

УДК 621.37-621.39(091)

Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей

Пестриков В. М.

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

Получено: 20 сентября 2020 г.

Отрецензировано: 25 сентября 2020 г.

Принято к публикации: 29 сентября 2020 г.

Аннотация: *Феномен разряда электричества через разреженные газы изучался с конца XVII века. Во второй половине XIX века разряд электричества через разряженный газ стал темой интенсивных исследовательских экспериментов, прежде всего в Германии. Разрядные трубки и насосы, изобретенные И. Гейслером в 1850-х гг, и индукционная катушка, усовершенствованная Г. Румкорфом примерно в то же время, позволили многим физикам экспериментировать с катодными лучами. Отличительной чертой этих исследований было использование газоразрядных трубок с холодным катодом.*

Ключевые слова: *катодные лучи, трубка Гейслера, спектр тела, трубка Гитторфа, каналовые лучи, исследования Варли, эксперименты Крукса, кометы Гольдштейна.*

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Пестриков В. М. Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2020. Т. 3, № 2. С. 190—226.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011): Пестриков, В. М. Открытие и некоторые научные исследования катодных лучей / В. М. Пестриков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2020. — Т. 3, № 2. — С. 190—226.

Discovery and some scientific research of cathode rays

V. M. Pestrikov

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

Received: September 20, 2020

Peer-reviewed: September 25, 2020

Accepted: September 29, 2020

Abstract: *The phenomenon of the discharge of electricity through rarefied gases has been studied since the end of the 17th century. In the second half of the 19th century, the discharge of electricity through gas became the subject of intensive research experiments, primarily in Germany. Discharge tubes and pumps, invented by I. Geissler in the 1850s, and an induction coil, improved by H. Ruhmkorff at about the same time, allowed many physicists to experiment with cathode rays. A distinctive feature of these studies was the use of cold cathode gas discharge tubes.*

Keywords: *cathode rays, Geissler tube, body spectrum, Hittorf tube, channel rays, Varley's research, Crookes' experiments, Goldstein's comet.*

For citation (IEEE): V. M. Pestrikov “Discovery and some scientific research of cathode rays,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 3, no. 2, pp. 190–226, 2020. (In Russ.).

1. Введение

Некоторые из основных открытий, сделанных в физике в начале так называемой Второй научной революции в конце XIX века имели общий элемент. Прямым или косвенно общим элементом во всех этих открытиях был эксперимент по электрическим разрядам в газах. Обнаружение катодных лучей было следствием исследования разряда электричества через разреженные газы. Катодные лучи невидимы, но их присутствие было впервые обнаружено в ранних вакуумных трубках, когда лучи ударялись о стеклянную стенку трубки, возбуждая атомы стекла, и вызывали излучение света — свечение, называемое флюоресценцией. Явление разряда электричества через разреженные газы изучалось с конца XVII века. Это привело к появлению электроники, которая успешно стала развиваться с изобретением трубки Брауна.

В 1742 и 1743 гг. профессор Лейпцигского университета Иоганн Винклер (*Winkler Johann Heinrich*, 12.03.1703—18.05.1770) проводил эксперименты с электрическими разрядами в трубках с откачанным воздухом и первым придал им форму в виде светящихся букв.

Пытаясь выяснить, насколько хорошо вакуум проводит электричество, английский физик Уильям Ватсон (*Watson William*, 03.04.1715—10.05.1787) в 1751 г. сконструировал вакуумированную стеклянную трубку, содержащую две металлические пластины (электроды). Он сообщил, что разряд, наблюдаемый во время его экспериментов, был «самым восхитительным зрелищем... ярко-серебристого оттенка». В другом эксперименте с изогнутой стеклянной трубкой он наблюдал «дугу мерцающего пламени» [1].

В 1838 г. Фарадей, изучая электрический разряд при низком давлении в газоразрядной трубке, обнаружил темное пространство между тлеющим свечением у катода и положительным столбом, которое получило название «темное пространство Фарадея» (англ. *Faraday dark space*) [2]. Важной особенностью его открытия было то, что свечение при разряде было не непрерывным, а разделенным на яркие области вблизи электродов и темную область посередине, рис. 1. Фарадей предположил, что светимость сильно разреженного газообразного материала в вакуумной трубке при возбуждении электричеством является свойством вещества в четвертом состоянии, которое он назвал «лучистой материей» (англ. *radiant matter*).

Существование так называемого «темного пространства Фарадея» в газоразрядных трубках привлекло еще больший интерес к исследованиям световых эффектов из-за проводимости электричества через газы при очень низких давлениях. Такое внимание было связано главным образом из-за некоторых первоначальных наблюдений за существованием связи между снижением давления, расширением темного пространства и затуханием цвета у электродов.

Многие увлеченные наукой люди внесли свой вклад в развитие исследований разряда электричества в разреженных газах. Они ради любопытства проводили эксперименты и изобретали новые технологии. Оригинальная стеклянная разрядная трубка, разработанная и изготовленная Иоганном Генрихом Вильгельмом Гейсслером (нем. *Johann Heinrich Wilhelm Geissler*, 26.05.1815—24.01.1879) для наглядной демонстрации электрического разряда, способствовала не только открытию катодных лучей, но и новаторским конструкциям в области электроники и телекоммуникаций на протяжении десятилетий.

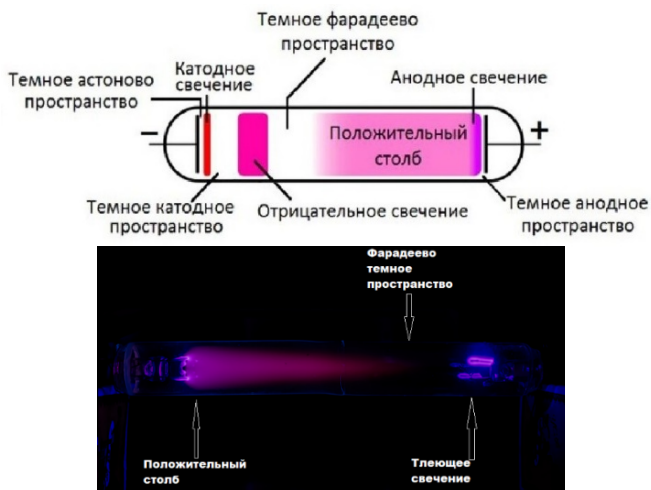


Рис.1. Структура и фото некоторых областей тлеющего разряда.

Fig. 1. Structure and photo of some areas of the glow discharge

2. Эксперименты Гассиота

Открытие катодных лучей было побочным продуктом исследования разряда электричества в разреженных газах. К середине девятнадцатого века было установлено, что прохождение электричества через частично откачанную стеклянную трубку вызывает свечение газа, цвет которого зависел от его химического состава и давления. Ниже определенного давления свечение представляло собой многослойный узор из ярких и темных полос.

Ученые любители электротехники в начале XIX века постоянно находились в поиске новых впечатляющих экспериментов, которые можно было бы использовать для того, чтобы сделать электричество видимым. Открытие Фарадеем «темного пространства» стало толчком к дальнейшему исследованию тлеющего разряда.

Использование металлических электродов внутри трубки является гораздо более поздним достижением в исследовании электрического разряда, если брать в качестве точки отсчета эксперименты Фарадея. В 1854 г. английский бизнесмен и ученый-любитель Джон Гассиот (*John Peter Gassiot*, 02.04.1797—15.08.1877) изобрел герметичную частично вакуумированную стеклянную трубку с впаянными в её концы платиновыми электродами для проведения своих обширных исследований электрической искры и наблюдения электрических разрядов в разряженном воздухе, рис. 2 [3].

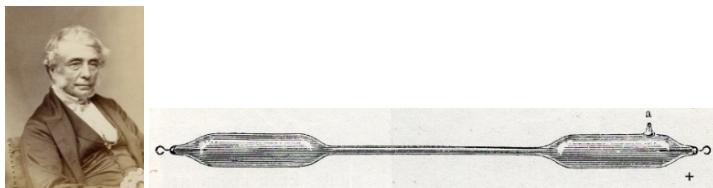


Рис. 2. Джон Гассиот (1865 г.) и его трубка для наблюдения электрических разрядов [4]. 1854 г.

Fig. 2. John Gassiot (1865) and his tube for observing electric discharges [4]. 1854

Интерес Гассиота к разряду был непосредственно стимулирован публикацией его друга Уильяма Роберта Грове¹ в 1852 г. о том, что разряд, который тот наблюдал, был «исчерчен поперечными несветящимися полосами...» и такие узоры сопровождают все электрические разряды в вакуумных трубках [5]. Гассиот в упомянутой выше статье [3] приводит результаты отработки методики проведения эксперимента с разрядной трубкой собственной конструкции (диаметр 5 см, длина 127 см) и индукционными катушками с разными характеристиками. Одну индукционную катушку ему дал Уильям Грове, а другую катушку прислал из Парижа и лично изготовил для него Генрих Румкорф. В статье [3] Гассиот отмечает, что с помощью указанных индукционных катушек он получил поперечные тусклые и темные полосы, которые впервые описал в своей статье мистер Грове. Далее Гассиот пишет: «Невозможно описать красоту этого эксперимента. Это нужно увидеть, чтобы это оценить, но те эксперименты, о которых я собираюсь упомянуть, объясняют возможности инструмента (имеется в виду катушка Румкорфа — авт.) и характер исследований, к которым он применим. Он открывает множество новых идей относительно необычного действия или природы индуцированных токов, и как таковые, вероятно, будут интересными для читателей *Philosophical Magazine*».

В своих первоначальных исследованиях Гассиот продемонстрировал, что, если проявить достаточно осторожности для достижения очень низкого давления, в торричеллиевом вакууме могут образовываться полосы. Он показал, что электрофорная машина производит такой же полосатый разряд, как и катушка Румкорфа с ячейкой Грове. Это еще раз подтвердило тождество этих двух источников электричества [6, с. 6]. Гассиот также заметил, что мощный электромагнит разделяет полосы на две отдельные колонки [6, с. 15]. Статья [6], в которой Гассиот объявил об этих

¹ Уильям Роберт Грове (также Гроув и Гров; англ. *William Robert Grove*, 11.07.1811—01.08.1896) — английский юрист, физик и химик. Первым в Англии использовал катушку Румкорфа для создания электрического разряда в газе при низком давлении. Изобрёл оригинальный гальванический элемент, отличный от элемента Вольты.

открытиях, была удостоена чести стать Бейкерианской лекцией² Королевского общества в 1858 г.

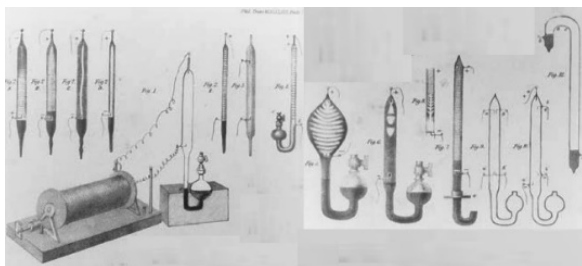


Рис. 3 Общий вид оборудования в экспериментах Гассиота по исследованию катодных лучей [6]. 1858 г.

