

УДК 621.37-621.39(091)

Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп

Пестриков В. М.

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

Получено: 27 июля 2022 г.

Отрецензировано: 30 июля 2022 г.

Принято к публикации: 30 июля 2022 г.

Аннотация: В статье основное внимание уделено работам Гарольда Вильсона, Роберта Милликена и его учеников, в частности, Луиса Беджемена и Харви Флетчера по определению величины элементарного электрического заряда. Обращено внимание на приоритет авторства в публикациях Р. Милликена и Х. Флетчера по результатам проведенных совместных исследований. Отмечена полемика вокруг результатов экспериментов Милликена по определению электрического заряда электрона. Описана ситуация с рекомендацией Р. Миллиkenом своего ученика Гарольда де Фореста Арнольда в исследовательскую группу WECso для разработки телефонного электронного ретранслятора.

Ключевые слова: электрон, заряд электрона, Гарольда Вильсона, Роберт Милликен, Луис Беджемен, Харви Флетчер, Гарольд де Форест Арнольд.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 4. С. 587—610.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Пестриков, В. М. Роберт Милликен и его роль в рождении современных радиоламп / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 4. — С. 587—610.

1. Введение

В 1897 году британский экспериментатор Дж. Дж. Томсон открыл электрон и определил отношение его заряда e к массе m (e/m). Этот факт помог открытию электронного века. Отношение e/m электрона было связано с рядом других важных величин, представляющих интерес для ученых. Без знания заряда e и массы m электрона можно было получить только

набор относительных значений. Измерение заряда e электрона казалось невозможным. На рубеже 19 и 20 веков сам Дж. Дж. Томсон ($e = 6,5 \times 10^{-10}$ ед. CGSE, декабрь 1898), будучи руководителем Кавендишской лаборатории, а также другие ее сотрудники, пытались различными косвенными методами произвести измерения e , но результаты были неубедительны. Более того, пока не появился относительно прямой способ измерения заряда электрона, не было уверенности, что электрон действительно является «атомом электричества». Только через 13 лет требуемый метод был разработан американским физиком Робертом Миллиkenом (англ. *Robert Andrews Millikan*, 22.03.1868—19.12.1953). Его метод основывался на наблюдении за поведением капель масла в электрически заряженном поле.

Роберт Милликен придавал важное значение контактам университетской и промышленной науки. Сотрудничество Милликена с *West Electric Co.* в качестве консультанта по научным исследованиям оказало существенное влияние на рождение современных радиоламп. Это выразилось не только в фундаментальных исследованиях заряда электрона Миллиkenом, но и привлечении его учеников к научно-техническим разработкам в новой области знаний — радиоэлектронике.

2. Эксперимент Г. Вильсона

В 1903 году Гарольд Альберт Вильсон¹ (*Harold Albert Wilson*, 01.12.1874—1964), аспирант Дж. Дж. Томсона, следуя своему руководителю, провел исследование влияния электрического поля на заряженное облако водяных паров при воздействии рентгеновских лучей. Г. Вильсон усовершенствовал метод Дж. Дж. Томсона. Отличием работы Вильсона явилось определение скорости падения капли с учетом влияния на нее электрического поля. Это устранило необходимость измерения проводимости, создаваемой рентгеновскими лучами, а также сделало эксперимент независимым от точного расширения, используемого для получения капли. Эксперимент становится гораздо более аккуратным и самодостаточным. Ему нужно было просто измерить скорость падения капли с электрическим полем и без него. По словам Г. Вильсона, предложение использовать электрическое поле исходило первоначально от профессора Оксфордского университета Джона Таунсенда² (англ. *Sir John Sealy Edward Townsend*, (07.06.1868—16.02.1957) [1].

¹ Г. А. Вильсон не имеет никакого отношения к изобретателю туманной камеры Чарлзу Томсону Ризу Вильсону (англ. *Charles Thomson Rees Wilson*, 14.02.1869—15.11.1959).

² В 1897 г. Таунсенд разработал метод падающей капли для первого прямого определения элементарного ионного заряда e [2]. Его процедура, в которой использовались насыщенные пары воды, позже была усовершенствована и в конечном итоге привела к высокоточному методу капель масла, разработанному Робертом А. Миллиkenом из США.

До исследований Г. Вильсона [3] рядом ученых была определена величина заряда одного иона e , однако, полученные результаты различались между собой. Таунсенд в статье [4] описал определение среднего заряда капель, составляющих облако, которое образуется при пропускании свежеприготовленного кислорода через воду. Было обнаружено, что этот заряд составляет около 3×10^{-10} ед. CGSE. Дж. Дж. Томсон в работах [5, 6] дал две оценки e , первая из которых основывалась на определении среднего заряда капель облака, образованного конденсацией водяного пара на ионах, образующихся в воздухе рентгеновскими лучами, а второе — аналогичным определением ионов, испускаемых цинковой пластинкой под действием ультрафиолетового света. Средний результат первого исследования составил $e = 6,5 \times 10^{-10}$ ед. CGSE [5], а второго $e = 6,8 \times 10^{-10}$ ед. CGSE [6]. В более ранних опытах Дж. Дж. Томсона [5, 6] облако формировалось в основном из отрицательных ионов, а не из положительных и отрицательных ионов, как предполагалось в то время, поэтому полученный им результат был почти в два раза больше, чем в работе [4].

Абсолютная величина e сама по себе представляет значительный интерес, так как из ее значения можно сразу определить число молекул в кубическом сантиметре газа. Этот факт указал на целесообразность проведения Г. Вильсоном нового экспериментального исследования для определения e другим методом, с целью уточнения величины заряда одного иона e , создаваемого рентгеновскими лучами.

Методика эксперимента была такой, как и у Дж. Дж. Томсона: основанная на факте, открытом Чарльзом Вильсоном, что ионы, образующиеся в воздухе под действием рентгеновских лучей, действуют как ядра при туманной конденсации водяного пара, когда в результате внезапного расширения происходит перенасыщение, превышающее определенную величину. Г. Вильсон предположил, что каждая из капель образовавшегося облака содержит один или несколько ионов. В этом случае капля, содержит один ион и, следовательно, имеет заряд e и массу m , которую можно определить, наблюдая за скоростью ее падения (скажем, v_1) в воздухе. Если теперь к этой капле приложить вертикальное электростатическое поле напряженностью X , то за счет поля на каплю будет действовать вертикальная сила, равная Xe , так что суммарная сила, действующая на каплю, будет равна $Xe + mg$, где g — ускорение свободного падения. Сила Xe считается положительной, когда ее направление совпадает с направлением силы веса mg . Теперь скорость установившегося движения капли в виде шара в вязкой жидкости пропорциональна действующей на него силе, так что скорость падения капли будет изменяться под действием электриче-

ского поля. Если скорость капли будет v_2 , то в этом случае можно записать следующее соотношение:

$$\frac{mg}{mg+Xe} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (1)$$

Связь между m и v_1 определяется выражением [6, р. 561]:

$$m = 3,1 \times 10^{-9} \times v_1^{3/2}. \quad (2)$$

Тогда, подставляя (2) в (1), получим

$$e = 3,1 \times 10^{-9} \frac{g}{X} (v_2 - v_1) v_1^{1/2}. \quad (3)$$

Таким образом, если X известно и произведены измерения v_1 и v_2 , то подставив эти величины в (1) определим e .

