

УДК 621.37-621.39(091)

Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков

Пестриков В. М.

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

Получено: 30 сентября 2020 г.

Отрецензировано: 5 октября 2020 г.

Принято к публикации: 9 октября 2020 г.

Аннотация: *Результаты экспериментальных исследований, полученные учеными в различных научных лабораториях, подтвердили разные версии природы катодных лучей. Кроме того, доказательная важность некоторых из этих результатов была неоднозначной. Неоднозначность результатов исследований катодных лучей, полученных Генрихом Герцем, стала причиной к укреплению ложного взгляда на их природу как на волновой процесс. Эксперименты Ф. Ленарда, ученика Генриха Герца, привели к прояснению корпускулярной природы катодных лучей и открытию электрона. Благодаря этому была разработана трубка Брауна и изобретен выпрямитель Венельта.*

Ключевые слова: *катодные лучи, эксперименты Генриха Герца, трубка Ленарда, окошко Ленарда, катодная трубка Брауна, выпрямитель Венельта.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 227—260.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Развитие катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 227—260.

Development of cathode-ray technologies at the turn of the 19th and 20th centuries

V. M. Pestrikov

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

Received: September 30, 2020

Peer-reviewed: October 5, 2020

Accepted: October 9, 2020

Abstract: *The results of experimental studies obtained by scientists in various scientific laboratories have confirmed different versions of the nature of cathode rays. In addition, the evidence-based importance of some of these results has been mixed. The ambiguity of the results of studies of cathode rays obtained by Heinrich Hertz became the reason for the strengthening of the false view of their nature as a wave process. The experiments of F. Lenard, a student of Heinrich Hertz, led to the clarification of the corpuscular nature of cathode rays and the discovery of the electron. Thanks to this, the Brown tube was developed and the Wehnelt rectifier was invented.*

Keywords: *cathode rays, experiments by Heinrich Hertz, Lenard tube, Lenard window, Brown cathode tube, Wehnelt rectifier.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “Development of cathode-ray technologies at the turn of the 19th and 20th centuries,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 227–260, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Лекция Крукса «О лучистой материи» (On radiant matter), прочитанная 22 августа 1879 г. в Британской ассоциации содействия развитию науки (British Association for the Advancement of Science), была напечатана сразу же через 7 дней, сначала в «Chemical News»¹ [1]. Немецкий перевод этой статьи появился в Лейпциге той же осенью 1879 г. В этом переводе лучистая материя, или четвертое состояние материи, были проиллюстрированы качественными печатными блоками рисунков, заимствованных из английского оригинала. Новая научная статья, а с ней и трубки Крукса, обратили на себя внимание на европейском континенте, и вызвали новый

¹ Крукс был номинальным редактором и владельцем одного из самых успешных и престижных среди научных журналов того времени — *Chemical News*, с момента его основания в декабре 1859 г. и до своей смерти.

интерес к исследованию катодных лучей. В этом немалую роль сыграл молодой научный сотрудник Боннского университета Генрих Рудольф Герц (нем. *Heinrich Rudolf Hertz*, 22.02.1857—01.01.1894, рис. 1).

2. Исследования Генриха Герца

В начале 1880 г., 23 января, Генрих Герц защитил докторскую диссертацию (PhD) на тему «Об индукции во вращающихся сферах» (нем. *Ueber die Induction in rotirenden Kugeln*) в Берлинском университете. Через 14 дней, 5 февраля, он успешно сдал экзамены, полагающиеся после защиты диссертации. 15 марта 1880 г. Герцу был вручен докторский диплом (PhD) с «большой похвалой» (лат. *magna cum laude*), что являлось редкостью в Берлинском университете.



Рис. 1. Генрих Рудольф Герц с супругой Элизабет. 1886 г. Физический институт Боннского университета, где Генрих Герц работал и жил с 1889 г. до своей смерти в 1894 г.

Fig. 1. Heinrich Rudolf Hertz with his wife Elizabeth. (1886). Physical Institute of the Bonn University where Heinrich Hertz worked and lived from 1889 till his death in 1894

Вскоре Герц занял освободившееся место ассистента в Физическом институте Гельмгольца и получил в свое распоряжение физическую лабораторию, которая была оснащена лучшим оборудованием для того периода времени. У Герца появились широкие возможности для экспериментальных научных исследований.

В начале Герц занялся теоретическими вопросами в области электромагнетизма, упругости и испарения жидкости. Сразу после завершения работы по испарению Герц обратился к другой области, за которой он всегда следил с большим интересом, — к области электрического разряда в газах. Случилось это 29 июня 1882 г., о чем он сообщает в письме: «Я хотел бы поработать в несколько более экспериментальной области и оставить точные измерения в стороне, кроме того, рассматриваемая область очень темная и неизведанная, и ее исследование, вероятно, представляет большой теоретический интерес» [2].

Для экспериментальных исследований Герц собрал установку, которая состояла из катушки Румкорфа, электрометра и разрядной трубки оригинальной конструкции. Конструкция трубки Герца отличалась от трубок Гейсслера, так как позволяла изолировать рассматриваемое явление от остальной легкой массы разряда. Для экспериментов использовалась катушка Румкорфа большой мощности с длиной искры от 4 до 5 см на открытом воздухе и лейденская банка площадью около двух квадратных футов, которая подключалась к полюсам индуктора.

Эксперименты проводились с газоразрядной трубкой, состоящей из вложенных друг в друга двух стеклянных трубок. Одна трубка содержала в запаянном конце катод, в то время как ее второй конец был открыт. Этим концом трубка помещалась в другую стеклянную трубку, в которой размещался подвижный электрод — анод. Анод представлял собой цилиндр из металлической сетки, способный пропускать катодные лучи. Всё устройство помещалось под колпак воздушного насоса, который создавал под ним давление 30—50 мм рт. ст., после этого включалась катушка Румкорфа и инициировались электрические разряды. Благодаря оригинальной конструкции анода удалось получить удобный для исследования катодный пучок, который располагался за ним.

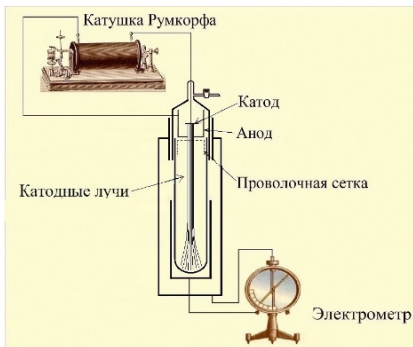


Рис. 2. Экспериментальная установка Г. Герца на катодной трубке для обнаружения переноса электрического заряда пучком катодных лучей. 1883 г.

Fig. 2. G. Hertz's experimental setup on a cathode tube for detecting the transfer of electric charge by a beam of cathode rays. 1883

Герц провел эксперименты, которые ранее были проведены другими учеными, в частности, Е. Гольдштейном. Результаты исследований были опубликованы в мае 1883. В начале статьи он отмечает: «В большинстве случаев электрический разряд настолько незаметен, что, кажется, не стоит упоминать о нем, но когда я впервые заметил его, то увидел такой поразительном вид, что я был вынужден провести несколько экспериментов с этим явлением» [3]. Им было, в частности, подтверждено, что катодные лучи оказывают значительное механическое воздействие. Проволока, подвешенная в потоке лучей, совершает сильные колебания, как и упругий

лист слюды, от которого отклоняется луч. Если положить кусок слюды на открытый конец трубки, то инициированные лучи мгновенно его отбрасывают на некоторое расстояние. Часть эффектов, которые он обнаружил, не были описаны в научной литературе. Это невзирая на то, что Гольдштейн неоднократно наблюдал подобные явления в своих многочисленных экспериментах с разрядом в разряженных газах.

Отметим только некоторые наиболее отличительные результаты экспериментов, которые получил Герц. Им не был подтвержден факт влияния магнита на катодные лучи. В эксперименте для доказательства того, что катодные лучи являются носителями электрического заряда, он установил газоразрядную трубку между пластинами заряженного конденсатора. В этом случае электрическое поле конденсатора должно было отклонить катодные лучи и сместить тень предмета на экране. Однако ничего подобного Герц также не увидел.

Неудача проведенных Герцем опытов объяснялась, в одном случае, недостаточной чувствительностью использованного им электрометра, а в другом — слабостью электрического поля конденсатора, которое он создал. Опыты по электрическому отклонению катодных лучей оказались не столь убедительными. Герц не обнаружил такого отклонения и пришел к выводу, что катодный луч — это колебательный процесс продольных волн в эфире. Он утвердился в понимании того, что катодные лучи не могут быть заряженными частицами, что было неправильно.

Полученные научные результаты экспериментов Герц обсудил с Е. Гольдштейном, который побудил того продолжить исследования природы тлеющего разряда и уделить основное внимание структуре этого явления, а также связи между его световыми и электрическими свойствами. Гольдштейн оказывал всяческую помощь в проведении исследований. За это Герц ему был очень благодарен, о чем он не преминул отметить в начале публикации, последовавшей после окончания экспериментов [4]. Для экспериментов, к сентябрю 1882 г., Герц построил мощную батарею, состоящей из тысячи элементов Планте.

Эксперименты проходили с определенными трудностями. Часто отказывала во время работы батарея и ее в конце концов пришлось заменить индуктором типа катушки Румкорфа [4, с.785—786]. Можно предположить, что это обстоятельство негативно отразилось на результатах проведенных опытов.

Герц поставил задачу получить тлеющий разряд, который при самых тонких методах исследования не обнаруживал бы следов разрывности. Оказалось, это вполне возможно, причем доказать отсутствие прерывно-

сти Герц смог шестью разными способами, не считая некоторых косвенных доказательств.

В эксперименте Герц не смог установить дискретность электрического разряда. Свои соображения по этому поводу он изложил следующим образом: «Из совокупности представленных экспериментов я прихожу к выводу, что испытанные разряды были непрерывными. Этот вывод следует из этого, что в целом разряд батареи следует рассматривать как непрерывный, если он не обнаруживает прерывистости по известным характеристикам, и, кроме того, что разряды индуктора в зависимости от размера устройства, могут составлять от $1/1000$ до $1/60$ секунды, в течение этого интервала его следует рассматривать также как непрерывный ток» [4, с. 796—797].

Только через 18 лет, после экспериментов Герца, в 1910 г. американский физик Роберт Милликен (англ. *Robert Andrews Millikan*; 22.03.1868—19.12.1953) опытным путем показал, что электрический заряд дискретен, то есть заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда. Дискретность катодных лучей была установлена по их поведению в электрическом и магнитном полях. Ошибочный вывод Герца, по всей видимости, связан в первую очередь с несовершенством экспериментальных технологий, которые он использовал.