Fig. 3 General view of the equipment in the experiments of Gassiot on the study of cathode rays [6]. 1858

В бейкерианской лекции Гассиот сообщил об отклонении электрических разрядов в разреженных газах при воздействии на них как магнитного, так и электрического полей. Это было раннее наблюдение явления катодных лучей, их открытие обычно приписывают немецкому профессору физики Юлиусу Плюккеру (нем. *Julius Plücker*, 16.06.1801—22.05.1868) из Боннского университета. Хотя сам Плюккер в своей статье [7] отмечает, что влияние магнитного поля на катодные лучи он увидел у Гассиота: «Если прикоснуться к трубке в ее темном месте рядом с отрицательным электродом слабым подковообразным магнитом, то система белых облаков втянется в темное пространство; прекрасное явление, которое я видел у мистера Гассио, но которое я до этого не мог наблюдать ни одной из трубок Гейсслера». Эти данные (наряду с данными Плюккера) явились первым доказательством того, что «катодные лучи» несут электрический заряд и могут быть частицами. Заметим, что Гассиот опубликовал четыре статьи об исследованиях катодных лучей. В статье из этого цикла его работ, вышедшей в 1859 г., следует фундаментальный вывод: «...изменения электрического сопротивления внешней цепи изменяют разряд и создают световой разряд, который на самом деле является прерывистым, хотя иногда он кажется непрерывным» [8]. На рис. 4 представлены виды светового разряда в экспериментах Гассиота 1862 г., подтверждающие его прерывистость (расслоение) [9].

² Бейкерианская лекция (англ. *Bakerian Medal and Lecture*) — награда, ежегодно присуждаемая Лондонским королевским обществом за вклад в развитие естествознания. Является одной из старейших научных премий (присуждается с 1775 года). В награду входит 10 тысяч фунтов стерлингов и медаль.

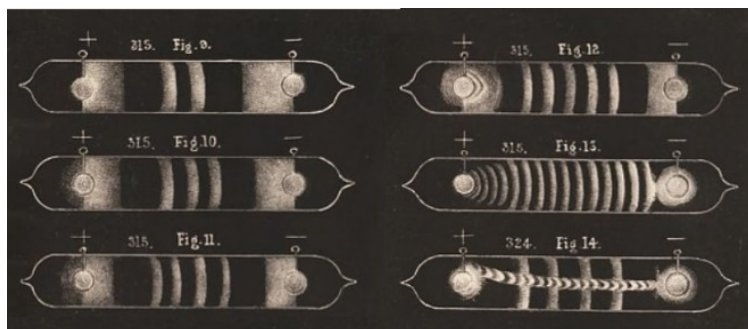


Рис. 4. Виды светового разряда в экспериментах Гассиота, показывающие его прерывистость (расслоение) [9]. 1862 г.

Fig. 4. The types of light discharge in the experiments of Gassiot, showing its discontinuity (stratification) [9]. 1862

3. Трубки Гейслера

Разрядными трубками типа трубок Гассиота заинтересовался немецкий стеклодув и механик Боннского университета Иоганн Гейслер, когда их увидел у своего брата Фридриха, который занимался производством инструментов в Амстердаме. Фридрих изготавливал трубки, заполненные парами ртути, для голландского математика и физика Фолькерта Симона Мартена ван дер Виллигена³ (*Volkert Simon Maarten van der Willigen*, 1822—1878).

Развитие ртутно-поршневых насосов было главным фактором в достижении более низких давлений. Первый шаг был сделан в 1854 г. в Боннском университете Юлиусом Плюккером, который попросил Генриха Гейслера спроектировать стеклянный насос с использованием ртутного поршня для проведения экспериментов по газовым разрядам низкого давления.

В 1855 г. Иоганн Гейслер построил насос, в котором столб ртути действовал как поршень, создавая лучший вакуум, чем это было возможно ранее. Ртутный насос позволил достичь разряжения воздуха 1—2 мм рт. ст. Насос впервые был описан в брошюре Теодора Майера, опубликованной в 1858 г. [10]. Майер был помощником Плюккера.

Два года спустя, в 1857 г., благодаря новой технологии вакуумирования Гейслер изготовил усовершенствованную герметичную двухэлектродную газонаполненную стеклянную трубку высокого вакуума. Для подсоединения источника питания в противоположные концы трубки бы-

³ Виллиген в 1854 г. проводил эксперименты с гальванической дугой.

ли впаяны короткие платиновые проволоки, которые имели температурный коэффициент объемного расширения⁴ при нагревании близкий к стеклу ($\beta = 25^{-10} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), рис. 5. В стеклянном корпусе трубки имелось отверстие, через которое откачивался воздух. Эти вакуумные трубки Гейсслера нового поколения сделали возможным исследование катодных лучей.

Если к металлическим электродам трубки подвести высокое напряжение от полюсов спирали Румкорфа или гальванической батареи, состоящей из нескольких тысяч пар элементов, то внутри трубки можно наблюдать свечение по всей её длине с характерным цветом, а не световую дугу, начинающуюся у катода и заканчивающуюся у анода, как в экспериментах Фарадея. Цвет свечения в трубке Гейсслера зависел от состава газа и разряджения.



Рис. 5. Иоганн Гейсслер, его газоразрядные трубки различной конструкции (конец XIX в.) и подключение трубки к катушке Румкорфа.
Fig. 5. Johann Geissler, his gas-discharge tubes of various designs (late 19th century) and the connection of the tube to the Rumkorff coil

Трубки производились в мастерской научных инструментов, которую Гейсслер открыл в Бонне в 1852 г. Позднее эти трубки стали называться газоразрядными трубками, но в большинстве случаев они известны как трубки Гейсслера, благодаря высокому качеству произведенной продукции.

Гейсслер изготовлял трубки самых разнообразных форм и художественного оформления. Впечатляющие цветовые эффекты могли быть созданы с использованием различных газов и материалов. Поэтому трубки

⁴ Коэффициент расширения металла должен быть больше коэффициента расширения стекла. Это необходимо для того, чтобы внутренние напряжения, возникающие в направлении, перпендикулярном к плоскости контакта стекло — металл, имели сжимающий характер.

Гейсслера использовались за пределами лаборатории в качестве объектов зрелищ и развлечений, например, они светились в театральных диадемах, которые ярко блестели в балетных представлениях.

В середине XIX в. трубки Гейсслера использовались не только для развлечений, но и для научных исследований. Например, когда Генрих Герц имел дело с электрическим разрядом, то ему пришлось отметить это отличие в извинительном тоне в письме к отцу в июне 1882 года: «Я занимаюсь в течение дня и до вечера световыми явлениями в разряженных газах в так называемых трубках Гейсслера, но Вы не думайте, что это те предметы, которые обычно используют во время зрелищ».

Трубки Гейсслера впервые были использованы для научных исследований в Боннском университете. Гейсслер тесно сотрудничал с университетом, в котором он работал механиком. Производимые в его мастерской устройства были предназначены не только для научных сотрудников в области физики, но и других научных направлений, таких как химия, медицина, физиология и минералогия. У него был длинный международный список клиентов⁵, который сформировался за время его деятельности. Его работа высоко ценилась в Боннском университете и в 1868 г. Гейсслер был удостоен звания почетного доктора этого учебного заведения.

Усовершенствованные трубки Гейсслера работали от электрических машин или индукционных устройств. Для их работы требовалось минимальное напряжение величиной 2910 В [11]. Вначале разрядные сосуды были настоящими трубками, но вскоре это слово в первую очередь стало относиться к их функции, а не к форме.

4. Эксперименты Юлиуса Плюккера

В Боннском университете у Иоганна Гейсслера сложились рабочие отношения с известным ученым математиком Юлиусом Плюккером, который в 1847 г., обескураженный отсутствием признания в области аналитической геометрии, отвернулся от математики и занялся экспериментальной физикой. Это научное направление у Плюккера первоначально являлось своеобразным хобби. Его исследовательская программа базировалась на работах Майкла Фарадея, с которым он переписывался в течение 15 лет и чья теория электромагнетизма стала руководящим принципом Плюккера.

В 1858 г. Гейсслер сделал несколько инструментов для Плюккера, в частности, разрядные трубки новой конструкции. Эти трубки Плюккер часто называл «трубками Гейсслера».

⁵ В 1859 г. Гейсслер совместно с русским химиком Д. И. Менделеевым (1834—1907) разработал пикнометр — физико-химический прибор для измерения плотности веществ в газообразном, жидком и твердом состояниях.

Плюккер быстро применил усовершенствованные трубки для исследования электрических разрядов. Он исследовал разряд в гейсслеровых трубках при воздействии на него самых разнообразных факторов: разреженных газов при различной величине давления, электрического напряжения и температуры, формы трубки и материала электродов, а также влияние магнитного поля [7]. В 1858 г. Юлиус Плюккер описал вариант вакуумной трубки, которую И. Гейсслер изготавливал с 1857 года, рис. 6.

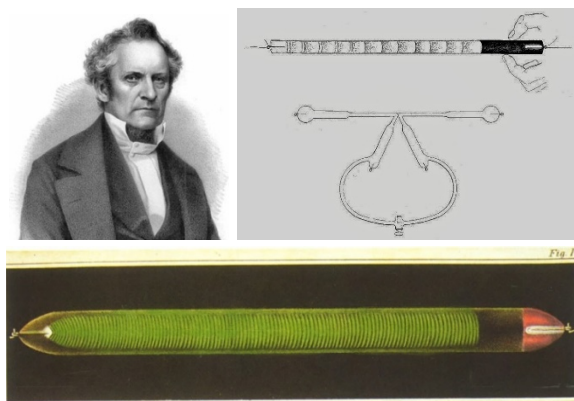


Рис. 6. Юлиус Плюккер (1856 г.) и некоторые общие виды трубок Гейсслера, которые использовал в своих экспериментах Плюккер [7].

Fig. 6. Julius Plucker (1856) and some general types of Geissler tubes that Plucker used in his experiments [7]

В 1859 г. Юлиус Плюккер наконец обнаружил с помощью трубки Гейсслера лучи, которые впоследствии были названы «катодными лучами». Он заметил, что если катод сделан в виде острия, то свечение имеет форму шнура, отходящего от катода. Этот «шнур», по его мнению, представляет поток заряженных частиц, который летит от катода к аноду. Он также установил, что поток заряженных частиц отклоняется магнитным полем и во время электрического разряда стекло возле катода начинает светиться. Был отмечен эффект свечения в разрядной трубке в зависимости от чистоты вакуума. Другими словами, он определил, что проводимость газа зависит от его концентрации в трубке и возрастает, если часть газа из трубки откачать. Если увеличивать разрежение в трубке, то вблизи катода появляется темное пространство («катодное пятно»), которое при дальнейшем откачивании газа расширяется и заполняет все пространство трубки. В результате этого свечение в трубке прекращается [12].

В одном из экспериментов Плюккер исследовал электрический разряд в трубках Гейсслера различной формы, которые были заполнены раз-

ными газами (водородом, азотом и гелием). В результате он обнаружил, что цвет и спектр света, излучаемого во время разряда, зависят от типа газа в трубке и температуры во время разряда. Плюккер был одним из первых, кто исследовал спектры излучения газов. Из полученных результатов Плюккер сделал вывод, что полученные световые спектры излучения характерны для химических веществ, и он был убежден в том, что по их изменениям можно получить информацию о молекулярном строении вещества.

Цикл исследований Плюккер провел в тесном сотрудничестве с Гейсслером. Плюккер как математик не обладал способностями экспериментатора, поэтому Гейсслер кроме исследовательской работы решал ещё и сложные технические задачи экспериментального характера. Стиль работы Плюккера был интуитивным, его эксперименты были направлены на умение исследовать сложные и захватывающие эффекты. К теоретическим толкованиям или даже к применению привычной ему математики Плюккер в этих работах никогда не прибегал.

