроэнергетики и электрификации промышленности и быта — представляет собой интереснейшую страницу истории науки. Хотя исследования, направленные на отыскание способа «превратить магнетизм в электричество», в конце 20-х — начале 30-х гг. XIX в. проводились в разных странах, обнаружить явление электромагнитной индукции удалось независимо Майклу Фарадею (1791—1876) в Королевском институте в Лондоне и американцу Джозефу Генри (1797—1878) — преподавателю гимназии в городе Олбани, штат Нью-Йорк.

Однако с тех пор, как стали писать историю физики XIX в., в литературе имеют место весьма противоречивые суждения, связанные с именем Генри и, в частности, с фактом открытия им индуктированных токов — от полного отрицания этого факта до признания приоритета Генри [1]. Такое положение объясняется отчасти тем, что опубликованные работы Генри были собраны воедино и без надлежащего научного аппарата изданы малым тиражом лишь в 1886 г. [2] через 8 лет после смерти их автора. На русский язык переведены всего 2 статьи Генри [3, 4]. Предпринятое в 1972 г. Смитсоновским институтом в Вашингтоне 15-томное издание «Бумаг Джозефа Генри» к настоящему времени насчитывает пока три вышедших тома [5], которые охватывают период с ранних лет жизни ученого до 1838 г. Это позволяет подробно проследить путь, которым американский физик пришел к открытию индуктированных токов. В «Бумагах» впервые опубликованы хранящиеся в различных архивах первичные документы — корреспонденция Генри, его дневники и лекции, протоколы заседаний научных обществ, другие рукописи.

Что касается М. Фарадея, то его научное наследие уже давно прочно вошло в фундамент современного естествознания, а его жизненный путь уже более века служит