Некоторые факты в тот период времени заставляли предполагать отсутствие связи между световым лучом и электрическим током в газоразрядной трубке. Например, было известно, что катодные лучи всегда нормальны к поверхности катода, где бы ни располагался анод, тогда как ток, очевидно, должен менять свое направление с изменением местоположения анода. Герц задался целью внести полную ясность в этот вопрос. В таком эксперименте главное — отделить светящийся пучок от электрического тока. Нормальность катодного луча к поверхности катода подсказала способ такого отделения. В этом случае катод должен иметь форму диска с отверстием посередине, в центре которого располагается анод, по виду напоминающий головку булавки, рис. 3а. Герц провел такой эксперимент и из него сделал вывод, что магнитное действие светящегося пучка, если оно вообще существует, то не превышает $1/300$ части того действия, которое наблюдалось бы, если бы светящийся пучок был образован носителями электрического тока [4, с. 801] Этот вывод Герца сегодня является неправильным, так как известно, что светящийся пучок в газоразрядной трубке состоит из электронов, носителей электрического заряда, движение которых рождает магнитное поле.

Герц не обратил внимание на магнитное поле движущихся электронов, по всей видимости из-за того, что в разрядной трубке имелась боль-

шая концентрация остаточного газа. Концентрация остаточного газа еще не стала к тому времени объектом пристального внимания экспериментаторов, а от нее, как выяснилось впоследствии, существенно зависели многие важные свойства газового разряда. В частности, при большой концентрации газа катодный ток создает встречный поток положительно ионизированных атомов, магнитное поле которого отчасти компенсирует магнитное поле катодного тока.

В изложенном опыте объектом наблюдения служили видимые катодные лучи. Для того чтобы иметь возможность следить за распределением невидимых линий тока, Герц построил камеру в виде небольшого прямоугольного ящика, в котором электроды располагались таким образом, что происходило отделение лучей от тока, рис. 3б. Направление линий тока определялось по их магнитному действию на магнитную стрелку, подвешиваемую над ящиком в разных точках. Предыдущий опыт позволил утверждать, что поведение стрелки обуславливалось именно током, а не лучами. Отмечая положения стрелки, Герц получил графики распределения силовых линий для нескольких положений анода и катода. Один из таких графиков показан на рис. 3б. Поскольку линии тока явным образом не совпали с катодными лучами (пунктирные линии), то Герц еще более укрепился в своем мнении об отсутствии связи между током и лучами [4, с. 801—804].

После этого Герц решил выяснить электростатическое воздействие катодных лучей, рис. 3в. Сначала он попытался установить электростатическое действие самих катодных лучей, а затем электростатическое действие на них других заряженных тел. В итоге он получил ошибочный результат. Если бы катодные лучи были носителями электрического заряда, то поле конденсатора отклоняло бы их, а тень предмета на экране смещалась. Однако ничего подобного Герц тоже не заметил, хотя действие магнита на тот же катодный луч наблюдалось без труда.

Неудачу двух последних опытов Герца следует объяснить низкой чувствительностью использованного им электрометра в первом случае, и слабостью электрического поля, которое он был в состоянии создать, во втором случае.

В этих опытах факт несовпадения силовых линий с катодными лучами в действительности не имеет того значения, которое придавал ему Герц. Это расхождение объяснялось большой скоростью вылетевших из катода электронов, однако Герцу такая трактовка была неприемлема. Мысль о быстрых частицах посещала Герца, как показывает одно его замечание, но он считал ее невероятной [4, с. 815].

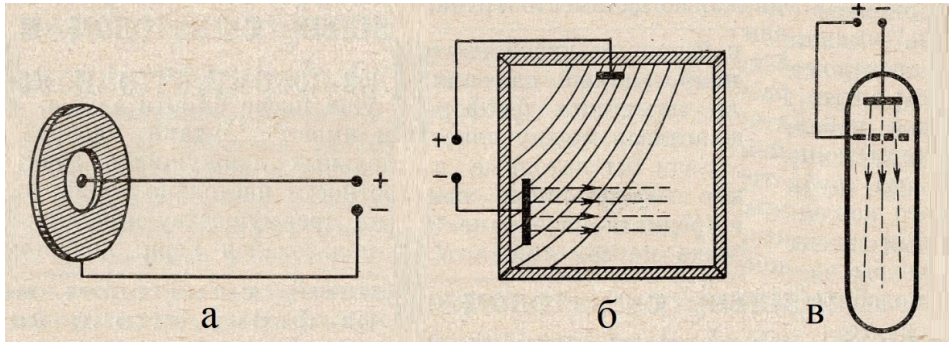


Рис. 3. Эксперименты Герца по отделению светящегося пучка от электрического тока:
а — модель катода в форме диска и в его центре анод в форме булавочной головки,
б — графики линий тока и лучей, в — опыт по выяснению электростатического действия
катодных лучей.

Fig. 3. Hertz's experiments on the separation of a luminous beam from an electric current:
а — a model of a cathode in the form of a disk and an anode in the form of a pin head, in its center,
б — graphs of streamlines and rays, в — an experiment on elucidating the electrostatic action
of cathode rays

В результате своих опытов Герц решил, что катодные лучи непрерывны и ничего общего не имеют с электричеством. Более ошибочную позицию трудно даже предположить. К тому же Герц попытался развить ее, например, ввел понятие катодных лучей, создаваемых током, в отличие от обычных катодных лучей, создаваемых катодом [4, с. 809]. Он упорно подчеркивал аналогию между магнитным отклонением катодных лучей и магнитным вращением плоскости поляризации света [4, сс. 807, 816] и даже наметил крылатую аналогию: катодные лучи не более связаны с электричеством, чем свет с электрической лампочкой [4, с. 814].

Ошибочность выводов, сделанных Герцем по результатам проведенных экспериментов, сразу сказалась на дальнейшем развитии катодно-лучевых технологий. Среди физиков, особенно немецких, укрепился ложный взгляд на катодные лучи как на волновой процесс в эфире. Это сильно затормозило процессы познания природы катодных лучей, а ближайшему ученику Герца, Ленарду, стоило первенства в открытии электрона [5].

3. Лучи Ленарда

Лекция Крукса «О лучистой материи» была издана в виде небольшой книги объемом в 34 страницы в 1879 г., рис. 4. Книга имела успех у людей, интересующихся наукой, и продавалась во многих городах Европы. В

городе Прессбурге² (нем. *Pressburg*, ныне Братислава, Словакия), на востоке Австро-Венгерской империи на реке Дунай, о ней узнал Филипп Ленард (нем. *Philipp Eduard Anton von Lenard*, 07.06.1862—20.05.1947), когда ему было восемнадцать лет. Идя по дороге в школу, он увидел книгу взглянув в окно книжного магазина, что и предопределило его выбор научного пути. Воодушевленный смелым утверждением Крукса о том, что помимо твердого, жидкого и газообразного состояний, существует еще и четвертое агрегатное состояние материи, к которому он отнес катодные лучи. Ленард на протяжении двенадцати лет занимался исследованием катодных лучей.



Рис. 4. Общий вид города Прессбург со стороны реки Дунай (1901 г.) и обложка книги Крукса «О лучистой материи» (1979 г.)

Fig. 4. General view of the city of Pressburg from the side of the Danube River (1901) and the cover of Crookes's book "On Radiant Matter" (1979)

Ленард после окончания Королевской венгерской средней школы в 1880 г. провел два семестра в изучении естественных наук в Будапеште и Вене. После этого он предпочел работать в винном магазине своего отца в Прессбурге. В 1883 г. он продолжил учебу в Гейдельберге у Георга Германа Квинке (*Georg Hermann Quincke*) и Роберта Бунзена (*Robert Bunsen*). В 1886 г., после семестра обучения у Германа фон Гельмгольца в Берлине, он защитил диссертацию «О колебании падающих капель» (нем. *Ueber die Schwingung fallender Tropfen*) под руководством Георга Квинке и получил докторскую степень (PhD) в Гейдельберге³ (Heidelberg). После этого он до

² Этнический состав населения города Прессбург в 1880 г.: немцы (68 %), словаки (8 %), венгры (8 %) и прочие (16 %). Для сравнения, этнический состав населения города Братислава в 2001 г.: словаки (91,4 %), венгры (3,8 %) чехи (1,9 %), немцы (0,3 %) и прочие (2,6 %).

³ Гейдельберг (также Хайдельберг, нем. *Heidelberg*, алем. нем. *Heidelbärg*) — город в Германии, на северо-западе земли Баден-Вюртемберг. Население (2018) — около 160000 жителей. Город известен своим университетом и замком. Гейдельбергский университет (нем. *Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg*) является старейшим университетом современной Германии, который основан в 1386 году.

1889 г. был ассистентом Квинке в физическом институте Рупрехт-Карлс-Университета Гейдельберга (нем. *Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg*).

В 1890 г. Ленард поехал в Бреслау в качестве ассистента, а через год, с 1 апреля 1891 г., начал работать ассистентом Генриха Герца в Бонне. В 1892 г. Герц опубликовал свою последнюю статью, которую посвятил явлению прохождения катодных лучей через тонкие металлические пластинки [6]. Статья начиналась словами: «Катодные лучи отличаются от света существенным образом в отношении способности проникать через твердые тела». Описывая результаты опытов по прохождению катодных лучей через золотые, серебряные, платиновые, алюминиевые и др. тонкие металлические пластинки, Герц отметил, что он не заметил особых отличий в наблюдаемых явлениях. Лучи проходят через тонкие металлические пластинки не прямолинейно, а дифракционно рассеиваются. Этот факт, по его мнению, свидетельствует об их волновой природе. В этой работе Герц рассматривал прохождение катодных лучей не только в сплошных пластинах, но и через отверстия в них. Он отметил, что в последнем случае они должны распространяться по прямой после прохождения через отверстие, но этого не происходило. Герц, объясняя это явление, сделал предположение, что лучи дифракционно рассеиваются по мере прохождения.

Природа катодных лучей все еще оставалась неясной. Герц в связи с этим предложил Ленарду исследовать поведение катодных лучей вне газоразрядной трубки. Ленард для экспериментов с катодными лучами вне газоразрядной трубки сконструировал в 1892 г. оригинальную трубку, которую стали называть «трубкой Ленарда», рис. 5. Отличительной особенностью конструкции трубки явилось наличие небольшого отверстия диаметром 1,7 мм, через которое устремлялся поток катодных лучей вне трубки. Это отверстие получило название «окошко Ленарда». Благодаря этому впервые появилась возможность изучать катодные лучи независимо от газового разряда.