Перед проведением эксперимента они тщательно обсуждали его методику и необходимое оборудование для него, которое должен был изготовить Гейсслер. Иоганн Гитторф, ученик Плюккера, отмечал [13]: «...Плюккер никогда не достигал большой ловкости рук в качестве экспериментатора. Однако у него всегда были очень четкие представления о том, что нужно, и он обладал высокой степенью способности отдавать другим свои идеи, вдохновлять их и воплощать их в жизнь».

Плюккер опубликовал девять статей о проведенных исследованиях за период 1858—1862 г., которые стали классическими, но ни в одну из них он не включил в качестве соавтора Гейсслера, на что тот очень обижался. В серии публикаций Плюккер собрал большое количество свойств газового разряда. Они состояли из непрерывного списка описаний тестов и различных соображений, но без общей темы. Общий вид представленных им исследований имеет характер записей лабораторных книг, а не систематического резюме. Хотя Плюккер был математиком, однако, у него не возникало желания установить законы, которые могли бы быть сформулированы математически. С другой стороны, в его сборниках приводится описание экспериментов и результатов по влиянию на разряд размера и формы трубок, материала катода и магнитных полей. Все эти описания занимают более 200 страниц [14].

В 1864 г. широкой аудитории (на собрании немецких натуралистов и врачей) трубка Гейсслера была представлена берлинским физиком Иоганном Кристианом Поггендорфом⁶ (*Johann Christian Pogendorff*, 1796—

⁶ С 1824 года Поггендорф начал издавать физико-химический журнал «*Annalen der Physik und Chemie*», который вёл до самого конца 1860 г.

1877). Гейслер по этому случаю также продемонстрировал свой ртутный воздушный насос. Немецкое химическое общество в некрологе Гейслера отметило, что он всегда вкладывал в свои заказные инструменты больше своих идей, чем его клиенты просили [15].

5. Трубки Гитторфа

В исследованиях Плюккера по электрическому разряду в трубках Гейслера принимал участие его ученик и сотрудник Иоганн Вильгельм Гитторф (нем. *Johann Wilhelm Hittorf*, 27.03.1824—28.11.1914), профессор физики и химии в университете Мюнстера⁷, рис. 7. В начальный период работы в университете Гитторфу из-за отсутствия и ограниченности денег в университете пришлось истратить большую часть своих собственных средств на оснащение физической лаборатории оборудованием.



Рис. 7. Иоганн Вильгельм Гитторф (1893) и современный вид университета Мюнстера.

Fig. 7. Johann Wilhelm Hittorf (1893) and the modern view of the University of Münster

В этой исследовательской лаборатории он провел обширные исследования газовых разрядов в специальных трубках собственной конструкции (трубки Гитторфа) с «абсолютным вакуумом» еще в 1865 г. В экспериментах было использовано 32 трубки разных видов и конструкций. Особенностью трубок Гитторфа было то, что они были больше в диаметре трубок Гейслера и имели на стеклянной поверхности от 1 до 5 электродов для подачи напряжения, с целью воздействия на энергетические лучи, исходящие от отрицательного электрода (катода). Трубки Гитторфа, кроме дополнительных электродов, имели в стеклянном корпусе отвод для присоединения вакуумного насоса и два электрода для соединения с источни-

⁷ Это один из крупнейших университетов Германии в городе Мюнстер (нем. Münster, земля Северный Рейн-Вестфалия). Основан 16 апреля 1780 г. Носит имя кайзера Германии Вильгельма II. (нем. Westfälische Wilhelms-Universität, сокр. WWU).

ком высокого напряжения с помощью катушек индуктивности. Он ввел название «катодные трубки» для любых газоразрядных трубок [16].

Гитторф, используя насос Sprengel⁸, сумел создать в разрядных трубках достаточно высокий вакуум (менее 0,001 мбар). Это позволило в 1869 г. увидеть «лучи свечения» через стекло и установить, что электрический разряд в вакуумных трубках (разреженном газе) сопровождается лучами свечения (сияющими лучами). Эти лучи впоследствии получили название катодных («катодные лучи»). С этого момента он начал системное изучение лучей свечения. До публикации своих исследований Гитторф показал свои трубки Гейсслеру, который скопировал устройства и начал их производство для продажи.

Гитторф благодаря исследованиям с трубками своей конструкции пришел к выводу: *что-то* вытекает из отрицательных электродов (катодов), наиболее четко это видно у точечных катодов, рис. 8. Это *что-то*, попадая на стекло перед катодом трубки, заставляет его флюоресцировать и бросает резкую тень от предмета, находящегося в просвечиваемом пространстве, что указывает на линейное распространение этого *чего-либо*. Этот эффект Гитторф заметил еще до английского физика и химика Уильяма Крукса (англ. *Sir William Crookes*, 17.06.1832—04.04.1919).

Источником этого света являлся светящийся слой, покрывавший катод. Гитторф предположил, что «свечение является процессом, в котором происходит протекание светового потока между частицами газа и частицами в катоде». Изучение этого светового потока, идущего от катода к аноду, показало, что он состоит из отрицательных зарядов. Этому потоку Гитторф дал название «лучи отрицательного света». Рассмотренное излучение не зависело от местоположения анода. В отличие от обычного света, на световой луч или катодный свет оказывает воздействие магнит, например, тень можно сместить или исказить.

В 1869 г. Гитторф, получил в разрядной трубке вакуум со степенью разрежения ниже 1 мм рт. ст. и, заметил, что темное катодное пространство быстро распространяется по всей трубке, вследствие чего стенки трубки начинают сильно флюоресцировать. Он подметил, что свечение трубки смещается под действием магнита.

Построив L-образную трубку с электродами на двух концах, Гитторф смог установить, что свечение ограничивается плечом, в котором

⁸ В 1862 г. профессор Рижского политехнического училища А. Теплер (нем. *August Joseph Ignaz Toepfer*; 07.09.1836 - 06.03.1912) изобрел усовершенствованную конструкцию насоса Гейсслера, а в 1865 г. немецкий химик Г. Шпренгель (нем. *Hermann Johann Philipp Sprengel*; 29.08.1848 – 14.01.1906), работавший на химическом заводе в Кеннингтоне (Англия), изобрел насос, в котором цепочка капель ртути засасывала порции газа в стеклянную трубку и отправляла газ прочь.

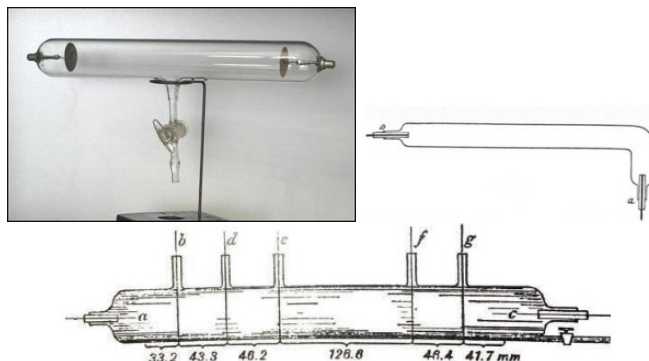


Рис. 8. Катодные трубки конструкции Иоганна Гитторфа.

Fig. 8. Cathode tubes designed by Johann Gittorf

находится катод, рис. 8. Он заметил, что «если какое-либо тело помещается в пространство, заполненное светом свечения [исходящим от отрицательного электрода], то оно бросает резкую тень на флюоресцентную сторону» [16]. Из этого был сделан вывод, что свечение генерируется от точечного катода и распространяется по прямым линиям. «Поэтому можно говорить о прямолинейных траекториях или лучах свечения, а также рассматривать любую точку катода как источник конуса лучей» [16].

Гитторф в статьях описал свойства катодных лучей и указал, что их интенсивность связана с понижением давления в газоразрядной трубке. Гитторфом было установлено что нагревание отрицательного электрода облегчает разряд в вакууме, то есть этот электрод является источником лучей [17]. В этом случае электрический ток в вакууме возникает за счет термоэлектронной эмиссии электрода (катода) и при меньшем значении приложенного напряжения к электродам катодной трубки, если бы не было подогрева катода.

Важным оказался наблюдаемый факт того, что если катод выполнен из платины, то участок поверхности стекла рядом с ним покрывается тонким слоем этого металла.

Предположение Гитторфа о волновой природе «лучей отрицательного света», исходящих от катода, стало отправной точкой для почти тридцатилетней полемики вокруг природы этого излучения, которая свелась на нет после «открытия электрона» Дж. Дж. Томсоном (англ. *Sir Joseph John Thomson*, 18.12.1856—30.08.1940).

Через 10 лет после публикации работ И. Гитторфа, совершенно независимо от него, после изучения электрического разряда в разрежен-

ных газах Уильям Крукс пришел к тем же результатам, которые затем были изложены им в его сочинении о лучистом состоянии материи (1879 г.). Возможный вариант идентификации катодных лучей как потока электронов был дан позже Дж. Дж. Томсоном (1897 г.).

Через 40 лет о работах Гитторфа вспомнил известный радиотехник Майкл Пупин (серб. *Михајло Идворски Пупин*; 22.09.(04.10.)1858—12.03.1935), профессор электромеханики Колумбийского университета в Нью-Йорке, выступая в январе 1927 года с речью на открытии конференции Американской ассоциации содействия развитию науки. Он сказал, что героями радиовещания являются Клерк-Максвелл и Гитторф. Работа Маркони была названа «простым выводом», в то время как трехэлектродная лампа была «умелым приложением известных явлений». Далее Пупин отметил, что пророчество даже самого возвышенного оптимиста двадцать пять лет назад не приблизилось ни к каким достижениям, которые действительно были достигнуты, и что самый замечательный факт, связанный с этими великими достижениями, заключается в том, что все они основаны на простом явлении, которое наблюдал неизвестный немецкий физик по имени Гитторф более сорока лет назад. «Его эксперимент заключался в следующем: если в вакуумной трубке один из электродов нагревается до высокой температуры, то наименьшая электродная движущая сила может создавать электрический ток, идущий через вакуум, тогда как, если оба электрода холодные, возникает мощная индуктивность. Катушка, создающая огромные электрические силы, необходима для того, чтобы вообще генерировать любой ток» [18].

Есть несколько причин, по которым работы Гитторфа не получили должного внимания, которого они заслуживают. С одной стороны, в них присутствует множество эмпирических подходов, которые затрудняют их чтение, что не позволяет четко прояснить закономерности. С другой стороны, Гитторф был, по-видимому, скромным и стеснительным в публичности человеком, который, кроме того, преподавал в одном из непрестижных немецких университетов. Он работал в католической академии, которая, по сути, обучала преподавателей и священников. В 1875 г. академия получила право присуждать докторские степени, то есть через 10 лет после начала исследований Гитторфа. Поэтому у Гитторфа почти не было настоящих учеников, которые могли бы продолжить его научное направление. Многие из его экспериментов с аппаратурой, разработанной им для их проведения, до сих пор связывают с именем талантливого популяризатора Уильяма Крукса, который умело их копировал и знал в этом толк.

6. Исследования Е. Гольдштейна

В начале 1860-х гг. Плюккер со своим бывшим учеником Гитторфом поставили под сомнение важный принцип для спектрального анализа, который содержал утверждение о том, что каждое вещество имеет характерный спектр. Они обнаружили, что некоторые вещества могут иметь разные спектры. Существует определенное количество элементарных веществ, которые при разном нагревании дают два вида спектров совершенно другого характера, не имеющих ни одной линии или какой-либо общей полосы.

