

Infocommunications and Radio Technologies, 2020, vol. 3, no. 3, pp. 325–359.
Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 3. С. 325—359.
ISSN: 2587-9936

УДК 621.37-621.39(091)

Открытие природы катодных лучей

Пестриков В. М.

*Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения
ул. Правды, д. 13, Санкт-Петербург, 191119, Российская Федерация
pvm205@yandex.ru*

Получено: 2 ноября 2020 г.

Отрецензировано: 5 ноября 2020 г.

Принято к публикации: 9 ноября 2020 г.

Аннотация: *Исследована парадоксальная научная дискуссия о природе катодных лучей между сторонниками волнового эфира и материальных частиц. Рассмотрены эксперименты Перрена. Проанализированы оценки отношения заряда к массе частиц катодных лучей в работах Шустера, Дж. Дж. Томсона и других ученых. Представлена гипотеза Дж. Дж. Томсона о корпускулах, а также результаты его работ, которые привели к открытию электрона. Уделено внимание исследованиям Ридчардсона по электропроводности пространства, окружающего горячую поверхность металлических проволок и вывод им формулы, носящей его имя.*

Ключевые слова: *катодные лучи, эксперименты Перрена, исследования Шустера, корпускулы Дж. Дж. Томсона, термоэмиссия, формула Ридчардсона.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Открытие природы катодных лучей // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 3. С. 325—359.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Открытие природы катодных лучей / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 325—359.

Discovery of the origin of cathode rays

V. M. Pestrikov

*St. Petersburg State University of Film and Television
13, Pravda Str., St. Petersburg, 191119, Russian Federation
pvm205@yandex.ru*

Received: November 2, 2020

Peer-reviewed: November 5, 2020

Accepted: November 9, 2020

Abstract: *A paradoxical scientific discussion about the origin of cathode rays between external wave ether and material particles is investigated. Perrin's experiments are considered. The estimates of the ratio of charge to mass of particles of cathode rays in the works of Schuster, J. J. Thomson and other scientists. The hypothesis of J. J. Thomson about corpuscles is presented, as well as the results of his work, which lead to the discovery of the electron. Attention is paid to Richardson's research on the electrical conductivity of the surrounding space surrounding the surface of metal wires and the derivation of the formula of his name.*

Keywords: *cathode rays, Perrin's experiments, Schuster's research, J. J. Thomson corpuscles, thermionic emission, Richardson's formula.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov "Discovery of the origin of cathode rays," *Informations and Radio Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 325–359, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Катодные лучи были открыты еще в 1859 г., но в 1897 г. их природа все еще оставалась предметом острой дискуссии. Некоторые физики предполагали, что катодные лучи являются своего рода волновым движением в «эфире». Концепция воображаемого эфира как среды, в которой передаются колебания, была модной до того момента, пока А. Эйнштейн не разработал теорию относительности. Другие ученые считали, что катодные лучи состоят из частиц.

Давно было известно, что катодные лучи отклоняются даже слабым магнитным полем, так же, как и быстро движущаяся отрицательно заряженная частица, что свидетельствовало в пользу частиц. Однако немецкий физик Генрих Герц ошибочно пришел к выводу, что катодные лучи не отклоняются электрическим полем, как должно быть в случае движущихся заряженных частиц. После этого физик Филипп Ленард показал, что катодные лучи, оставаясь неизменными, могут беспрепятственно проникать

через золотую фольгу, достаточно толстую, которая содержит множество слоев атомов золота. В тот период времени казалось маловероятным, что частица может пройти через атом, а тем более через многие из них. Таким образом, разные экспериментальные результаты подтверждали разные представления о природе катодных лучей. Более того, доказательная ценность некоторых из этих результатов была неоднозначной.

2. Эксперименты с катодными лучами Жана Перрена

Важную роль в споре между эфирной и материальной теориями катодных лучей сыграли эксперименты 25-летнего французского физика Жана Батисты Перрена (фр., *Jean Baptiste Perrin*, 30.09.1870—17.04.1942). Гипотеза о том, что катодные лучи состоят из частиц отрицательно заряженной материи и распространяются с большой скоростью, побудила его осуществить проверку этого утверждения. С 1894 по 1897 гг. Перрен был ассистентом физики в Высшей нормальной школе (фр. *École Normale Supérieure*) в городе Лилль (фр. *Lille*). В течение указанного времени Жан проводил экспериментальные исследования катодных лучей в лаборатории *École Normale* и лаборатории Пеллата (*H. Pellat*) в Сорбоне, рис. 1. Это направление исследований стало предметом его докторской диссертации. Перрену в проведении фундаментального эксперимента по определению заряда катодных лучей, помогал его друг по Нормальной школе Поль Ланжевен¹.

Лабораторией в *École Normale* заведовал физик Жюль Виоль² (фр. *Jules Louis Gabriel Violle*, 16.11.1841—12.09.1923). Он же являлся научным руководителем по диссертации Перрена.

В 1895 г. Перрен для экспериментов сконструировал газоразрядную трубку оригинальной конструкции, которая содержала цилиндр Фарадея³ для определения знака заряда катодных лучей. Внутри разрядной трубки были коаксиально установлены два металлических цилиндра: цилиндр Фарадея *ABCD* и *EFGH* с двумя соосными отверстиями β и γ , направленными в сторону катода, рис. 2. Цилиндр *EFGH* служил анодом и его основание *FG* находилось на расстоянии примерно 0,1 м от поверхности катода *N*. Этот цилиндр был заземлен и защищал цилиндр Фарадея от внешних наводок.

¹ Поль Ланжевен (фр. *Paul Langevin*; 23.01.1872—19.12.1946) — французский физик. Автор парадокса близнецов — мысленный эксперимент, при помощи которого пытаются доказать противоречивость специальной теории относительности. Создатель теории диамагнетизма и парамагнетизма.

² Исследования Жюль Виоля в основном касались радиометрии, в частности, разработки актинометра, фотометрии и калориметрии.

³ Цилиндр Фарадея — устройство для определения полного электрического заряда и интенсивности пучка частиц. Названо в честь английского физика Майкла Фарадея.

Излучения могли проникать во внутренний цилиндр $ABCD$ и зарядить его только через отверстие β во внешнем экране $EFGH$. Для оценки заряда использовался электроскоп, соединенный с внутренним цилиндром [1].

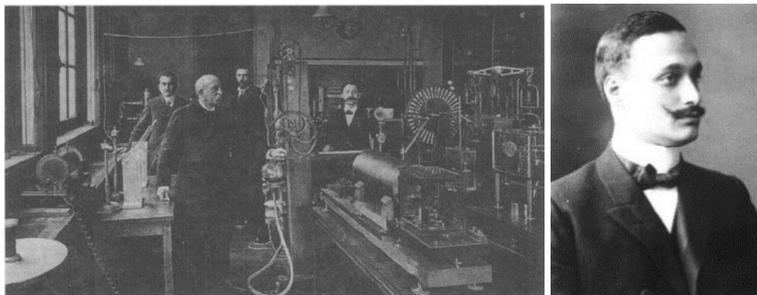


Рис. 1. Жан Батист Перрен (*Jean Baptiste Perrin*). Новая лаборатория физических исследований в Сорбонне, открытая в 1894 г. Слева катушка Румкорфа. Справа спереди — электродинамометр Пеллата, на заднем плане — электростатическая машина Вимшерста.

Fig. 1. Jean Baptiste Perrin. The new physics research laboratory at the Sorbonne, opened in 1894. On the left the Ruhmkorff coil. On the right, in front, Pellat's electro-dynamometer, in the background, the Wimshurst electrostatic machine

Во время работы трубки в отверстие α внутреннего цилиндра $ABCD$ попадал пучок катодных лучей, который его заряжал. Заряд стекал к электроскопу и фиксировался. В результате проведения опыта цилиндр оказывался заряжен отрицательно. Отсюда следовал вывод, что неизвестные частицы, бомбардировавшие его, также были заряжены отрицательно. Электроскоп вообще не реагировал на отклонения катодных лучей магнитом, когда они не попадали внутрь цилиндра $ABCD$. Исходя из проведенного эксперимента Перрен сделал вывод, что катодные лучи представляют собой поток частиц с отрицательным электрическим зарядом, которые движутся прямолинейно и могут отклоняться под воздействием магнитного поля в нужном направлении, в частности, при необходимости их можно направить в цилиндр Фарадея.

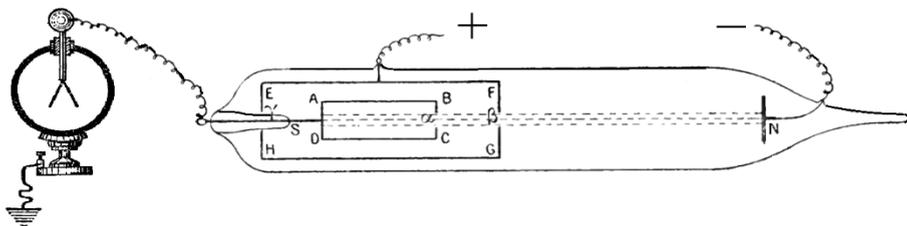


Рис. 2. Схема эксперимента Перрена по определению заряда катодных лучей. 1895 г.

Fig. 2. Scheme Perrin experiment to determine the charge of cathode rays. 1895

Эксперимент Перрена носил качественный характер. В статье [1] в связи с этим он отметил: «Можно измерить количественно поток электрического заряда, переносимый катодными лучами. Я не закончил это измерение, но могу оценить по порядку величины приобретенный заряд. Цилиндр Фарадея, помещенный в одну из моих трубок, находящуюся под давлением 20 микрон ртутного столба, приобретает при одном выключении электромагнита потенциал 300 вольт при емкости 600 ед. СГС».

Перрен помимо определения природы катодных лучей исследовал каналные лучи и установил их положительный заряд. В этом эксперименте использовалась газоразрядная трубка, подобная по конструкции трубке, изображенной на рис. 2.

В проведенном исследовании Перрена отметим эксперимент с модернизированной трубкой Крукса по разделению катодных лучей, рис. 3 [2]. Трубка Крукса содержала анод P из металлической сетки и дополнительный электрод A , который располагался перпендикулярно катодным лучам. Катодные лучи, то есть отрицательно наэлектризованные частицы, ускоренные разностью потенциалов между катодом N и анодом P , проходят через анод P и продолжают свое движение до тех пор, пока не достигнут стеклянной стенки трубки и не произойдет ее флуоресценция. Когда электрод A имеет отрицательный потенциал по отношению к аноду, то в этом случае катодные лучи разделяются на два расходящихся потока. При подаче на электрод A положительного потенциала относительно анода происходит пересечение двух катодных лучей, рис. 3.

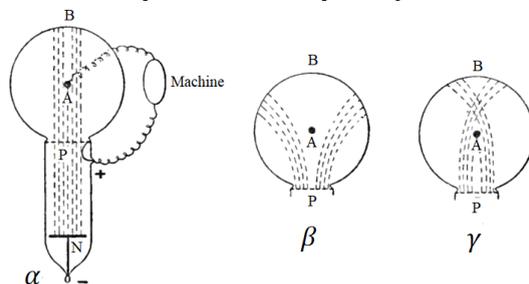


Рис. 3. Отображение траектории катодных лучей, когда электрод A : α — нейтрален, β — заряжен отрицательно и γ — положительно заряжен. Рисунок из диссертации Жана Перрена [2].