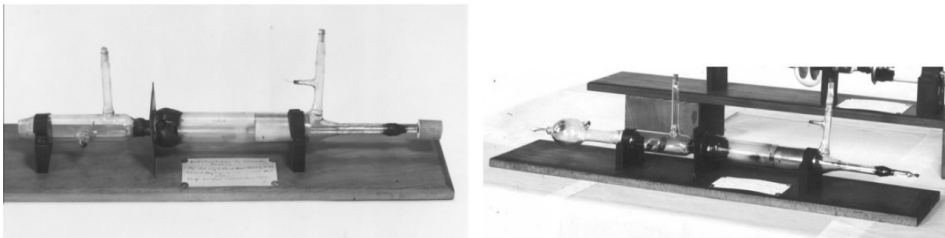


Рис. 5. Трубка Ленарда (слева) и трубка Ленарда с наблюдательной трубкой (справа), которую сделал Ленард в декабре 1892 г. и описал её в публикации 1894 г.

Fig. 5. The illustrations show a Lenard tube (left) and a Lenard tube with an observation tube (right), which Lenard made in December 1892 and described in an 1894 publication

В экспериментах Ленарда отверстие в боковой части разрядной трубки было герметично закрыто тонкой алюминиевой фольгой толщиной 0,0003 мм, рис. 6 [7]. Фольга могла выдерживать давление атмосферы только с одной стороны и обладала заметной проницаемостью, что позволяло катодным лучам выйти в открытое воздушное пространство. Таким образом, наблюдение катодных лучей значительно облегчалось, так как можно было выбирать и изменять условия эксперимента независимо от условий их происхождения. Лучи, выходящие из «окошка», получили название «лучей Ленарда».

Ленард сначала провел исследование катодных лучей на открытом воздухе, в вакууме и различных газах (светильный газ, водород, кислород и угольная кислота) [8]. Он установил, что катодные лучи делают воздух слабосветящимся. Окошко окружает ореол голубоватого света, умеренно яркий только на его поверхности, при этом чувствуется сильный запах озона. Вещества, содержащие люминофор⁴, если их поднести к окну, начинают светиться своим особым светом на ближайшей к окошечку стороне. С увеличением расстояния от окошечка интенсивность явления быстро уменьшается и исчезает на расстоянии примерно шести сантиметров. Только величина расстояния определяет яркость света. Все явления фосфоресценции в пространстве наблюдения прекращаются, если магнит, приложенный к разрядной трубке, отталкивает катодные лучи от внутренней поверхности окошка.

Дальнейшие эксперименты Ленарда были связаны с природой катодных лучей и ответом на фундаментальный вопрос: зависит ли их распространение от присутствия вещества или это происходит в пустом пространстве. Невозможность получения катодных лучей в полном вакууме до сих пор не позволяла решить этот вопрос. Ленард показал, что магнит отклоняет катодные лучи как в воздухе, так и в безвоздушном пространстве [9]. На рис. 7 показано перемещение светлого пятна из области O в область O_1 под действием магнита M . Величина этого перемещения различна при различной степени разрежения воздуха. Чем сильнее разрежение воздуха в трубке, тем меньше отклоняются магнитом катодные лучи. Существуют различные виды катодных лучей. Ленард наблюдал, что иногда можно отклонить, по-видимому, только часть катодных лучей. Впрочем, он не обратил особенного внимания на этот эффект. Если бы он сделал это, то, может быть, ему удалось бы сделать то открытие, которым в конце 1895 г. профессор Рентген в Вюрцбурге поразил мир.

⁴ Люминофор (от лат. *lumen* — свет и греч. *phoros* — несущий) — вещество, способное преобразовывать поглощаемую им энергию в световое излучение (способность люминесцировать).

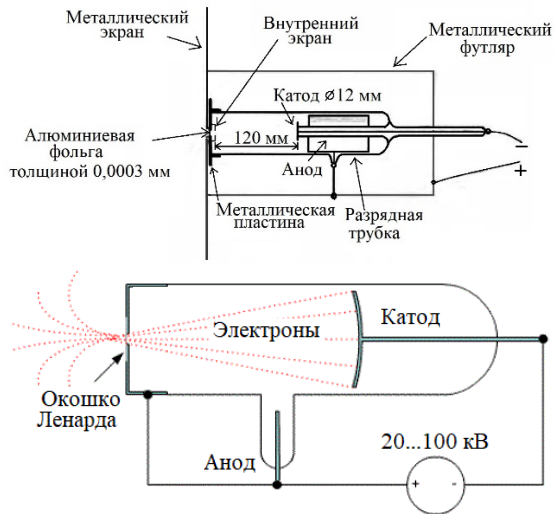


Рис. 6. Устройство [7] и принцип работы трубки Ленарда.
Fig. 6. Device [7] and the principle of operation of the Lenard tube

С одной стороны, магнитное отклонение катодных лучей, указывало на то, что они являются заряженными частицами, что совместимо с эфирной интерпретацией их природы. Можно было предположить, что магнитное поле изменило состояние эфира, вызвав отклонение лучей. С другой стороны, способность катодных лучей проходить через тонкие металлические листы, говорила о том, что они являются волнами в эфире, что может быть обосновано гипотезой, согласно которой катодные лучи являются заряженными частицами.

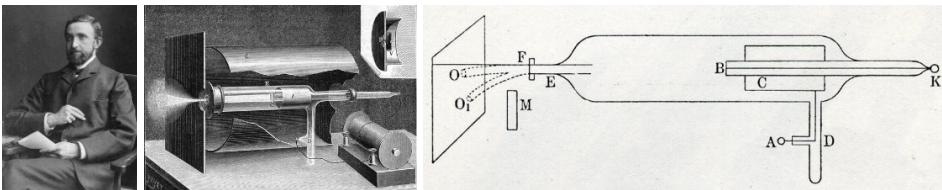


Рис.7. Филипп Эдуард Антон Ленард, общий вид трубки Ленарда и опыт по отклонению катодных лучей магнитом.

Fig. 7. Philip Edward Anton von Lenard, general view of the Lenard tube and experiment on the deflection of cathode rays by a magnet

Поскольку впервые была обнаружена проникаемость катодных лучей для твердых тел (металлов), то с появлением трубки Ленарда появилась возможность проверить проникаемость и для других веществ. Не

удалось найти ни одного твердого тела, которое реагировало бы на катодные лучи, как стекло на свет. Напротив, газообразные тела были намного более проницаемыми, чем твердые тела. Здесь излучающие линии измерялись сантиметрами и было несложно определить относительную меру проницаемости. Измеренная таким образом проницаемость была показана Ленардом в связи с плотностью газовой среды, поскольку каждый раз более тонкий газ был более проницаемым, чем более плотный.

Ленард заметил, что катодные лучи проникают в воздух (около 1 см) и другие вещества на разную глубину. Кроме того, он показал, что поглощение лучей пропорционально толщине и плотности поглощающего вещества. Проникающая способность лучей возрастает при большом напряжении, так как происходит увеличение их скорости и энергии [10].

Катодные лучи проходили через это окошко, и, таким образом, Ленард смог измерить их длину свободного пробега вне трубки. Как оказалось, пробег был намного длиннее, чем у атомов и молекул. Проникновение катодных лучей через золотую фольгу указывало на то, что они состоят из частиц, которые значительно меньше, чем атомы. В табл. 1 приведенные экспериментальные данные, полученные Ленардом для различных веществ.

Табл. 1. Экспериментальные данные по проникающей способности катодных лучей, полученные Ленардом для различных веществ [10].

Table 1. Experimental data on the penetrating ability of cathode rays obtained by Lenard for various substances [10]

Вещество	Проникающая способность, 1/см	Плотность, $\frac{г}{см^3}$	$\frac{\text{Проникающая способность, см}^2}{\text{Плотность, г}}$
Газообразный водород под давлением 3,3 мм	0,00149	0,000000368	4040
Атм. воздух давлением 0,78 мм	0,00416	0,00000125	3330
Газообразный водород под давлением 760 мм	0,476	0,0000849	5610
Атм. воздух давлением 760 мм	3,42	0,00123	2780
Сероводород H ₂ S. Кислота при давлении 760 мм	8,51	0,00271	3110
Коллодиевая кожа	3310	1,10	3010
Бумага	2690	1,30	2070
Стекло	7810	2,47	3160
Алюминий	7150	2,70	2650
Слюда	7250	2,80	2590
Искусственное сусальное золото	23800	8,90	2670
Серебро	32200	10,5	3070
Золото	55600	19,3	2880
		В среднем	3200

Из опытов Ленарда можно сделать общее заключение. Катодные лучи распространяются в пустоте беспрепятственно. Ленард смог проследить их в своей разрядной трубке на расстоянии нескольких метров от окошка. Катодные лучи в газах, в частности, при больших давлениях, заметны лишь на расстоянии нескольких миллиметров от окошка. Это означает, что они поглощаются газами и Ленард определил, что поглощение катодных лучей происходит тем сильнее, чем больше плотность того газа, в котором эти лучи распространяются.

Эксперименты Филиппа Ленарда привели к прояснению корпускулярной природы катодных лучей, хотя к его великому огорчению, приоритет в открытии электрона отошел в 1897 г. к Дж. Дж. Томсону.

4. Открытие Рентгена

В 1893 г. заведующий кафедрой физики⁵ университета немецкого города Вюрцбурга⁶ (нем. *Würzburg*) Вильгельм Рентген (нем. *Wilhelm Conrad Röntgen*, 27.03.1845—10.02.1923) заинтересовался исследованиями катодных лучей, рис. 8.

В экспериментах Рентген использовал сначала катодные трубки Гитторфа и Крукса, а после трубки Ленарда. Катодные трубки конструкции Ленарда дал ему сам разработчик. Эти трубки были использованы только в некоторых научных экспериментах. Рентген был хорошо знаком с Ленардом и его научными работами.

Трубки Гитторфа — Крукса имели более толстые стенки в сравнении с другими и были приспособлены для проведения исследований электрических разрядов в разреженных газах. Трубки Ленарда с окошками, закрытыми тонкой фольгой, использовались Рентгеном для исследования катодных лучей в воздухе. Помимо этого в трубках Ленарда можно было наблюдать флуоресценцию платиноцианида бария, если поместить его рядом с небольшим окном, через которое катодные лучи выходили в воздух.