Было обнаружено, что при использовании сильных рентгеновских лучей некоторые капли в облаке имели больший заряд, чем другие. На самом деле иногда оказывалось несколько наборов капель с зарядами, близкими к отношению 1:2:3. Таким образом, оказалось, что часть капель содержала один ион, часть — два иона и т. д. Это согласуется с наблюдением Дж. Дж. Томсона, что, когда сила рентгеновских лучей превышает определенную величину, то количество капель в облаках не увеличивается пропорционально количеству ионов, присутствующих в момент расширения. Поэтому Дж. Дж. Томсона использовал слабые лучи, так что в его экспериментах каждая капля, вероятно, содержала только один ион, что является необходимым условием успеха применяемого метода.

Принципиальные преимущества метода Г. Вильсона состояли в том, что не было необходимости оценивать ни количество капель в облаке, ни количество ионов, присутствующих в момент его образования, ни делать предположение, что каждая капля содержит только один ион. Обе эти оценки включают предположения, которые на практике могут быть верны лишь приблизительно, и всегда существует опасность того, что некоторые капли в облаке содержат более одного иона. Устройство аппарата, использовавшегося в эксперименте показано на рис. 1 [3].

В экспериментах всегда использовалось расширение от 16 до 17 см ртути, и все результаты относились к заряду отрицательных ионов. Все капли не всегда падали с одинаковой скоростью при приложении электрического поля. Так было почти всегда, но особенно это было заметно, когда использовались сильные лучи. Скорость падения самого многочисленного набора указывала на то, что капли в нем имели наименьшие заряды. Приведенные ниже наблюдения относятся только к этому набору. Поскольку облако

начинало испаряться вскоре после его образования, то очень важно было как можно быстрее измерить скорость его падения. Поэтому в эксперименте обычно допускалось падение облака только примерно на 0,5 см, а после этого прикладывалось электрическое поле в направлении, которое увеличивало скорость падения. Еще одна причина, по которой необходимо было использовать очень малое расстояние между дисками, заключалась в том, что доступное напряжение составляло всего 2000 вольт, так что если диски не находились близко друг к другу, электрическое поле между ними было недостаточно сильным, чтобы заметно изменить скорость их падения.

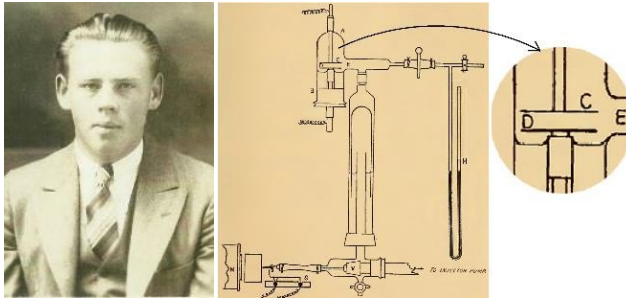


Рис. 1. Гарольд Альберт Вильсон и схема его установки для определения величины элементарного электрического заряда [3] (1903 г.). На схеме: C и D обкладки плоского конденсатора.

Fig. 1. Harold Albert Wilson and a diagram of its installation for determining the value of an elementary electric charge [3] (1903). In the diagram: C and D plates of a flat capacitor

Г. Вильсон сделал одиннадцать различных измерений и получил одиннадцать различных результатов. Его вычисления были сделаны исходя из усредненного поведения микроскопических капелек конденсата, а не одной капли, табл.1 [3].

Полученный разброс данных впоследствии был объяснен изменением количества ионизированных частиц в облаке водяных паров в зависимости от времени экспозиции рентгеновского излучения, а также расстояния до рентгеновской лампы.

Эксперимент, в котором Г. Вильсон вычислил скорость падения заряженных капель конденсата в электрическом поле между пластинами конденсатора в моменты его присутствия и отсутствия, позволил определить среднюю величину элементарного электрического заряда $e = 3,1 \times 10^{-10}$ ед. CGSE при давлении $p = 17$ см. Полученное значение элементарного заряда оказалось на 35 % меньше, чем ожидалось, от более точного, определенного позже Р. Милликеном (1911). Для того периода времени это было ценное определение величины заряда электрона.

Табл. 1. Данные Г. Вильсона, полученные в ходе эксперимента по определению величины заряда электрона. 1903 г.

Table 1. G. Wilson's data obtained during the experiment by determining the value of the electron charge. 1903

Расстояние между пластинами конденсатора <i>d, cm</i>	<i>X, E.S. units</i>	<i>v₁, cm/sec</i>	<i>v₂, cm/sec</i>	<i>m, gram</i>	<i>e, E.S. units</i>
0,45	13,3	$1,9 \times 10^{-2}$	$2,62 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-12}$	$2,3 \times 10^{-10}$
1,00	$\pm 6,7$	$4,36 \times 10^{-2}$	25×10^{-12}	$2,6 \times 10^{-10}$
0,50	13,3	$4,39 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-2}$	$28,6 \times 10^{-12}$	$4,4 \times 10^{-10}$
0,50	13,3	$2,68 \times 10^{-2}$	$3,41 \times 10^{-2}$	$13,6 \times 10^{-12}$	$2,7 \times 10^{-10}$
0,50	13,3	$3,4 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-2}$	$19,5 \times 10^{-12}$	$3,4 \times 10^{-10}$
0,55	12,1	$3,27 \times 10^{-2}$	$4,11 \times 10^{-2}$	$18,3 \times 10^{-12}$	$3,8 \times 10^{-10}$
0,40	16,7	$1,9 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$8,1 \times 10^{-12}$	$3,8 \times 10^{-10}$
0,40	16,7	$1,93 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-12}$	$3,0 \times 10^{-10}$
0,40	16,7	$1,98 \times 10^{-2}$	$3,34 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-12}$	$3,5 \times 10^{-10}$
0,40	12,5	$1,26 \times 10^{-2}$	$2,00 \times 10^{-2}$	$4,4 \times 10^{-12}$	$2,0 \times 10^{-10}$
0,44	15,2	$1,93 \times 10^{-2}$	$2,72 \times 10^{-2}$	$8,3 \times 10^{-12}$	$2,3 \times 10^{-10}$
				Mean.....	$3,1 \times 10^{-10}$

Г. Вильсону не удалось найти метод, который позволил бы провести все измерения на отдельной капле. После всех этих исследований вопрос о дискретности электрона и его заряде остался нерешенным.

Когда Г. Вильсон написал статью о проведенном исследовании [3], то Дж. Дж. Томсон сообщил ему о том, что недавно он сделал новое определение e своим оригинальным методом, но с использованием усовершенствованного аппарата, и попросил упомянуть полученный им результат в статье. Г. Вильсон очень любезно согласился на то, чтобы привести его в статье. Новое значение Дж. Дж. Томсон $e = 3,8 \times 10^{-10}$ ед. CGSE очень хорошо согласуется со средним результатом экспериментов Г. Вильсона, а именно, $e = 3,1 \times 10^{-10}$ ед. CGSE.

3. Эксперимент Р. Милликена и Л. Беджемена

После двенадцати лет работы (с 1896 г.) в Чикагском университете забеспокоился о своей исследовательской карьере помощник профессора физики Альберта Абрахама Майкельсона (*Albert Abraham Michelson*, 19.12.1852—09.05.1931), ассистент во вновь созданной *Ryerson Laboratory* в Чикагском университете Роберт Милликен, как он позже вспоминал в своей автобиографии [7], рис. 2. Он состоял в должности доцента с зарплатой до \$2000 и был недоволен своими достижениями в области физики. Ему требовался фундаментальный эксперимент, который бы принес оглушительный успех.