Это открытие имело большое значение, поскольку представляло новый взгляд на основы спектрального анализа. Сначала этот факт практически не привлекал к себе внимание. После смерти Плюккера в 1868 г. его приемником в университете Бонна стал ассистент профессора Адольф Вюльнер (нем. *Adolf Wüllner*, 13.06.1835—06.10.1908), рис. 9. Он продолжил исследовать множественные спектры разряда, и именно его работа положила начало научной дискуссии между исследователями [19]. Вюльнер предположил, что происхождение различных спектров зависит от типа разряда. Было проведено различие между «непрерывными» и «прерывистыми» разрядами, в зависимости от того, протекал ли ток через газовую массу или был прерывистым с более или менее короткими промежутками. Из своих экспериментов Вюльнер пришел к выводу, что линейный спектр возникает всегда, когда имеет место прерывистый разряд, и соответственно полосовой спектр возникает всякий раз, когда возникает непрерывный разряд [20].

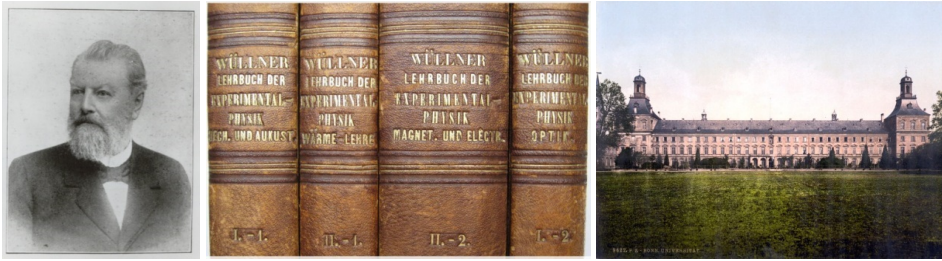


Рис. 9. Адольф Вюльнер, его учебник экспериментальной физики в 4 томах, изданный в Лейпциге (1863/1865 гг.) и Дворец выборщиков Бонна, главное здание Боннского университета (около 1900 г).

Fig. 9. Adolf Wüllner, his textbook of experimental physics in 4 volumes, published in Leipzig (1863/1865) and the Bonn Electoral Palace, the main building of the University of Bonn, around 1900

В это время пожалуй единственным, кто подробно изучил исследования Гитторфа и их продолжил, был немецкий физик Евгений Гольдштейн (нем. *Gotthilf-Eugen Goldstein*, 05.09.1850—26.12.1930). В 1870 г.

он провел свое собственное исследование с газоразрядными трубками и дал испускаемым катодом лучам название «катодные лучи». Словосочетание «катодные лучи» было выбрано Гольдштейном из совокупности терминов, среди которых был и указанный, а также «отрицательный свет», «катодный свет» и «светящиеся лучи света». Все эти термины употреблял пять лет до этого в своих исследованиях Гитторф.

Гольдштейн был учеником и другом физика Германа фон Гельмгольца⁹ (рис. 10), который поддерживал его в этих исследованиях. Гельмгольц представил работу Гольдштейна в Королевской Прусской академии наук в Берлине (нем. *Königlich-Preußische Akademie der Wissenschaften*) 13 августа 1874 года [21]. Эта работа под названием «О наблюдениях газовых спектров» (нем. *Über Beobachtungen am Gasspektris*) стала первой научной публикацией Гольдштейна и прелюдией к более чем пятидесятилетнему занятию им направлением, которое он сформулировал, как «электрический разряд в разряженных газах». В статье подробно рассмотрен результат Вюльнера. Гольдштейн использовал различные источники электричества (индукторы, лейденские банки) и смог получить разряды, которые противоречили теории Вюльнера. Например, он смог создать непрерывный разряд, который показывал линии и полосы. Гольдштейн глубоко исследовал проблему и пришел к выводу, о том, что «появление спектров... не зависит от формы, в которой возникают создающие их разряды» [22].

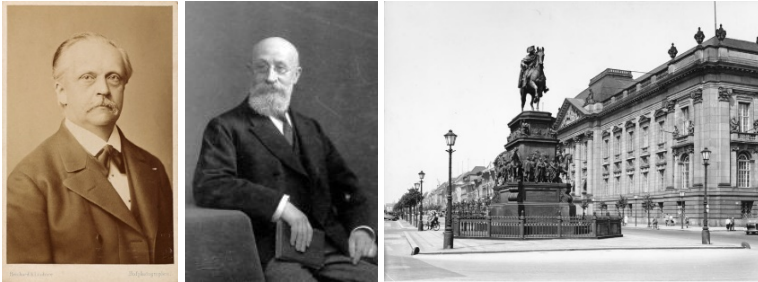


Рис. 10. Герман фон Гельмгольц (слева) и Евгений Гольдштейн (1886 г.).

Государственная библиотека Унтер Линден, место пребывания Академии наук Пруссии до 1945 г. Берлин.

Fig. 10. Hermann von Helmholtz (left) and Eugene Goldstein (1886). State Library Unter Linden, seat of the Prussian Academy of Sciences until 1945. Berlin

Гольдштейн открыл несколько важных свойств катодных лучей, которые способствовали их последующей идентификации как первой суб-

⁹ Полное имя — Герман Людвиг Фердинанд фон Гельмгольц (нем. *Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz*, 31.08.1821—08.09.1894).

атомной частицы — электрона. В 1876 г. он обнаружил, что катодные лучи обладают энергией, распространяются прямолинейно, а когда нет внешних воздействий, то они испускаются перпендикулярно металлической поверхности катода, независимо от местоположения анода. Он попытался измерить скорость катодных лучей с помощью доплеровского смещения спектральных линий в свечении, испускаемом трубками Крукса [23].

Гольдштейн не имел постоянной работы по физике, но благодаря своему другу, директору Берлинской обсерватории Вильгельму Юлиусу Фёрстеру (*Wilhelm Julius Foerster*, 16.12.1832—18.01.1921) он был назначен на должность физика в этом учреждении по контракту. Здесь он проработал с 1878 по 1890 год. В 1880 г. Гольдштейн смог экспериментально доказать влияние магнитных полей на катодное излучение.

В 1881 г. Гольдштейн защитил докторскую диссертацию (Ph.D.) на тему «Новая форма электрического отталкивания» (нем. *Eine neue Form elektrischer Abstoßung*), в которой исследовал электростатическое отклонение катодных лучей. Несмотря на свои ранние успехи, Гольдштейн не смог получить работу или назначение на должность в университете после присвоения докторской степени, однако благодаря своему учителю Герману Гельмгольцу он получил некоторую финансовую поддержку от Академии наук. Через год, в 1882 г., им было установлено, что катодные лучи имеют диффузное отражение от анода.

Гольдштейн помимо своей чисто физической работы в Берлинской обсерватории занимался и астрофизическими исследованиями в Потсдамской астрофизической обсерватории (*Astrophysical Observatory in Potsdam* — АОП). В этой обсерватории ему удалось с 1888 по 1890 год получить краткосрочную реальную исследовательскую должность в качестве физика с постоянным бюджетным финансированием. За это время он создал физический кабинет в берлинской «Урании»¹⁰. В Потсдамской обсерватории он провел большую часть своей карьеры, в которой в 1927 г. возглавил астрофизическую секцию. С 1890 по 1896 год Гольдштейн работал в качестве гостя в *Physikalisch Technische Reichsanstalt* (Физико-технический национальный институт).

В 1886 г., работая в физической лаборатории Потсдамской обсерватории, он обнаружил, что трубки с перфорированным катодом также излучают свечение на конце катода [24]. Гольдштейн пришел к выводу, что

¹⁰ Урания — научное общество, основанное в Берлине в 1888 г. по инициативе Александра фон Гумбольдта (*Alexander von Humboldt*), Макса Вильгельма Мейера (*Max Wilhelm de Meyer*) и Вильгельма Фёрстера (*Wilhelm Foerster*). Целью его создания было донести до широкой общественности самые последние научные открытия.

в дополнение к уже известным катодным лучам, которые впоследствии были распознаны как электроны, движущиеся от отрицательно заряженного катода к положительно заряженному аноду, существует еще один луч, который движется в противоположном направлении, рис. 11. Поскольку эти последние лучи проходили через отверстия или каналы в катоде, Гольдштейн назвал их канальными лучами (нем. *kathodenstrahlen*). Эти лучи, иногда называют «анодными лучами» или «положительными лучами», так как они состоят из положительных ионов. В канальных лучах, в отличие от отрицательных частиц в катодных лучах, возникает тлеющий разряд, цвет которого варьировался в зависимости от природы газа в трубке. Например, цвет разряда в воздухе был желтым, в водороде — розовый, а в углекислом газе — зеленовато-серый. Гольдштейн также продемонстрировал, что лучи канала не подвержены влиянию слабых магнитных полей, расположенных вблизи разрядной трубки.

В 1886 г. Гольдштейн опубликовал в отчетах сессий Берлинской академии наук доклад, озаглавленный «О форме излучения, еще не исследованных на катоде индуцированных зарядов» (нем. *Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathodeinducierter Entladung*) [25].

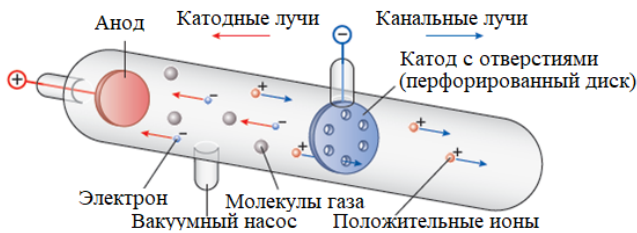


Рис. 11. Схема движения катодных и канальных лучей в вакуумной трубке.

Fig. 11. A diagram of the movement of cathode and channel rays in a vacuum tube

В 1898 г. ученик Гольдштейна, Вильгельм Вин (*Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Franz Wien*, 13.01.1864—30.08.1928), провел обширные исследования лучей канала. Его работа, со временем, стала основой для масс-спектрометрии¹¹. Он показал, что лучи канала могут отклоняться сильными электрическими и магнитными полями, при этом поток положительно заряженных ионов отклоняется магнитным полем с силой, пропорциональной отношению массы частицы к её заряду.

¹¹ Масс-спектрометрия — метод исследования и идентификации вещества, позволяющий определять концентрацию различных компонентов. Основой для измерения служит ионизация компонентов, позволяющая физически различать компоненты на основе характеризующего их отношения массы к заряду и, измеряя интенсивность ионного тока, производить отдельный подсчёт доли каждого из компонентов (получать *масс-спектр* вещества).

Когда Вин использовал наложенные параллельные электрические и магнитные поля для отклонения ионов, то он обнаружил, что частицы с различным отношением заряда к массе (e/m) следуют по различным параболическим кривым, рис. 12. На основании этих данных Вин пришел к выводу, что значения e/m лучей канала зависят от природы газа в трубке. Для фильтрации заряженных частиц в скрещенном магнитном и электрическом поле Вин разработал прибор, названный его именем — фильтр Вина (*Wien filter*). Этот прибор может использоваться как анализатор энергетического спектра, монохроматор или масс-спектрометр.