Через два года после начала исследований Вильгельм Рентген обнаружил, что катодная трубка излучает до сих пор не известные науке лучи. Открытие Рентгена произошло ночью в пятницу 8 ноября 1895 г., когда он проводил эксперимент в своей лаборатории. Эксперимент был связан с эффектом прохождения электрического тока через газы при низком давлении. Это можно назвать судьбой, удачей или случайностью, но был ряд моментов,

⁵ С 1888 г. Рентген занимал должность профессора и одновременно директора Физического института Вюрцбургского университета.

⁶ Вюрцбургский университет имени Юлиуса и Максимилиана (нем. *Julius-Maximilians-Universität Würzburg*) — один из старейших университетов Германии, находится в Вюрцбурге, Бавария.



Рис. 8. Общий вид здания Физического института Вюрцбурга (1892 г.), Вильгельм Рентген в возрасте 50 лет в своей лаборатории Физического института университета Вюрцбурга и катодные трубки в первых экспериментах Рентгена.

Fig. 8. General Physics Institute of Würzburg (1892), Wilhelm Roentgen at the age of 50 in his laboratory at the Physics Institute of the University of Würzburg and cathode tubes in Roentgen's first experiments

которые сделали эту ночь незабываемой. Во-первых, Рентген в эксперименте полностью поместил трубку Гитторфа — Крукса в футляр из черного картона, по примеру Ленарда, сделав ее светонепроницаемой (рис. 9). Во-вторых, его лаборатория погрузилась во мрак. И, наконец, кусок бумаги, окрашенный кристаллами платиноцианида бария, лежал на скамейке на некотором расстоянии от трубки.



Рис. 9. Общий вид катодной трубки Рентгена в первых его экспериментах и эксперимент, объясняющий открытие X-лучей (1895 г.) [11]

Fig. 9. General view of the X-ray cathode tube in his first experiments and the experiment explaining the discovery of X-rays (1895) [11]

Этот кусок бумаги с платиноцианидом бария был «шансом», который природа дала Рентгену, чтобы раскрыть один из ее секретов. Когда кристаллы засветились мерцающей желто-зеленой флуоресценцией, то удивление посетило проницательный научный ум Рентгена. Неужели, катодные лучи могут заставить кристаллы светиться, но на таком расстоянии? Он поместил кристаллический экран на еще большем расстоянии от трубки, куда, как известно, проникали катодные лучи дальнего действия. Опять странное свечение! С колотящимся сердцем он схватил книгу и поместил ее между трубкой Крукса и экраном. Кристаллы продолжали светиться. Что

бы это ни было, но это проходило через книгу! Затем он попробовал металлы и обнаружил, что лучи проникают с разной степенью, хотя свинец и платина полностью останавливают их. После этого настало самое драматическое испытание из всех. Рентген обнажил руку, казалось его сердце, должно было, почти остановиться, когда он увидел тени своих костей. Во время экспериментов Рентген делал фотографии своих открытий, было очевидно, что он обнаружил нечто гораздо более захватывающее, чем катодные лучи — *X*-лучи! Для открытых лучей сам Рентген предложил название «*X*-лучи» (англ. *X-ray*), которое закрепилось в основном в англоязычной литературе. Однако в немецкоязычных странах излучение обычно называют в честь ученого, который его открыл: рентгеновские лучи.

Эксперименты Рентгена показали, что *X*-лучи возникают в месте столкновения катодных лучей с преградой внутри катодной трубки. В первых его экспериментах это были стеклянные стенки трубки: в местах, на которые падали катодные лучи, они флуоресцировали (рис. 8). Это и стало причиной появления неизвестных лучей. Подобные эффекты видели многие исследователи катодных лучей до Рентгена, но не придавали этому большого значения.

Стороннему наблюдателю рентгеновский снимок руки, показанный ниже (рис. 10), покажется ничем не примечательным. Однако на самом деле это первый в мире рентгеновский снимок, сделанный человеком 22 декабря 1895 г., и он принадлежит жене человека, случайно изменившего лицо в результате медицинского диагноза. Анна Берта Рентген испытала такой шок, когда увидела скелет левой руки с обручальным и помолвочным кольцами, что воскликнула: «Я видела свою смерть». Первый рентгеновский снимок в России был сделан в 1896 г. по инициативе русского ученого А. Ф. Иоффе, ученика В. Рентгена.



Рис. 10. Анна Берта Рентген и рентгеновский снимок её руки (декабрь 1895 г.).

Fig. 10. Anna Berta Roentgen and roentgenogram of her hand (December 1895)

В январе 1896 г. Рентген провел открытое собрание Физико-медицинского общества в Вюрцбурге, на котором представил свои открытия. В середине сеанса возникло предложение назвать новые лучи именем их первооткрывателя. Работа Рентгена по этому новому типу излучения бы-

ла отмечена 10 декабря 1901 г. первой в истории Нобелевской премией по физике, присужденной Шведской королевской академией наук. Робкий Рентген отказался выступать с Нобелевской лекцией. Он пожертвовал 50 000 шведских крон Вюрцбургскому университету и не стал подавать заявку на патент, тем самым он сделал свое открытие доступным для широкой публики. Уважаемый физик-экспериментатор получил множество наград за свои открытия, в частности, почетное гражданство города Леннепа (нем. *Lennepe*, родина Рентгена) и города Вюрцбурга, а также «Орден Гражданских заслуг Баварской короны» (нем. *Verdienstorden der Bayerischen Krone*).

Рентген в своих исследованиях мало использовал математику, несмотря на это он получил свои результаты с помощью оригинального и простого оборудования, большую часть которого он сконструировал сам. Он очень ценил умение импровизировать с аппаратурой и считал, что человек должен уметь делать все, что действительно необходимо, с помощью карманного ножа. Поэтому неудивительно, что он обычно не прибегал к услугам помощника и предпочитал проводить эксперименты и наблюдения собственноручно. На самом деле открытие Рентгена, как заметил сэра Дж. Дж. Томсон в своей лекции *Rede*⁷ 10 июля 1896 г., «связано с самым сильным из всех человеческих качеств, а именно — любопытством» [12].

5. Упущенные возможности Ленарда

Ленард единственный из плеяды ученых, исследовавших катодные лучи, был удостоен в 1905 г. Нобелевской премии по физике с формулировкой «за работы по катодным лучам». На церемонии вручения премии Арне Линдстедт из Шведской королевской академии наук сказал: «Ясно, что работы Ленарда по катодным лучам не только обогатили наше знание этих явлений, но и во многих отношениях заложили основу теории электронов». Несмотря на признание, которое получили его работы, Ленард все время страдал из-за того, что его вклад в науку не оценивается в достаточной степени. Он порой с пренебрежением и завистью относился к успехам других ученых. Ленард очень уважал и восхищался Герцем до приезда в Бонн и во время пребывания в нем, но став его ассистентом, считал, что тот обходится с ним недостаточно почтительно. Постепенно уважение к своему наставнику (который умер в 1894 г.) стало падать, поскольку Ленард становился все более антисемитски настроенным и участвовал в национал-социалистическом и нацистском движении.

⁷ Лектор сэра Роберта Педа (Sir Robert Rede's Lecturer) — это ежегодное назначение для чтения публичной лекции (Rede Lecture), лекции сэра Роберта Педа в Кембриджском университете. Он назван в честь сэра Роберта Педа, который в XVI веке был главным судьей Общего права.

Когда в 1895 г. Вильгельм Рентген открыл лучи, которые возникают при бомбардировке катодными лучами частей разрядной трубки, то Ленард был расстроен тем, что не он обнаружил их первым. Его угнетало то, что новые лучи стали называть именем первооткрывателя. Впоследствии он неизменно называл их «высокочастотным излучением», но никогда не употреблял их общепризнанного названия «рентгеновские лучи» или «рентгеновское излучение». Более того, Ленард считал, что, одолив Рентгену разрядную трубку, он внес вклад в открытие нового излучения и поэтому заслуживает особого упоминания.

Ленард полагал, что открытие должно, по меньшей мере, считаться совместным, однако вся слава открытия досталась одному Рентгену. Особой горечи Ленарду добавлял и тот факт, что Рентген не упомянул его имени в своих трех статьях [13—15], посвященных исследованию нового излучения, и даже не указал, что оно получено благодаря катодной трубке Ленарда! При этом, по-видимому, в решающих экспериментах Рентген трубкой Ленарда все же не пользовался [16].

Ленард негодовал, когда Рентген стал Нобелевским лауреатом и заявлял, что является матерью лучей, тогда как Рентген — лишь повивальная бабка. После того, как в 1897 г. Дж. Дж. Томсон открыл электрон и его открытие получило широкое признание, Ленард стал утверждать, что приоритет якобы принадлежал ему. Томсон дал вполне современное описание электрона, а Ленард же и в 1906 г. продолжал называть электрон «электричеством без материи, электрическим зарядом без заряженных тел» и говорил как об «электричестве в чистом виде».

И все же в его характере была добрая сторона, и часто он представлял собой скорее жалкую, чем угрожающую фигуру. Возможно, он испытывал глубокую личную потребность в дружбе, которую не мог завоевать, а если и мог, то не мог сохранить. Его недоверие к другим, неспособность пробудить уверенность в себе или симпатию тех, кто работал под его руководством, были причиной того, что он не основал великую школу физиков. Было высказано предположение, вероятно, правильное, что ключом к его характеру было то, что он был слабой личностью, которая стремилась защитить себя твердой оболочкой. Он был темным гением, омраченным сильными личными страхами, сомнениями и завистью, но, несомненно, гением и тем, кто оставил неизгладимое впечатление в физике [17].

Одним из главных научных достижений Ленарда было произведенное им в 1902 г. экспериментальное наблюдение, согласно которому свободный электрон (он назвал его катодным лучом) должен обладать определенной минимальной энергией для того, чтобы ионизовать газ (сделать

нейтральный газ электрически заряженным) путем выбивания из атома связанного электрона. Ленард называл выбитые атомные электроны вторичными катодными лучами. Он дал весьма точную оценку потенциала ионизации (энергии, необходимой для выбивания электрона) для водорода.