Fig. 3. Displays the trajectory of cathode rays when electrode A is: α — neutral, β — negatively charged and γ — positively charged. Drawing from Jean Perrin's dissertation [2]

Эксперименты Жана Перрена убедительно показали, что катодные лучи состоят из потока отрицательно заряженных частиц, которые выходят из катода во время разряда. К сожалению, эти наблюдения прояснили

только качественную сторону катодных лучей. Сам Перрен признает, что ему было трудно контролировать вакуум в своих трубках и электрический потенциал, приложенный к электродам.

Исследования Перрена указали на причину, по которой Генрих Герц не заметил никакого притяжения или отталкивания катодных лучей наэлектризованными пластинами. Дело в том, что частицы катодных лучей двигались так быстро, а электрические силы были настолько слабыми, что заметить слишком малое отклонение было почти невозможно. Герц не предполагал, что электрический заряд на его пластинах частично нейтрализуется воздействием молекул остаточного газа в трубке. Эти молекулы разбивались катодными лучами на заряженные частицы, которые затем притягивались к пластине с противоположным зарядом.

В июне 1897 г. Жан Перрен защитил на факультете естественных наук Парижского университета диссертацию под названием «Катодные лучи и лучи Рентгена. Экспериментальное исследование» (фр. *Rayons cathodiques et rayons de Röntgen. Étude expérimentale*) и получил докторскую степень по физическим наукам (фр. *docteur ès sciences physiques*, PhD).

Исследования Жана Перрена вместе с другими его работами о новых лучах Рентгена принесли ему после защиты диссертации в 1897 г. премию Джоуля Лондонского королевского общества (*Joule Prize of the Royal Society of London*) [3]. Потрясающее начало научной карьеры молодого ученого⁴, которому едва исполнилось 26 лет!

Работы Перрена по катодным лучам легли в основу более поздней работы физика Дж. Дж. Томсона, который использовал аппарат Перрена для характеристики отрицательно заряженных частиц, называемых электронами, которые, как позже выяснилось, являются частями атомов.

3. Оценка отношения заряда к массе компонентов катодных лучей

Заметным научным центром по изучению природы катодных лучей в конце XIX в. стала Кавендишская лаборатория Кембриджского университета. В 1875 г. в лабораторию в качестве исследователя был принят Артур Шустер (*Sir Franz Arthur Friedrich Schuster*, 12.09.1851—17.10.1934). В этой должности он оставался в течение пяти лет (до 1881 г.). Сначала он работал под руководством Джеймса Клерка Максвелла, а позднее с Джоном Уильямом Стреттом (Лорд Рэлей).

⁴ В 1926 г. Жан Перрен в возрасте 56 лет получил Нобелевскую премию по физике «за работу по дискретной природе материи и в особенности за открытие седиментационного равновесия».

В 1881 г. после окончания Owens колледжа (*Owens College*, позже стал *Victoria University* в Манчестере) он был назначен на должность профессора прикладной математики, рис. 4. В 1888 г. Шустер занял должность Лэнгуортиевского профессора физики (*Langworthy⁵ Professor of Physics*). К слову, в этом колледже с 1870 по 1876 гг. учился Дж. Дж. Томсон. Для почти двух последующих десятилетий Шустер был доминирующей фигурой в научной среде Манчестера.

Артур Шустер в 1907 г. подал прошение об отставке по возрасту с должности Лэнгуортиевского профессора физики и на свое место предложил Э. Резерфорда, поскольку незадолго до этого он был избран членом Королевского общества и награжден медалью Румфорда.

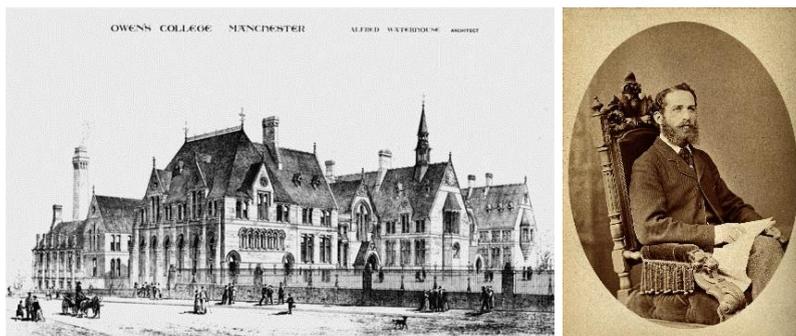


Рис. 4. Артур Шустер (1888 г.) и общий вид Owens колледжа в Манчестере (1874 г.).
Fig. 4. Arthur Schuster (1888) and a general view of Owens College, Manchester (1874)

Нужно заметить, что А. Шустер был один из немногих, кто должным образом оценил идеи Максвелла, изложенные в его «Трактате по электричеству и магнетизму» (1873). Уже на следующий год после выхода этой книги на ее основе Артур Шустер прочел первый лекционный курс. На его лекции записалось три студента. Одним из них был будущий преемник Максвелла на посту директора Кавендишской лаборатории Дж. Дж. Томсон, что явно стимулировало его интерес к занятиям физикой.

В 1880 А. Шустер провел важные исследования электрического разряда в газоразрядных трубках, которые показали, что проходящий через газовую среду под действием электрического поля электрический ток содержит ионы, и что ток, при наличии ионизация газа, можно поддержи-

⁵ В 1874 британский бизнесмен и политик Э. Р. Лэнгуорти (Edward Ryley (or Riley) Langworthy, 1797 - 07.04. 1874) завещал £10000 для одной должности профессора экспериментальной физики в Университете Манчестера, с условием, что получивший финансирование ученый должен сделать научное открытие.

вать с помощью небольшого потенциала. Это открытие он сделал в возрасте 29 лет, и оно стало предметом его лекций *Bakerian* в 1884 г. [4].

Замкнутый по характеру А. Шустер, активный велосипедист и скалолаз, меценат и страстный путешественник, предложил изящный метод определения отношения заряда к массе электрона $\frac{e}{m}$ по его отклонению в магнитном поле.

Шустер в основном принял гипотезу Крукса о том, что катодные лучи являются электрически заряженными частицами, а не волнами. Он расширил эксперименты Крукса, разместив в катодной трубке металлические пластины, параллельные катодным лучам и подав на них электрический потенциал. Отклонение полей лучей в сторону положительно заряженной пластины указывало на то, что лучи содержат отрицательный заряд. А. Шустер первый показал, что отношение заряда к массе $\frac{e}{m}$ можно вычислить по отклонению катодных лучей в магнитном поле (1889) [5].

Рассуждения его были следующими. Если частица массой m и зарядом e движется со скоростью v перпендикулярно магнитному полю с индукцией B , то магнитное поле отклоняет эту частицу от прямолинейного движения. На нее действует сила $F = evB$, и частица начинает двигаться по круговой орбите радиуса r .

В этом случае

$$Bev = \frac{mv^2}{r} \text{ или } \frac{e}{m} = \frac{v}{Br}. \quad (1)$$

Для определения $\frac{e}{m}$ одного уравнения недостаточно, так как неизвестна скорость v . Для ее нахождения Шустер использует уравнение энергетического баланса в виде

$$Ue = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

где U — разность потенциалов, приложенная к газоразрядной трубке.

Исключив из уравнений (1) и (2) скорость v , Шустер получил выражение для оценки верхнего предела $\frac{e}{m}$

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}. \quad (3)$$

Значения верхнего предела $\frac{e}{m}$ в формуле (3) оценивались по результатам реального эксперимента, при значениях $U = 225$ В, $B = 200$ Гс и $r = 1$ см.

Нижний предел $\frac{e}{m}$ оценивался из выражения (1), при значениях $B = 200$ Гс и $r = 0,5$ см, а скорость частицы определялась на основании

кинетической теории газов. В эксперименте скорость молекул в воздухе при комнатной температуре составила $v = 1000$ м/с.

В результате исследования оказалось, что $\frac{e}{m}$ находится в следующем диапазоне значений

$$5 \cdot 10^2 \frac{SGCM}{g} < \frac{e}{m} < 10^6 \frac{SGCM}{g}.$$

Полученное значение $\frac{e}{m}$ для катодных лучей оказалось на два порядка выше, чем подобное значение для атома водорода при электролизе ($\frac{q_{H_2}}{m_{H_2}} = 10^4 \frac{SGCM}{g}$ или $10^8 \frac{Кл}{кг}$), что вызвало определенный скепсис у ученых к его расчетам. Ко всему прочему, он не сделал правильных выводов из своих экспериментов и продолжал считать катодные лучи потоком заряженных атомов или молекул газа.

Шустер не смог извлечь пользу из своих исследований по всей видимости из-за того, что его квалификация физика-экспериментатора была недостаточного уровня. Невзирая на это, исследования А. Шустера легли в основу экспериментов Дж. Дж. Томсона, которые в последующем привели к открытию электрона.

4. Исследования по катодным лучам в Кавендишской лаборатории

22 декабря 1884 г., после ухода второго профессора Кавендишской лаборатории лорда Дж. У. Рэля (англ. *John Strutt, 3rd Baron Rayleigh*, 12.12.1842—30.06.1919), был избран третьим ее профессором и одновременно директором 28-летний Джозеф Джон Томсон (*Sir Joseph John Thomson*, 18.12.1856—30.08.1940, рис. 2.17). Юность Джей-Джея была лишь одной из причин удивления его назначением. Его способности явно не соответствовали поставленной задаче [6]. Он был слишком неуклюж, чтобы безопасно обращаться со стеклянной посудой, и проявлял меньше интереса к экспериментам, чем к продвижению современных идей в математической физике: электромагнитной теории Максвелла и концепции Кельвина об атомах как вихрях в эфире. Тем не менее, он произвел сильное впечатление на избирателей, которые предпочли его более опытным кандидатам, и поздравительные письма, которые он получил, показывают, как высоко его ценили многие с превосходными соперничающими претензиями.

Томсон, став главой Кавендишской лаборатории, больше стал уделять внимания экспериментальным исследованиям электрической проводимости в газах. Этой проблемой он занимался вплоть до 1897 г. Трудно-

сти в понимании этой проблемы заключались в том, что газ при низком давлении был непроводящим, пока приложенное напряжение не было достаточно высоким, чтобы начать разряд. Тогда это был настолько быстро-текущий процесс, что воспроизводимые результаты были делом случая и настойчивости.