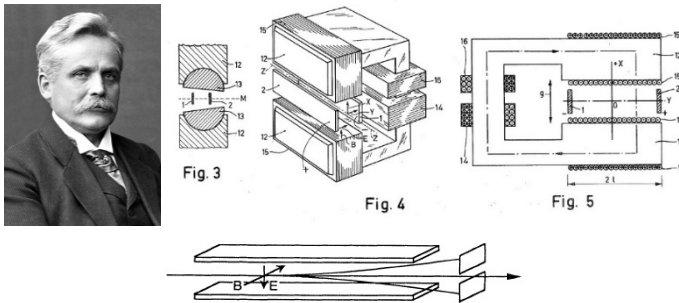


Рис. 12. Вильгельм Вин (1911 г.), принципиальная схема фильтра Вина и его современная конструкция (патент US4019989 U.S. Philips Corporation, New York, N.Y. Field: Oct. 22, 1975).
 Fig. 12. Wilhelm Wien (1911), Wien Filter Concept and Modern Design (patent US4019989 U.S. Philips Corporation, New York, N.Y. Field: Oct. 22, 1975)

Анодный луч с наибольшим отношением e/m происходит из газообразного водорода (H_2) и состоит из ионов H^+ . Другими словами, этот луч состоит из протонов. Работа Гольдштейна с анодными лучами H^+ была, по-видимому, первым наблюдением протона, хотя, строго говоря, можно утверждать, что именно Вильгельм Вин первым измерил отношение e/m протона. Из опытов Вина по отклонению анодных лучей в электрическом и магнитном поле значение скорости протона составляет около $v = 10^7$ см/с, а отношение $\frac{e}{m} = 10^4$ [26]. Нужно заметить, что история оказалась несправедливой, открытие протона приписывается не Евгению Гольдштейну, а англичанину Эрнесту Резерфорду (1919 г.).

Исследованиями В. Вина и Дж. Дж. Томсона было доказано, что положительные частицы лучей канала движутся вдоль пучка с очень большой скоростью. В своем течении вдоль луча эти частицы непрерывно сталкиваются с молекулами газа, которые содержатся в трубке, и если их кинетическая энергия достаточно велика, то можно ожидать, что произойдет испускание света. Еще в 1902 г. другой ученик Гольдштейна, Иоганн

Штарк¹² (*Johannes Stark*, 15.04.1874—21.06.1957), предсказал, что движущиеся частицы канальных лучей, таким образом, становятся светящимися, и, следовательно, линии в спектре, испускаемые ими, должны быть смещены к фиолетовому концу спектра, если лучи замечены приближающимися к наблюдателю. Это происходит подобно тому, как смещение линий в спектрах тех звезд, которые движутся к нам. Поскольку это смещение, так называемый эффект Доплера, увеличивается со скоростью источника света, то, таким образом, должна быть возможность определения скорости частиц канального луча. Штарк сумел показать, что свет от частиц канального луча показывает доплеровский сдвиг. Это была первая четкая демонстрация оптического доплеровского сдвига в земном источнике. В 1905 г. Штарку впервые удалось обнаружить это явление в канальной лучевой трубке, содержащей водород.

Гольдштейн также попытался опровергнуть гипотезу Уильяма Крукса, который интерпретировал катодное излучение как своего рода поток заряженных молекулярных частиц. Он также показал, что длина свободного пробега катодных лучей в 100 раз больше, чем у молекул. Гольдштейн также описал наблюдавшийся небольшой доплеровский сдвиг в свете катодного излучения.

Гольдштейн, будучи универсальным экспериментатором, разработал для своих экспериментов множество трубок с различным расположением электродов. Он опубликовал в дальнейшем свои новые работы о канальных лучах, в которых исследовались длины волн света, испускаемого различными металлами и оксидами, когда они попадают в канальные лучи. Им также было обнаружено, что разрядная трубка может быть эффективным источником положительного излучения. Гольдштейн посвятил последние два десятилетия своей жизни явлениям анодного разряда и слоистой форме положительного столба в разрядной трубке. Однако, эти работы не привлекли к себе особого внимания, поскольку не соответствовали научному тренду того времени.

5 сентября 1930 года на конференции немецкой ассоциации физиков в Кенигсберге физик Вальтер Кауфман¹³ (нем. *Walter Kaufmann*,

¹² Иоганн Штарк был активный противник теории относительности. При нацистах участвовал в немецком националистическом движении «арийская физика». Был членом нацистской партии. После 1933 г. начал борьбу против «белых евреев», к которым относил физиков, не разделявших его взгляды, в частности Гейзенберга. Нобелевская премия, по его мнению, которую получил последний, была «демонстрацией находящегося под еврейским влиянием Нобелевского комитета против национал-социалистической Германии» [27]. Нобелевский лауреат по физике 1919 года «За открытие эффекта Доплера в канальных лучах и расщепление спектральных линий в электрическом поле (эффект Штарка)».

¹³ В 1897 г. Кауфман одновременно с Дж. Дж. Томсоном, измерил отношение заряд/масса для катодных лучей. Результаты у обоих экспериментаторов были сходны, однако Кауфман, в отличие от Томсона, был осторожен в своих выводах, и слава первооткрывателя электрона досталась Томсону.

05.06.1871—01.01.1947) выступил с речью в честь 80-летия своего коллеги Евгения Гольдштейна. Кауфман назвал Гольдштейна учителем, у которого были тысячи учеников, и автором классических работ по физике.

7. Исследования Кромвеля Варли

В конце 19 века, невзирая на проведенные исследования, природа электричества была ещё совсем не понятна. Немецкие ученые И. Гитторф, Е. Гольдштейн, Г. Герц, Э. Видеман¹⁴, Ф. Ленард и другие были выразителями теории эфира. Они полагали, что электрические лучи — это своего рода колебания в эфире. Главным противником волновой интерпретации был Уильям Крукс, который на основании впечатляющей серии экспериментов, проведенных в конце 1870-х годов, пришел к выводу, что токопроводящие лучи от катода представляют собой поток наэлектризованных молекул, или, как их называли немецкие физики, «катодные лучи». Однако немецкий взгляд на катодные лучи не разубедил Дж. Дж. Томсона, Уильяма Томсона (лорд Кельвин¹⁵, англ. *William Thomson, 1st Baron Kelvin*; 26.06.1824—17.12.1907), физика Джорджа Стокса и многих других британцев в том, что лучи представляют собой некую микроскопическую заряженную частицу.

Уильяма Томсона в этом англо-немецком споре особенно раздражало то, что немцы упустили из виду работу его бывшего делового партнера, британского инженера-электрика Кромвеля Флитвуда Варли (англ. *Cromwell Fleetwood Varley*, 06.04.1828—02.09.1883), рис. 13. Одной из причин, по которой в марте 1871 г. Уильям Томсон поддержал избрание Варли в члены Королевского общества, было то, что перед этим была опубликована небольшая статья номинанта «Некоторые эксперименты по разряду электричества через разреженные среды и атмосферу» (англ. *Some Experiments on the Discharge of Electricity through Rarefied Media and the Atmosphere*) в *Proceedings of the Royal Society of London* [28]. Статья содержала экспериментальные доказательства материальной природы катодных излучений, возникающих при электрическом разряде через разреженные га-

¹⁴ Видеман Эйльхард (*Wiedemann Eilhard Ernst Gustav*, 01.08.1852—07.01.1928) — немецкий физик и историк науки. С 1887 г. вместе с отцом редактировал журнал «*Annalen der physik und chemie*». Изучал катодные лучи, считая их электромагнитными волнами. Исходя из этого предложил механизм чередования светлых и темных полос в разряде за счет обмена возбуждением «эфирных оболочек молекул». Ф. Ленард, следуя Э. Видеману, проводил свои опыты и предложил кварцевое «окошко Ленарда» в разрядной трубке, пытаясь обнаружить исходящее из него жесткое ультрафиолетовое излучение.

¹⁵ 1892 г. королева Виктория пожаловала Томсону наследственное пэрство с титулом «барон Кельвин» по названию реки Кельвин.

зы. Однако статья Варли, похоже, быстро была забыта. Она была упущена из виду в первых систематических обзорах исследований электрического разряда, опубликованных в 1880-х и начале 1890-х годов. Крукса особенно озадачивал тот факт, что, несмотря на сотрудничество с Варли в спиритуалистических и других исследованиях, он оставался в неведении относительно его статьи, пока лорд Кельвин в 1893 г. не обратил на нее его внимание. Благодаря этой публикации историки науки называют Варли одной из ключевых фигур в «предыстории» открытия электрона, в которой он, как оказалось, предвидел корпускулярную природу катодных лучей.

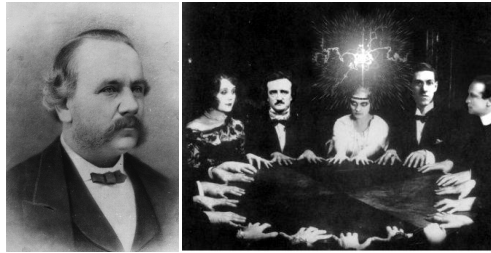


Рис. 13. Кромвель Флитвуд Варли (1880 г.) и спиритический сеанс.

Fig. 13. Cromwell Fleetwood Varley (1880) and the seance spiritualism

К. Ф. Варли был английским инженером-электриком, который принимал активное участие в успешной прокладке трансатлантического телеграфного кабеля и его тестировании в 1860-х годах. Однако наибольшую известность, помимо электрических исследований, ему ещё принесли занятия спиритизмом¹⁶.

Для Варли спиритизм был одним из наиболее значительных контекстов при написании статьи 1871 года [29]. В этой работе он явно стремился не только раскрыть тайну электрического разряда через разреженные газы, но ещё показать туманную границу между невидимым и видимым, и ко всему прочему, ещё между материальным и нематериальным областями. Это указывает на то, что одну из невидимых сил, связанных со спиритизмом, можно сфотографировать и сделать научно более достоверной, а также упростить понимание того, как невесомые духи могут иметь явно материальные качества.

Хотя физические аспекты публикации Варли не были исследованы до 1890-х годов, однако его «спиритуалистический» метод нашел применение при исследовании загадочных психических феноменов.

¹⁶ Спиритизм (от лат. *spiritus* — «душа, дух») — это способ связи (общение) с душами умерших и пришельцами из потустороннего мира, которые могут вступать в контакты с живыми через специальных лиц — медиумов, одаренных особой таинственной силой.

Большая часть исследований Варли в области спиритических явлений была проведена с использованием трубок Гейсслера. У Варли были трубки Гейсслера и он умел ими пользоваться, по крайней мере, еще в 1867 г. К этому времени он использовал их для указания силы тока в аппарате, имитирующем электрические характеристики длинных телеграфных кабелей.

Исследования Варли электрического разряда через разреженные газы относились к той научной области, где доминировали ученые, значительно более выдающиеся, чем он. В связи с этим его статья начинается со стратегического реверанса в сторону Джона Гассиота и Уильяма Грове, которые в 1850-х годах опубликовали работы о загадочной темноте, полосах, бороздках и расслоениях в этом виде электрического разряда. Варли, благодаря работам Гассиота и Грове, также был знаком с пионерскими исследованиями Фарадея, включая его идентификацию темного пространства между отрицательным электродом и светимостью, вызванную разрядом.