6. Катодная трубка Брауна

Многие ученые, начиная с Ю. Плюккера, были заняты систематическими научными исследованиями катодных лучей и не задумывались о практическом применении полученных результатов. В то время как другие ученые искали способы применить их в практических целях. Первым такую область приложений указал французский физик Альберт Гесс (*Albert Hess*), который предложил использовать катодные лучи для изучения переменных магнитных полей. Для этой цели им было разработана конструкция устройства на базе трубки Гейсслера, которое он описал в общих чертах в статье в 1894 г. [18]. Катодные лучи образуются в трубке Гейсслера, конец которой напротив катода герметично закрыт металлической пластиной с диаметром отверстия от 1 до 2 мм. Это отверстие закрыто алюминиевой фольгой толщиной 0,002—0,003 мм. Исследуемое магнитное поле располагают таким образом, чтобы отклонение лучей происходило в направлении диаметра отверстия. Лучи проходят через тонкую фольгу, выходят из трубки Гейсслера и попадают на вертикальную тонкую стенку металлического герметичного ящика, за которой находится фотопленка. Движение катодного луча в каждый момент времени фиксируется на фотопленке и после ее проявления получается кривая изменения напряженности магнитного поля. В статье Альберт Гесс подчеркивает, что детали устройства можно легко изменять в соответствии с косвенными указаниями, исходя из результатов работ Ф. Ленарда [8, 9].

Однако первым, кто обратил внимание на практическую сторону катодных технологий, был профессор Страсбургского университета Карл Фердинанд Браун (нем. *Karl Ferdinand Braun*, 06.06.1850—20.04.1918) рис. 11. В 1896 г. Браун задумался о возможности использования газоразрядной трубки в качестве визуального индикатора колебательных и переходных явлений в электрических цепях. К этому времени наибольшую известность получили конструкции газоразрядных трубок Гитторфа, Крукса, Ленарда и Рентгена.

Зимой 1896/97 г. в Физический институт Страсбургского⁸ университета прибыл большой деревянный ящик с надписью «Осторожно, стекло» и адре-

⁸ Страсбургский университет (фр. *Université de Strasbourg*) в 1621 году получила статус полноценного университета во время Римско-Германской империи. С 1681 года Страсбург принадлежал

сом отправителя «Франц Мюллер⁹, ранее Г. Гейсслер, Бонн». В нем, среди прочего, находилась стеклянная трубка длиной 50 см с выпуклым концом, внутри которой можно было увидеть экран из слюды, покрытой фосфоресцирующей краской. Это была специальная версия газоразрядной трубки, сделанная на заказ и предназначенная для профессора Брауна и его сотрудников.



Рис. 11. Город Страсбург на карте Европы, общий вид Физического института Страсбургского университета в 1897 г. и Карл Фердинанд Браун.

Fig. 11. The city of Strasbourg on a map of Europe, general view of the Physics Institute of the University of Strasbourg in 1897 and Karl Ferdinand Brown

За основу своего визуального индикатора Браун взял трубку Крукса 1879 г. Для реализации замысла в ее конструкцию он внес некоторые изменения, которые отвечали требованиям задуманного индикатора. Для этого пришлось сузить расходящиеся лучи от катода до узкого светового пучка с помощью окошка Ленарда, а внутри в конце трубки разместить флуоресцентный экран. На экране от столкновения с ним катодных лучей возникало пятно света, для перемещения которого использовался эффект отклонения катодных лучей с помощью магнитного поля. При таком воздействии пятно начинало колебаться синхронно с изменяющимся полем, и его движение отражало изменения напряжения или тока.

Газоразрядная трубка Брауна на основе трубки Крукса получила название «осциллоскоп». С современных позиций это был упрощенный вариант осциллографа, описание которого было опубликовано в журнале «Annalen der Physik und Chemie» в 1897 г. [19]. После этого трубка получила название по фамилии ее изобретателя — «трубка Брауна» (нем. — *Braunsche Röhre*).

Франции. После франко-прусской войны 1870/71 г. он вернулся в Германию и восстановлен как Kaiser-Wilhelms-Universität в 1872 году. После окончания Первой мировой войны в 1918 году он был восстановлен как французский университет, а после победы Германии над Францией в 1940 году снова стал немецкоязычным университетом до конца 1944 г. В начале 1945 г. и до сегодня — французский университет. В 2019 г. в Страсбургском университете обучалось 52 114 студентов.

⁹ Франц Мюллер (*Franz Müller*) — преемник Генриха Гейсслера в мастерской физических инструментов, основанной Гейсслером в Бонне.

Трубка Брауна показана на рис. 12. Алюминиевый плоский дисковый холодный катод *K* служил источником катодных лучей, а электрод *A* сбоку от трубки действовала как анод. Пучок катодных лучей проходил через круглую диафрагму *C* с отверстием диаметром 2 мм в центре. Отверстие служило для сужения расходящегося потока катодных лучей в пучок небольшого диаметра. Внутри трубки, на конце, противоположном катоду, был установлен круглый слюдяной экран *D*, покрытый виллемитом (сульфидом цинка). Фосфоресцирующий экран крепился к стеклянной стенке *E* таким образом, чтобы флуоресцентное пятно, создаваемое катодными лучами, можно было видеть сквозь стекло и слюду. Внутри трубки находился воздух под низким давлением. В месте попадания пучка катодных лучей на экране появлялось световое пятно.

Катодные лучи в основном генерировались с помощью 20-пластинчатой индукционной машины Тёплера (нем. *August Joseph Ignaz Toepler (Töpler)*, 07.09.1836—6.03.1912), рис. 12. Удивительно, но требуемое высокое напряжение около 50 кВ, необходимое для создания разряда в разреженном газе, обеспечивалось ручным генератором электростатического напряжения. Скорости вращения индукционного устройства было достаточно для многих экспериментов. Включенный в цепь регулируемый искровой разрядник позволял выбирать наиболее благоприятный тип разряда. Браун впервые продемонстрировала возможность записи электрических сигналов на флуоресцентном экране газоразрядной трубки. Интересно отметить, что трубка Брауна была сконструирована до того, как была разгадана природа катодных лучей.

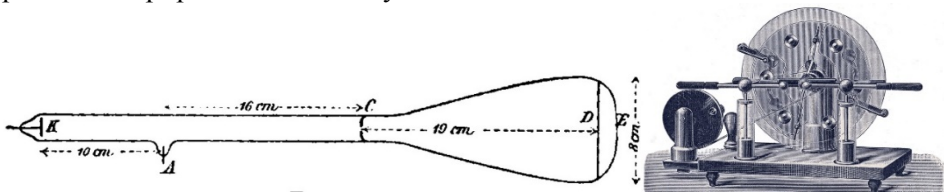


Рис. 12. Трубка Брауна [19] и индукционная машина Тёплера.

Fig. 12. Brown tube [19] and Töpler induction machine

В статье [19] описаны эксперименты, в которых Ф. Браун использовал специально сделанные на заказ вакуумные стеклянные трубки с экраном, покрытым люминофором. Целью исследования было измерить электричество и сделать его видимым в течение длительного периода времени. Брауну удалось нарисовать кривую на экране генерируемым в трубке электронным пучком. Для отклонения катодного луча использовался соленоид, который размещался снаружи стеклянной колбы в месте ее суже-

ния (между диафрагмой и экраном) перпендикулярно оси трубки. Этот соленоид он назвал «индикаторной катушкой».

Для наблюдения временной зависимости переменных во времени токов Браун отклонял катодный луч с помощью одной катушки и наблюдал за экраном через вращающееся зеркало, чтобы обеспечить горизонтальную временную развертку. Методику использования вращающегося зеркала он позаимствовал у Б. Феддерсена, который изучал колебательную природу искровых разрядов. Этой техникой эксперимента Браун овладел в совершенстве, он назвал ее «вращающимся зеркалом Кёнига¹⁰» (*rotating König mirror*) в честь ученого, который последним в 1897 г. практически применил этот способ отображения зависящих от времени явлений.

К катушке индуктивности подводился переменный электрический ток (исследуемый сигнал), который давала электростанция города Страсбурга. След, оставляемый на экране катодным пучком лучей, преобразовывался вращающимся зеркалом в синусоидальную кривую. Зеркало крепилось к якорю электромагнита, а его катушка питалась током, частота которого была кратной частоте тока катушки индуктивности. Такая визуализация позволила связать синусоидальную форму кривой на экране с переменным электрическим током электросети. Форма волны электроснабжения центральной электростанции Страсбурга (120 В, 50 Гц) была представлена слабой мерцающей синусоидальной волной. В экспериментах трубка работала при напряжениях 10—20 кВ и позволяла наблюдать на экране колебания электрического напряжения с частотой 50—60 Гц. Частотный диапазон трубки в основном ограничивался индуктивностью отклоняющих катушек. На рис. 13а показана синусоидальная зависимость переменного тока частотой 50 Гц от сети электростанции Страсбург от времени в сравнении с синусоидальными колебаниями камертона, изображенного на рис. 13b. Кривые были нарисованы вручную в соответствии с их видом во вращающемся зеркале.



Рис. 13. Измеренные осциллограммы временной зависимости (а) переменного тока электростанции Страсбург, (б) колебания камертона [19].

Fig. 13. Measured waveforms of the time dependence of (a) ac current of the Straßburg power station, (b) tuning fork oscillation [19]

¹⁰ Рудольф Кёниг (нем. *Rudolf König*; 26.11.1832 — 02.10.1901) — немецкий физик, бизнесмен, занимался изготовителем на основе своих изобретений научных акустических приборов.

На рис. 14 показана зависимость тока через первичную обмотку индукционной катушки от времени. Для разомкнутой вторичной обмотки (случай а) нарастание тока от α до β происходит так быстро, что эту часть кривой трудно реализовать. В течение интервала от β до γ искра при разрыве все еще дает контакт.

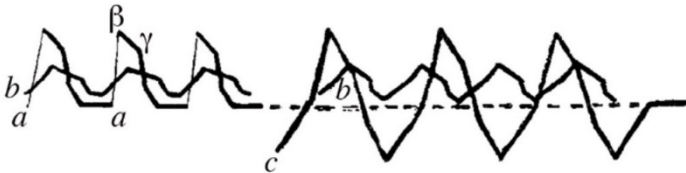


Рис. 14. Измеренные формы сигналов временной зависимости тока через первичную катушку индукционной катушки Румкорфа для (а) — разомкнутой вторичной катушки, (б) — короткозамкнутой вторичной цепи, (в) — вторичной катушки с конденсатором [19].

Fig. 14. Measured waveforms of the time dependence of the current through the primary coil of a Ruhmkorff induction coil for (a) – secondary coil open circuited, (b) – secondary circuit short-circuited, (c) – secondary coil terminated with a capacitor [19]

Для фазовых измерений с помощью фигур Лиссажу использовались две ортогонально расположенные пары индикаторных катушек. Это позволило Фердинанду Брауну также продемонстрировать двумерное отклонение катодного луча. Обе индикаторные катушки питались токами, проходящими через первичную и вторичную обмотки катушки Румкорфа с неподвижным прерывателем. Используя катушки индуктивности без железных сердечников и с ними, а также подключая к цепи конденсатор, он мог изменять фазовую задержку между индикаторными катушками, а также генерировать 3-ю гармонику, как это видно из фигур Лиссажу, изображенных на рис. 15.

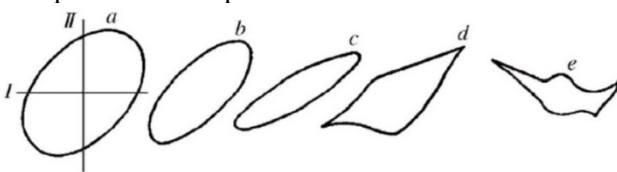


Рис. 15. Измеренные фигуры Лиссажу [19].

Fig. 15. Measured Lissajou's figures [19]

Браун не только придумал идею использования газоразрядной трубки в качестве визуального индикатора, но также ввел циклографический метод использования трубки, то есть средства отображения неподвижных фигур на флуоресцентном экране за счет одновременного применения двух прямоугольных отклонений. С открытием электрона, носителя элементарного электрического заряда, трубку Брауна чаще стали называть «электронно-лучевой» трубкой, рис. 16.

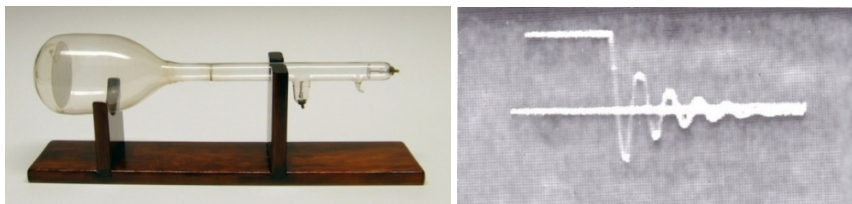


Рис. 16. Катодная трубка Брауна образца 1900 г. и вид затухающих электрических колебаний на экране трубки Брауна, полученный в 1897 г. [20].

Fig. 16. Brown cathode tube, sample 1900 and the form of damped electric oscillations on the screen of the Brown tube, obtained in 1897 [20]

В 1899 г. Джонатан Зеннек (*Jonathan Zenneck*), ученик Брауна, упростил дисплей на трубке Брауна. Вместо вращающегося зеркала, которое использовалось для определения временной шкалы, была использована электрическая система горизонтального сканирования. Эта система перемещала электронный луч по экрану с постоянной скоростью, а затем возвращала его в крайнее левое положение в конце каждого цикла. Вся конструкция напоминала современный поворотный потенциометр, в котором электродвигатель использовался для привода колеса с прикрепленной к нему проволокой. Два контактных кольца крепились к проводу и были подключены через щетки к батарее. В соленоиде таким образом протекал линейный пилообразный ток и производилось линейное сканирование, как в современных приборах.

Катодная трубка Брауна сыграла важную роль в его исследованиях в области беспроводного телеграфирования. В Нобелевской лекции от 11 декабря 1909 г. он сказал: «...позвольте, я напомним об устройстве, которое было очень полезно для меня и других экспериментаторов. Я имею в виду катодную трубку, которую я описал в 1897 г. Она обеспечивала визуальную картину изменения тока и напряжения до 100000 Гц. С ее помощью мы можем определить период, исследовать как форму кривой, так и интенсивность колебаний, определить затухание и фазу колебания» [20].

Электронно-лучевое устройство Брауна сразу нашло применение в различных технических областях. Нужно отметить, что Ф. Браун не запатентовал конструкцию своей катодной трубки — осциллографа. Он решил сделать свое изобретение доступным для научных исследований и всячески содействовал его распространению. Одним из наиболее плодотворных направлений такого применения оказалась область беспроводной передачи информации. После изобретения этой трубки в нее были внесены различные усовершенствования, которые сделали ее использование более удобным.

7. Открытия и изобретения Венельта

В этот же период времени, в 1898 г., в университете города Эрлангена (город в Баварии) молодой немецкий ученый Артур Венельт (*Arthur Rudolph Berthold Wehnelt*, 04.04.1871—15.02.1944, рис. 17) защитил диссертацию на тему «Исследования темного катодного пространства» (нем. *Studien über den dunklen Kathodenraum*) и получил докторскую степень (PhD) с «высшей похвалой» (лат. *summa cum laude*). Руководителем его диссертации был Е. Видеманн¹¹ (*Eilhard Gustav Heinrich Wiedemann*, 01.08. 1852—07.01.1828). В своей диссертации Венельт исследовал темное пространство возле катода в газоразрядных трубках и установил, что высокое сопротивление темного пространства катода соответствует сопротивлению диэлектрика.

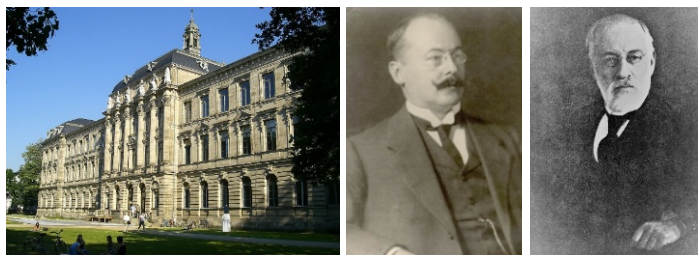


Рис. 17. Общий вид университета города Эрлангена (нем. *Universität Erlangen*), Артур Рудольф Венельт и его руководитель докторской диссертации Эйльхард Видеманн.

Fig. 17. General view of the University of Erlangen (German. *Universität Erlangen*), Arthur Rudolph Wehnelt and his doctoral dissertation supervisor Eilhard Wiedemann

Венельт после защиты диссертации сосредоточился на совершенствовании катодно-лучевых технологий. В 1899 г. он изобрел прерыватель, названный в его честь (нем. *Wehnelt-Unterbrecher*) [21]. Устройство предназначалось для быстрого ритмического прерывания постоянного тока. Прерыватель Венельта состоял из тонкого платинового электрода, погруженного в разбавленную серную кислоту, на котором последовательно формировались изолирующие пузырьки газа, которые лопались, а потом снова образовывались, рис. 18. Этот тип прерывателя позволял получать более быстрые токи, нежели с помощью механических прерывателей. Прерывания были настолько резкие, что не нужен был конденсатор. Прерыватель обладал не только большой быстротой переключения, но и был

¹¹ Эйльхард Эрнст Густав Видеманн был немецким физиком и историком науки. Он был сыном физика Густава Генриха Видемана (1826–1899) и старшим братом египтолога Альфреда Видемана (1856–1936). В 1872 году защитил диссертацию «Об эллиптической поляризации света и ее связи с цветом поверхности» и получил докторскую степень (PhD). Долгое время с 1877 года он редактировал *Annalen der Physik und Chemie* вместе со своим отцом.

достаточно мощным, способным работать при больших напряжениях. Например, при напряжении около 100 В можно было достичь 1000 прерываний в секунду. Искровой индуктор, работающий с таким прерывателем, отличается отсутствием конденсаторной коробки. Прерыватели Венельта благодаря своим преимуществам оставались до середины 20-х гг. XX в. предпочтительными устройствами для всех мощных искровых индукторов рентгеновской техники, пока их не вытиснули высоковольтные трансформаторы с мощными выпрямителями.

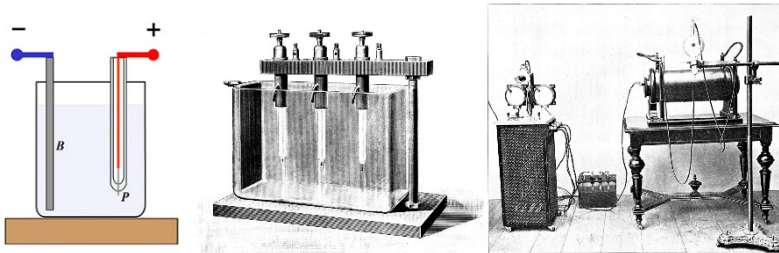


Рис. 18. Общее устройство прерывателя Венельта (слева). Промышленный образец трехкомпонентного прерывателя Венельта и этот прерыватель в комплекте рентгеновского аппарата. Аппаратура производства компании Сименс и Гальске. 1901 г.

Fig. 18. General arrangement of the Wehnelt breaker (left). An industrial prototype of a three-component Wehnelt interrupter and this interrupter included in the X-ray apparatus. Apparatus manufactured by Siemens & Halske. 1901

После непродолжительной работы ассистентом в Техническом университете Берлина Венельт вернулся в Эрланген, где в 1901 г. завершил научную работу для habilitation¹². Ее тема была «Измерение тока и напряжения на катодах в газоразрядных трубках» (нем. *Strom- und Spannungsmessung an Kathoden in Entladungsröhren*). В тот период времени наибольший интерес среди работ, проводимых А. Венельтом, представляли эксперименты, относящиеся к усилению потока катодных лучей в трубке Брауна и изучение законов испускания электронов нагретыми телами.

В 1902 г. Вельнет показал, что разряд электричества с катода ограничен областью, которая покрыта световым свечением. В этом случае полный ток, протекающий через трубку, пропорционален полностью покрытой области [22]. Это означает, что плотность тока на катоде остается постоянной, пока есть пространство для расширения свечения. Одновре-

¹² Хабилитация (нем. *Habilitation* от лат. *habilis* «способный, пригодный») — в некоторых европейских и азиатских странах процедура получения высшей академической квалификации, следующей после ученой степени (PhD). После прохождения процедуры хабилитации претенденту присваивается ученая степень хабилитированного доктора (лат. *doctor habilitatus, Dr. habil.*), которая дает право на занятие профессорской должности в университете.

менно с Венельтом два других ученых, английский физик Гарольд Вильсон (*Harold Albert Wilson*, 1874—1964) [23] и физик из Эрлангенского университета Н. Хель (*N. Hehl*) [24] также, обнаружили постоянство плотности тока. Разряд, когда катод не покрыт свечением, называется «нормальным», и катодное падение потенциала имеет постоянное значение, независимо от давления и тока в трубке. Если катод полый или трубчатый, то разряд остается в нормальной форме с большим сопротивлением, до тех пор, пока внутренняя и внешняя сторона катода не покроются свечением.

Если катод представляет собой закрытый цилиндр с отверстием на плоской поверхности, ближайшей к аноду, то с этой поверхности при понижении давления до некоторого уровня начинает образовываться разряд. При постепенном понижении давления наступит стадия, когда яркий линейный разряд пройдет через центр отверстия и свечение появится как на задней, так и на передней стороне пластины. По мере того, как давление становится все меньше и меньше, свечение распространяется все дальше и дальше по внутренней части цилиндра, и темное пространство, отделяющее его от металла, становится все шире и шире, и вся внутренняя часть заполняется светом. При очень низких давлениях это свечение исчезает, и пучок положительных лучей проходит через отверстие в цилиндр, при этом разность потенциалов намного больше, чем при высоких давлениях.

В 1903 г. Венельт экспериментально случайно обнаружил эмиссионную способность оксидов щелочноземельных металлов при высоких температурах, рис. 19. Во время экспериментов он подверг проверке закон испускания электронов нагретыми телами, открытый незадолго до этого английским физиком О. Ричардсоном.

Для экспериментов были выбраны образцы платиновой проволоки. Первый же опыт полностью подтвердил закон, но А. Венельт спустя некоторое время решил повторить эксперимент еще с одним образцом. Каково же было его удивление, когда платина стала испускать поток электронов, во много раз больший, чем накануне. Прибор, измерявший электронную эмиссию, едва не вышел из строя. Поскольку свойства металла не могли так резко измениться, оставалось предположить, что виновником электронного «шквала» является случайно попавшее на поверхность проволочки вещество с более высокой способностью к эмиссии электронов, чем платина. Но что же это за вещество? Ученый стал поочередно наносить на платину различные материалы, подозреваемые в изменении электронного потока, но все они без труда доказывали свою явную непричастность к этому делу. И когда А. Венельт уже решил, что докопаться до истины ему вряд ли удастся, он вдруг вспомнил, что в смазке насосной установки, при-

нимавшей «участие» в эксперименте, содержалась окись бария, которая могла случайно попасть на платиновую проволочку. Ученый вновь включил приборы и уже через несколько мгновений его радость не знала границ. Венельт доказал, что причиной этого явления может быть поверхностное загрязнение платиновой проволоки. Так было открыто вещество, которое по способности испускать электроны при нагреве не имеет себе равных.

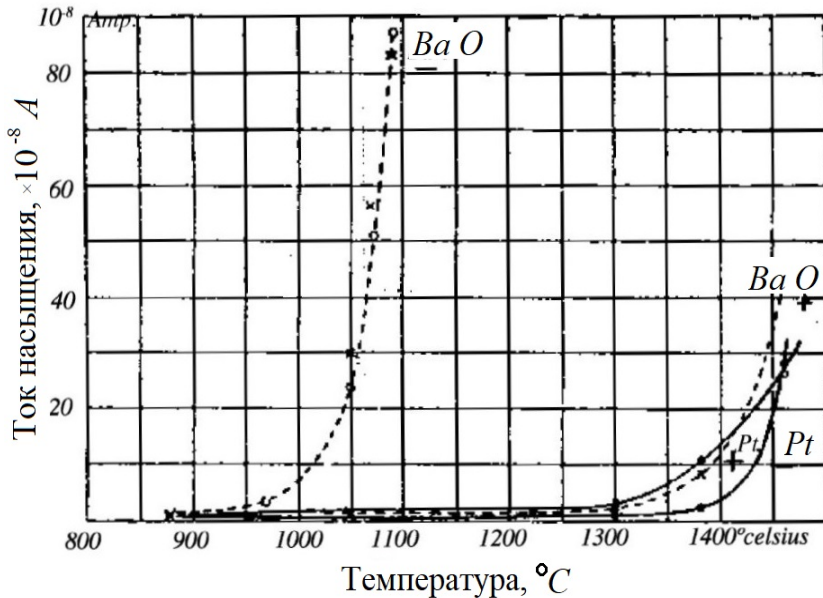


Рис. 19. Зависимость тока насыщения термоэлектронной эмиссии от температуры для чистой платиновой проволоки (сплошные кривые) и платиновой проволоки с покрытием BaO (штриховые кривые) для положительной и отрицательной полярности катода (процесс сначала происходит при очень низкой температуре!) согласно [25].

Fig. 19. Saturated emission current vs. temperature for pure platinum wire (solid curves) and BaO coated platinum wire (slashed curves) for positive and negative polarity of the cathode (onset a very low temperature!) according to [25]

Однако в достоверность полученного результата научный мир поверил не сразу [26]. После того как А. Венельт опубликовал результаты своих опытов, многие физики занялись их проверкой. Одно за другим начали появляться в печати сообщения о том, что А. Венельт сильно преувеличил эмиссионную способность окиси бария. Да и самому А. Венельту больше не удавалось подтвердить свое открытие. Однако, невзирая на это, он первым, предложил использовать окисные катоды в выпрямительных клапанах.

15 января 1904 г. Венельт подает заявку на получение патента на катодную трубку — выпрямитель (диод), состоящий из подогреваемого оксидного катода и холодного анода [27]. Патент на изобретение «Электрического клапана» (нем. *Elektrisches Ventil*) был получен уже в следующем году. В патенте Венельт приводит особенности катода с оксидным покрытием, ссылаясь на свою статью 1903 г. [26]. Предмет изобретения сформулирован следующим образом: «Электрический клапан, представляющий собой разрядную трубку с горячим катодом с металлическим покрытием и холодным анодом из любого металла». В патенте не приведен рисунок самого выпрямительного устройства и содержится только текст о выпрямлении токов низкой частоты таким устройством, по-существу указан способ осуществления этого процесса. В описании патента отмечается, что клапан способен передавать токи любой величины, что делает его особенно подходящим для преобразования токов переменного направления (однофазных и многофазных переменных токов) в токи одного и того же направления в соответствии с хорошо известными схемными решениями. Венельт не дал никаких подробностей о конструкции этого клапана и о его применении для каких-либо технических целей в вышеупомянутом описании своего изобретения.

В 1904 г. Венельт продолжил эксперименты по исследованию веществ повышающих эмиссионную способность катода. Он стал наносить на платиновую проволоку нитраты *Ca*, *Sr* и *Ba* и нагревать ее на открытом воздухе. Уже в июле 1904 г. выходит его статья [25] с результатами проведенных исследований по оксидным катодам. Он обнаружил, что оксиды щелочноземельных металлов имеют самую низкую работу выхода из 40 исследованных оксидов, и количественно измерил токи эмиссии *BaO* и *CaO* на платиновых проволоках в зависимости от температуры по сравнению с чистой платиной. Он наблюдал начало эмиссии уже при 875 °С для *BaO* и *CaO* по сравнению с началом эмиссии для чистой платины *Pt* при 1600 °С. Артур Венельт также обнаружил, что уравнение Ричардсона справедливо не только для металлов, но и для оксидных катодов. Его сотрудник Феликс Йенч (*Felix Hermann Ferdinand Jentsch*, 14.0.1882—10.11.1946) в 1908 г. измерил работу выхода нескольких оксидов [28]. Предложение Венельта об использовании оксидных катодов в вентилях выпрямителя нашло практическое воплощение в выпрямителях Siemens & Halske для заряда автомобильных аккумуляторов, рис. 20 [29].

Открытие Венельта нашло практическое применение только через 30 лет при производстве радиоламп для радиоприемников с питанием от электросети переменного тока. Катоды, покрытые соединениями щелоч-

ноземельных металлов, получили название «оксидные катоды». Такие катоды работают при температуре темно-красного каления 800—900 °С. На каждый ватт электроэнергии, затрачиваемый на их накал, они дают иногда до четверти ампера электронной эмиссии. Срок службы таких катодов достигает нескольких тысяч часов. В дальнейшем радиолампы стали изготавливаться с катодами из никеля с покрытием кальция, бария и стронция.

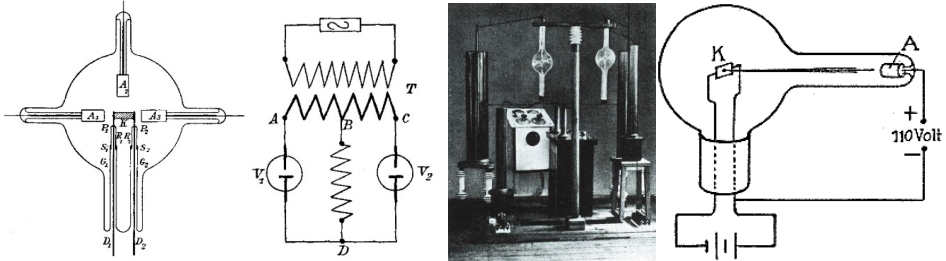


Рис. 20. Трехфазная выпрямительная трубка Венельта [29] с горячим катодом с оксидным покрытием и схема двухпериодного выпрямителя [29]. Установка (справа) получения постоянного тока при выпрямлении переменного тока по патенту Венельта [26].

Катодная трубка (справа) выпрямитель конструкции А. Венельта. 1904 г.

Fig. 20. Three-phase rectifier tube of Wehnelt [29] with a hot cathode with an oxide coating and a circuit of a two-period rectifier [29]. Installation (right) for obtaining direct current when rectifying alternating current according to the Wehnelt patent [26]. Cathode tube (right) rectifier designed by A. Wehnelt. 1904

Венельт усовершенствовал трубку Брауна в 1905 г. с помощью нагреваемого катода. Нить накала представляла собой узкую полоску платиновой фольги с небольшим пятном оксида кальция на ней. Небольшой диаметр пятна излучения обеспечивал хорошую фокусировку. Анод был сделан из алюминиевой проволоки. Пластика накалялась посредством тока вспомогательной батареи и соединялась с отрицательным полюсом источника электричества, в то время как положительный полюс был соединен с алюминиевой проволокой. Из раскаленного катода уже при разности потенциалов в 100—200 вольт начинали исходить сильные катодные лучи. Разность потенциалов использовалась только для направления и увеличения скорости лучей. При работе лампы с низкими анодными напряжениями, то есть с более медленными электронами, в отличие от ламп с холодным катодом, которым для газового разряда требовалось высокое напряжение, увеличивалась чувствительность к отклонению пучка электронов. На рис. 21 показано устройство катодной трубки Венельта [30].

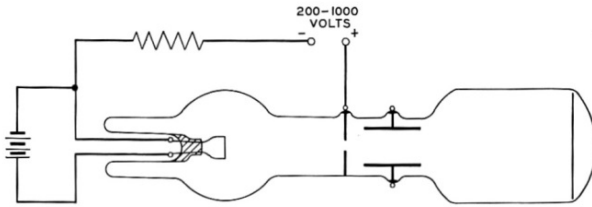


Рис. 21. Катодная трубка Венельта [30]. 1905 г.