Внимание к проблеме определения величины элементарного электрического заряда появилось у Роберта Милликена не случайно. Произошло это еще во время годовичного пребывания в октябре 1895 года в Берлине, где он прослушал цикл лекций Макса Планка (*Max Karl Ernst Ludwig Planck*, 23.04.1858—04.10.1947) о катодных лучах и заинтересовался их природой. Но наибольший интерес вызвала у Роберта Милликена основополагающая статья Дж. Дж. Томсона (1897 г.) по этой проблеме [8]. Эта статья стала отправной точкой в начале исследований Роберта Милликена по определению величины элементарного электрического заряда. Помимо Дж. Дж. Томсона, Бенджамин Франклин был источником вдохновения для Милликена, которому он приписал концептуализацию первой электрической частицы или атома [9].

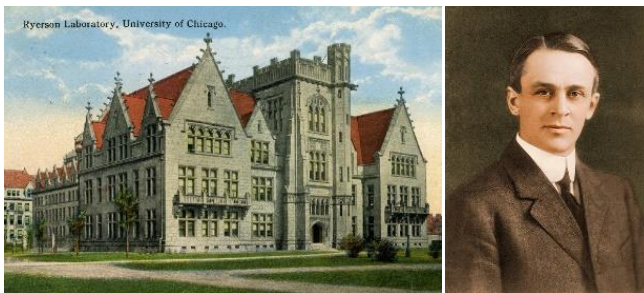


Рис. 2. Лаборатория Ryerson Чикагского университета (1910 г.). Роберт Милликен (1925 г.).
Fig. 2. Ryerson Laboratory, University of Chicago (1910). Robert Millikan (1925)

Решение поставленной задачи происходило в два этапа. На каждом этапе в эксперименте вместе с Р. Милликеном принимали участие его аспиранты, которые писали свои научные диссертации для получения степени доктора философии по физике (*PhD*).

В конце 1907 года Р. Милликен вместе с аспирантом Луисом Беджеменом³ (*Louis Begeman*, 1865—1958) осуществили по методике Г. Вильсона (*Harold Albert Wilson*) эксперимент по определению электрического заряда частиц водяного пара (с учетом модернизации оборудования). Усовершенствованная установка Вильсона имела более высокий потенциал на пластинах конденсатора (3000 В), что позволяло не только замедлить скорость падения облака, но и при желании фактически обратить его вспять. Высокий потенциал, кроме прочего, позволил уменьшить в эксперименте ошибки из-за испарения.

³ После защиты диссертации Луис Беджемен принял должность профессора физики в педагогическом колледже штата Айова (*Iowa State Teachers College*), где проработал до 1957 г. Его жизнь была связана с колледжем в течение почти 58 лет, с учетом того, что он преподавал в нем до аспирантуры с 1899 г.

Во время проведения эксперимента некоторые заряженные капли двигались вверх, некоторые быстро двигались вниз, в то время как незаряженные капли оставались незатронутыми и продолжали дрейфовать вниз. Несколько капель, которые несли заряд определенной величины, и сила тяжести на них почти равнялась силе электрического поля, оставались в поле зрения. Изменяя потенциал пластин от 1600 В до 3000 В, Милликен мог просто уравновесить эти капли. Эта ситуация оказалась значительным улучшением эксперимента, поскольку позволила проводить все измерения на одной капле. Используя этот метод сбалансированных капель, Милликен смог наблюдать свойства отдельных ионов и определить, несут ли разные ионы один и тот же заряд.

Расстояние между пластинами конденсатора в камере Вильсона было установлено фиксированным — 5 мм, а разность потенциалов на конденсаторе колебалась от 1600 до 3000 вольт.

Заряды создавались ионизацией нейтральных молекул воздуха потоком радиоактивного излучения. В качестве ионизатора был использован кусок минерала радия весом 200 г, вместо рентгеновского излучения, которое присутствовало в эксперименте Г. Вильсона. При этом измерялся заряд ионов, захваченных каплями.

В результате проведенного эксперимента после обработки полученных данных средняя величина заряда электрона составила $e = 4,03 \times 10^{-10}$ ед. CGSE.

Летом 1908 года Р. Милликен с Л. Беджеменом продолжили совершенствовать методику проведения эксперимента. Одна из интересных особенностей этого периода заключается в определении заряда отдельно падающих капель водяного облака в условиях воздействия и отсутствия электрического поля. Было проведено 400 пар наблюдений с электрическим полем и без него при расстоянии между пластинами конденсатора в паровой камере 0,575 см и давлении в ней $p = 17$ см. После обработки данных средняя величина заряда электрона составила $e = 4,54 \times 10^{-10}$ ед. CGSE. При этом было отмечено, что скорость падения капель была очень небольшой, в связи с этим возможно полученное значение имеет некоторую погрешность из-за неучета процесса испарения. Другим важным результатом стал факт того, что единица положительного электростатического заряда имеет такую же величину, что и отрицательная.

В первых числах июня 1909 года в *Ryerson Laboratory* была установлена новая более совершенная установка для определения заряда электрона методом облака, которая отличалась по конструкции от ранее применявшейся для этих целей, рис. 3.

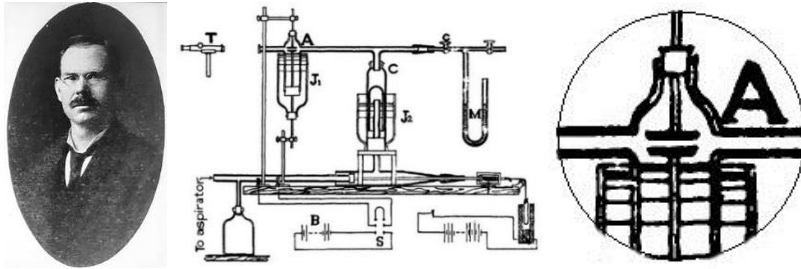


Рис. 3. Луис Беджемен. Схема установки Р. Милликена и Л. Беджемена для определения заряда электрона. 1909 г. [10]. На схеме: А — плоский конденсатор

Fig. 3. Louis Begeman. Scheme of R. Milliken and L. Bedgeman setup for determining the charge of an electron in 1909 [10]. In the diagram: A – flat capacitor

Ученые усовершенствовали методику проведения эксперимента. В процессе исследования было установлено, что существует разница между массовой скоростью облака и скоростью отдельной капли. Милликен быстро понял, что измерение заряда отдельных ионизированных капель гораздо лучше, чем определение среднего заряда капель в облаке. Оказалось, что физическо-химические параметры облака в большей степени зависят от испарения [11, 12]. Все это было в дальнейшем учтено при определении заряда электрона. Расчетная величина элементарного электрического заряда в этом эксперименте получилась $e = 4,668 \times 10^{-10}$ ед. CGSE, что отличается от более точного значения, полученного позже Р. Миллиkenом (1911) всего на 2,29 %. Было также установлено, что заряды водяных капель были кратны наименьшему электрическому заряду, то есть заряду электрона. Однако самым важным аспектом этих экспериментов было наблюдение Милликена того, как поднимающаяся капля внезапно меняет свою скорость. Изменение скорости капли можно было бы легко вызвать, если поместить рядом с ней радиоактивный источник. Это говорило о том, что капля «захватила» ион, и тем самым изменила свой заряд и соответственно скорость.