Не довольствуясь простым рассмотрением трубки Гейсслера как технологии отображения, он разработал две новые стратегии для исследования «действия внутри трубки», в частности слабой яркости, которую можно растянуть между электродами. Важно отметить, что обе стратегии включали расширение диапазона чувств человека и зрения. Первая заключалась в том, чтобы сфотографировать трубку в «совершенно темной комнате», а вторая — возможность «проведения беседы».

В экспериментальных исследованиях, описанных в статье, Варли использовал трубку Гейсслера оригинальной конструкции, которая имела диаметр $1\frac{1}{4}$ дюйма (31,75 мм), а длину $3\frac{1}{4}$ дюйма (82,55 мм). Трубка содержала два кольца из алюминиевого провода. Одно кольцо имело диаметр $\frac{1}{4}$ дюйма (10,16 мм), а другое — $\frac{9}{10}$ дюйма (22,86 мм). Кольца располагались друг от друга на расстоянии $\frac{8}{10}$ дюйма (20,32 мм), рис. 14а. В трубке находился водород при достаточно высоком вакууме.

Трубка Гейсслера подключалась к цепи, содержащей две батареи Даниэля, гальванометр и два переменных резистора, которые позволяли регулировать цвет и форму светимости при увеличении и уменьшении сопротивления. Схема включения газоразрядной трубки в электрическую цепь представлена на рис. 14б.

В схеме (рис.14б) использован переменный резистор оригинальной конструкции в виде U-образной стеклянной трубки, содержащей глицерин или воду, в которые опускались два алюминиевых провода. Опускание проводов на различную глубину раствора уменьшало или увеличивало сопротивление резистора. Переменные резисторы имели сопротивление 2—3 МОм.

Во время эксперимента в трубку электромагнит помещался таким образом, чтобы между его полюсами проходили катодные лучи. При включении электромагнита происходило искривление лучей и появлялась светящаяся арка. На фотографиях показаны арки, когда один из электродов имеет отрицательный потенциал: малое кольцо (рис.14в) и большое кольцо (рис.14г). Для выяснения природы арки Варли построил её физическую модель, из которой выяснил, что эта арка состоит из частиц вещества, проецируемых с отрицательного полюса электричеством во всех направлениях, движение которых зависит от магнитного поля. Эти частицы, получая импульс, разлетаются во все стороны от отрицательного полюса за пределы электрического тока.

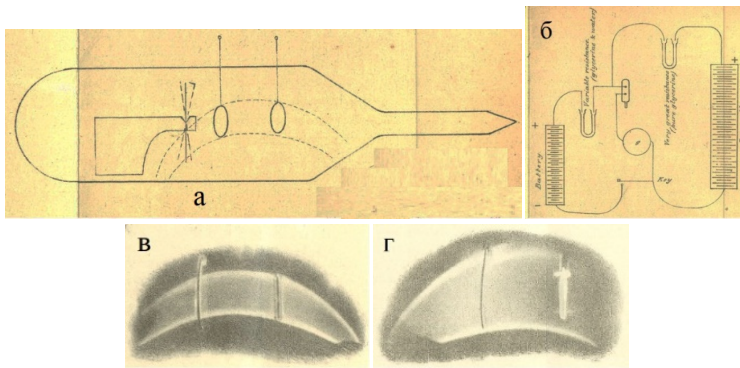


Рис. 14. Трубка Гейслера в эксперименте Варли (а), схема включения газоразрядной трубки в электрическую цепь (б). Фотографии арок при отрицательном потенциале одного из электродов: малое кольцо (в) и большое кольцо (г) [28].

Fig. 14. Geissler tube in Varley's experiment (а), a diagram of the inclusion of a gas-discharge tube in an electrical circuit (б). Photographs of arches at a negative potential of one of the electrodes: a small ring (в) and a large ring (г) [28]

Исходя из проведенного эксперимента Варли пришел к мысли, что катодные лучи могут состоять из заряженных частиц. Эти частицы должны отклоняться магнитным полем в том же направлении, что и наблюдаемое направление отклонения катодных лучей. Модель арки и фотопластинка были ключевыми инструментами Варли для создания новых картин в трубке Гейслера с целью расширения границ человеческих чувств. Точно так же, как фотопластинка позволила обнаружить признаки электрического разряда, которые были до этого скрыты от человеческого зрения, так и модель арки показала, что то, что казалось светящейся нематериальной формой, оказалось материальным, способным производить механическое действие (удары) на тела, на которые оно падает.

8. Трубка Крукса

Уильям Крукс был очарован гипотезой Фарадея о четвертом агрегатном состоянии вещества и с 1875 г. начал изготавливать разрядные трубки. Он работал в собственной лаборатории в Лондоне, где проводил все свои исследования и разработал большое количество самых разнообразных вакуумных трубок, содержащих внутри различного вида устройства для изучения свойств излучающей материи.

Крукс улучшил методы откачки трубок и достиг давления 0,05 мм рт. ст. Его трубки имели более глубокий вакуум, чем трубки Гейсслера. Трубка конструкции Крукса получила широкое распространение в научных исследованиях ученых и ее стали называть «трубка Крукса». Одна из таких трубок, изготовленная в 1880 г., представляла собой грушевидную колбу из уранового стекла, в которой анод был выполнен в виде Мальтийского креста. Использование Мальтийского креста связано по всей видимости с тем, что произношение его фамилии (*Crookes*) не отличается от произношения латинского слова, означающего крест (*crux-cross*). В этой трубке на фоне зеленоватого свечения стекла под действием разряда можно было увидеть тень от анода на стенке стеклянной колбы, рис. 15. Данный эксперимент подтверждал прямолинейное распространение катодных лучей. Это также доказывало то, что катодные лучи возникают на катоде и движутся к аноду, где они ударяются в окружающее анод стекло и создают свечение.

У. Крукс провел много важнейших экспериментов с использованием своих разрядных трубок и открыл ряд явлений. Он обнаружил, что при выкачивании значительного объема воздуха из трубок темное пространство Фарадея распространяется по трубке от катода к аноду, пока трубка полностью не станет темной. Образовавшееся катодное темное пространство иногда называют «круксово тёмное пространство», рис. 16. Это одна из прикатодных частей тлеющего разряда, расположенная между светящимся катодным слоем и отрицательным тлеющим свечением. Катодным темным пространством часто называют всю область от катода до тлеющего свечения. В этом пространстве свободно движутся отрицательные молекулы газа, летящие от катода и задерживаемые на его границе встречными положительными молекулами. На эту область приходится основное падение потенциала, т. е. здесь формируется пучок электронов высокой энергии (сотни вольт). При этом возле анода трубки происходит свечение стекла.

Круксу удалось показать, что основой электрического разряда в вакууме является поток молекул, который получил отрицательный заряд от катода и оттолкнулся от него. Он разработал трубку с вогнутым катодом, чтобы продемонстрировать, что катодные лучи выделяют тепло. Вогнутый

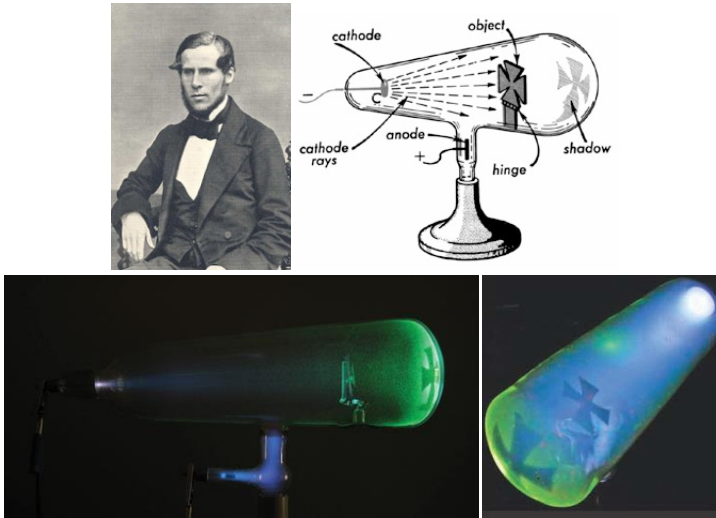


Рис. 15. Сэр Уильям Крукс, трубка Крукса и тень Мальтийского креста на стенке стеклянной колбы в эксперименте.

Fig. 15. Sir William Crookes, Crookes' tube and the shadow of the Maltese cross on the wall of a glass flask in the experiment

катод фокусировал лучи на куске металла, что приводило к флюоресценции. Трубка с вогнутым катодом стала в дальнейшем прототипом фокусирующей трубки. Крукс также заметил, что то место на металлической тонкой пленке, куда падает пучок катодных лучей, становится горячим. Это доказывало, что катодные лучи обладают энергией. Крукс назвал их материей в четвертом (лучистом) состоянии. Во время лекции «О лучистой материи» (*On radiant matter*) в Британской ассоциации содействия развитию науки (*British Association for the Advancement of Science*) в Шеффилде в пятницу, 22 августа 1879 года, Крукс продемонстрировал 19 различных трубок и провел дискуссию по теме лекции.

В 1879 г., в разгар споров между британскими и немецкими учеными о природе катодных лучей, Уильям Крукс провел эксперимент, в котором ось очень легкой мельницы или «гребного колеса» с восьмью лопастями установлена на стеклянных направляющих в вакуумной трубке. При разряде через трубку катодные лучи ударяются о верхние лопасти и колесо начинает вращаться с одновременным движением от отрицательного к положительному концу трубки, рис. 16. Крукс объяснил движение колеса передачей импульса от катодных лучей к лопастям колеса [30] и интерпретировал эксперимент как свидетельство того, что катодные лучи являются отрицательно заряженными частицами.



Рис. 16. Эксперимент Уильяма Крукса: движение «ребенчатого колеса» под действием катодных лучей. Справа показаны флуоресцентные наконечники на лопастном колесе, светящиеся от электронной бомбардировки при её приближении к аноду.¹⁷

Fig. 16. An experiment by William Crookes: the movement of a “paddle wheel” under the action of cathode rays. Shown on the right are the fluorescent tips on the paddle wheel, glowing from the electron bombardment as it approaches the anode¹⁷

В 1903 г. Дж. Дж. Томсон не согласился с выводами Крукса, рассчитав, что если лучи несут ток 10^{-5} ампер и движутся со скоростью 10^{10} см/сек, то они ударяются о лопасти с силой $2 \cdot 10^{-3}$ дин (в системе СИ это $2 \cdot 10^{-8}$ Н). В этом случае механический эффект в целом слишком мал, чтобы объяснить наблюдаемое движение колеса [31]. В современной работе [32] показано, что сила, создаваемая ударом электронного пучка о лопасти, недостаточна, чтобы вызвать вращение лопастного колеса, поскольку она на два порядка меньше требуемой. В этом случае движение можно объяснить радиометрическим эффектом. Воздействие катодных лучей делает одну сторону лопатки намного теплее, чем другую. Позже выяснилось, что не прямое действие электронной бомбардировки приводит к движению, а тот факт, что вакуум не идеален. Оставшиеся молекулы воздуха могут воздействовать на лопасти не только термически, но и электрическим зарядом. Другими словами, оба механизма, с помощью которых разность температур между противоположными сторонами лопаток может приводить к вращательному движению, требуют наличия некоторого количества молекул остаточного газа в трубке.