В 1894 г. Томсон решил провести эксперименты по определению скорости распространения катодных лучей, поскольку ему казалось, что знание этой скорости позволит определиться с одним из двух взглядов на природу катодных лучей: «Если принять точку зрения, что катодные лучи представляют собой эфирные волны, то можно ожидать, что они будут двигаться со скоростью, сравнимой со скоростью света; тогда как если лучи состоят из молекулярных потоков, то скорость этих лучей будет равна скорости молекул, которая, как мы можем ожидать, будет намного меньше скорости света» [7]. Используя эффект отклонения катодных лучей магнитом, Томсон определил, что скорость катодных лучей составляет $1,9 \times 10^7$ см/сек, что при 0°C примерно в сто раз больше скорости молекул водорода ($1,8 \times 10^5$ см/сек). Скорость катодных лучей, полученная в ходе экспериментов, очень близка к скорости, которую отрицательно наэлектризованный атом водорода приобретет под влиянием падения потенциала на катоде. В статье отмечается, что действие магнитной силы при отклонении этих лучей позволяет предположить, что отклонение вызвано действием магнита на движущееся наэлектризованное тело и в этом случае скорость атома должна быть по крайней мере того же порядка, который был определен автором. Скорость частиц катодных лучей оказалась в 1600 раз меньше скорости света, что явилось убедительным доводом в пользу корпускулярной гипотезы.

В первые десять лет, вплоть до 1895 г., результаты исследований лаборатории были достойными, но не очень впечатляющими.

Опубликованная в декабре 1895 г. статья Вильгельма Рентгена об открытии X-лучей стимулировала новый интерес к электронно-лучевым трубкам, которые генерировали эти лучи, а также к экспериментам с ними. Статья привлекла внимание Томсона, особенно в той ее части, где касалось влияния рентгеновских лучей: «Легкость, с которой газ, путем применения и удаления рентгеновских лучей, может быть превращен из проводника в изолятор, делает использование этих лучей ценным средством изучения проводимости электричества через газы» [8].

Для Кембриджского университета 1895 год стал примечательным еще тем, что впервые начали принимать выпускников других университетов в качестве «студентов-исследователей». Среди них были Эрнест Резер-

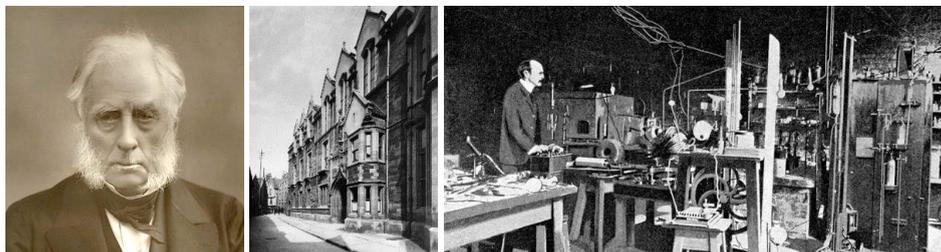


Рис. 5. Уильям Кавендиш, 7-й герцог Девонширский (27.04.1808—21.12.1891), при финансовой поддержке которого была создана лаборатория его имени. Общий вид Кавендишской лаборатории в 1911 г. Джозеф Джон Томсон проводит эксперимент в Кавендишской лаборатории.

Fig. 5. William Cavendish, 7th Duke of Devonshire (04.27.1898—12.21.1891), with the financial support of which a laboratory named after him was created. General view of the Cavendish Laboratory in 1911. Joseph John Thomson conducting an experiment at the Cavendish Laboratory

форд (*Ernest Rutherford*) из Новой Зеландии, Джон Таунсенд (*John Townsend*) и Дж. А. Макклелланд (*J. A. McClelland*) из Ирландии, а в конце 1895 г. к ним присоединился выпускник Кембриджа Чарлз Т. Р. Вильсон (*Charles Thomson Rees Wilson*). Томсон и Макклелланд провели серию исследований рентгеновских лучей и их эффектов в начале 1896 г., сразу после публикации Рентгена. Томсон и Резерфорд вместе работали над серией экспериментов с газами, наэлектризованными рентгеновскими лучами, в течение первой половины 1896 г. Резерфорд продолжил эти исследования до 1897 г.

Другим фактором, который, несомненно, имел значение для научной области интересов Томсона, явилась статья, опубликованная Жаном Перреном в конце 1895 г., где сообщалось об эксперименте, в котором, в отличие от Герца, отрицательный электрический заряд действительно сопровождает катодные лучи [1,2].

Томсон хорошо знал о взаимосвязи между m/e и скоростью при искривлении траектории катодных лучей в магнитном поле, поскольку он использовал это вместе с предположениями о величине m/e в своих оценках скорости в 1894 г., а также у него была информация о том, что Шустер аналогичным образом использовал это вместе с предположениями о скорости в своих оценках m/e в 1890 г. Проблема в обоих случаях заключалась в том, что изогнутая магнитным полем траектория обеспечивает единственную экспериментальную связь между двумя неизвестными. Возможно это и было главным, что подтолкнуло Томсона к экспериментам с катодными лучами в конце 1896 г., так как он увидел потенциальные возможности эксперимента Перрина по установлению второй связи между этими двумя неизвестными.

5. Доклад Дж. Дж. Томсона в Кембриджском философском обществе

Первое публичное выступление Томсона о приведенных экспериментах по магнитному отклонению катодных лучей и модернизированном варианте эксперимента Перрина (1895 г.), состоялось 8 февраля 1897 г. в Кембриджском философском обществе (Cambridge Philosophical Society).

В докладе, материалы которого были опубликованы [9], Томсон уделил внимание двум группам экспериментов: первая группа, связанная с электрическими зарядами, переносимыми лучами, а вторая — с отклонением этих лучей, когда они проходят через однородное магнитное поле.



Рис. 6. Общий вид Кембриджского университета, 1890—1900 гг. Лекционный зал Кембриджского философского общества.⁶

Fig. 6. General view of the University of Cambridge, 1890–1900, Lecture hall of the Cambridge Philosophical Society.⁶

Томсон повторил эксперимент Перрена, однако в несколько измененном виде. Основания цилиндров в газоразрядной трубке, в отличие от трубки Перрена (рис. 2), содержали не отверстия, а прорезы в виде щелей. Внутренний цилиндр соединялся не с электроскопом, а с одной парой квадрантного электрометра⁷, рис. 7. Лучи не могли попасть во внутренний цилиндр, если на них не действовал магнит. Заряд в цилиндре фиксировался электрометром во время его возникновения при каждом замыкании и размыкании индукционной катушки.

⁶ Illustrated London News, June 28, 1845, CUL NPR.C.313) [10].

⁷ Квадрантный электрометр разработан в 1867 году британским физиком Уильямом Томсоном (позже лорд Кельвин). Электрометр используется для точного измерения электрического заряда или потенциала тела. Эта чрезвычайно чувствительная конструкция имеет алюминиевый диск (подвешенный в центре на торсионном волокне), разрезанный на четыре сегмента. Изолированные сегменты соединены по диагонали попарно. При зарядке один алюминиевый сегмент притягивается к одной паре сегментов и отталкивается от другого сегмента. Это отклонение (мера величины электрического заряда) измеряется лучом света, отраженным от зеркала, прикрепленного к заряженному сегменту.

В эксперименте Томсон обнаружил, что небольшой заряд проходит в цилиндр, даже когда он не находится на прямой траектории лучей. По всей видимости, это было связано с рассеянием заряда, выходящего из трубки через прорезь в цилиндре при каждом разряде катушки. Этот заряд был небольшим и отрицательным, а при сильном истощении вакуума часто имел положительный заряд. Когда лучи отклонялись магнитом для прохождения внутрь цилиндра, то он получал отрицательный заряд большой величины. Величина заряда сохранялась до тех пор, пока небольшой фосфоресцирующий участок возле цилиндра движением магнита перемещался в ту или иную сторону цилиндра.

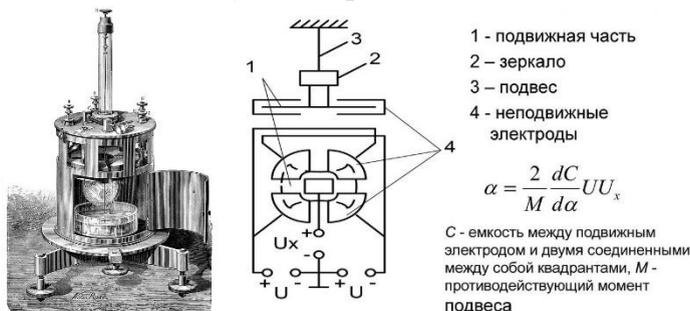


Рис. 7. Квадрантный электрометр конструкции Уильяма Томсона. Иллюстрация взята из книги «Physique Populaire» (Emile Desbeaux, 1891).

Справа — устройство квадрантного электрометра.

Fig. 7. Quadrant electrometer designed by William Thomson. Illustration taken from the book “Physique Populaire” (Emile Desbeaux, 1891). On the right is a quadrant electrometer device

Этот эксперимент убедительно показал, что вдоль катодных лучей идет поток отрицательного электричества. Однако следующие эксперименты обратили на себя внимание тем, что должно быть что-то помимо потока отрицательно наэлектризованных частиц вдоль катодных лучей. Если катушка продолжала работать, то отрицательный заряд в цилиндре не увеличивался до бесконечности, а достигал определенного предела и после этого оставался неизменным, хотя катодные лучи продолжали вливаться в цилиндр. Помимо этого, внутренний цилиндр, изначально заряженный отрицательно до определенной величины, сохранял этот заряд, до тех пор, пока на него не воздействовали лучи. Но как только лучи падали на него, то часть отрицательного заряда исчезала, невзирая на идеальную изоляцию.

Катодные лучи в экспериментах для магнитного отклонения создавались в боковой трубке и направлялись в большой колпак через щель в металлической пластине, рис. 8. Колпак помещался между двумя катушками, расположенными как в гальванометре Гельмгольца для создания однородного

магнитного поля. Лучи в колпаке проходили перед стеклянной пластиной, разделенной на квадраты. Благодаря этому было сделано большое количество фотографий лучей в разных газах и при разной степени истощения.

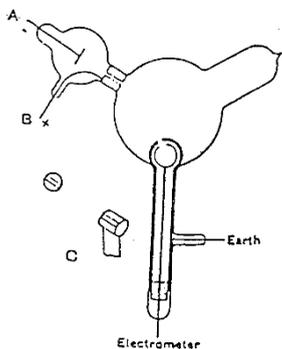


Рис. 8. Устройство установки в эксперименте Томсона по магнитному отклонению катодных лучей [9].

Fig. 8. Installation design in Thomson's experiment on the magnetic deflection of cathode rays [9]

Томсон в представленной серии экспериментов установил, что магнитное отклонение катодных лучей в воздухе, водороде, углекислом газе и метилиодиде (йодистый метил) имеет одно и тоже значение, если средняя разность потенциалов между катодом и анодом постоянна, рис. 9. Он отметил, что через щель внутреннего цилиндра газоразрядной трубки проходят определенные «лучи», которые не отклоняются магнитом, и они почти не способны производить фосфоресценцию. Траектория лучей в первой части их пути была близка к окружности.