В июле 1910 года материалы диссертации Л. Беджемена были изданы в виде препринта⁴. Вскоре в Чикагском университете состоялась успешная защита его докторской диссертации на тему «Экспериментальное определение заряда электрона облачным методом» (*An Experimental*

⁴ Препринт (реже *предпубликация*) - научное издание, обычно небольшого объема, которое посвящено какой-либо теме, с которой автор хочет ознакомить заинтересованных лиц и специалистов. Выпускается в свет до публикации статьи в рецензируемом научном журнале или до выхода полноценной монографии. Как правило, препринты не рецензируются перед выходом в свет, поэтому они могут содержать ошибки и поэтому зачастую не учитываются в отчетах в качестве публикаций. Электронный препринт (препринт, размещаемый в Интернете) иногда называют е-принтом.

Determination of the Charge of an Electron by the Cloud Method) и он получил степень доктора философии по физике (*PhD*). Материалы диссертации были также опубликованы в журнале Американского физического общества (*The American Physical Society*) «*Physical Review*» [10]. Л. Беджемену на получение фундаментального результата понадобилось почти 4 года непрерывной кропотливой работы (1907—1910).

4. Эксперимент Р. Милликена и Х. Флетчера

Осенью 1909 года Милликен и Беджемен завершили цикл экспериментальных работ по измерению элементарного электрического заряда (заряда электрона) на основе водяных капель [13]. В этот период времени в аспирантуру Чикагского университета, благодаря поддержке Роберта Милликена, был принят недавний выпускник Университета Бригама Янга⁵ (*Brigham Young University* или *BYU*, город Прово (англ. Provo) в округе Юта, штат Юта, США) Харви Флетчер (*Harvey Fletcher*, 11.09.1884—23.07.1981), рис. 4.

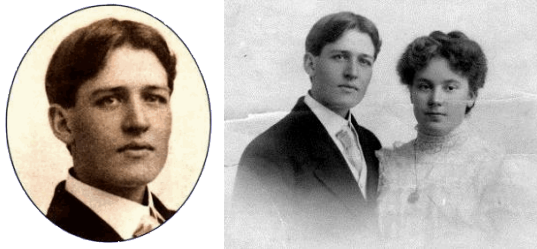


Рис. 4. Харви Флетчер с женой Лореной Чипман вскоре после их свадьбы. Сентябрь 1908 г.

Fig. 4. Harvey Fletcher and wife Lorena Chipman shortly after their wedding. September. 1908

Харви Флетчер был достаточно амбициозным и самолюбивым молодым человеком. В декабре 1909 года ему удалось договориться с Милликеном о встрече, на которой планировал обсудить тему его будущей докторской диссертации (*PhD*). Встреча была назначена в лаборатории, где в это время Милликен с Беджеменом проводили эксперименты по определению заряда электрона. Обсуждение коснулось повышения точности эксперимента по методу облака. Ученые пришли к выводу, что капельный метод имеет один серьезный недостаток, который связан с быстрым испарением водяных капель. Из этого следовало, что для эксперимента следует найти такие вещества, которые испаряются более медленно, чем вода. Милликен поручил Флетчеру разработать методику эксперимента с использованием различных веществ, в частности, ртути, глицерина и масла.

⁵ В настоящее время университет является третьим по величине частным университетом в США.

Распылять вещества в камере было решено пульверизатором. Это устройство использовал в своих исследованиях по броуновскому движению еще в 1908 году Дж. Ли (*J. Y. Lee*), другой аспирант Милликена.

Флетчер нашел оригинальный выход из ситуации. Он пошел в аптекарский магазин, где купил распылитель для духов и немного масла для смазки часов. Пробное распыление масла в камере установки произвело фурор. В микроскоп можно было наблюдать броуновское движение медленно падающих капель масла. Милликен увидев все это воочию, сразу прекратил все работы с водяными каплями и сосредоточился на совершенствовании метода на основе падения масляных капель. При помощи пульверизатора удалось получить капли масла радиусом 1—2 мкм.

Экспериментальная установка представляла собой большой и емкий плоский конденсатор из двух металлических пластин, рис. 5. На верхней пластине располагалась камера, в которой происходило сначала распыление воды, а затем масла. Образовавшиеся капельки жидкости заряжались в ионизированном воздухе одним или несколькими электронами. Капли жидкости электризовались благодаря трению.

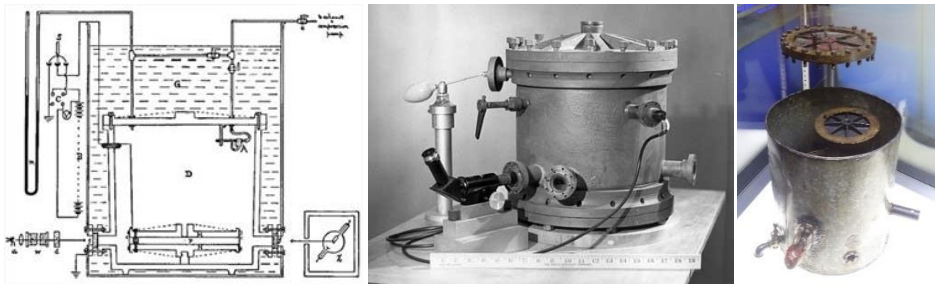


Рис. 5. Схема устройства аппарата Милликена «Капли масла» [14]. Аппарат Милликена «Капли масла», ок. 1916 г., использовался Робертом Милликеном и Харви Флетчером в нескольких экспериментах по измерению заряда электрона.

Музей науки и промышленности (Чикаго).

Fig. 5. Scheme of the apparatus of the Millikan apparatus «Drops of oil» [14]. Millikan's Oil Drop apparatus, ab. 1916, used by Robert Millikan and Harvey Fletcher in several experiments to measure an electron's charge. Museum of Science and Industry (Chicago)

Под действием веса капли через отверстие в пластине конденсатора попадали в пространство между его обкладками, на которые подавалось постоянное напряжение от мощной батареи. Положение капель в пространстве конденсатора определялось с помощью катетометра. Исходя из этого определялась скорость ее движения с одной стороны под действием силы тяжести, а с другой — под действием силы электрического поля. Меняя направление электрического поля, можно было заставить одну и ту

же каплю двигаться вверх или вниз по несколько раз. Это давало возможность определить заряд капли с большой точностью.

В эксперименте при постепенном понижении внешнего напряжения происходило периодическое «выпадение в осадок» капель масла. По градациям шкалы напряжения, при которых осаждается очередная порция аэрозоля, судили об абсолютной величине единичного заряда, поскольку дробного заряда наэлектризованные капельки нести на себе не могут. Повторив эксперимент для нескольких капель, ученые подтвердили, что общий заряд капель складывается из нескольких элементарных. Отсюда следовало, что величина заряда капель будет кратна единичному заряду электрона.

5. Определение величины элементарного электрического заряда

Значение величины элементарного электрического заряда Р. Милликен получил, основываясь на подходе Г. Вильсона [15]. Он также рассмотрел скорость падения капли в электрическом поле, только не водяного пара, а масла. Скорость падения масляной капли массой m в пространстве между обкладками конденсатора зависит от воздействия на нее силы тяжести и силы электрического поля напряженностью E . Если v_1 – скорость капли только от действия силы тяжести, а v_2 – скорость капли, когда, кроме силы тяжести, на нее действует еще и электрическое поле напряженностью E и капля при этом движется в верх. В этом случае можно записать следующее соотношение:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Ee_n - mg}, \quad (4)$$

откуда

$$e_n = \frac{mg}{E} \left(\frac{v_1 + v_2}{v_1} \right). \quad (5)$$

Из (5) видно, что для вычисления электрического заряда масляной капли необходимо из эксперимента определить скорости v_1 и v_2 по вышеописанной методике.

Если считать, что масляная капля представляет собой небольшую сферу радиусом a и падает под действием собственного веса, то установившаяся скорость достигается, когда сила Стокса ($F_C = 6\pi\mu a v_1$) совместно с силой Архимеда ($F_A = \frac{4}{3}\pi a^3 \rho g$) точно уравновешивается силой ее веса ($P = mg = \frac{4}{3}\pi a^3 \sigma g$). Тогда из условия равновесия небольшой масляной капли, находящейся под действием силы тяжести, силы Стокса и силы однородного электрического поля напряженностью E , найдем скорость v_1 :

$$v_1 = \frac{2ga^2}{9\mu}(\sigma - \rho). \quad (6)$$

где σ — плотность масла, ρ — плотность воздуха, μ — коэффициент вязкости воздуха, g — ускорение свободного падения.

Теперь, подставив (6) в (5), после преобразований получим:

$$e_n = \frac{4}{3}\pi \left(\frac{9\mu}{2}\right)^{3/2} \left(\frac{1}{g(\sigma-\rho)}\right)^{1/2} \frac{(v_1+v_2)v_1^{1/2}}{E}. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива только для очень малых масляных капель при их равномерном движении. Эта формула приводится в статье Р. Милликена, из нее он и вычислял величину электрического заряда масляных капель. Одной из особенностей исследования было то, что на каплях находилось неопределенное число электрических зарядов, величины которых невозможно было вычислить. Если для всех вычисленных значений зарядов масляных капель можно найти наибольший общий делитель, то тогда заряд капли можно представить в виде $e_n = n \cdot e$, где $n=1,2,3,\dots$, а e — элементарный электрический заряд. То есть различные капли могут нести на себе заряды, кратные e . В рамках классической электродинамики не существует заряда, выраженного дробным числом элементарных зарядов.

Милликен после обработки экспериментальных данных определил, что заряд на любой капле масла всегда представляет собой целое кратное величины $1,5924(17) \times 10^{-19}$ Кл ($4,7772 \times 10^{-10}$ ед. CGSE), а это и есть заряд 1 электрона. Тем самым был установлен фундаментальный факт, что электрический заряд электрона является дискретным, а также найдена количественная характеристика дискретности. Этим подтверждалось существование электронов.

Милликен показал, что положительные и отрицательные заряды всегда кратны по величине одной и той же единице, то есть заряду электрона. Это представление до сих пор еще не опровергнуто какими-либо опытными данными.

Полученное Милликеном значение электрона в опыте 1910 года на 1 % отличается от современного значения $1,602176487(40) \times 10^{-19}$ Кл. ($e = 4,8 \times 10^{-10}$ ед. CGSE). Заряд электрона обычно принимают за элементарный электрический заряд.

Милликен сразу понял важность сделанного открытия для понимания основ природы электричества. Научное открытие принесло ученым известность. Многие видные ученые приходили в лабораторию понаблюдать за экспериментом. Нанес визит и Чарльз П. Штейнмец (англ. *Charles Proteus Steinmetz*, нем. *Carl August Rudolph Steinmetz*), рис. 6, «чародей» компании

General Electric, который не верил в существование электронов. Он мог объяснить все электрические явления в терминах природы теории эфира. Увидев воочию падение малых капель масла, он покачал головой и сказал: «Я никогда бы не поверил в это. Я никогда не поверил бы», а затем тихо ушел [16].



Рис. 6. Чарльз П. Штейнмец.
1915 г.

Fig. 6. Charles P. Steinmetz.
1915

С той ночи электрон, который до того времени в основном был игрушкой ученых, явно вошел в поле деятельности в качестве мощного средства для удовлетворения коммерческих и промышленных потребностей человека. Электронная лампа-усилитель теперь лежит в основе всей области связи, и это, в свою очередь, по крайней мере отчасти сделало возможным его применение в дюжине других областей. Это был великий день как для науки, так и для промышленности, когда они объединились благодаря разработке лампового электронного усилителя.

6. Публикация научных результатов

Вскоре статьи с описанием проведенного эксперимента Милликена и Флетчера, а также различных его аспектов были подготовлены для публикации в научных журналах. Основная статья о эксперименте с масляными каплями вышла за подписью Милликена [15], последующие две статьи были совместными (Милликен и Флетчер [17, 18]), и три — за подписью одного Флетчера [19—21].

Информация о делении научного материала между учеными и приоритетах ее публикации была изложена в опубликованных мемуарах Флетчера, которые появились через один год после его смерти [16, р. 43—47]. Если верить этим мемуарам, то инициатива в этом вопросе принадлежала Р. Милликену. Сейчас трудно сказать, насколько приведенная в них информация соответствует действительности. Возникает один вопрос, касающийся научной этики: почему он не опубликовал свои мемуары, когда был жив Милликен?

В своих мемуарах Флетчер (рис. 7) написал, что он наивно думал, что будет соавтором Милликена по всем публикациям. Радужные надежды его рассеялись, когда увидел профессора Милликена на крыльце своего дома. В скромной квартире аспиранта профессор расставил все точки над «i» в вопросе научных публикаций.

Хотя Флетчер и был разочарован тем, что его не включили в качестве соавтора в пионерскую работу, он в дальнейшем не испытывал ника-

кой неприязни к профессору Милликену. Милликен не остался в долгу. Он нашел Флетчеру хорошо оплачиваемую работу для покрытия всех его личных и аспирантских расходов в течение последних двух лет. Их крепкая дружба продолжалась на протяжении всей их жизни.



Рис. 7. На фото слева: Флетчер (слева крайний) и Крендалл (слева второй). Середина 30-х годов 20 века. На фото справа: Флетчер в 1936 году с Милликеном (слева от него) и дирижером Филадельфийского оркестра Леопольдом Стоковски, с которым он работал над записывающей аппаратурой [16].

Fig. 7. In the photo on the left: Fletcher (far left) and Krendall (second from left). Mid 1930s. In the photo on the right: Fletcher in 1936 with Millikan (to his left) and conductor of the Philadelphia Orchestra Leopold Stokowski, with whom he worked on recording equipment [16]

Статья Р. Милликена с первыми предварительными результатами, была опубликована в сентябре 1910 в журнале *Science* [22], а полный формат статьи вышел в апреле 1911 года в журнале *Physical Review* [15]. До публикации результатов экспериментов по определению электрического заряда электрона Милликен не был широко известен в ученой среде, но после появления его фундаментальной работы его имя заняло достойное место в когорте выдающихся физиков.



Рис. 8. Австрийский физик Феликс Эренхафт.
Fig. 8. Austrian physicist Felix Ehrenhaft

В тот же период времени, когда вышла статья Милликена в журнале *Science* [22], австрийский физик Феликс Эренхафт (*Felix Ehrenhaft*, 24.04.1879—04.03.1952, рис. 8) опубликовал статью, в которой утверждал о существовании еще меньшего элементарного электрического заряда, чем электрон [23]. Дебаты Эренхафта с Милликеном, не позволили последнему получить Нобелевскую премию по физике 1920 года из-за их нерешенности.

Начавшаяся полемика заставила Милликена вернуться к работе над новой серией эксперимен-

тов. К весне 1912 года он получил данные, которые должны были поставить точку в «окончательном абсолютном определении численного значения электрона» (*the final, absolute determination of the numerical value of the electron*). Результаты были опубликованы в августе 1913 года [14].

Споры в конечном итоге пошли на убыль, так как большая часть физиков верила в непоколебимость результатов Милликена. По этому поводу в конце 1940 г. Эйнштейн писал: «Относительно его результата о элементарном заряде, то я не верю его вычислениям [результатам физика Феликса Эренхафта — *авт.*], но я считаю, что никто не имеет четкого представления о причинах, приведших к очевидным суб-электронным зарядам (*sub-electronic charges*), которые он обнаружил в ходе кропотливого исследования» [24].

В 1923 году за научные исследования, проведенные в первом десятилетии 20 века, а также за проверку эйнштейновской корпускулярной теории света Милликен получил Нобелевскую премию по физике с формулировкой: «за работы по определению элементарного электрического заряда и фотоэлектрическому эффекту». В своей Нобелевской лекции он сказал, что «наука шагает вперед на двух ногах — на теории и эксперименте... Иногда вперед выдвигается одна нога, иногда другая, но неуклонный прогресс достигается лишь тогда, когда шагают обе» [25—26].

Эксперимент Милликена с масляными каплями был повторен в 1939—1940 гг. сотрудниками Университета Мельбурна преподавателем естественной философии (*Natural Philosophy*) В. Д. Хоппером (*V. D. Hopper*, 1913—??) и профессором Томасом Леби (*Thomas H. Laby*, 1880—1946). Это, по всей видимости, был последний случай, когда эксперимент был выполнен «основательно» и тщательно профессиональными физиками, а вся информация об этом нашла отражение в научных журналах [27, 28]. Время наблюдения за каплями в эксперименте было чрезвычайно коротким, так как использовались масла с малым испарением, такие как касторовое и апиезонное масло. Капли из таких масел были способны нести большой заряд. Для эксперимента потребовалось 26 капель с радиусом от 3 до 10 мкм, но распылители давали гораздо большие капли. Обработка данных эксперимента показала, что погрешность в значении e , найденном методом капель, в основном была связана со значением вязкости воздуха. Значение e , полученное рентгеновским методом, оказалось не связанным с этим источником погрешностей.

7. Превратности судеб аспирантов Роберта Милликена

В университете Чикаго в то время, когда под руководством профессора Милликена проводился эксперимент с каплями масла, параллельно

шли другие научные исследования, в частности, связанные с законом Стокса. Занимался этой работой другой его аспирант, по фамилии Гарольд де Форест Арнольд (*Harold De Forest Arnold*, 03.09.1883—10.07.1933).

В начале своей научной карьеры Г. Арнольд был в аспирантуре у физика А. А. Майкельсона (рис. 9), но маститый ученый не уделял должного внимания своему ученику и не интересовался его исследованиями. Молодой Арнольд не смирился с таким положением дел и пришел к Р. Милликену, которому заявил, что собирается покончить жизнь самоубийством, так как он не в состоянии соответствовать предъявляемым требованиям Майкельсона. Роберт Милликен, спросив: «Не шутка ли это?» отнесся к этому серьезно и попросил повременить того с его намерениями.

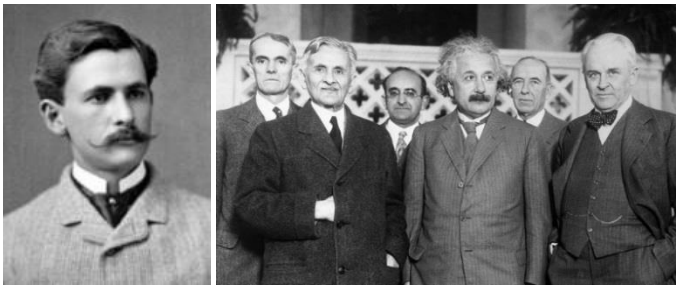


Рис. 9. Альберт Абрахам Майкельсон. Первый ряд слева Альберт А. Майкельсон, Альберт Эйнштейн и Роберт А. Милликен в Калифорнийском технологическом институте (1931 г.).

Fig. 9. Albert Abraham Michelson. First row from the left Albert A. Michelson, Albert Einstein and Robert A. Millikan at Caltech (1931)

После этого Р. Милликен бросился к Майкельсону и попросил его позволить ему взять на себя научное руководство исследованиями Арнольда. Для того, чтобы не обидеть Майкельсона, он спросил его с таким трепетом, что тот вынужден был сказать: «Ради Бога, заведи его с моих рук» [29].

Пионерские исследования в университете Чикаго находились в поле зрения *American Telephone & Telegraph Company* и *Western Electric Company*. В компании формировалось новое научное направление по электронике и разработке экспериментальных конструкций усилителей электрических сигналов. Поскольку никто из сотрудников компании не имел достаточных знаний в области молекулярной физики, то научный менеджер при главном инженере компании *AT&T* Фрэнк Джеббет обратился за помощью к Роберту Милликену с просьбой порекомендовать ему одного из лучших своих студентов с соответствующей квалификацией.

В начале Милликен рекомендовал доктора Флетчера, который первым убедительно продемонстрировал существование электрона, измерив его квантованный заряд, работая над докторской диссертацией. В 1911 году

Флетчеру после защиты диссертации была присуждена ученая степень доктора философии (*PhD*) в Чикагском университете. В том же году он получил предложение о работе от *Western Electric Company*, но, не теряя времени, вместо этого в 1911 году вернулся в город Прово



Рис. 10. Гарольд де Форест Арнольд.

Fig. 10. Harold De Forest Arnold

(*Provo*) и возобновил свою преподавательскую карьеру в университете имени Бригама Янга (*Brigham Young University*). В университете он занял должность заведующего кафедрой физики. Позже Флетчер жалел о своем отказе. В ответ Роберт Милликен порекомендовал своего ученика Гарольда де Фореста Арнольда (*Harold De Forest Arnold*, 03.09.1883—10.07.1933, рис. 10), который недавно получил докторскую степень (*PhD*) по физике в университете Чикаго [30]. Арнольд принял предложение, и в течение трех лет, опираясь на исследования в Чикаго, разработал вакуумную электронную лампу.

Харви Флетчер, узнав об этом, несколько задумчиво сказал: «Это, возможно, было мое изобретение, а не его, если бы я согласился на работу, предложенную тогда» [31].

Флетчер, работая в университете, продолжал интересоваться электронной физикой и той ролью, которую электроника будет играть в человеческом общении. Он понял, что его потенциал не будет полностью реализован в Университете Бригама Янга. Предложение Джейветта Флетчеру присоединиться к *AT&T* возобновлялось в январе каждого года. Таким образом, в 1916 году благодаря этой сильной ежегодной поддержке со стороны Джейветта, Флетчер пришел в *Western Electric Research Laboratories* и работал с Ирвингом Крендаллом⁶ (*Crandall Irving B.*, 1890—1927), который стал его наставником и коллегой по акустике. Среди своих коллег Флетчер был известен как дядя Харви. Это прозвище ему нравилось и доставляло удовольствие его коллегам. Помимо своих профессиональных успехов, у дяди Харви была исключительно хорошо сбалансированная и приносящая удовлетворение личная жизнь. У Флетчера и его жены Лорены Чипман было шестеро детей — пятеро

⁶ Крендалл скончался 22 апреля 1927 г., как раз перед вторым изданием его книги о речи (*Crandall Irving B. Theory Of Vibrating Systems And Sound. New York. Publisher D. Van Nostrand Company. 1926. 296 p.*), и Флетчер взял на себя работу Крендалла по улучшению разборчивости и качества телефонной сети. Упомянутая книга Крендела считается классическим трудом инженерной мысли в области акустики. Перевод этого труда на русском языке издавался неоднократно, в частности, под названием: Крендалл И. Б. Акустика. Пер. с англ. Изд. 5. М.: Изд-во ЛЕНАНД. 2017. 168 с. URL: [https:// soundmain.ru/resources/krendall-i-b-akustika.398/download](https://soundmain.ru/resources/krendall-i-b-akustika.398/download) (27.07.2022).

сыновей⁷ и одна дочь, которые выросли и стали достойными членами общества.

Справедливости ради следует отметить, что именно Милликен организовал для Флетчера переход в *Bell Telephone Laboratories*, где он стал, по словам доктора Джонта Аллена⁸ (*Jont Allen B.*), «исключительной интеллектуальной силой в развитии современных средств связи, акустики и телефонии» [32].

8. Заключение

Эксперимент Милликена с каплей масла, как это обычно бывает в процессе развития науки, был разработан на основе идей и работ ученых, которые предшествовали ему. Каждая модернизация Милликеном экспериментальной техники, каждое усовершенствование его аппарата, каждое написанное им слово, публичное или частное, были направлены только на одну цель: максимально точное измерение заряда электрона.

В науке есть много творческих аспектов, в частности, творчество Милликена относится к области экспериментальных разработок, то есть к созданию новой методики и оборудования для надежного измерения того, что не удалось сделать другим. Милликен был экспериментатором, и поэтому его работа была полностью эмпирической. Его исследования привели к выводу, что замысел всего, от атома до Вселенной, был работой Бога, которого Милликен называл «благодетельным творцом» и «Великим Архитектором» в знак признания Его творческой силы и Его роли в творении [7, p. 274].

Личность Милликена была более сложной, чем признают его недоброжелатели. Как и у любого, у него были свои сильные стороны и свои недостатки. Он был недостаточно великодушен, чтобы ставить интересы своего ученика выше своих собственных в критический момент своей карьеры. Описывая результаты своего эксперимента с каплей масла, он несколько увлекся, доказывая правильность своей эмпирической поправки к закону Стокса.

Настоящим соперником Милликена был не злополучный Эренхафт, а скорее Дж. Дж. Томсон — не потому, что они расходились во мнениях с научной точки зрения, а потому, что оба хотели, чтобы их запомнили в истории как отцов электрона.

⁷ Один из его сыновей, Джеймс Чипман Флетчер, два срока, с 1971 по 1977 год, занимал должность директора Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА), а затем с 1964 по 1971 год был президентом Университета штата Юта.

⁸ Джонта Аллен был сотрудником отдела акустических исследований в *AT&T Laboratories* с 1974 по 1997 год.

Список литературы

1. Thomson G. P. Harold Albert Wilson. 1874–1964. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society. November 1965. Vol. 11. P. 195.
2. Townsend J. S. On electricity in gases and the formation of clouds in charged gases // Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 1897. Vol. 9. P. 244–258.
3. Wilson H. A. A Determination of the Charge on the Ions Produced in air by Rontgen Rays // Philosophical Magazine. Series 6. 1903. Vol. 5. P. 429–441.
4. Townsend J. S. Electrical properties of newly prepared gases // Philosophical Magazine. Series 5. February 1898. Vol. 45. P. 125–151.
5. Thomson J. J. On the Charge carried by the Ions produced by Röntgen Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. December 1898. Vol. 46. No. 283. P. 528–545.
6. 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.
7. Millikan R. A. The autobiography of Robert A. Millikan. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc, 1950. P. 69.
8. Thomson J. J. Cathode Rays // Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5. 1897. Vol. 44. P. 293–316.
9. Millikan R. A. The electron : Its isolation and measurement and the determination of some of its properties. Chicago: University of Chicago Press, 1917. P. 15.
10. Begeman L. An Experimental Determination of the Charge of an Electron by the Cloud Method // Physical Review. Series 1. July 1910. Volume 31, iss. 1. P. 41–54.
11. Millikan R. A., Begeman L. On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas // Physical Review. 1908. Vol. 26, no. 2. P. 197–198.
12. Heering P., Osewold D. Constructing Scientific Understanding Through Contextual Teaching. Frank & Timme GmbH, 2007. P. 345.
13. Millikan R. A. A New Modification of the Cloud Method of Determining the Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of That Charge // Philosophical Magazine. Series 6. February 1910. Vol. 19, no. 110. P. 209–228.
14. Millikan R. A. On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant // Physical Review. August 1913. Vol. II, no. 2. P. 122.
15. Millikan R. A. The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of Its Charge, and the Correction of Stokes's Law // Physical Review. Series 1. April 1911. Vol. 32, no. 4. P. 349–397.
16. Fletcher H. My work with Millikan on the oil-drop experiment // Physics Today. June 1982. P. 46.
17. Millikan R. A., Fletcher H. Causes of Apparent Discrepancies and Recent Work on the Elementary Electrical Charge // Physikalische Zeitschrift. January 1911.
18. Millikan R. A., Fletcher H. On the Question of Valency in Gaseous Ionization // Philosophical Magazine. Series 6. June 1911. Vol. 21, no. 126. P. 753–770.
19. Fletcher H. Some Contributions to the Theory of Brownian Movements, with Experimental Applications // Physikalische Zeitschrift. January 1911.
20. Fletcher H. A Verification of the Theory of Brownian Movements and a Direct Determination of the Value of Ne for Gaseous Ionization // Physical Review. Series I. August 1911. Vol. 32, iss. 2. P. 239.
21. Fletcher H. Vérification de la théorie du mouvement brownien et détermination de la valeur de Ne pour l'ionisation des gaz // Le Radium. 1911. Vol. 8. P. 279–286.
22. The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of It's Charge and the Correction of Stokes' Law (Preliminary Report)// Science. September 30, 1910. Vol. 32, no. 822. P. 436–448.

23. Ehrenhaft F. Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die kleiner zu sein scheinen als die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons und von dessen Vielfachen abweichen. 1910. Wien, Kais. Akad. Wiss. Sitzber. math.-nat. Kl. Vol. 119 (IIa). H. 815—867.
24. Magalhães S. G. A debate on magnetic current : the troubled Einstein–Ehrenhaft correspondence // *The British Journal for the History of Science*. September 2011. Vol. 44, iss. 3. P. 377.
25. Goodstein D. In the Case of Robert Andrews Millikan // *American Scientist*. Jan–Feb 2001. P. 54–60.
26. Милликен Роберт Э. В кн. : Лауреаты Нобелевской премии. Энциклопедия. Том 2. М—Я. М. : Прогресс, 1992. С. 79—82.
27. Laby T. H., Hopper V. D. The Electronic Charge // *Nature*. 1939. Vol. 143, iss. 3613. P. 157—158.
28. Laby T. H., Hopper V. D. The Electronic Charge // *Nature*. 1940. Vol. 145, iss. 3685. P. 932—933.
29. Darrow Karl. Oral History Transcript. URL: <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4567-1> (25.07.2022).
30. Harold De Forest Arnold // *Review of Scientific Instruments*. August 1933. Vol. 4, no. 8. P. 421.
31. Harvey Fletcher 1884—1981. In : *A Biographical Memoir by Stephenh Fletcher*. 1992. National Academy of Sciences Washington. P. 172.
32. Allen J. B. Harvey Fletcher’s role in the creation of communication acoustics // *Acoustical Society of America*. April 1996. Vol. 99, no. 4. Pt. 1. P. 1837.

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.

Robert Millikan and His Role in the Birth of Modern Radio Tubes

V. M. Pestrikov

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

Received: July 27, 2022

Peer-reviewed: July 30, 2022

Accepted: July 30, 2022

Abstract: *The article focuses on the work of Harold Wilson, Robert Millikan and his students, in particular, Louis Begeman and Harvey Fletcher on determining the magnitude of an elementary electric charge. Attention is drawn to the priority of authorship in the publications of R. Millikan and H. Fletcher based on the results of joint research. A controversy was noted around the results of Millikan's experiments to determine the electric charge of an electron. The situation with R. Millikan's recommendation of his student Harold de Forest Arnold to the WECo research group for the development of a telephone electronic repeater is described.*

Keywords: *electron, electron charge, Harold Wilson, Robert Millikan, Louis Begeman, Harvey Fletcher, Harold de Forest Arnold.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov, "Robert Millikan and His Role in the Birth of Modern Radio Tubes," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 4, pp. 587–610, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.4.41. (In Russ.).

References

- [1] "Harold Albert Wilson, 1874–1964," *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, vol. 11, pp. 186–201, Nov. 1965, doi: 10.1098/rsbm.1965.0013.
- [2] J. S. Townsend, "On electricity in gases and the formation of clouds in charged gases," *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 9, pp. 244–258, 1897.
- [3] H. A. Wilson, "XLII. A determination of the charge on the ions produced in air by Röntgen rays," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 5, no. 28, pp. 429–441, Apr. 1903, doi: 10.1080/14786440309462941.
- [4] J. S. Townsend, "XIII. Electrical properties of newly prepared gases," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 45, no. 273, pp. 125–151, Feb. 1898, doi: 10.1080/14786449808621115.
- [5] J. J. Thomson, "LVII. On the charge of electricity carried by the ions produced by Röntgen rays," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 46, no. 283, pp. 528–545, Dec. 1898, doi: 10.1080/14786449808621229.
- [6] J. J. Thomson, "LVIII. On the masses of the ions in gases at low pressures," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 48, no. 295, pp. 547–567, Dec. 1899, doi: 10.1080/14786449908621447.

- [7] R. A. Millikan, *The autobiography of Robert A. Millikan*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc, p. 69, 1950.
- [8] J. J. Thomson, "XL. Cathode Rays," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 44, no. 269, pp. 293–316, Oct. 1897, doi: 10.1080/14786449708621070.
- [9] R. A. Millikan, *The electron: Its isolation and measurement and the determination of some of its properties*. Chicago: University of Chicago Press, p.15, 1917.
- [10] L. Begeman, "An Experimental Determination of the Charge of an Electron by the Cloud Method," *Physical Review (Series I)*, vol. 31, no. 1, pp. 41–54, Jul. 1910, doi: 10.1103/physrevseriesi.31.41.
- [11] R. A. Millikan and L. Begeman, "On the Charge Carried by the Negative Ion of an Ionized Gas," *Physical Review*, vol. 26, no. 2. pp. 197–198, 1908.
- [12] P. Heering and D. Osewold, *Constructing Scientific Understanding Through Contextual Teaching*, Frank & Timme GmbH, p. 345, 2007.
- [13] R. A. Millikan, "XXII. A new modification of the cloud method of determining the elementary electrical charge and the most probable value of that charge," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 19, no. 110, pp. 209–228, Feb. 1910, doi: 10.1080/14786440208636795.
- [14] R. A. Millikan., "On the Elementary Electrical Charge and the Avogadro Constant," *Physical Review*, vol. 2, no. 2, pp. 109–143, Aug. 1913, doi: 10.1103/physrev.2.109.
- [15] R. A. Millikan, "The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of its Charge, and the Correction of Stokes's Law," *Physical Review (Series I)*, vol. 32, no. 4, pp. 349–397, Apr. 1911, doi: 10.1103/physrevseriesi.32.349.
- [16] H. Fletcher, "My work with Millikan on the oil-drop experiment," *Physics Today*, vol. 35, no. 6, pp. 43–47, Jun. 1982, doi: 10.1063/1.2915126.
- [17] R. A. Millikan and H. Fletcher, "Causes of Apparent Discrepancies and Recent Work on the Elementary Electrical Charge," *Physikalische Zeitschrift*, January 1911.
- [18] R. A. Millikan and H. Fletcher, "XC. On the question of valency in gaseous ionization," *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 21, no. 126, pp. 753–770, Jun. 1911, doi: 10.1080/14786440608637092.
- [19] H. Fletcher, "Some Contributions to the Theory of Brownian Movements, with Experimental Applications," *Physikalische Zeitschrift*, January 1911.
- [20] H. Fletcher, "A Verification of the Theory of Brownian Movements and a Direct Determination of the Value of NE For Gaseous Ionization," *Physical Review (Series I)*, vol. 33, no. 2, pp. 81–110, Aug. 1911, doi: 10.1103/physrevseriesi.33.81.
- [21] H. Fletcher, "Vérification de la théorie du mouvement brownien et détermination de la valeur de Ne pour l'ionisation des gaz," *Le Radium*, vol. 8, no. 7, pp. 279–286, 1911, doi: 10.1051/radium:0191100807027901.
- [22] R. A. Millikan, "The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of Its Charge, and the Correction of Stokes's Law," *Science*, vol. 32, no. 822, pp. 436–448, Sep. 1910, doi: 10.1126/science.32.822.436.
- [23] F. Ehrenhaft, *Über die Messung von Elektrizitätsmengen, die kleiner zu sein scheinen als die Ladung des einwertigen Wasserstoffions oder Elektrons und von dessen Vielfachen abweichen*, Kais. Akad. Wiss. Wien, Sitzber. math.-nat. Kl. 119 (IIa), pp. 815–867, 1910.
- [24] G. M. SANTOS, "A debate on magnetic current: the troubled Einstein–Ehrenhaft correspondence," *The British Journal for the History of Science*, vol. 44, no. 3, pp. 371–400, Oct. 2010, doi: 10.1017/s0007087410001299.
- [25] D. Goodstein, "In the Case of Robert Andrews Millikan," *American Scientist*, pp. 54–60, Jan–Feb 2001.

- [26] “Robert Andrews Millikan,” in *Encyclopedia of Nobel Laureates 1901–2017*, by P. T. Rajasekharan, Panther Publishers Pvt. Ltd, 2018.
- [27] T. H. LABY and V. D. HOPPER, “The Electronic Charge,” *Nature*, vol. 143, no. 3613, pp. 157–158, Jan. 1939, doi: 10.1038/143157b0.
- [28] T. H. LABY and V. D. HOPPER, “The Electronic Charge,” *Nature*, vol. 145, no. 3685, pp. 932–933, Jun. 1940, doi: 10.1038/145932a0.
- [29] K. Darrow, *Oral History Transcript*. URL: <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4567-1> (25.07.2022).
- [30] “Harold DeForest Arnold,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 4, no. 8, pp. 421–421, Aug. 1933, doi: 10.1063/1.1749162.
- [31] *Harvey Fletcher 1884–1981*. A Biographical Memoir by Stephenh Fletcher. National Academy of Sciences, Washington, p. 172, 1992.
- [32] J. B. Allen, “Harvey Fletcher’s role in the creation of communication acoustics,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, no. 4, pp. 1825–1839, Apr. 1996, doi: 10.1121/1.415364.

Information about the author

Viktor M. Pestrikov, Dr. Tech. Sc., Professor, St. Petersburg State University of Film and Television, St. Petersburg, Russian Federation. ORCID 0000-0003-0466-881X.