Уильям Крукс был удивительным человеком не только в науке, но и в обычной жизни. Круг его интересов был очень широк. Его жизнеутверждающий девиз «*Ubi Crookes, ibi lux*» (лат., «где Крукс, там и свет»). Как не странно, он был убежденным сторонником спиритизма. Кстати, спиритизмом увлекался не только он, но и другие великие умы, например, Джеймс Максвелл и Томас Эдисон. Крукс заинтересовался спиритизмом в

¹⁷ Website “Tuopeek” Experimental Vacuum tube. URL: http://www.tuopeek.com/vacuum_tube.html

конце 1860-х годов, возможно потому, что был заинтересован в контакте со своим умершим братом Джоном Круксом (1846—1867), который умер от желтой лихорадки на Кубе. Известно, что Крукса в таком контакте убедил в 1867 г. его однокашник Кромвель Варли, который считал себя ясно-видящим [33]. Крукс, несмотря на его научные достижения, подвергся широкой критике за спиритические взгляды. Так, лауреат Нобелевской премии по химии за 1904 год сэр Уильям Рамсей (*Sir William Ramsay*, 1852—1916), сказал, что «Крукс настолько близорук, что, несмотря на его бесспорную честность, нельзя доверять тому, что он говорит Вам, что видел» [34]. В 1874 г., после целой серии обманов в спиритических сеансах, Крукс прекратил психические эксперименты и в дальнейшем не высказывал свои взгляды на спиритизм. Однако нет никаких сомнений в том, что он сохранил до самой смерти свою веру в спиритизм.

В проведенных Круксом эффектных экспериментальных исследованиях особой новизны не было, так как результаты подобных работ уже были ранее опубликованы другими учеными, которые занимались такой же или близкой тематикой. Отличительной чертой цикла работ Крукса по катодным лучам было то, что они были связаны с его гипотезой о том, что лучи должны представлять собой заряженные частицы вещества или молекул. Это мнение противоречило взглядам Плюккера, Хитторфа и других ученых того времени, которые считали лучи особым типом света. Насколько научно обосновано предположение Крукса — не совсем понятно, поскольку он также хотел объяснить природу световых частиц с помощью световых мельниц, у которых вращение лопаток вызвано воздействием «легких частиц», что, однако оказалось не совсем так.

9. Катодно-лучевая модель кометы

На протяжении всей своей жизни Гольдштейн сталкивался с проблемой поиска оплачиваемой исследовательской должности, из-за этого он написал большую часть своих научных работ в качестве частного ученого, который работал по контракту. Он часто получал финансовую поддержку, но её было недостаточно для небольшой частной лаборатории и лаборанта.

Гольдштейн постоянно испытывал нужду в финансах, начиная с того момента, когда стал стажером в лаборатории Германа Гельмгольца в Первом Берлинском физическом институте в 1871 г. Гельмгольца уважали его ученики не только потому, что он был великий ученый, но также за то, что он постоянно о них заботился. Он пользовался своим влиянием в академии для оказания финансовой поддержки сотрудникам своей лаборатории. Гольдштейн благодаря этому получил деньги от академии в 1878,

1879, 1881, 1882 и 1887 годах. Он всю жизнь с уважением и благоговением относился к своему учителю, образцу для подражания и наставнику, которому он был многим обязан.

Возможная причина того, что Гольдштейн, будучи известным ученым, не смог интегрироваться в немецкие научные исследования и даже получить преподавательскую должность в университете, кроется в его еврейской родословной. Многим еврейским физикам удалось закрепиться лишь в теоретической физике, которая в то время еще мало привлекала к себе внимание.

В конце XIX в. директор Берлинской астрономической обсерватории Вильгельм Фёрстер (*Wilhelm Julius Foerster*, 16.12.1832—18.01.1921) начал развивать астрономию как междисциплинарную область, которая включала физику и науки о Земле, рис. 17. В отличие от астрономии, физика была чем-то иным. Физик постоянно изменяет условия своих экспериментов, и методами проб и ошибок медленно раскрывает тайны природы. Таким образом, астрономы и физики идут разными путями, и у них нет никаких тенденций заглядывать за свои горизонты. Из-за слепоты ученых к явлениям, находящимся за пределами их областей познания, многие актуальные научные проблемы остаются нерешенными. К этому времени был достигнут незначительный прогресс в изучении природы комет. Вильгельм Фёрстер в связи с этим организовал амбициозный проект «Исследования природы электричества в космосе». Соответствующие эксперименты касались имитации кометных явлений, полярных сияний и их частоты, а также корреляции между солнечными пятнами и изменениями магнитного поля Земли. Неизвестно, кто подал идею, чтобы сравнить газовые разряды с космическими явлениями, но Фёрстер был убежден, что, проводя такую аналогию, можно сделать очень важные открытия [30].

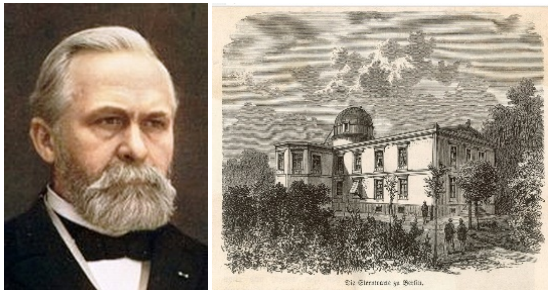


Рис. 17. Немецкий астроном Вильгельм Юлиус Фёрстер и Берлинская обсерватория (Германия. Рисунок Мэри Эванс. 1860 г.).

Fig. 17. German astronomer Wilhelm Julius Foerster and the Berlin Observatory (Germany. Drawing by Mary Evans, 1860)

Для руководства проектом он пригласил своего знакомого, Евгения Гольдштейна, одного из самых известных ученых в области электрического разряда в тот период времени. При этом главным аргументом приглашения явилось то, что он имел опыт использования газоразрядных трубок в лабораторных экспериментах. Гольдштейн стал ассистентом в Берлинской обсерватории, но не стал профессором в университете. Его официальной обязанностью было экспериментальное исследование взаимосвязи между электричеством и космическими явлениями.

В июле 1882 г. Венская Академия получила от Гольдштейна запечатанное письмо, которое не прочитали и открыли только в 1884 г. В нем содержалось краткое сообщение с описанием эксперимента, в котором электрод помещен во второе темное пространство в газовом разряде. В этом случае из этого электрода возникает свет в виде струны или полосы (нем. *Lichtstreif* — полоса света). Гольдштейн назвал эту светящуюся полосу «боковая полоса» (нем. *Lateralstreifen*). При определённых условиях и подходящем угле обзора эта боковая полоса выглядела как хвост кометы, похожий на большую комету Донати¹⁸, рис. 18. Такие кометные хвосты производили очень сильное впечатление. Фёрстер использовал их для продвижения своей междисциплинарной программы. Например, они были представлены германскому императору, принцу прусскому и другим важным чиновникам в 1892 г.



Рис. 18. Итальянский математик и астроном Джованни Баттиста Донати (итал. Giovanni Battista Donati) и «Комета Донати», изображенная на картине Уильяма Дайса «Воспоминание о 5 октября 1858 года» (1859, Лондон, галерея Тейт).

Fig.18. Italian mathematician and astronomer Giovanni Battista Donati (It. Giovanni Battista Donati) and “Comet Donati” depicted in the painting by William Dyes “Memories of October 5, 1858” (1859, London, Tate Gallery)

Самой загадочной проблемой физики комет был тот факт, что их хвост направлен в сторону от Солнца. На рис. 19 показан рисунок кометы Даниэ-

¹⁸ Комета Донати — долгопериодическая комета, открытая итальянским астрономом Джованни Донати 2 июня 1858 г. После Большой Кометы 1811 г. она была наиболее красивой из комет, явившихся в XIX веке.

ля¹⁹ (*comet Daniel*), сделанный немецким астрономом Максимилианом Вольфом (нем. *Maximilian Franz Joseph Cornelius Wolf*; 21.06.1863—03.10.1932) из Гейдельбергской астрономической обсерватории. Из ядра к Солнцу устремляются твёрдые частицы, которые окутаны туманной оболочкой (комой). Потоки солнечных лучей выбивают частицы газа из комы и отбрасывают их назад, вытягивая в длинный дымчатый хвост, который движется за ней в пространстве. Это объяснялось в то время предположением о существовании особой силы отталкивания, действующей на частицы кометы. Природа этой отталкивающей силы также была совершенно не ясна. Отталкивающая сила была в 150 раз сильнее, чем гравитация Солнца. Немецкий астроном Фридрих Зеллер (*Johann Karl Friedrich Zoellner*, 1834—1882) предположил наличие электростатических сил, а шведский физико-химик Сванте Аррениус (швед. *Svante August Arrhenius*; 19.02.1859—02.10.1927) позже объяснил причину отклонения как воздействие светового давления.

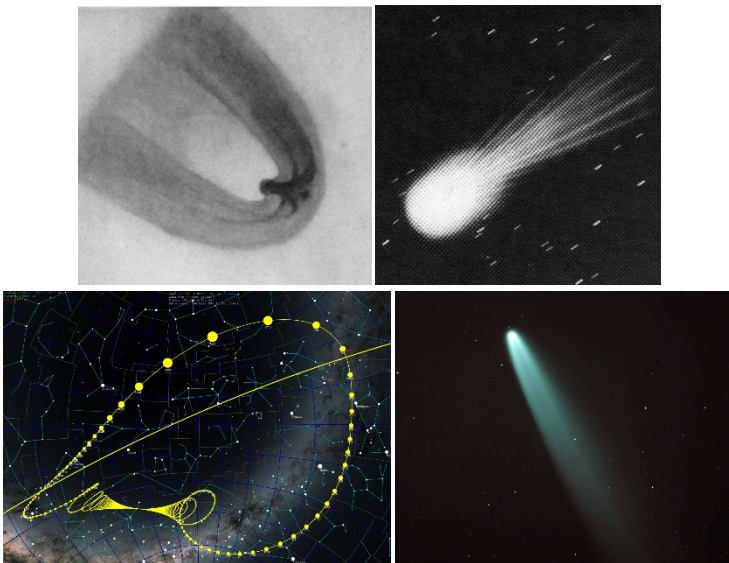


Рис. 19. Комета Даниэля: рисунок [30], сделанный Максом Вольфом (изображение повернуто) 1909 г., и фото, 1907 г. Комета «Неовайз» («NEOWISE» C/2020 F3) и её траектория. «Неовайз» наблюдалась в июне 2020 г. и вернется лишь через 6800 лет.

Fig. 19. Comet Daniel: drawing [30] by Max Wolff (image rotated) 1909 and photo 1907. Comet «Neowise» (C/2020 F3) and its trajectory. «Neowise» was observed in June 2020 and will return only 6,800 years later

¹⁹ Комета Даниэля открыта 7 декабря 1909 года Закеусом Даниэлем (Zaccheus Daniel, Zaccheus Daniel, Принстонский университет, Нью-Джерси, США) как объект девятой звездной величины.

Гольдштейн при построении экспериментальной модели кометы провел аналогию между космическим пространством и газоразрядной трубкой. Он считал, что в небе происходит то же самое, что и в трубке. Поскольку физический процесс в газоразрядной трубке может быть применен к комете, то эффекты имеют один и тот же оптический вид, а процессы могут быть идентифицированы как имеющие одинаковое происхождение.

Физическая идея хвостов кометы Гольдштейна состояла в том, что пространство — это вакуум, и поэтому его можно сравнить с разрядной трубкой. Согласно Гольдштейну существуют доказательства того, что катодные лучи исходят от Солнца. Когда катодные лучи солнца попадают в ядро кометы, образуются вторичные катодные лучи. Эти вторичные лучи испускаются перпендикулярно поверхности, на которую падают первичные лучи. Но поскольку Солнце является катодом, лучи от кометы подвержены отклонению, обнаруженному Гольдштейном. Вторичные лучи искривляются, и хвост кометы приобретает свой типичный вид.