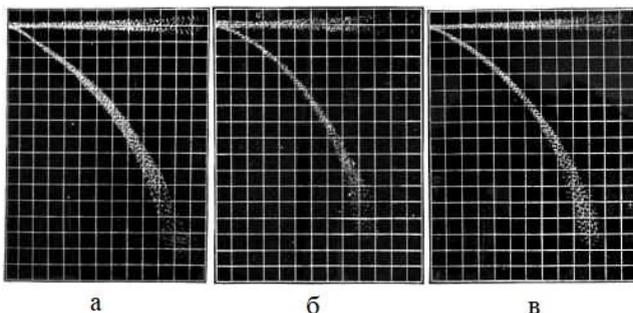


Рис. 9. Фотографии траекторий отклонения в магнитном поле катодных лучей в средах: а — водород (12 А, 1600 В), б — воздух, в — углекислый газ (12 А, 1600 В) [9].

Fig. 9. Photos of the trajectories of deflection in a magnetic field of cathode rays in media: а – hydrogen (12 A, 1600 V), б – air, в – carbon dioxide (12 A, 1600 V) [9]

Краткое содержание доклада Томсона в Кембриджском философском обществе было опубликовано в журнале «Nature» [11]. Следует отметить, что в выступлении Томсон не затронул вопрос о субатомной частице.

6. Корпускулы Дж. Дж. Томсона

Через три месяца, Дж. Дж. Томсон, в пятницу 30 апреля 1897 г., на еженедельной вечерней встрече в Королевском институте Великобритании (*Royal Institution of Great Britain*) выступил с лекцией «Катодные лучи» (*Cathode rays*), рис. 10. Лекция содержала результаты автора о трех ключевых экспериментах по проводимости электричества в газах, которые четко отличали «катодные лучи» от различных явлений, которые привлекали внимание ученых и затрудняли изучение газовых разрядов в XIX в. Полученные результаты основывались на серии экспериментов с газовыми разрядами, которые он начал в 1893 г. для сравнения и сопоставления проводимости газов с аналогичным поведением в электролитах, причем последнее явление хорошо описывалось в то время работами Майкла Фарадея, немецкого физика Рудольфа Клаузиуса (нем. *Rudolf Julius Emanuel Clausius*, 02.01.1822—24.08.1888) и шведского физикохимика Сванте Аррениуса (швед. *Svante August Arrhenius*, 19.02.1859—02.10.1927). Томсон после доклада в Кембриджском философском обществе продолжал эксперименты в течение 4 месяцев. В лекции из последних исследований были представлены эксперименты по влиянию некоторых внешних факторов на заряды, переносимые катодными лучами как внутри, так за пределами газоразрядной трубки [12].

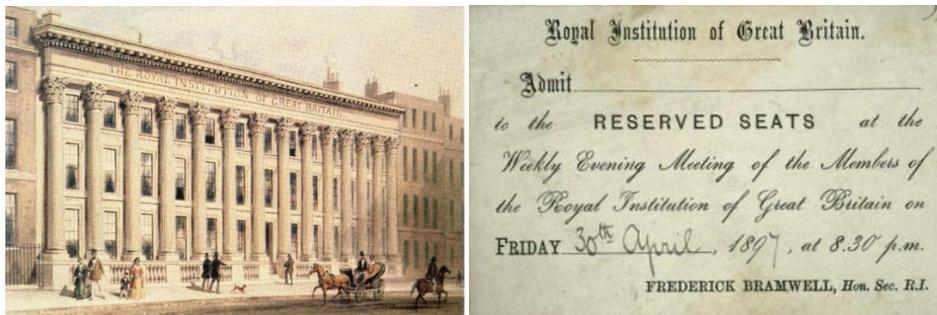


Рис. 10. Общий вид здания Королевского института Великобритании (1838 г.), в котором 30 апреля 1897 г. состоялась лекция Дж. Дж. Томсона и билет на эту лекцию.

Fig. 10. General view of the building of the Royal Institute of Great Britain (1838), in which April 30, 1897, a lecture by J. J. Thomson and a ticket to this lecture

Первая половина лекции была посвящена анализу экспериментальных исследований Плюккера, Гитторфа, Гольдштейна, Крукса, Э. Видеманна, Эльстера и Гейтел. Дж. Дж. Томсон остановился на особенностях экспериментов Перрена и отклонении катодных лучей под воздействием магнитного поля в различных средах, то есть по существу был изложен материал из его доклада в Кембриджском философском обществе. После

этого он остановился на неудавшемся эксперименте Герца по отклонению катодных лучей в электростатическом поле: «Например, мы можем заставить, как это сделал Герц, пройти лучи между пластинами, соединенными с батареей, так, что между этими пластинами действует электростатическая сила, и катодный луч сможет пересекать это пространство, не отклоняясь в ту или иную сторону. Однако мы должны помнить, что катодные лучи, когда они проходят через газ, делают его проводником, так что газ, действуя как проводник, экранирует электрическую силу от заряженной частицы. Когда пластины погружаются в газ и между пластинами установлена определенная разность потенциалов, то проводимость газа вблизи катодных лучей, вероятно, намного больше, чем средняя проводимость газа между пластинами, и поэтому градиент потенциала на катодных лучах очень мал по сравнению со средним градиентом потенциала».

Во второй половине лекции Томсон рассмотрел поведение катодных лучей вне газоразрядной трубки, опираясь на эксперименты Ленарда. Из экспериментов Ленарда по поглощению лучей за пределами трубки Томсон выдвигает гипотезу о том, что катодные лучи являются заряженными частицами, движущимися с большими скоростями, размер носителей должен быть мал по сравнению с размерами обычных атомов или молекул. Томсон отмечает, что предположение о том, что материя подразделяется на более тонкие части, чем атом элемента, является несколько поразительным. Однако гипотеза, которая имела бы несколько схожие последствия, а именно, что так называемые элементы являются соединениями какого-то изначального элемента, время от времени выдвигалась различными химиками. Так, Праут полагал, что атомы всех элементов состоят из атомов водорода, а Норман Локьер выдвинул весомые аргументы, основанные на спектроскопических соображениях, в пользу составной природы элементов.

Далее Томсон размышляет и выдвигает гипотезу⁸ [12]: «Проследим последствия предположения, что атомы элементов представляют собой скопления очень маленьких частиц, все похожие друг на друга. Мы будем называть такие частицы корпускулами, так что атомы обычных элементов состоят из корпускул и дырок, причем дырки преобладают». Он предположил, что на катоде некоторые молекулы газа расщепляются на эти частицы, и что они, заряженные отрицательным электричеством и движущиеся с высокой скоростью, и образуют катодные лучи. Расстояние, которое пройдут эти лучи, прежде чем потерять определенную часть своего импульса,

⁸ Математическая гипотеза в физике — форма научной гипотезы, один из методов познания, широко используемый в теоретической физике, заключающийся в распространении на новую, неисследованную область известных математически выраженных законов из какой-либо из смежных областей в видоизмененной форме.

будет пропорционально средней длине свободного пробега *корпускул*. Эти частицы сталкиваются с другими частицами, а не с молекулами в целом и можно предполагать, что они могут проникать между пустотами в молекуле. Таким образом, длина свободного пробега будет пропорциональна количеству этих корпускул. Так как каждая корпускула имеет одинаковую массу относительно массы единицы объема (плотность вещества), то независимо от его химической природы или физического состояния, длина свободного пробега, α , следовательно, и коэффициент поглощения будут зависеть только от плотности. Это в точности результат Ленарда.

На основе этой гипотезы видно, почему магнитное отклонение одинаково внутри трубки, независимо от природы газа, поскольку носителями заряда являются *корпускулы*, которые одинаковы независимо от состава газа. Все носители не могут быть уменьшены до минимальных размеров, некоторые могут быть агрегатами двух или более частиц. Они по-разному отклонялись бы от единственной корпускулы. Таким образом мы должны получить магнитный спектр.

Томсон попытался с помощью следующего метода измерить m/e , отношение массы этих корпускул к заряду, который они переносят. Для этого двойной цилиндр с прорезями, который использовался в эксперименте, был помещен перед вогнутым катодом для фокусировки катодных лучей на прорезь. Прорезь во внутреннем цилиндре закрывалась термопреградой. Термопреграда нагревалась, когда катодные лучи попадали в прорезь и ударялись об нее. Зная теплоемкость преграды, можно было определить механический эквивалент переданного ей тепла. Отклонение электрометра показывало величину заряда, попавшего в цилиндр.

Для определения отношения m/e Дж. Дж. Томсон получил соответствующую формулу. В это выражение вошли экспериментально определяемые величины. При их наличии можно вычислить отношение m/e .

Остановимся на подходе Дж. Дж. Томсона. В нем он руководствовался следующими соображениями. Если пучок катодных лучей однородный и состоит из N частиц с зарядом e и массой m , то тогда частицы несут определенное количество электричества $Ne = Q$. Величину Q можно измерить с помощью электрометра.

С другой стороны, катодные лучи, падая на твердое тело, повышают его температуру. Кинетическая энергия движущихся частиц со скоростью v превращается в тепло, и если предположить, что вся эта энергия полностью переходит в тепло, то можно измерить увеличение температуры тела и вычислить его теплоемкость. В этом случае кинетическая энергия W частиц определится из формулы $W = \frac{Nmv^2}{2}$.

На любой электрический заряд, движущийся в магнитном поле, как известно, действует сила Лоренца. Если магнитное поле однородно, а вектор скорости частицы \vec{v} и напряженности магнитного поля \vec{H} перпендикулярны, то траектория движения заряженной частицы представляет собой окружность радиуса ρ . Этот радиус можно определить из второго закона Ньютона: $F = ma$, где $a = \frac{v^2}{\rho}$ — центростремительное (нормальное) ускорение. Таким образом, имеем:

$$evH = m \frac{v^2}{\rho} \quad \text{или} \quad \frac{mv}{e} = I, \quad \text{где} \quad I = \mu_0 H \rho, \quad \mu_0 = const.$$

Исходя, из выше записанных выражений для Q , W и I , можно получить следующее соотношение для W/Q , а уже из него вычислить m/e :

$$\frac{m}{e} = \frac{I^2 Q}{2W}. \quad (4)$$

Таким образом, если определить из эксперимента значения величин Q , W и I , то тогда из полученной формулы (4) можно сделать вывод о скорости неизвестной частицы и ее массе.

В эксперименте Томсона, проведенном при очень низком давлении, когда лучи существовали около одной секунды, а заряда было достаточно, чтобы поднять потенциал внутреннего цилиндра до 16 В при емкости 1,5 мкФ, значение Q было следующим:

$$Q = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ CGSS}.$$

В эксперименте теплоемкость термопреграды составляла 0,005, а ее температура под воздействием лучей поднялась на 3,3 °С. В этом случае механический эквивалент тепла равен

$$W = 3,3 \cdot 0,005 \cdot 4,2 \cdot 10^7 = 6,3 \cdot 10^5 \text{ erg}.$$

В эксперименте значение $I = 280 \text{ G} \cdot \text{cm}$. Тогда после подстановки значений величин Q , W и I в формулу (4) получим

$$\frac{m}{e} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ g/CGSS}. \quad (5)$$

Полученное значение m/e значительно меньше по сравнению со значением 10^{-4} для отношения массы атома водорода к заряду, который он несет. Другими словами, для неизвестных частиц оказалось, что их отношение m/e примерно в 1000 раз меньше, чем у самого маленького известного носителя заряда — атома водорода.