Fig. 21. Wehnelt cathode tube [30]. 1905

Вскоре А. Венельт, основываясь на полученных результатах [22], сумел сделать важное усовершенствование катодной трубки с горячим катодом. Для концентрации электронного излучения он установил цилиндр с отверстием между катодом и анодом и подал на него отрицательный электрический потенциал, рис. 22. Изменяя силу заряда на этом электроде, можно было усиливать или ослаблять электронный поток с катода, делая точку на экране то более яркой, то тусклой. Цилиндрический электрод вскоре стали называть «венельт-цилиндр» (нем. *Wehnelt-Zylinder* или *Wehneltzylinder*).

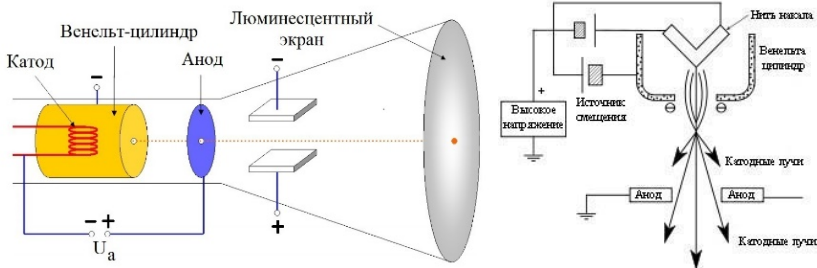


Рис. 22. Усовершенствованная трубка Брауна с горячим катодом и цилиндром Венельта. Современное устройство Венельт-цилиндра (справа).

Fig. 22. Improved hot cathode brown tube with Wehnelt cylinder. Modern device of the Wehnelt-cylinder (right)

Венельт-цилиндр по-существу представлял собой подогреваемый катод. У цилиндра Вельнета дно с отверстием можно трактовать как своеобразный управляющий электрод типа сетки, которая фокусирует пучок электронов, летящий к аноду. Сквозное отверстие, расположенное в центре цилиндра, имело диаметр, который обычно находился в диапазоне от 200 до 1200 мкм. Электроны, направление полета которых очень сильно отклонялись от оси пучка, равномерно отталкивались отрицательным потенциалом от стенок цилиндра и направлялись обратно к оси пучка. Цилиндр таким образом производил фокусировку электронного пучка. Сфокусированным пучком легче было проводить эксперименты, например, в тонкой катодной трубке. Ток пучка можно было контролировать с помо-

щью цилиндра Венельта, который ограничивал зону пространственного заряда катода и находился под отрицательным потенциалом по отношению к катоду. Цилиндр Венельта позволял значительно снизить ранее требуемое очень высокое анодное напряжение. Благодаря этому трубка Брауна получила дальнейшее развитие. К слову, А. Венельт ввел в употребление слово «электроника».



Рис. 23. Медаль Джона Скотта.

Fig. 23. John Scott Medal

В 1905 г. А. Венельт за свои научные исследования был отмечен престижной премией *John Scott Medal*, рис. 23. Аптекарь Джон Скотт из Эдинбурга учредил фонд в размере \$ 4000, который после его смерти в 1815 г. начал вручать медаль его имени и денежную премию. Медаль Джона Скотта существует до сих пор, ею награждаются как мужчины, так и женщины, чьи изобретения улучшили значительным образом «комфорт, благополучие и счастье человеческого рода». С 1919 г. эту награду вручает городской совет города Филадельфии согласно ежегодному списку номинантов, представленных Институтом Франклина. Эту премию в последующие годы получили такие известные радиотехники как, Р. Фессенден (*Reginald A. Fessenden, 1922*), Т. Эдисон (*Thomas Edison, 1929*), Ли де Форест (*Lee De Forest, 1929*), Г. Маркони (*Guglielmo Marconi, 1931*), Н. Тесла (*Nikola Tesla, 1934*) и И. Лангмюр (*Irving Langmuir, 1937*).

8. Заключение

Наряду с катодными лучами, наблюдаемыми при разрядах в сильно разреженных газах, был открыт целый ряд совершенно аналогичных лучей, которые все можно объединить общим термином — катодные лучи. Общим для всех них явилось то, что они представляют из себя потоки отрицательно заряженных частиц — электронов, тождественных в отношении величины заряда и массы, и различающихся лишь по величине скорости. Условия их возникновения позволяют выделить некоторые разновидности лучей: 1. Обыкновенные катодные лучи. 2. Ленардовы лучи. 3. Отраженные и вторичные катодные лучи. 4. Лучи от накаливаемых катодов. 5. Анодно-катодные лучи.

При помощи разряда в сильно разреженном газе можно получить катодные лучи лишь сравнительно больших скоростей. Пучки катодных лучей любой скорости и любой мощности получают другим способом, а именно используя для извлечения электронов из катода явление электронной эмиссии — выход электронов проводимости из накаливаемого металла в окружающую среду.

Системные эксперименты Ф. Ленарда по прохождению катодных лучей через вещество показали, что поглощение было примерно пропорционально его плотности и, кроме того, оно очень быстро уменьшалось с увеличением скорости лучей. Он доказал, что катодные частицы высокой энергии могут проходить сквозь атомы.

Открытия и изобретения в области катодно-лучевых технологий на рубеже XIX и XX веков сыграли основную роль в появлении первой усиленной электронной лампы — катодного реле конструкции австрийского физика Роберта фон Либена (*Robert von Lieben*, 05.09.1878—20.02.1913).

Список литературы

1. Crookes W. On radiant matter // *Chemical News*. 1879. Vol. 40, No. 1023. Pp. 91—93, 104—107, 127—131.
2. *Gesammelte Werke von Heinrich Hertz*, Band 1, Schriften vermischten Inhalts. Leipzig, 1895. S. XXIV.
3. Hertz H. Ueber eine die electriche Entladung begleitende Erscheinung // *Annalen der Physik und Chemie*. 1883. Band 19. S. 78—86.
4. Hertz H. Versuche über die Glimmentladung // *Annalen der Physik und Chemie*. 1883. Band 19. S. 782—816.
5. Григорьян А. Т., Вяльцев А. Н. Генрих Герц. 1857—1894. М.: Наука, 1968. 309 с.
6. Hertz H. Ueber den Durchgang der Kathodenstrahlen durch dünne Metallschichten // *Annalen der Physik und Chemie*. 1892. Band 45. S. 28—32.
7. Philipp L. On cathodic rays in Gases at the Atmospheric Pressure and in an Extreme Vacuum // *Scientific American Supplement*. May 6, 1893. No. 905. P. 14464—14465.
8. Lenard P. Ueber Kathodenstrahlen in Gasen von atmosphärischem Druck und im äussersten Vacuum // *Annalen der Physik und Chemie*. 1894. Band 51. No. 2. S. 225—267.
9. Lenard P. Ueber magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen // *Annalen der Physik und Chemie*. 1894. Band 52. S. 23—33.
10. Lenard P. Ueber die Absorption der Kathodenstrahlen // *Annalen der Physik und Chemie*. 1895. Band 56. S. 256—275.
11. Ebel Fred E. X-Rays (After Class Feature) // *Popular Electronics*. 1960. No. 10. P. 89—92, 128.
12. Röntgen, and the Discovery of X-Rays // *Nature*. April 7, 1934. P. 511.
13. Röntgen W. C. Über eine neue Art von Strahlen. Vorläufige Mitteilung. In: Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik-med. Gesellschaft, Würzburg. 1895. S. 137—147.
14. Röntgen W. C. Eine neue Art von Strahlen. 2. Mitteilung. In: Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physik-med. Gesellschaft, Würzburg. 1896. S. 11—17.
15. Röntgen W. C. Weitere Beobachtungen über die Eigenschaften der X-Strahlen. In: Mathematische und Naturwissenschaftliche Mitteilungen aus den Sitzungsberichten der Königlich

- Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. Physikalisch-Mathematische Klasse. 1897. S. 392—406.
16. Гельфер Е. Вчера наступило завтра. Как Альберт Эйнштейн боролся за европейский мир и теоретическую физику. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nplus1.ru/material/2018/03/28/albert-einstein-and-aryan-physics> (дата обращения 08.09.2020).
 17. Anrade E. N. da C. Obituaries Prof. P. Lenard // Nature. December 27, 1947. Vol. 160. P. 895—896.
 18. Hess Albert. Sur une application des rayons cathodiques à l'étude des champs magnétiques variables // Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Paris, 1894. Tome 119. P. 57—58.
 19. Braun F. Ueber ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme // Annalen der Physik und Chemie, Leipzig. 1897. Bd. 60, S. 552—559.
 20. Браун Ф. Мои работы по беспроволочной телеграфии и по электрооптике. Речь, произнесенная при получении премии Нобеля в Стокгольме 11 декабря 1909 г. С дополнениями автора. Перевод с рукописи Л. И. Мандельштама и Н. Д. Папалекси. Одесса : изд-во «Матезис», 1910. С. 27—28.
 21. Wehnelt A. Ein elektrolytischer Stromunterbrecher // Annalen der Physik. 1899. Band 68. No. 6. S. 234—272.
 22. Wehnelt A. Ueber die Verteilung des Stromes an der Oberfläche von Kathoden in Entladungsröhren // Annalen der Physik. 1902. Band 7. No. 2. S. 237—255.
 23. Wilson H. A. The current density at the cathode in the electric discharge in air // Philosophical Magazine. Series 6. 1902. Vol. 4. P. 608—614.
 24. Hehl N. Über die dimensionen der Gebilde an der Kathode // Physikalische Zeitschrift. 1902. Bd. 3. S. 547—552.
 25. Wehnelt A. Über den Austritt negativer Ionen aus Glühenden Metallverbindungen und damit zusammenhängende Erscheinungen // Annalen der Physik. 1904. Band 4. No. 8. S. 425—468.
 26. Wehnelt A. Über den Austritt negativer Ionen aus Glühenden Metallverbindungen und damit zusammenhängende Erscheinungen // Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Sozietät Erlangen. 1903. Band 5. S. 150—158.
 27. Wehnelt Arthur. Elektrisches Ventil. Deutsche Patentschrift Nr. 157845. Patentiert im Deutschen Reiche 15 Januar 1904.
 28. Jentzsch F. Über die Elektronenemission glühender Metalloxyde // Annalen der Physik. 1908. Vol. 27. S.129—156.
 29. Wehnelt A. Ein elektrische Ventilrohr // Annalen der Physik. 1906. Vol. 19. S.138—156.
 30. Wehnelt A. Empfindlichkeitssteigerung der Braunschen Röhre durch Benutzung von Kathodenstrahlen geringer Geschwindigkeit // Physikalische Zeitschrift. 1905. Band 6. No. 22. S.732, 733.

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. ORCID 0000-0003-0466-881X.