Гольдштейн начиная с 1888 года и до своей отставки в 1921 г. официально работал над астрофизической проблемой под названием «Исследование электричества в космосе». За этот период времени ему удалось экспериментально воспроизвести кометные хвосты в газоразрядных трубках. Гольдштейн сделал более 70 публикаций, касающихся электричества, газовых разрядов и т. д., но при этом не написал ни одной статьи, посвященной электричеству в космосе. Трудно поверить, но это так. Более 30 лет Гольдштейн получал средства от прусского государства, ничего не публикуя о своих официальных исследованиях! Последним документом в личном деле Гольдштейна в обсерватории является заявление Фёрстера о присуждении ему премии.

Как выглядели искусственные хвосты комет Гольдштейна до сих пор не известно, так как утеряны фотографии экспериментов Гольдштейна. В Институте физики Кирхгофа в Гейдельберге (Heidelberg) его сотрудник Майкл Граули (Michael Grauli) попытался реконструировать хвосты комет в соответствии со скудными данными Гольдштейна, рис. 20, [35]. Эти эксперименты не являются исторической репродукцией оригинальных экспериментов Гольдштейна. Для такого воспроизведения слишком мало исходного материала.

Эксперименты Майкла Граули показывают, что Гольдштейн мог производить электрические эффекты, напоминающие хвосты комет. Детали вновь изготовленного искусственного хвоста кометы очень похожи на рисунки волка. Современные эксперименты не являются строгим историческим воспроизведением, и люди сто лет назад наверняка смотрели на

них другими глазами. Но эти картины дают нам представление о том, что Гольдштейн и Фёрстер показывали германскому императору.

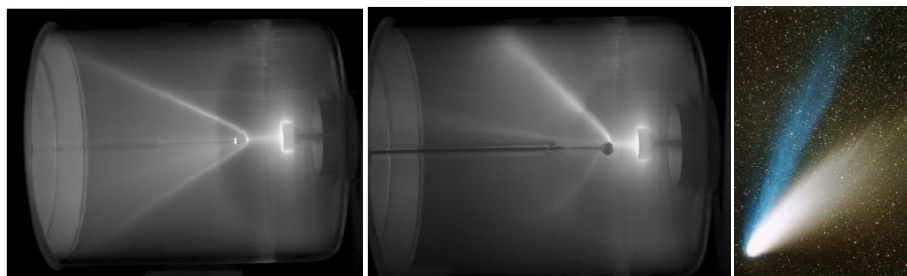


Рис. 20. Модели комет Гольдштейна: Модель 1 (слева [30]). Стекло́нный шарик помещен в газоразрядную трубку. Катодные лучи исходят от катода с правой стороны. Шар попал под лучи, и появились вторые лучи. Хвосты состоят из этих вторичных лучей. Модель 2 (посередине [30]). Стекло́нный шар заменен железным шаром. Комета имеет два хвоста и напоминает комету Хейла — Боппа, открытую 23 июля 1995 (справа).

Fig. 20. Goldstein comet models: Model 1 (left [30]). A glass ball is placed in a gas discharge tube. The cathode rays come from the cathode on the right side. The ball fell under the rays, and the second rays appeared. The tails are composed of these secondary rays. Model 2 (middle [30]). The glass ball is replaced with an iron ball. The comet has two tails and resembles the Hale–Bopp comet discovered on July 23, 1995 (right)

10. Заключение

Во второй половине XIX в. разряд электричества через разреженный газ стал темой интенсивных исследовательских экспериментов, прежде всего в Германии и отчасти в Великобритании. Появление усовершенствованных вакуумных газоразрядных трубок конструкции Генриха Гейсслера позволило многим ученым провести экспериментальные исследования катодных лучей.

Исследования, проведенные Грове, Гассиотом, Плюккером, Гитторфом, Круксом и другими учеными, представляют собой первые фундаментальные наблюдения новых явлений. Отличительной чертой этих исследований было использование газоразрядных трубок с холодным катодом. Для создания в них катодных лучей требовались большие вакуумированные стеклянные трубки и мощные источники напряжения. При электрическом разряде таких батарей образовывались положительные ионы газа, то есть происходил процесс ионизации. Эти ионы под действием электрического поля устремлялись к катоду и выбивали из его поверхности электроны, из которых и формировался поток катодных лучей. Заметим, что в трубках такого типа не существовало термоэлектронной эмиссии.

Под впечатлением экспериментов с катодными лучами Вильгельм Фёрстер запустил междисциплинарную программу, объединившую астрономию и физику катодных лучей. Фёрстер считал, что эксперименты Гольдштейна могут быть важны для исследования космоса. Катодно-лучевая модель кометы Гольдштейна позволила с неожиданной стороны взглянуть на природу формирования хвостов комет. Причины, по которым Гольдштейн ничего не публиковал о своих астрофизических предположениях, не известны, возможно, он не хотел делать поспешных выводов. После смерти Фёрстера и Гольдштейна их проект не был развит.

Благодаря совершенствованию конструкций газоразрядных трубок они стали своеобразными контейнерами, в которых можно было собирать ресурсы из различных дисциплинарных контекстов, наряду с экспериментальным аппаратом, построенным вокруг них. Трубки превратились во все более сложные интерфейсы, обеспечивающие связь между чувствами человека и микромиром. Шло зарождение катодно-лучевых технологий и формировалось одно из научных направлений, которое привело к появлению первых практических электронных приборов в области электротехники, а позже и радиотехники.

Список литературы

1. Watson W. An account of the phenomena of electricity in vacuo with some observations thereupon // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1751—1752. Vol. 47. P. 362—376.
2. Faraday Michael. VIII Experimental researches in electricity. Thirteenth series // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1838. Vol. 128. P. 125—168.
3. Gassiot John P. XIII. On some Experiments made with Ruhmkorff's Induction Coil // *Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1854. Vol. VII. Fourth Series, January—June. P. 97—99.
4. Лакур П., Аппель Я. Историческая физика. Т. II. Одесса. Mathesis. 1908. С. 375.
5. Grove W. R. On the Electro-Chemical Polarity of Gases // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1852. Vol. 142. P. 87—101.
6. Gassiot John P. On the Stratification and Dark Band in Electrical Discharges as Observed in the Torricellian Vacua // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1858. Vol. 148. P. 1—16.
7. Plücker M. Fortgesetzte Beobachtungen über die elektrische Entladung // *Annalen der Physik und Chemie*. January 1, 1858. Band 105. S. 67—84.
8. Gassiot John P. On the Stratification in Electrical Discharges Observed in Torricellian and Other Vacua. Second Communication // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1859. Vol. 149. P. 137—160.
9. Gassiot John P. IV. Experimental Investigations on the Stratified Appearance in Electrical Discharges. Effect obtained by varying the Resistance // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1863. Vol. 12. P. 329—340.
10. Mayer W. H. T. Über das geschichtete elektrische Licht. Berlin. 1858. 29 S.

11. Graetz L. Die Elektrizität und ihre Anwendungen. Verlag Engelhorn Stuttgart. 1910. 690 S.
12. Plücker M. Fortgesetzte Beobachtungen über die elektrische Entladung in gasverdünnten Räumen // *Annalen der Physik und Chemie*. January 1, 1859. Band 107. S. 77—113.
13. Julius Plücker. Biography in *Encyclopaedia Britannica*.
URL: <https://www.britannica.com/biography/Julius-Plucker> (22.04.2020).
14. Hedenus Michael. Der Komet in der Entladungsröhre : Eugen Goldstein, Wilhelm Foerster und die Elektrizität im Weltraum. Diepholz : GNT-Vlg, 2007. 246 P.
15. Meinel Christoph. Rühmkorff, Röntgen, Regensburg : Historische Experimente zur Gasentladung. Regensburg : Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte, 1997. S. 35.
16. Hittorf W. I. Über die Elektrizitätsleitung der Gase. Erste Mitteilung // *Annalen der Physik und Chemie*. 1869. Band 136. No. 1. S. 1—31. No. 2. S. 197—234.
17. Hittorf W. Über die Elektrizitätsleitung der Gase // *Annalen der Physik*. 1884. Band 257. Heft 1. S. 90—139.
18. Is Static A Solar Message? Pupin Puts Question to Learned Society // *Radio world*. January 15, 1927. Vol. 10. No. 17. P. 8.
19. Michael Hedenus. Der Komet in der Entladungsröhre : Eugen Goldstein, Wilhelm Foerster und die Elektrizität im Weltraum. Diepholz : GNT-Vlg, 2007. P. 23.
20. Willner A. Ueber die Spectra einiger Gase bei hohem Drucke // *Annalen der Physik und Chemie*. 1869. Band 137. Heft 7. S. 337—361.
21. Goldstein E. “Über Beobachtungen an Gasspektris“ in *Berlin Akademie Monatsberichte*. 1874. S. 593—610.
22. Goldstein E. Beobachtungen an Gasspectri // *Annalen der Physik und Chemie*. 1875. Band 154. Heft 1. S. 128—149.
23. Goldstein E. “Vorläufige Mittheilungen über electriche Entladungen Verdünnten Gasen“ in *Berlin Akademie Monatsberichte*. 1876. S. 279.
24. Goldstein E. Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathode inducirter Entladungen // *Annalen der Physik und Chemie*. 1898. Band 300. Heft 1. S. 38—48.
25. Goldstein E. “Über eine noch nicht untersuchte Strahlungsform an der Kathodeinducirter Entladungen“ in *Berlin. Akd. Monatsber, II*, 1886. 691 S.
26. Эйхенвальд А. А. Электричество (курс лекций). Третье издание. М. : Типо-литография т-ва И. Н. Кушнеревъ и К^о, 1918. С. 545.
27. Терлецкий Е. Популяризатор с свреями в машине времени. Тель-Авив : Э.РА, 2018. С. 630.
28. Varley C. F. Some Experiments on the Discharge of Electricity through Rarefied Media and the Atmosphere // *Proceedings of the Royal Society of London*. 1871. Vol. 19. P. 236—242.
29. Noakes Richard. Cromwell Varley FRS, Electrical Discharge and Victorian Spiritualism // *Notes & Records of the Royal Society*. 2007. Vol. 61. P. 5—21.
30. Crookes W. The Bakerian lecture : On the illumination of molecular pressure, and the trajectory of molecules // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. 1879. Vol. 170. P. 135—164.
31. Thomson J. J. Mechanical effects produced by the rays. *Conduction of Electricity Through Gases*. Cambridge University Press, 1903. P. 501—502.
32. Humphrey T. E., Calisa Vaishnavi. A Century-Old Question: Does a Crookes Paddle Wheel Cathode Ray Tube Demonstrate that Electrons Carry Momentum? // *The Physics Teacher*. March 2014. Vol. 52. P.142—145.
33. Crookes O. M. *Researches in the Phenomena of Spiritualism*. London : J. Burns, 15, Southampton Row, Holborn, 1874. 141 P.

34. Brock William H. William Crookes (1832—1919) and the Commercialization of Science. Aldershot, UK : Ashgate, 2008. 556 P.
35. Hedenus M. Eugen Goldstein and his laboratory work at Berlin Observatory // Astron. 2002. Vol. 323, No. 6. P. 567—569.

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.