В конце доклада Томсон, комментируя полученный результат (5), сказал: «Интересно отметить, что значение e/m , которое мы нашли на основе катодных лучей, имеет тот же порядок, что и значение 10^{-7} , выведенное Зеemanом из его экспериментов по влиянию магнитного поля на период натриевого света».

Полученные результаты подтвердили ранее сделанные предположения по данной проблеме о том, что катодные лучи состоят из пучка отрицательно заряженных частиц.

Несмотря на жесткое противодействие своим представлениям о том, что катодные лучи представляют собой частицы, особенно со стороны Герца и Ленарда, которые придерживались волнового объяснения, Томсон придерживался своей гипотезы и в конечном итоге представил решающие доказательства для ее подтверждения [12]: «Атомы элементов представляют собой скопления очень маленьких частиц, которые похожие друг на друга и называются корпускулами. Атомы обычных элементов состоят из корпускул и дырок, причем дырки преобладают».

Теория Томсона встретила общий скептицизм. Даже последователь Максвелла ирландский физик Джордж Фицджеральд (англ. *George Francis Fitzgerald*, 03.08.1851—22.02.1901), самый отзывчивый слушатель, считал, что он пошел намного дальше, чем того требовали его экспериментальные данные. Фицджеральд сделал альтернативное предположение, что частицы катодных лучей были свободными электронами, как это предусмотрено теорией Джозефа Лармора⁹ [13]. Такие электроны должны были быть центрами напряжения в эфире. Они объяснили дискретные электрические заряды, но не зависели от материи. Таким образом, Фицджеральд признал природу катодных лучей в виде частиц, но он не согласился с гипотезой, что эти же частицы могут составлять атомы. С точки зрения Томсона, Фицджеральд вводил ненужную дополнительную гипотезу.

Текст лекции Томсона 30 апреля 1897 г. в Королевском институте появился под заголовком «*Cathode Rays*» три недели спустя 21 мая в журнале «*Electrician*» [14]. Через два месяца в том же журнале появилась реакция на лекцию Томсона: «Объяснение проф. Дж. Дж. Томсоном некоторых явлений электронно-лучевого излучения с помощью предположения о делимости химического атома приводит к такому количеству априори важных и интересных выводов, что нельзя не желать, чтобы эта гипотеза была подтверждена на ранней стадии каким-нибудь решающим экспериментом» [15].

⁹ Сэр Джозеф Лармор (англ. *Sir Joseph Larmor*, 11.08.1857—1905.1942), ирландский физик, первый, кто вычислил скорость, с которой излучается энергия ускоренным электроном, и первый, кто объяснил расщепление линий спектра магнитным полем. Его теории были основаны на убеждении, что материя полностью состоит из электрических частиц, движущихся в эфире.

7. Решающие эксперименты Дж. Дж. Томсона

В октябре 1897 г. Томсон опубликовал развернутую статью «Катодные лучи» (*Cathode Rays*) в журнале *Philosophical Magazine* [16]. В нее вошли исследования по катодным лучам, которые были представлены в виде доклада в Кембриджском философском обществе и лекции в Королевском институте, а также новые научные результаты в этой области.

В начале статьи автор отмечает: «Обсуждаемые в этой статье эксперименты были предприняты в надежде получить некоторую информацию о природе катодных лучей. Относительно этих лучей существуют самые разные мнения...». Чтобы прояснить ситуацию и получить необходимую информацию о природе катодных лучей, он решил провести серию экспериментов с акцентами на их количественные оценки.

Ключевые эксперименты, описанные в статье, основывались на рабочей гипотезе о том, что катодные лучи состоят из отрицательно заряженных частиц. В частности, в работе Томсона по определению величины заряда, переносимого корпускулами, использовался экспериментальный метод и оборудование, разработанные сотрудником Кавендишской лаборатории Чарлзом Вильсоном (англ. *Charles Thomson Rees Wilson*, 14.02.1869—15.11.1959), который использовал открытие Таунсенда (*Townsend's discovery*) о том, что заряженные частицы могут образовывать ядра, вокруг которых может конденсироваться пересыщенный водяной пар. Этот эмпирический метод привел к разработке устройства, которое позже будет называться «туманная камера» (камера Вильсона).

Томсон в последних в своих опытах сумел сделать то, что не удалось сделать Герцу. При проведении экспериментов он неожиданно столкнулся с проблемой при достижении очень низкого давления. Оказалось, что ниже определенного критического давления потенциал, необходимый для разряда, быстро возрастал, и вскоре разряд становился критическим из-за выхода из строя разрядных трубок. Путь к разрешению проблемы ему указало исследование его соотечественников химиков Де ла Рю (англ. *Warren De la Rue*, 15.01.1815—19.04.1889) и Мюллера (*Hugo W. Müller*), которые в 1883 г. обнаружили, что увеличение диаметра разрядной трубки снижает критическое давление [17]. Томсон в 1897 г., опираясь на этот вывод, сконструировал свою разрядную трубку с почти идеальным вакуумом, рис. 11. Стеклообразная колба трубки вокруг катода имела диаметр около 10 см перед сужением к цилиндрическому каналу, внутри которого распространялись лучи. Герц, проводивший исследования катодных лучей 13 лет назад, не знал о результатах Де ла Рю и Мюллера. Его разрядная трубка имела диаметр около 2,5 см по всей ее длине. Если бы Герц достиг

достаточно низкого давления, чтобы наблюдать электростатическое отклонение, то, возможно, он не смог бы получить разряд.

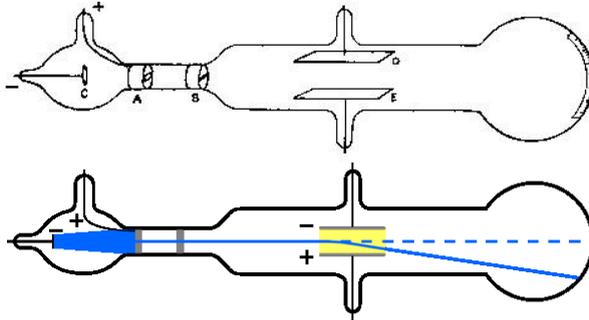


Рис. 11. Катодная трубка конструкции Дж. Дж. Томсона [16], с помощью которой он наблюдал отклонение катодных лучей электрическим полем. 1897 г.

Fig. 11. Cathode tube designed by J. J. Thomson [16], with the help of which he observed the deflection of cathode rays by an electric field. 1897

В мае—июне 1897 г. Томсон, используя трубку своей конструкции, обнаружил отклонение катодных лучей электростатическим полем. До этого исследователи, например, Генрих Герц, утверждали, что такое невозможно. В опытах Герца причиной была проводимость остаточного газа в трубке, возникавшая под действием катодных лучей. После этого Томсон установил, что отклонение катодных лучей зависит от степени разреженности вакуума в газоразрядной трубке. Это указывало на связь отрицательного результата Г. Герца с большим количеством остаточного газа в его газоразрядной трубке. Позднее он отметил, что «отклонение катодных лучей электрическими силами стало вполне различимым, а его направление указывало то, что составляющие катодные лучи частицы несли отрицательный заряд. Этот результат устраняет противоречие между воздействием электрических и магнитных сил на катодные частицы. Но он имеет гораздо большее значение. Здесь возникает способ измерения скорости этих частиц v , а также и m/e , где m — масса частицы, а e — ее электрический заряд».

Введенное в статье Дж. Дж. Томсона обозначение « e » для заряда электрона так и закрепилось за этой частицей в научно-технической литературе. Вверху « e » иногда как в степени, ставят знак минус « $-$ » - « e^- », чтобы подчеркнуть, что это электрон. Заметим, что в его работах определяется m/e (англ. *mass-to-charge ratio*), в то время как в научной литературе чаще используется величина e/m (отношение заряда электрона к его массе).

К этому моменту времени Томсону были доступны важные экспериментальные результаты Герца, Ленарда, Перрена, Вихерта и Кауфмана

по катодным лучам. Он обобщил эксперименты А. Шустера, добавив к нахождению параметров для вычисления e/m не только данные из отклонения катодных частиц в магнитном поле, но и из эффекта их отклонения в электрическом поле. После этого Дж. Дж. Томсону оставалось определить массу неизвестных отрицательно заряженных частиц, составляющих катодные лучи. С этой целью он модифицировал эксперимент Ж. Перрена. Для определения требуемой характеристики частиц m/e было изготовлено несколько типов катодных трубок оригинальной конструкции с высоким вакуумом. Конструкция одна из таких трубок приведена на рис. 11. Значение m/e Томсон вычислял по формуле (3.1), для определения величин Q , W и I были использованы катодные трубки трех различных типов. Некоторые результаты измерений величин Q , W и I , полученных Дж. Дж. Томсоном из эксперимента с одной из катодных трубок под № 1 при отклонении катодных лучей в магнитном поле, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Значения величин Q , W и I , полученных Дж. Дж. Томсоном из эксперимента с одной из катодных трубок под № 1 при отклонении катодных лучей в магнитном поле [16].

Tab. 1. Values of quantities Q , W and I obtained by J. J. Thomson from an experiment with one of the cathode tubes under No. 1 when the cathode rays are deflected in a magnetic field [16]

Gas	Value of W/Q	I	m/e , g/CGSS	v , cm/sec
Air (Воздух)	$4,6 \times 10^{11}$	230	$0,57 \times 10^{-7}$	4×10^9
Air	$1,8 \times 10^{12}$	350	$0,34 \times 10^{-7}$	1×10^{10}
Air	$6,1 \times 10^{11}$	230	$0,43 \times 10^{-7}$	$5,4 \times 10^9$
Air	$2,5 \times 10^{12}$	400	$0,32 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{10}$
Air	$5,5 \times 10^{11}$	230	$0,48 \times 10^{-7}$	$4,8 \times 10^9$
Air	1×10^{12}	285	$0,4 \times 10^{-7}$	7×10^9
Air	1×10^{12}	285	$0,4 \times 10^{-7}$	7×10^9
Hydrogen (Водород)	6×10^{12}	205	$0,35 \times 10^{-7}$	6×10^9
Hydrogen	$2,1 \times 10^{12}$	400	$0,5 \times 10^{-7}$	$9,2 \times 10^9$
Carbonic acid (Углекислый газ)	$8,4 \times 10^{11}$	260	$0,4 \times 10^{-7}$	$7,5 \times 10^9$
Carbonic acid	$1,47 \times 10^{12}$	340	$0,4 \times 10^{-7}$	$8,5 \times 10^9$
Carbonic acid	$3,0 \times 10^{12}$	480	$0,39 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{10}$

Анализируя результаты экспериментов для катодных трубок трех различных типов, Дж. Дж. Томсон отмечает: «Значение m/e значительно больше для трубки 3, где отверстие меньше, чем у трубок 1 и 2, у которых отверстие представляет собой щель гораздо большей площади. Я считаю, что значения m/e , полученные для трубок 1 и 2, слишком малы из-за утечки газа из внутреннего цилиндра во внешний, который становится проводником при прохождении катодных лучей. Из этих таблиц видно, что значение m/e не зависит от природы газа». В статье приведены средние значения m/e , полученные при отклонении катодных лучей в магнитном поле

для трубок [16]: № 1 при наличии воздуха $-0,40 \times 10^{-7} g/CGSS$, водорода $-0,42 \times 10^{-7} g/CGSS$ и углекислого газа $-0,40 \times 10^{-7} g/CGSS$; № 2 при наличии воздуха $-0,52 \times 10^{-7} g/CGSS$, водорода $-0,50 \times 10^{-7} g/CGSS$ и углекислого газа $-0,54 \times 10^{-7} g/CGSS$.

В июне—июле 1897 г. Томсон провел эксперимент по нахождению значений для вычисления m/e из эксперимента по электростатическому отклонению катодных лучей. Произошло это через два месяца после высказанной им гипотезы, что катодные лучи представляют собой корпускулы. В эксперименте использовалась катодная трубка конструкции Дж. Дж. Томсона, рис. 11.

Электростатическое отклонение катодных лучей определялось выражением

$$\Theta = \frac{Fel}{mv^2}, \quad (6)$$

где Θ — электрическое угловое отклонение, F — приложенная электрическая напряженность, l — длина электрических пластин, v — скорость частицы). Если была приложена магнитная сила, распространяющаяся на ту же площадь, что и на электрические пластины, то

$$\Phi = \frac{HEl}{mv}, \quad (7)$$

где Φ — магнитная девиация или магнитное отклонение), H — напряженность приложенного магнитного поля).

Если магнитное поле изменяли до тех пор, пока магнитное отклонение не стало таким же, как и электрическое отклонение, то уравнения (6) и (7) можно упростить:

$$\frac{Fel}{mv^2} = \frac{HEl}{mv} \quad \text{или} \quad v = \frac{F}{H},$$

тогда

$$\frac{m}{e} = \frac{H^2 l}{F\Phi}, \quad (8)$$

где значение Θ найдено путем измерения только электрического прогиба.

Томсон провел измерения в воздухе, водороде и углекислом газе, а также испробовал как алюминиевые, так и платиновые электроды. В таблице 2 приведены значения величин Θ , H и F , полученные Дж. Дж. Томсоном из эксперимента при отклонении катодных лучей в электрическом поле. Как видно из табл. 2, полученные результаты для m/e по формуле (8) лежат в интервале от $1,3 \times 10^{-7}$ до $1,5 \times 10^{-7}$ г/Кл и в целом совпадают с его более ранними результатами.

Табл. 2. Значения величин Θ , H и F , полученных Дж. Дж. Томсоном из эксперимента при отклонении катодных лучей в электрическом поле [16].

Tab. 2. Values of the quantities Θ , H and F obtained by J. J. Thomson from the experiment with the deflection of cathode rays in an electric field [16]

Gas	Θ	H	F	l	$m/e, g/C$	$v, cm/sec$
Air	8/110	5,5	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,3 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^9$
Air	9,5/110	5,4	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^9$
Air	13/110	6,6	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,2 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^9$
Hydrogen	9/110	6,3	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,5 \times 10^{-7}$	$2,5 \times 10^9$
Carbonic Acid	11/110	6,9	$1,5 \times 10^{10}$	5	$1,5 \times 10^{-7}$	$2,2 \times 10^9$
Air	6/110	5	$1,8 \times 10^{10}$	5	$1,3 \times 10^{-7}$	$3,6 \times 10^9$
Air	7/110	3,6	$1,0 \times 10^{10}$	5	$1,1 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^9$

В статье [16] не приводится среднее значение m/e , полученное для одной трубки при отклонении катодных лучей в электрическом поле, но его можно определить из данных табл. 2, которое после вычислений составляет $m/e = 1,286 \times 10^{-7} g/CGSS$. Полученное значение m/e в несколько раз больше, чем при отклонении катодных лучей в магнитном поле. Дж. Дж. Томсон не приводит также общее среднее значение m/e , исходя из четырех экспериментов при отклонении катодных лучей в магнитном и электрическом полях. Если воспользоваться данными статьи, то среднее значение $m/e = 0,773 \times 10^{-7} g/CGSS$.

По поводу представления результатов экспериментов Дж. Дж. Томсон высказался спустя четыре десятилетия: «Эти эксперименты носили исследовательский характер; прибор имел простую конструкцию и не предназначался для получения наиболее точных результатов... Эти результаты были настолько удивительными, что казалось более важным провести общий обзор предмета, чем пытаться улучшить определение точного значения отношения массы частицы к массе атома водорода» [18, с. 337].

Из анализа данных эксперимента Томсон пришел к выводу, что для определения значений m/e метод, основанный на отклонении катодных лучей в электрическом поле гораздо менее трудоемок и, вероятно, более точен, чем предыдущий метод, однако его нельзя использовать в столь широком диапазоне давлений, рис. 12 [16, с. 310]. Тем не менее его эксперимент был далек от точности. Нужно отметить, что в статье Томсона не приводится статистическая обработка данных экспериментов и все значения определяющих величин записаны без единиц измерения. Приведенные единицы измерения у некоторых величин в табл. 1 и 2 сделаны автором данной статьи. В литературе XIX в. в качестве единицы измерения массы использовался грамм g , а заряда — электростатическая единица $e.s.u$, которая называлась статкулоном (*statcoulomb* или *statC*). В совре-

менной системе измерений (СИ) $1 \text{ C (кулон)} = 2,997925 \times 10^9 \text{ statC}$ или $e.s.u.$, а $1 \text{ statC} \approx 3.33564 \times 10^{-10} \text{ C}$. В литературе того периода времени использовалась электромагнитная единица измерения $e.m.u.$, которая называлась абкулон (*abC* или abC или aC). В современной системе СИ $1 \text{ coulomb} = 1 \times 10^{-1} \text{ abC}$ или $e.m.u.$ [19].

Томсон рассмотрел только два источника ошибок в своем эксперименте [20]. Во-первых, предполагалось, что магнитная сила ограничена пространством между электрическими пластинами, что верно лишь приблизительно. Это была систематическая ошибка, которая увеличивала измерение m/e , и он не пытался оценить увеличение. Во-вторых, при любом отклонении катодные лучи распределяются по спектру. Вместо яркого флуоресцентного пятна на конце трубки Томсон наблюдал пятно длиной в несколько миллиметров, что привело к ошибке до 20 %. Это значение зависит от того, измерял ли он электростатическое и магнитное отклонения последовательно, или же он противопоставлял их, чтобы получить нулевое отклонение, что по своей сути является более точным методом.

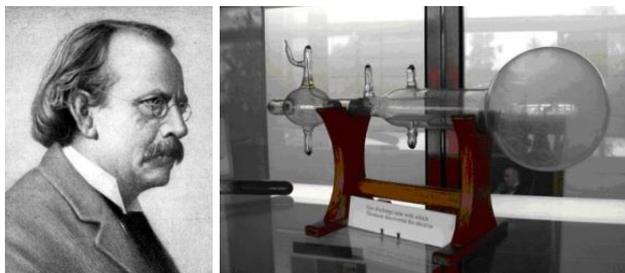


Рис. 12. Джозеф Джон Томсон (Sir Joseph John Thomson) и его катодная трубка (экспонат Музея науки в Лондоне).

Fig. 12. Sir Joseph John Thomson and his cathode tube (exhibit at the Science Museum in London)

Анализируя полученные результаты экспериментов на основе двух методов, Дж. Дж. Томсон сделал вывод о том, что значение m/e для исследуемой неизвестной частицы зависит от индукции магнитного поля и от напряженности электрического поля (т. е. от разности потенциалов между пластинами). При этом было установлено, что значение m/e не зависит не только от химических свойств остаточного газа в трубке и ее геометрической формы, материала электродов, но и от скорости катодных лучей (в опытах Томсона 1897 г. эта скорость составляла $0,1c$, где c — скорость света в вакууме), а также иных физических параметров. Катодные лучи оказались все же потоком отрицательных частиц, а не ионами остаточного газа, испускаемых катодом, как полагал Крукс.

В статье Томсон величину m/e неизвестной частицы сравнил с аналогичной величиной, полученной для водородного иона в электролизе, в результате оказалось, что она в 1000 раз меньше. Таким образом, для носителей электричества в катодных лучах величина m/e очень мала по сравнению со значением этой величины для носителей заряда в электролизе. Малость величины m/e может быть объяснена малым значением массы m или большим значением заряда e . Как установил Дж. Дж. Томсон, масса неизвестной частицы оказалась примерно в 2000 раз меньше массы атома водорода ($m_{H_2} = 1,67 \times 10^{-24} g$), легчайшего среди всех атомов. В статье Томсон не указал окончательное значение m/e .

В предположении того, что неизвестные частицы имеют удельный заряд постоянной величины, Дж. Дж. Томсон позже получил величину отношения массы частицы к ее заряду, равную $m/e = 0,588 \times 10^{-7} g/CGSS$ [21]. О высокой точности его эксперимента говорит тот факт, что современное значение этого отношения равно $m/e = (0,588 \pm 0,002) \times 10^{-7} g/CGSS$.

8. От абстрактной математической гипотезы к эмпирической реальности

Томсон был уверен в своих результатах значения m/e с точностью до последнего знака или около этого, что он считал достаточно хорошим значением. Экспериментальная работа Томсона и его идеи об корпускулах были подтверждены многими другими учеными. Самым известным из них был немецкий физик Вальтер Кауфман (нем. *Walter Kaufmann*, 05.06.1871—01.01.1947). Кауфман в 1896—1898 гг., будучи ассистентом Физического института в Берлине, начал исследования магнитного отклонения катодных лучей, пытаясь определить первое приближение отношения заряда микрочастицы (электрона) к массе (e/m). В 1897 г. Кауфман одновременно с Дж. Дж. Томсоном вычислил отношение e/m для катодных лучей. Его наиболее точное значение этого отношения было $e/m = 1,865 \times 10^7$ cgs/gm ($m/e = 0,53619 \times 10^{-7}$ gm/cgs). Результаты у обоих экспериментаторов были близкими, однако Кауфман, в отличие от Томсона, был осторожен в своих выводах, и слава первооткрывателя электрона досталась Томсону. Несколько ученых, включая Кюри, вместе с Томсоном номинировали Кауфмана на Нобелевскую премию, мотивируя это тем, что теория Томсона не была бы принята без подтверждающих доказательств Кауфмана.

Нужно отметить, что Томсон и Кауфман не были первыми в нахождении отношения заряда микрочастицы (электрона) к массе (e/m). Первым

ученым, сообщившим об открытии микрочастицы (электрона), был Эмиль Вихерт из Кёнигсбергского университета (нем. *Johann Emil Wiechert*, 26.12.1861—12.03.1928 of Königsberg). В конце обстоятельной лекции, прочитанной 7 января 1897 г. перед *Physikalisch-ökonomische Gesellschaft* и озаглавленной «О природе электричества» (нем. *Ueber das Wesen der Elektrizität*), он обратился к «экспериментальным фактам о природе катодных лучей» [22]. Из собственных исследований отклонения катодных лучей в магнитном поле он пришел к следующему выводу: «Если предположить, что катодные лучи состоят из материальных частиц (масса m), несущих отрицательный электрический заряд e (полученный из деления электролитических констант F на примерно известное число Авогадро N), то отношение m/e находится между $1/4000$ и $1/400$ отношения, наблюдаемого для легчайшего иона, или: «Верхний предел без сомнения показывает, что катодные лучи не могут представлять обычные химические атомы» [23]. Нужно заметить, что исследования Вихерта по катодным лучам занимали небольшую область в его научных интересах, в основном он занимался сейсмологией и наиболее известен как разработчик сейсмографов.

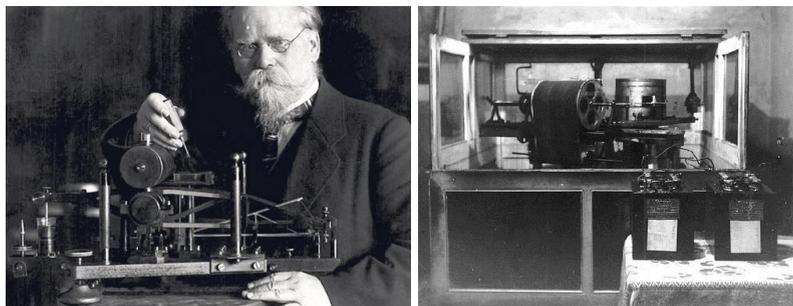


Рис. 13. Эмиль Вихерт и сейсмограф его конструкции.

Fig. 13. Emil Wiechert and the seismograph of his design

Ряд физиков с утверждениями Томсона не соглашались. Предположение, что атомы могут состоять из корпускул, воспринималось с трудом, так как эксперименты Томсона не были достаточно убедительными. Томсон позже писал об этих событиях: «Сначала было очень мало тех, кто верил в существование этих тел, меньших, чем атомы. Много лет спустя один выдающийся физик, присутствовавший на моей лекции, даже сказал мне, что, по его мнению, я “дурачил их”. Я не удивился этому, так как сам пришел к такому объяснению своих экспериментов с большой неохотой, и только после того, как убедился, что эксперимент не оставляет сомнений, я опубликовал свою веру в существование тел меньших, чем атомы» [18, с. 325].

Постепенно ученые приняли первые две гипотезы: 1. Катодные лучи — это заряженные частицы (корпускулы). 2. Корпускулы — это составные части атома. Более поздние эксперименты показали, что третья гипотеза (Корпускулы — единственные составляющие атома) неверна, благодаря усилиям Эрнеста Резерфорда и последующих исследователей.

Основная причина, по которой результаты эксперимента с m/e быстро стали весомыми, заключалась в том, что эти ученые также поддерживали альтернативное предложение Фицджеральда об электронах¹⁰. В его представлении катодные лучи были «электронами», независимыми от вещества. Работа Томсона быстро получила широкое признание, особенно после его экспериментов 1899 г., которые показали, что заряд равен единице электролитического заряда [24]. Лоренц, чья теория электронов была похожа на теорию Лармора и оказала гораздо большее влияние на сторонников волновой теории, ухватился за электронную интерпретацию и включил ее в свою теорию. Более того, «свободный электрон» был своего рода структурой в эфире. Следовательно, это предположение было приемлемо даже для сторонников эфирного взгляда на катодные лучи.

Фундаментальные экспериментальные исследования по газовому разряду Томсон изложил в трех статьях, когда ему было около 40 лет. Его первая статья была опубликована журнале *Philosophical Magazine* в 1897 г. [16], вторая — «О заряде, переносимом ионами, образующимися рентгеновскими лучами» (англ. *On the Charge carried by the Ions produced by Röntgen Rays*) [25], появилась в декабре 1898 г. и третья — «О массах ионов в газах при низких давлениях» (англ. *On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures*) вышла в декабре 1899 г. [26]. На последних пяти страницах этой статьи 1899 г. был представлен новый взгляд на ионизацию и электропроводность в газах. Эти пять страниц стали кульминацией усилий Томсона по обоснованию существования электрона.

Последующие два года, 1897—1899 гг., Дж. Дж. Томсон исследовал фотоэффект по экспериментальной методике, подобной той, что он пользовался при исследовании свойств катодных лучей. В результате он показал, что ток между двумя противоположно заряженными пластинами при освещении катода ультрафиолетовыми лучами есть поток отрицательно заряженных частиц. В работе по проведенным исследованиям, опубликованной в 1899 г., он отмечает, что электрический ток от угольной нити накала в вакуумной лампе тоже переносится отрицательно заряженными

¹⁰ Ирландский физик Джордж Стоней (George Johnstone Stoney, (15.02.1826—05.07. 1911) в 1891 г. в одной из своих теоретических работ предложил термин «электрон» для обозначения электрического заряда одновалентного иона при электролизе [25].

частицами (электронами) [27]. Исходя из этого, эффект Эдисона представляет собой движение электронов от отрицательно заряженной нити накала к положительно заряженному дополнительному холодному электроду. А это и есть не что иное, как электрический ток в вакууме.

Томсон указал на экспериментальное явление, в котором с неизвестной отрицательной частицей катодных лучей можно проводить ее идентификацию, влиять на нее и экспериментировать. Это наглядно было показано в его эксперименте по отклонению катодных лучей в магнитном и электрических полях при определении m/e , что позволило с пониманием сущности явления провести измерения. Дж. Дж. Томсон определил только соотношение массы и заряда m/e неизвестной отрицательной частицы катодных лучей. По полученным экспериментальным данным она была намного меньше любого атома. Только через 12 лет, в 1911 г. эта частица под названием электрон была исследована более точно (был измерена минимальный электрический заряд, который может нести эта частица). Благодаря эксперименту m/e электронная теория превратилась из абстрактной математической гипотезы в эмпирическую реальность.

В 1906 г. Дж. Дж. Томсон получил Нобелевскую премию по физике «в знак признания его выдающихся заслуг в области теоретических и экспериментальных исследований проводимости электричества в газах». На церемонии презентации лауреата Дж. П. Класон, член Шведской королевской академии наук, поздравил Томсона с тем, что он «дал миру несколько главных трудов, позволяющих натурфилософу нашего времени предпринять новые исследования в новых направлениях».

9. Экспериментальные исследования О. У. Ричардсона

В 1900 г. выпускник Тринити-колледжа (*Trinity College*) при Кембриджском университете Оуэн Уилланс Ричардсон (*Sir Owen Willans Richardson*, 26.04.1879—15.02.1959, рис. 14) стал сотрудником Кавендишской лаборатории. Во время учебы в университете он занимался в этой лаборатории под руководством Дж. Дж. Томсона вместе с другими студентами, в числе которых были Эрнест Резерфорд, Чарлз Т. Р. Вильсон (*Charles Thomson Rees Wilson*), Гарольд А. Вильсон (*Harold A. Wilson*) и Поль Ланжевен.

Первая научная работа Ричардсона [28] в качестве студента-исследователя была посвящена поиску физических эффектов в рамках новой гипотезы Томсона об излучении металлической проволокой, нагреваемой переменным током. Эта гипотеза Томсона об электрических токах, переносимых корпускулами, заключалась в том, что, поскольку в проводе,

несущем переменный ток высокой частоты, движущиеся частицы будут ограничены лишь очень тонким слоем у поверхности, было бы разумно ожидать, что проволока испускает какое-то излучение, либо в форме ионов или частиц, либо в виде рентгеновского излучения, возникающего, когда быстро колеблющиеся частицы сталкиваются с атомами в проводе. В начале Ричардсон попытался обнаружить такое излучение с помощью фотографической пластинки, которая показывала темную линию при приближении к проводу, однако, это оказался световой разряд вокруг провода. После этого он применил чувствительный электрометр для поиска ионизации в газе возле провода в диапазоне давлений от одной атмосферы до 0,01 мм рт. ст. Все результаты экспериментов с более тонкими проволоками из разных металлов оказались отрицательными.

Сделав соответствующие выводы, Ричардсон в следующей своей экспериментальной работе в качестве отправной точки взял исследования температурной зависимости тока насыщения от температуры нагретой металлической проволоки немецких физиков Ю. Эльстера и Г. Гейтеля, а также его знакомого по лаборатории Джона Миклелленда (*John Alexander McClelland*, 01.12.1870—13.04.1920). Миклелленд показал, что при высоких температурах платиновая проволока испускает отрицательное электричество, и что объем выбросов увеличивается с повышением температуры [29].

Ричардсон решил сосредоточиться на эффекте при очень низких давлениях, когда влияние окружающего газа можно было считать незначительным, и исследовать температурную зависимость тока насыщения от нагретой проволоки, т. е. количества электронов, испускаемых в единицу времени. Устройство, которое он сконструировал для этого исследования (рис. 14б [30]), было модифицированной версией того, что он использовал в своей более ранней работе (рис. 14а [28]). Вторая экспериментальная работа Ричардсона в отношении оборудования и экспериментальной техники для исследования теплового излучения корпускул была тесно связана с его неудачной попыткой обнаружить излучение переменного тока.

В экспериментах Ричардсон исследовал электропроводность пространства, окружающего горячую поверхность платиновых проволок. При обработке экспериментальных данных оказалось, что ток эмиссии от нагретой платиновой проволоки экспоненциально зависит от ее температуры. При этом вид аппроксимирующей функции очень похож на уравнение Аррениуса, описывающее зависимость скорости реакции v от температуры T :

$$v = v_0 e^{-E_a/RT}, \quad (9)$$

где T — температура реакции в градусах Кельвина ($^{\circ}K$), E_a — энергия активации, v_0 — скорость, которую имела бы реакция при нулевой энергии активации, R — универсальная газовая постоянная.

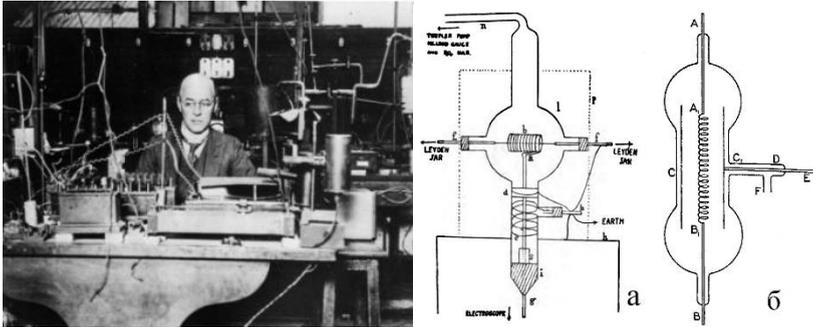


Рис. 14. Сэр Оуэн Уилланс Ричардсон в Кавендишской лаборатории. Устройства в экспериментах Ричардсона: а — для поиска излучения от проволоки при переменном токе (1901 г.) [28], б — для определения плотности тока при термоэлектронной эмиссии (1903 г.) [30].

Fig. 14. Sir Owen Willans Richardson at the Cavendish Laboratory. Devices in Richardson's experiments: а – to search for radiation from a wire at alternating current (1901) [28], б – to determine the current density during thermionic emission (1903) [30]

Опираясь на проведенные исследования, Ричардсон высказал гипотезу о том, что корпускулы внутри нагретого проводника, достигнув поверхности, могут покинуть его, если их кинетическая энергия достаточно велика, чтобы преодолеть силы, удерживающие их в материале. Иначе говоря, электронный газ может испаряться с горячей поверхности. Ричардсон сформулировал эмпирический закон¹¹, исходя из распределения скорости электронов Максвелла — Больцмана для плотности эмиссионного тока насыщения j_s , который можно измерить при достаточно высоком потенциале анода относительно горячего катода (в его экспериментах это 120 В) [30]:

$$j_s = AT^{1/2}e^{-b/T}, \quad (10)$$

где j_s — плотность тока эмиссии в амперах на единицу поверхности катода (A/cm^2), T — температура катода в $^{\circ}K$, A и b — постоянные, зависящие от материала катода.

Формула (10) стала известна как закон Ричардсона: «Если отрицательное излучение возникает из-за корпускул, выходящих из металла, то ток насыщения s должен подчиняться закону». Закон Ричардсона связыва-

¹¹ В 1928 году Ричардсону была присуждена Нобелевская премия по физике «за работы по термионным исследованиям, и особенно за открытие закона, носящего его имя».

ет скорость испускания электронов с химическим составом нити и температурой ее поверхности. По этой формуле можно определить величину плотности тока j_s термоэлектронной эмиссии (тока насыщения).

Предварительный отчет о некоторых экспериментах с платиной был представлен Ричардсоном в Кембриджском философском обществе 25 ноября 1901 г., после чего последовала публикация в трудах этого общества [30]. Ричардсон провел исследования [28] и [30] в возрасте 22 лет, будучи студентом Тринити-колледжа.

Эксперименты, проведенные в последующие 12 лет, а также полученные позже с пластичной формой вольфрама, полностью подтвердили закон Ричардсона [31]. Этот закон утверждает, что скорость испускания электронов быстро возрастает с увеличением температуры поверхности. В 1928 г. Ричардсону была присуждена Нобелевская премия по физике «за работы по термионным¹² исследованиям, и особенно за открытие закона, носящего его имя».

Нужно отметить, что в 1923 г. американский ученый С. Дэшмен (*Saul Dushman*, 07.12.1883—07.07.1954) опубликовал новую формулу для термоэлектронной эмиссии на основе квантовой теории, в то время как Ричардсон получил формулу (10) на основе классической электронной теории металлов. Формула была получена Дэшменом из рассмотрения электронного испарения из металла как термодинамически эквивалентного испарению одноатомного газа [32].

$$j_s = A_1 T^2 e^{-b/T}, \quad (11)$$

где $A_1 = 60,2$.

Формула Дашмена, как видно из (11), отличается от (10) только значением коэффициента A и степенью температуры.

Проведенные эксперименты показали, что значения плотности тока эмиссии, получаемые на основании формул *Ричардсона* и *Дэшмена*, значительно расходятся для низких температур, давая более совпадающие результаты в рабочем интервале температур катода. Для практических подсчетов русским ученым радиотехником В. И. Волынкиным была предложена упрощенная формула [33]:

$$j_s = A_0 10^{-a/T}, \quad (12)$$

где коэффициенты A_0 и a определяются из эксперимента.

¹² В 1909 году Ричардсон предложил новый термин термионика (учение о термоэлектронных процессах) для обозначения эффекта испускания электрических зарядов раскаленными телами.

В рабочем интервале температур формула Волинкина (12) дает весьма удовлетворительные совпадения с результатами, полученными по формулам (10) и (11). Эти формулы могут быть использованы в некоторых случаях для расчета термоэмиссии у торированных и оксидированных катодов. В этом случае константы, входящие в эти формулы, должны быть найдены из экспериментов с соответствующими катодами.

В литературе формулу (11), обычно, называют формулой Ричардсона — Дэшмена. Ричардсон доказал, что электронная эмиссия при повышенной температуре свойственна всем проводникам и не связана с наличием газа внутри лампы [34]. Это окончательно опровергло утверждения, что термоэлектронная эмиссия есть результат особой реакции между газом в баллоне и материалом катода.

10. Заключение

Эксперименты с катодными лучами привели Томсона к мысли, что эти лучи состоят из легких частиц с отрицательным электрическим зарядом, так называемых корпускул. Это, пожалуй, один из главных результатов его экспериментов по выяснению природы катодных лучей.

К 1900 г. спор о катодных лучах практически прекратился. К этому времени стало ясно, что Дж. Дж. Томсон был прав и что частицы катодных лучей являются неотъемлемой частью атомной структуры, а слово «электрон» неразрывно связано с этими частицами. Термин «корпускула» Томсона был забыт, но он придал «электрону» важную значимость, поскольку он был элементарной частицей, первой из обнаруженных и фундаментальным составным элементом атомов.

Из результатов научных исследований, проведенных Дж. Дж. Томсоном, наиболее важными для радиоэлектроники явились следующие. Прояснение природы эффекта Эдисона и установление зависимости стабильности электрического тока в катодной трубке от степени разреженности в ней вакуума. Если бы на этот последний результат обратили внимание разработчики электронных ламп, то возможно «жесткие» радиолампы появились бы гораздо раньше, а не через 15 лет после работ Дж. Дж. Томсона.

Термоэлектронная эмиссия изучалась различными исследователями в последнее десятилетие XIX в., но Ричардсон впервые опубликовал в 1901 г. количественную интерпретацию этого явления как выделения газа свободных частиц, присутствующих в любом проводящем материале. Исследования О. У. Ричардсона позволили отойти от прямого копирования нитей накала обычных электрических ламп и использования их в радиолампах. Английский физик показал, что нити накаливания радиоламп требуют несколько иного подхода при их конструировании, нежели обычные осветительные.

Список литературы

1. Perrin J. Nouvelles propriétés des rayons cathodiques // Notes aux comptes-rendus de l'Académie des Sciences. 1895. V. 121. P. 1130–1134.
2. Jean Perrin (ab). URL: https://www.wikiwand.com/fr/Jean_Perrin (11.10.2020).
3. Perrin Jean. New experiments on the kathode rays // Nature. January 30, 1896. Vol. 53. P. 298–299.
4. Schuster A. The Bakerian Lecture : Experiments on the Discharge of Electricity through Gases. Sketch of a Theory // Proceedings of the Royal Society of London. 1884. Vol. 37. P. 317–339.
5. Schuster A. Bakerian Lecture: The Discharge of Electricity through Gases. (Preliminary Communication) // Proceedings of the Royal Society of London. 1889. Vol. 47. P. 526–561.
6. Pippard Brian, J. J. Thomson and the Discovery of the Electron // Europhysics News. 1997. Vol. 28, no. 2. P. 42–43.
7. Thomson J. J. On the Velocity of the Cathode-Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1894. Vol. 38, no. 233. P. 358–365.
8. Thomson J. J. and Rutherford E. On the Passage of Electricity through Gases exposed to Röntgen Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. November 1896. Vol. 42. P. 392–407.
9. Thomson J. J. On the Cathode Rays // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1897. Vol. 9. P. 243–244.
10. Dean K. Discovery : 200 Years of the Cambridge Philosophical Society.
URL: <https://specialcollections-blog.lib.cam.ac.uk/?p=17330> (30.10.2020).
11. Thomson J. J. On the kathode rays // Nature. March 11, 1897. Vol. 55. No. 1428. P. 453.
12. Thomson J. J. Cathode Rays // Proceedings of the Royal Institution of Great Britain. April 30, 1897. Vol. 15. P. 419–432.
13. Larmor J. A. Dynamical Theory of the Electric and Luminiferous Medium // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. 1894. Vol. 185. P. 719–822.
14. Thomson J. J. Cathode Rays // The Electrician. May 21, 1897. Vol. 39. P. 104–109.
15. Editorial. The Electrician July 2, 1897. Vol. 39. P. 299.
16. Thomson J. J. Cathode Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1897. Vol. 44. P. 293–316.
17. De la Rue W., Muller H. W. Experimental Researches on the Electric Discharge with the Chloride of Silver Battery. Part IV Tube-potential // Proceedings of the Royal Society of London. 1883. Vol. 35. P. 477–517.
18. Thomson J. J. Recollections and Reflections. London : G. Bell and Sons, Ltd., 1936. 595 p.
19. Kennelly A. E. Magnetic units and other subjects that might occupy attention at the next international electrical congress. In : 20th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, Niagara Falls, N. Y., July 2, 1903. P. 529–536.
20. Falconer I. J. J. Thomson and the discovery of the electron // Physics Education. 1999. Vol. 32. P. 226–231.
21. Smith G. E. J. J. Thomson and The Electron : 1897–1899. An Introduction // The chemical educator. 1997. Vol. 2, no. 6. P. 1–42.
22. Wiechert E. Ueber das Wesen der Elektrizität // Schriften der Physikalisch-Ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg. 1897. Vol. 38. P. 3–12.
23. Wiechert E. Experimentelles über die Kathodenstrahlen // Schriften der Physikalisch-Ökonomischen Gesellschaft zu Königsberg. 1897. Vol. 38. P. 12–16.
24. Ray T. P. Stoney's Fundamental Units Show affiliations // Irish Astronomical Journal. 1891. Vol. 15. P. 152.

25. Thomson J. J. On the Charge carried by the Ions produced by Röntgen Rays // *Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5.* 1898. Vol. 46. P. 528–545.
26. Thomson J. J. On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures // *Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5.* December 1899. Vol. 48. No. 295. P. 547–567.
27. Kamble V. B. Thomson J. J. The Discovery of the Electron.
URL: <https://vignyanprasar.gov.in/thomson-j-j/> (24.10.2020).
28. Richardson O. W. On an Attempt to Detect Radiation from the Surface of Wires Carrying Alternating Currents of High Frequency // *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* October 29, 1900 – May 19, 1902. 1901. Vol. 11. Part 3. P. 168–178.
29. McClelland J. A. On the Conductivity of Gases from an Arc and from Incandescent Metals // *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* October 31, 1898 – May 21, 1900. Vol. 10. P. 241–257.
30. Richardson O. W. On the Negative Radiation from Hot Platinum // *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.* October 29, 1900 – May 19, 1902. 1901. Vol. 11. Part 4. P. 286–295.
31. Richardson O. W. The Electrical Conductivity imparted to a Vacuum by Hot Conductors // *Proceedings of the Royal Society of London.* January 1, 1902. Vol. 71. P.415–418.
32. Dushman S. Electron Emission from Metals as a Function of Temperature // *Physical Review.* June 1923. Vol. 21. P. 623–636.
33. Вольткин В. И. Эмпирическая зависимость электронной эмиссии от температуры // *Телеграфия и телефония без проводов.* 1927. № 44. С. 495—508.
34. Richardson O. W. The Emission of Electrons from Tungsten at High Temperatures : An Experimental Proof That the Electric Current In Metals Is Carried By Electrons // *Science.* July 11, 1913. Vol. 38 (967). P.57–61.

Информация об авторе

Пестриков Виктор Михайлович, д.т.н., профессор Санкт-Петербургского государственного института кино и телевидения, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация. ORCID 0000-0003-0466-881X.

Information about the authors

Viktor M. Pestrikov, Dr.Tech.Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation.