

**К Л А С С И К И
Е С Т Е С Т В О З Н А Н И Я**



50
ANS
DES ONDES
HERTZIENNES



1888

АКАДЕМИЯ НАУК СОЮЗА ССР
ОТДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

50
ЛЕТ
**ВОЛН
ГЕРЦА**

Гос.
Публичная
Б-ка
Ленинград

ИЗДАТЕЛЬСТВО

АКАДЕМИИ НАУК СССР

МОСКВА ● 1938 ● ЛЕНИНГРАД

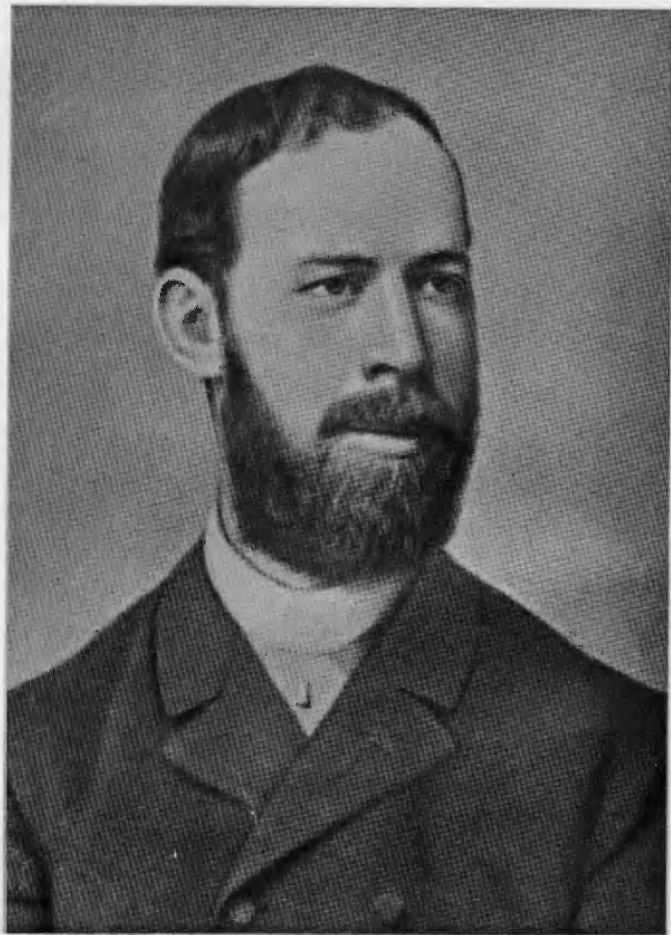
Ответственный редактор

Член-корреспондент Академии Наук СССР

В. К. АРКАДЬЕВ

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие		7
<i>В. К. Аркадьев.</i> Работы Герца, их значение и дальнейшее развитие		9
<i>И. Г. Кляцкин.</i> Генрих Герц и современная радиотехника . .		31
<i>Генрих Герц.</i> О весьма быстрых электрических колебаниях. W. A. 31, 421, 1887		45
<i>Генрих Герц.</i> Об электродинамических волнах в воздухе и об их отражении. W. A. 34, 610, 1888		76
<i>Генрих Герц.</i> Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла. W. A. 36, 1, 1889		92
<i>Генрих Герц.</i> О лучах электрической силы. W. A. 36, 769, 1889		120
<i>Генрих Герц.</i> О действиях ультрафиолетового света на разряд электричества. W. A. 31, 983, 1887		136



ГЕНРИХ РУДОЛЬФ ГЕРЦ

ПРЕДИСЛОВИЕ

В 1937—1939 гг. истекает 50 лет со времени замечательных опытов Генриха Герца, имевших целью проверить теорию Максвелла, касающуюся основных законов электродинамики. В 1886—1888 гг. Герцу удалось дать ответ на поставленный Максвеллом основной вопрос о магнитном действии тока смещения в диэлектрике.

Как известно, эти работы Герца привели к открытию способов получения и исследования предсказанных Максвеллом электромагнитных волн. Они обнаружили конечную скорость распространения электрических и магнитных сил и доказали участие среды в этом процессе. Работы Герца тем самым послужили еще одним физическим обоснованием правильности материалистического мировоззрения и дали в руки ученых-материалистов новое оружие против идеалистических взглядов в науке. Владимир Ильич Ленин в своем труде „Материализм и эмпириокритицизм“ писал: „...Герцу даже и не приходит в голову возможность нематериалистического взгляда на энергию“¹. Ленин категорически отметал всякие попользования идеалистов всех толков „завербовать“ к себе в союзники Генриха Герца и подчеркивал значение его трудов для углубления установок диалектического материализма. Тем больший интерес и значение приобретают работы Генриха Герца и их пятидесятилетний юбилей для всего прогрессивного человечества и переломной советской науки.

В согласии с предвидениями Максвелла волны, полученные Герцем, обнаружили основные свойства световых волн; этим была подтверждена электромагнитная природа последних. На ряду с тем, что открытые Герцем волны явились мощным толчком к развитию учения Максвелла об электромагнитном поле, это открытие имело и самодовлеющее огромное значение. Под именем радиоволн волны Герца теперь вошли в наш быт; они сами и их многочисленные применения теперь широко известны.

Джозеф Джон Томсон² характеризует открытие Герца и его исследования как изумительный триумф экспериментального мастерства, изобретательности и вместе с тем как образец осторожности в выводе заключений. Открытие электрических волн, говорит он, имело не только научное значение, оно побуждало к активной

¹ В. И. Ленин. Собр. сочин. т. XIII, стр. 233, 2-е изд. 1931 г.

² James Clerk Maxwell. A commemoration volume. 1831—1931. Essays by J. J. Thomson, Planck, Einstein a. oth., p. 43. Cambridge, Univers. Press, 1931.

деятельности в новых, до тех пор неизвестных направлениях. Подобно открытию Фарадеем электромагнитной индукции, оно имело глубокое влияние на цивилизацию. Открытие Герца само толкало на путь к нахождению способов, позволяющих людям, живущим в разных частях света, без труда слышать друг друга. Это открытие таит в себе возможности социального, воспитательного и политического порядка, которые мы еще только начали реализовать.

Значение открытия Герца чрезвычайно велико для нашей огромной социалистической страны, где открытые Герцем электромагнитные волны стали могучим средством укрепления братского союза народов СССР, их культурного и экономического развития.

В настоящем сборнике, посвященном 50-летию открытия герцевых волн, воспроизводится перевод пяти основных работ Герца из числа 14, входящих в собрание его работ, изданное впервые в 1892 г. под названием „Исследования о распространении электрической силы“. Впоследствии это собрание составило второй том издания „Gesammelte Werke von Heinrich Hertz“, заключающего в себе три тома.

Перевод статей Герца выполнен Н. Н. Маловым по полному собранию сочинений Герца, вышедшему вторым изданием в 1894 г.¹ При переводе по возможности были сохранены выражения подлинника, иногда существенно отличающиеся от современной терминологии. В тех случаях, когда это представилось необходимым, даны пояснения в примечаниях.

Некоторые высказывания Герца, являющиеся с современной точки зрения не вполне верными, сохранены без исправлений и даже без пояснений, так как читатель легко заметит эти неправильности, а подробный разбор их в примечаниях мог бы нарушить цельность впечатления, получающегося от чтения работ Герца.

Статьи „О весьма быстрых электрических колебаниях“ и „О действии ультрафиолетового света на разряд электричества“ печатаются по переводу, выполненному И. Мчедловым, впервые опубликованному в 1910 и 1911 гг.² и теперь вновь отредактированному; статья „О лучах электрической силы“ напечатана в журнале „Успехи физических наук“ и воспроизводится здесь с согласия редакции журнала. Остальные статьи, насколько нам известно, появляются на русском языке впервые.

¹ H. Hertz. Gesammelte Werke, 2. Verlag J. A. Barth. Leipzig, 1894.

² В сборниках „Электромагнитные колебания и волны“, вышедших под редакцией В. К. Лебединского.

РАБОТЫ ГЕРЦА, ИХ ЗНАЧЕНИЕ И ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

Работы Герца. Теория Максвелла. Первые работы Герца. Открытие электромагнитных волн. Уравнение плоской волны. Измерение скорости распространения и изучение других свойств электромагнитных волн. *Влияние работ Герца на развитие теории Максвелла.* Сближение границ на скале волн. Оптика электрических колебаний. Методика фотографирования, перенесенная в область герцевых волн. Световое давление. Спектры вещества в световых и герцевых лучах. Расширение теории Максвелла. Теория дисперсии света. Спектральные свойства металлов. Теория дисперсии в магнитных металлах. Общая электромагнитная спектроскопия.

РАБОТЫ ГЕРЦА

Теория Максвелла. В 1864 г. Джемс Клерк Максвелл опубликовал, свою электродинамическую теорию электромагнитного поля [1], в которой в виде дифференциальных уравнений были сформулированы взгляды Фарадея на электромагнитные процессы в эфире и во всякой другой среде.

В упрощенном виде можно на следующей схеме истолковать смысл основных уравнений Максвелла для неподвижных тел. На фиг. 1 представлено цилиндрическое тело, имеющее удельную электропроводность γ . По проводам $+$ и $-$ через цилиндр проходит ток I ; при достаточной длине цилиндра, на расстоянии R от его осей, как около прямой проволоки, ток создает магнитное поле напряженности H , которое согласно закону Био и Савара равно

$$H = \frac{2I}{R} = \frac{2S}{R} j_e.$$

Здесь j_e — плотность электрического тока в сечении цилиндра S . В случае проводника

$$j_e = \gamma E,$$

где E — напряженность электрического поля в цилиндре; поэтому около проводящего [цилиндра]

$$H = \frac{2S}{R} \gamma E.$$

Для диэлектрика $\gamma = 0$ и в постоянном поле $j_e = 0$. Максвелл утверждал, что при переменном поле в диэлектрике $j_e \neq 0$. Согласно утверждению Максвелла, при переменном поле и в диэлектрике течет ток; это ток смещения, плотность которого

$$j_e = \frac{\epsilon_m}{4\pi} \cdot \frac{dE}{dt},$$

где ϵ_m — диэлектрический коэффициент (электрическая проницаемость) диэлектрика в электромагнитных единицах CGS; $\epsilon_m = \frac{\epsilon}{v^2}$, где ϵ — относительный диэлектрический коэффициент, а $v = 2.998 \cdot 10^{10} \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/сек есть отношение электромагнитной единицы количества электричества к его электростатической единице.

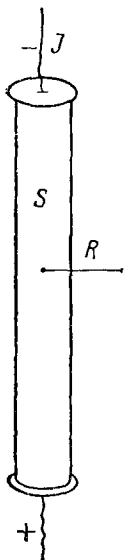
Если $j_e \neq 0$, то, по Максвеллу, около диэлектрического цилиндра должно быть такое же магнитное поле, как и около проводящего цилиндра:

$$(1) \quad H = \frac{2S}{R} \cdot \frac{\epsilon_m}{4\pi} \cdot \frac{dE}{dt}.$$

Фиг. 1. Магнитное поле прямого электрического тока (к первому уравнению Максвелла)

Величина магнитного поля обусловлена скоростью изменения электрического поля и, следовательно, скоростью изменения поляризации. Но и изменение магнитного поля может вызвать электрическое поле и электрическую поляризацию среды.

Действительно, пусть поле H вызывает в магнитном цилиндре (фиг. 2) магнитный поток $\Phi = \mu HS$, где μ — магнитная проницаемость



цилиндра. Тогда в некотором контуре C при изменении H будет возникать эдс

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt} = - \mu S \frac{dH}{dt}.$$

На расстоянии R от оси цилиндра возникает электрическое поле

$$(2) \quad E = - \frac{\mathcal{E}}{2\pi R} = - \frac{2S}{R} \cdot \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{dH}{dt}.$$

Как видим, выражение (2) для электрического поля аналогично выражению (1) для магнитного поля.

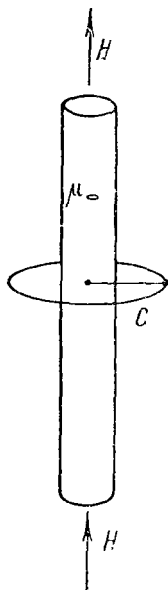
Первые работы Герца. В 1879 г. Берлинская академия наук объявила премию за экспериментальное доказательство существования магнитного поля, представленного уравнением (1), и диэлектрической поляризации, вызванной изменением магнитного поля, согласно (2).

Гельмгольц указал на эту проблему Герцу, который взялся за ее решение. Внимание Герца было обращено на наиболее быстрые электрические процессы, так как из (1) и (2) мы видим, что H и E будут тем больше, чем быстрее меняется электрическое поле E или магнитное H .

Вычислим по (1) поле на расстоянии 6 см от оси стеклянной колонки диаметром $2r = 10$ см; пусть при высоте ее 100 см на нее наложено напряжение $\Delta\mathcal{E} = 20$ kV. Примем диэлектрический коэффициент стекла в электромагнитных единицах равным $\frac{6}{9 \cdot 10^{20}}$. Произведя подстановку, при $\Delta t = 10^{-6}$ получим:

$$H = \frac{2\pi \cdot 25 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 10^8}{6 \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^{20} \cdot 10^{-6} \cdot 100} = \frac{5}{18} \cdot 10^{-3} \text{ Ое.}$$

Вычислим далее по (2) электрическое поле около цилиндра того же размера из железных проволок (напр., сердечник большого индуктора); при $\Delta H = 100$ Ое и $\Delta t = 10^{-3}$ сек., при-

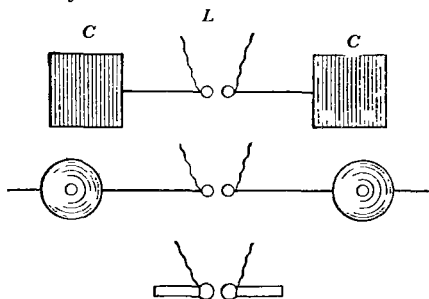


Фиг. 2. Электрическое поле прямого магнитного тока (ко второму уравнению Максвелла)

нимая за μ цилиндра его проницаемость тела [2] $\mu_0 = 60$, получим:

$$E = \frac{2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 60 \cdot 100}{6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-8} = 0.12 \text{ В/см.}$$

Таким образом, при частоте порядка 10^6 в первом случае мы можем рассчитывать на напряженность магнитного поля порядка сотых долей земного поля; во втором случае получается электрическое поле порядка десятых долей вольта на 1 см. Понятно, что при средствах экспериментирования, имевшихся в '80-х годах прошлого века, нельзя было надеяться, чтобы такие поля вызвали заметное действие. Поэтому внимание Герца было направлено к получению возможно бóльших значений $\frac{dE}{dt}$ и $\frac{dH}{dt}$, чем те, кото-



Фиг. 3. Различные виды вибратора Герца

10^{-6} сек. Исходя из формулы Томсона $T = \sqrt{2\pi \sqrt{LC}}$, Герц нашел способ получать такие колебания при помощи небольших проводников с малой емкостью и индуктивностью; они имели вид коротких кусков проволоки или стержней (вибраторов), длиной в несколько дециметров, иногда с присоединенными шарами или пластинками на концах (фиг. 3).

В частности, чтобы усилить электродинамическое действие диэлектрического цилиндра, представленного на фиг. 1, Герц пробовал достигнуть быстрого изменения поля пластин, приложенных к его основаниям, тем, что эти пластины сами составляли части упомянутого вибратора (фиг. 4).

В таком случае частота могла достигать 10^8 периодов в секунду, или, как мы теперь говорим, 10^8 герцев.

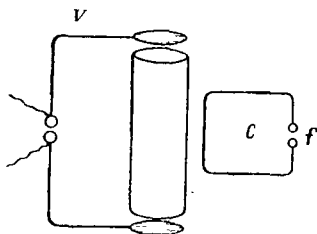
рые получались при наиболее быстром из известных тогда электрических процессов (колебания Фейддерсена, [3]).

В своей работе „О весьма быстрых электрических колебаниях“ (стр. 69) Герц описывает приемы, которые дают возможность иметь колебания в сто раз более быстрые, чем колебания Фейддерсена, имевшие порядок

Согласно (1), магнитное поле около цилиндра должно быть соответственно сильнее. Однако Герц убедился, что действие диэлектрика на контур C не исчерпывается одним магнитным полем цилиндра H . На контур влияет также и электрическое поле вибратора V , которое, как указывал Герц, не являясь во время его действия полем потенциальным, содействует появлению в нем электрических колебаний; о возникновении колебаний можно судить по искрам в промежутке f .

В дневнике Герца [4] под датой 5 ноября 1887 г. значится: „закончил работы об индукционном действии изоляторов и отослал Гельмгольцу“. В письме с той же датой он пишет Гельмгольцу:

...„Я не мог не послать Вам этой работы, так как в ней излагается предмет, к рассмотрению которого Вы [меня побудили [несколько лет тому назад. Я постоянно имел в виду эту задачу] и наконец нашел путь к ее разрешению, который должен был дать ясный результат. Вероятно, я не ошибаюсь, считая, что настоящие опыты достаточно убедительны. Я думаю, что примененные здесь электри-



Фиг. 4. Исследование электродинамического действия диэлектрического цилиндра

ческие колебания могут быть весьма полезны для электродинамики незамкнутых токов. Я уже успел сделать несколько дальнейших шагов“. 9 ноября жена Герца пишет его родителям, что Гельмгольц ответил открыткой: „Рукопись получена. Bravo! В четверг пошлю в печать. Г. ф. Гтц.“

Открытие электромагнитных волн. Рассматривая происходящий около диэлектрика (фиг. 3) сложный процесс развития динамических полей, Герц дал подробную картину происхождения и движения в пространстве электромагнитных волн [5].

По второй работе, приведенной в настоящем сборнике (стр. 76), „Об электродинамических волнах в воздухе и об их отражении“, Герц дает блестящее доказательство существования электромагнитных волн, испускаемых открытыми им электрическими вибраторами.

Существование этих волн вытекает из уравнений Максвелла для электромагнитного поля, которые были нами иллюстрированы выражениями (1) и (2). Полагая в них $R = r$ и умножая обе части

их на $2\pi r$, мы получим линейный интеграл магнитного и соответственно электрического полей. Очевидно, это — не что иное, как магнитодвижущая или электродвижущая [сила, действующая в контуре вокруг цилиндра. Деля ее на площадь S , получим то, что называется вихрем этих полей.

В векторной транскрипции они обозначаются $\text{rot } \vec{H}$ и соответственно $\text{rot } \vec{E}$. Таким образом, в электромагнитных единицах:

$$(3) \quad \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_m \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \text{rot } \vec{H}, \\ -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \text{rot } \vec{E}. \end{array} \right.$$

Герц писал эти уравнения в развернутом виде, при этом для компонент L , M и N поля H в электромагнитных единицах, а для компонент X , Y и Z поля E в электростатических единицах.¹ Он решает эти уравнения для поля вибратора, как точечного диполя, периодически меняющего свой электрический момент. Для разных азимутов и на разных расстояниях от вибратора он получает различные формы выражения электрического и магнитного полей. Для этого он пользуется хорошо теперь известной „функцией Герца“ Π , которая Абрагамом позже была обобщена и названа „вектором Герца“². Функция Герца облегчает вычисление поля сферических волн, исходящих из вибратора.

Уравнение плоской волны. На больших расстояниях от вибратора, т. е. в случае плоских волн, если они распространяются в направлении оси x и имеют электрический вектор, направленный по y , а магнитный, направленный по z , аналогично уравнениям (2) и (1) мы получим для однородной изотропной среды с произвольными ϵ_m и μ :

$$(4) \quad \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_m \frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial N}{\partial x}, \\ \mu \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial x}. \end{array} \right.$$

¹ См. помещенную в этом сборнике статью „Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла“, стр. 94.

² О векторе Герца см., напр., Б. А. Введенский. Основы теории распространения радиоволн. М. — Л., 1934.

Дифференцируя одно уравнение по x , другое по t , получим исключением одной из производных следующее уравнение:

$$(5) \quad \varepsilon_m \mu \frac{\partial^2 N}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}.$$

Это есть известное в математической физике уравнение распространения волн, имеющих постоянную скорость; обозначим ее V . Стоящий в формуле коэффициент $\varepsilon_m \mu$ связан с ней соотношением

$$\varepsilon_m \mu = \frac{1}{V^2}.$$

Для эфира $\mu = 1$, а $\varepsilon_m = \frac{1}{v^2}$; отсюда $V_{\text{эфира}} = v$, т. е. скорость распространения электромагнитных волн в свободном пространстве должна равняться отношению электромагнитной единицы количества электричества к его электростатической единице. Максвеллом и другими было установлено, что последнее равно скорости света c .¹ Вообще же в диэлектрике, у которого относительный диэлектрический коэффициент есть ε , а $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon}{c^2}$, коэффициент скорости (преломления)

$$(6) \quad n = \frac{c}{V} = \sqrt{\varepsilon \mu}.$$

(закон Максвелла).

Измерение скорости распространения и изучение других свойств электромагнитных волн. Выведенное выше известное соотношение Максвелла

$$V_{\text{эфира}} = v = c$$

Герцем было проверено на опыте.

В своей работе „О скорости распространения электродинамических действий“ [6] он определяет эту скорость $V_{\text{эфира}}$ из уравнения

$$\lambda = V_{\text{эфира}} \cdot T,$$

¹ Вследствие важности соотношения $v = c$, точному определению v было посвящено много работ. В частности, v измерял А. Г. Столетов, Ж. Р. Ф. О. 12, 66, 1880, J. de Phys (1) 10, 468, 1881, а также Р. А. Колли, Прот. физ.-мат. секции Общ. ест. в Казани. 1, 1885; 1, 1886; W. A. 28, 1, 1886.

причем длину волны λ он определяет из опыта по методу стоячих волн, а период T Герц вычисляет по формуле Томсона

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Вибратор в этих опытах состоял из двух латунных квадратных пластин 40×40 см, соединенных медной проволокой в 60 см длины с искровым промежутком посередине (фиг. 3). Индуктивность L проволоки определялась вычислением (стр. 69), а емкость каждой пластины C определялась экспериментально сравнением с емкостью шара диаметром 30 см.

Вставляя это значение C в формулу Томсона, Герц вычислил $T = 2.8 \cdot 10^{-8}$ сек. Длина волны λ равнялась 5.6 м. Отсюда получилось $V_{\text{эфир}} = 200\,000$ км|сек, что было в полтора раза меньше скорости света $c = 300\,000$ км|сек. Впоследствии Пуанкаре указал на ошибочность учета C , которая должна быть взята в два раза меньше (стр. 75). С этой поправкой V действительно получается очень близкой к скорости света c .

После этих опытов, когда указанное Максвеллом единство природы электрических и световых волн стало весьма правдоподобным, Герц начал уменьшать длину электрической волны и приближаться к длинам световых волн, еще более уменьшая размеры приборов: вибратора и резонатора. Таким способом он уменьшил длину испускаемых волн почти в 10 раз. С этими более короткими волнами, длину которых один раз он нашел равной 60 см, другой раз — 66 см, он произвел свои знаменитые опыты с параболическими зеркалами (стр. 120). Ему, таким образом, удалось получить „лучи электрической силы“, с которыми он воспроизвел все элементарные опыты, которые обычно показывают со световыми и инфракрасными лучами. В частности он определил показатель преломления асфальта, оказавшийся равным 1.69. Для лучей света смолообразные тела дают 1.5—1.6. Это было новое подтверждение, хотя и не вполне точное, электромагнитной природы света.

Этой работой, доложенной Берлинской академии наук 13 декабря 1888 г., был завершен определенный круг идей, закончен ряд блестящих опытов, направляемых столь же блестяще развиваемой теорией. Опыты Герца создали ему громадную популярность. Герц получает приглашение на кафедры ряда университетов, в том числе и берлинского, однако, он останавливается на университете в Бонне, куда вскоре и переезжает из Карлсруэ, где он занимал кафедру в Высшей технической школе. В это же время (начало

1889 г.) Герц получает от германских и иностранных учреждений и обществ почетные приглашения, поздравительные адреса: его извещают об избрании членом-корреспондентом Берлинской академии наук, членом Манчестерского философского общества, Британского общества естествоиспытателей; в 1890 г. он получает премию Парижской академии, медаль Румфорда от Лондонского общества, медаль Матеуччи из Неаполя и др.

В его дневнике отмечены также избрание его членом Московского общества естествознания и телеграмма от съезда естествоиспытателей из Петербурга (14 января 1890 г.).

Герцу принадлежат также крупные работы и в других областях, в частности им открыт фотоэффект (стр. 133).

Закончив свои исследования электрических колебаний, Герц работал по вопросам теоретической механики. Герц умер 1 января 1894 г. от сепсиса.

Мы в настоящее время отдаем должное этому замечательному исследователю, называя его именем изобретенные им вибратор и резонатор, так же, как открытые им волны и разработанную им систему механики. Мы приводили уже термины „функция Герца“ и „вектор Герца“. Единица частоты колебаний (1 период в 1 секунду) названа „герцем“. Это название применяется не только в радиотехнике, электротехнике и акустике, но и в других областях.

ВЛИЯНИЕ РАБОТ ГЕРЦА НА РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА

Работы Герца послужили сильным толчком к развитию теории электромагнитного поля Максвелла и всех ее выводов и следствий. Значительное число работ в этом направлении принадлежит ученым дореволюционной России и Советского Союза. Дальнейшее развитие теории Максвелла мы изложим преимущественно в свете этих исследований.

Сближение границ на ^{ли}шкале волн. Основной проблемой, касающейся подтверждения электромагнитной природы света, оставалось сближение герцевых волн со световыми или инфракрасными, тождество природы которых со световыми тогда уже не вызывало сомнений. Здесь можно было идти двумя путями: 1) укорочением волн Герца и 2) продвижением предела инфракрасных волн в сторону их удлинения. Этим способом можно было сближать границы огромного в то время интервала между этими волнами.

Значительный шаг по первому пути был сделан в 1895 г. П. Н. Лебедевым [7], который уменьшил длину волны, полученной

Герцем в его последней работе, в 100 раз; он получил волны в 6 мм длиной и проделал с ними все опыты Герца с зеркалами. Небольшие размеры приборов позволили Лебедеву выяснить и отношение кристаллов к герцевым волнам. Лебедев обнаружил в двусосных кристаллах серы двойное лучепреломление. После Лебедева короткие волны до нескольких миллиметров получил Лампа [8].

Во время Герца были известны как наиболее длинные инфракрасные волны, волны в 6 μ длины, полученные Ланглеем. Работами Рубенса [9] этот предел был продвинут в 1896 г. до 61 μ . В 1910 г. Рубенс и Байер [10] нашли в излучении ртутно-кварцевой лампы волны от 218 до 343 μ . Позже, в 1922 г., Ласки [11] нашла в этом излучении волны до 400 μ . В 1920 г. Мебиусу [12] путем видоизменения вибратора Герца удалось наблюдать волны длиной в миллиметры и доли мм, которые однако оказались невоспроизводимыми. Индивидуальный вибратор Герца очень малых размеров (0.4 мм) был построен Никольсом и Тиром [13]; с ним были получены волны до 1.8 мм (1923 г.).

Слияние границ герцевых и инфракрасных волн. Пробел на скале электромагнитных волн между электрическими и инфракрасными волнами был заполнен А. А. Глаголевой-Аркадьевой [14] по разработанному ею новому методу. Поскольку более короткие волны незаполненного интервала были молекулярно-атомного происхождения и испускались множеством молекулярных вибраторов, а более длинные излучались индивидуальным вибратором Герца, то Глаголева-Аркадьева (1922 г.) избрала вибратор, находящийся посередине между тем и другим источниками: это было большое число очень малых вибраторов Герца, взятых в виде мелких металлических частиц (опилок), взвешенных в густом масле. При пропускании через эту смесь электрических искр последние проскакивали и между такими парами опилок, которые, находясь на достаточно малом расстоянии одна от другой, образовали вибраторы, испускающие очень короткие волны. Так как опилки были разного размера, а в смеси они могли образовать цепочки большей или меньшей длины, то волны, излучаемые массовым излучателем, должны были быть и короткие и длинные. Действительно, измерения Глаголевой-Аркадьевой, произведенные при помощи интерферометра, показали, что в лучах ее излучателя заключаются волны длиной от 82 μ до десятков миллиметров. В 1934 г. [15] из этого смешанного излучения ей удалось выделить монохроматические лучи с волнами длиной от 10 до 0.35 мм. Особенно важно в этих опытах то, что волны в 0.35 мм

излучаемые вибратором Герца и кварцевой лампой, воспринимаются и исследуются одним и тем же прибором, термoeлементом [16].

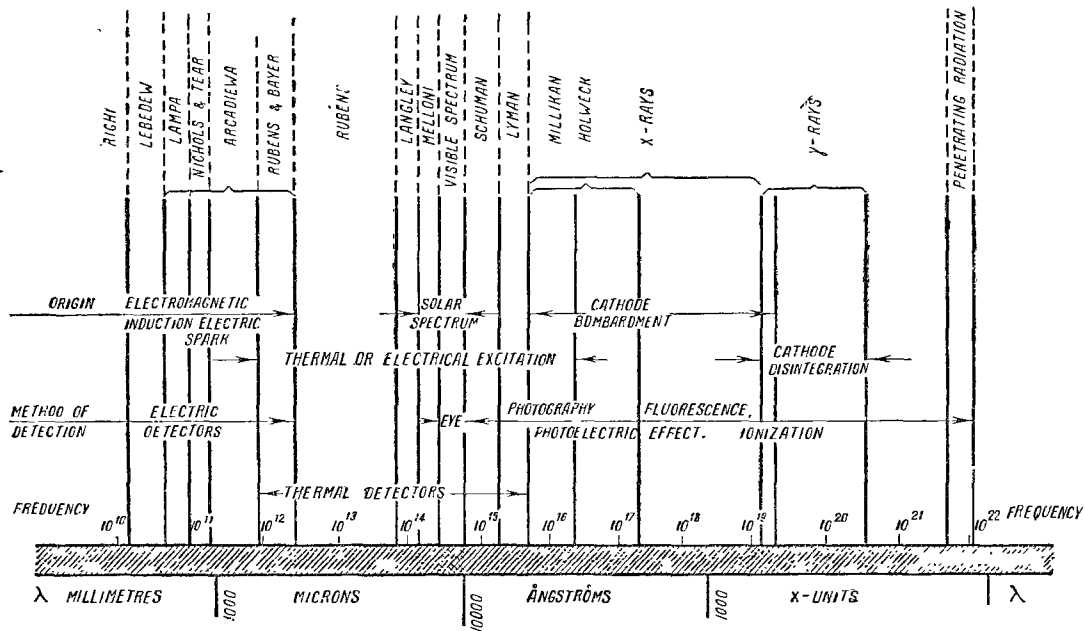
Таким образом, был заполнен пробел на скале электромагнитных волн, или на их „спектре“, между волнами молекулярно-атомного происхождения и волнами, излучаемыми металлическими проводниками (вибратором Герца) (фиг. 5). Этому факту не без основания приписывается большое принципиальное значение как констатации единства природы световых и герцевых волн.

Самые короткие электрически возбуждаемые волны получались также Никольсом и Тиром [13] в 1925 г. и М. А. Левитской в 1926 г. [17].

Оптика электрических колебаний. В носящей это название книге Риги [19] красной нитью проводится аналогия между методикой исследования лучей света и различных оптических явлений, с одной стороны, и методикой изучения лучей Герца — с другой.

Еще в первых опытах Герцем было показано, что электрические лучи могут отражаться, преломляться, поляризоваться, интерферировать. Лебедев обнаружил их двойное преломление в кристаллах. В опытах других экспериментаторов эта аналогия с лучами света расширялась и углублялась. Рубенс и Риттер [20] исследовали зависимость прошедшей энергии от угла между поляризатором и анализатором (закон Малюса в оптике). Для измерения длины коротких волн Герца был применен интерферометр Майкельсона с полупрозрачной пластинкой стекла [21]. Оптические законы интерференции наиболее длинных волн Герца — радиоволн — недавно были применены для измерения на море расстояний между кораблями [22]. С волнами Герца в 2 см длиной на модели кристаллической решетки было воспроизведено явление, аналогичное диффракции рентгеновых лучей в кристалле [23].

Методика фотографирования; перенесенная в область герцевых волн. В самое последнее время был найден способ [24] фиксации прохождения лучей Герца на бумаге, так же, как фиксируют прохождение лучей света в фотографии. Последнее достигается химическим действием световых лучей на чувствительный фотографический слой. Аналогичное явление получено при помощи лучей Герца, которые вызывают квазикимическое действие на соответствующим образом приготовленную чувствительную электрохимическую бумагу. Таким путем удается фиксировать изображение вибратора Герца при помощи лучей, им самим испускаемых [25]; так же может быть зафиксирован („сфотографирован“) диффракционный спектр [26] излучаемых им волн и многое другое. След действия герцевых



Фиг. 5. Лучи, полученные в Москве в 1923 г. (обозначено „ARCADEWA“), образуют мост между кратчайшими волнами Герца (миллиметровые волны Никольса и Тира) и инфракрасными волнами (волны Рубенса и Байера в 343 м). (Займствовано из книги Гаэтано Кастефранки „Последние успехи атомной физики“, английский перевод: G. C. Castelfranchi. Recent advances in atomic physics. London. 1932.)

волн на бумаге получатся в виде пятен, образованных группам точек, а самый метод называется *стиктографией*.

Световое давление. Важным моментом в истории подтверждения теории Максвелла является экспериментальное доказательство предсказанного Максвеллом светового давления. Последнее обнаружил на опыте впервые в 1900 г. Лебедев [18], установивший, что и по величине своей оно совпадает с тем, которое выводится из теории Максвелла. Несомненно, что интерес к световому давлению в значительной мере стимулировался открытием волн Герца и исследованиями по теории теплового лучеиспускания, которая излучение вещества трактовала как излучение множества молекулярных вибраторов Герца.

Спектры вещества в световых и герцевых лучах. Перейдем теперь к истолкованию оптических, или, лучше сказать, спектральных свойств вещества в свете его отношения к герцевым волнам.

Для этого прежде всего следует распространить выведенные выше уравнения на случай сред, обладающих электропроводностью. Для этого в уравнении (1) к плотности тока смещения следует прибавить плотность тока проводимости, т. е. написать:

$$(7) \quad \frac{\epsilon_m}{4\pi} \cdot \frac{dE}{dt} + \gamma E.$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$H = \frac{2S}{R} \left(\frac{\epsilon_m}{4\pi} \cdot \frac{dE}{dt} + \gamma E \right).$$

Таким образом, уравнения (3) и (4) пополнятся новым членом, а уравнение (5) примет вид:

$$(8) \quad \epsilon_m \mu \frac{\partial^2 N}{\partial t^2} + 4\pi\gamma\mu \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}.$$

Решение этого уравнения показывает, что распространение волны в среде с электропроводностью сопровождается поглощением энергии, а скорость распространения здесь зависит от периода процесса T . В случае синусоидальных колебаний (монохроматическое излучение) для скорости и поглощения получают простые зависимости, которые особенно упрощаются, если $2\gamma T$ очень велико по сравнению с ϵ_m , что имеет место в металлах при герцевых и инфракрасных частотах. В этом случае коэффициент, определяющий скорость распространения волн, по Друде равен:

$$(9) \quad \dots \dots \dots n = c \sqrt{\mu\gamma T},$$

а $V = \frac{c}{n}$. При проникании волн в среду с электропроводностью амплитуда убывает с расстоянием x по экспоненциальному закону

$$A = A_0 e^{-\frac{2\pi}{\lambda} kx}.$$

В случае металлов в герцевых и в инфракрасных волнах по Друде

$$(10) \quad k = c \sqrt{\mu \gamma T}.$$

Вообще же для полупроводников при $\mu = 1$

$$(11) \quad 2n^2 = r_e + \epsilon \quad \text{и} \quad 2k^2 = r_e - \epsilon,$$

где

$$r_e = \sqrt{\epsilon^2 + 4\gamma^2 T^2} \cdot \gamma \delta^2 \lambda^2$$

Для проверки теории электромагнитного поля Максвелла многократно пользовались формулами (6), (9), (10) и (11). Для диэлектриков, согласно (6), должно выполняться равенство квадрата показателя преломления и диэлектрического коэффициента. Еще до Герца было сделано много работ для проверки этого соотношения. Так, в 1873 г. Больцман указал на ряд случаев, где этот закон выполняется: газы, керосин, парафин и др. Так, для парафина $\epsilon = 1.975$, а $n^2 = 1.422^2 = 2.025$. Однако этому закону подчиняются отнюдь не все тела. Нередко обнаруживались резкие противоречия. В 1888 г. Кон и Аронс¹ открыли сильное расхождение для ряда жидкостей. Для света n^2 воды равен 1.77, а ϵ воды в постоянном поле они нашли близким к 80. Это резкое противоречие имело большое принципиальное значение и потому занимало внимание физиков на протяжении целого ряда лет.²

¹ E. Сohn u. L. Arons, W. A. 33, 13, 1888. Они измеряли по методу, разработанному П. А. Зильовым (Pogg. Ann., 156, 389, 1875) и основанному на изменении пондеромоторного действия при наполнении электрометра Томсона жидким диэлектриком. Заряжая электрометр переменным током индуктория, они определили для амидового спирта $\epsilon = 15$, этилового 26.5 и для воды $\epsilon = 76$. С. Я. Терешин нашел ϵ воды равным 83.8 (W. A., 36, 792, 1889). Позже n^2 различных жидкостей подробно исследовали Друде, Кулидж, И. И. Косоногов, Д. Добросердов, А. Р. Колли, Рукоп, К. Ф. Теодорчик, Франкенбергер, И. О. Эльцин, Мейбаум и др.

² До тех пор, пока не были получены исключительно короткие герцевы волны, n^2 все время оставался близким к 81. Только

В 1894 г. было обращено внимание на резкое расхождение n^2 и ϵ глицерина: его ϵ в длинных герцевых волнах (12 м) Твинг нашел равным 56, в то время как для света n^2 глицерина составляет 2.1. Однако последующими работами Друде (1895 г.) и Ланга (1896 г.) было доказано постепенное снижение n^2 глицерина с 56 до 14 при уменьшении длины герцевой волны до 8.5 см. Можно было думать, что уменьшение ϵ при увеличении частоты перемен поля обусловлено вязкостью глицерина, которая мешает частицам его (диполям) достаточно быстро повертываться, и потому электрическая поляризация глицерина обнаруживает заметное запаздывание в быстропеременных полях. Это указывало, с другой стороны, что в герцевых волнах еще меньшей длины n^2 глицерина может снизиться до его оптического значения 2.1.

Известны были и другие случаи расхождений. Электролиты вследствие своей большой электропроводности должны сильно поглощать электромагнитную энергию, см. (11). Коэффициент поглощения k герцевых волн действительно близок к вычисленному, согласно (11), по электропроводности раствора γ и по его диэлектрическому коэффициенту ϵ . Это показал Эйхенвальд [27] на растворах хлористого натрия, серной кислоты и других веществ для водн от 100 до 500 см длиной.

Однако световые волны хорошо проходят через серную и другие кислоты, а также через растворы солей.

Расширение теории Максвелла. Расхождение между n^2 оптическим и ϵ , измеренным электростатически, в сущности значило, что теория Максвелла в своей первоначальной форме, предполагавшая объяснить все электрические и оптические свойства тел их расчетом по измеренным в постоянном поле ϵ и γ , на деле не всегда или даже редко оправдывается. Формулы теории Максвелла всегда верны только в относительно малых частотах. Этим был поставлен вопрос о границах применимости теории Максвелла. Было выяснено, что опытные факты могут быть объяснены, если, сохраняя в основном уравнения (3), веществу приписать определенную структуру и вместе с тем определенные характеристические временные и пространственные константы. Пока последние малы по сравнению

в 1923 г. Тир (J. D. Tear, Phys. Rev. (2) 21, 611, 1923) между волнами 27 мм и 4.2 мм обнаружил снижение n^2 воды с 71 до 28. Меньших значений n^2 Тир не получил, так как он не мог производить измерений с волнами короче 4.2 мм.

с временными и пространственными характеристиками электромагнитного процесса, — в простейшем случае по сравнению с T и λ , — то отдельные структурные элементы и их состояние в отдельные моменты времени не оказывают влияния на течение такого процесса: мы здесь считаемся только со средними по времени и пространству величинами, которые определяют ϵ и λ вещества. По мере же уменьшения величины характеристик процесса и при приближении их к константам структурных элементов вещества в развитие представлений классической теории Максвелла вступают в силу ее расширения и обобщения, основанные на учете различных деталей внутреннего строения. Здесь вещество уже не рассматривают как континуум, так как здесь лежит граница применимости классической теории Максвелла в ее первоначальной форме.

Теория дисперсии света. Соответствующее расширение теории Максвелла, проведенное достаточно последовательно и глубоко, сделал в 1904 г. Друде на основе представлений Гельмгольца. В его работе преследуется цель дать теорию дисперсии и абсорбции света, т. е. вывести теоретически, исходя из представлений об атомном строении вещества, зависимость n и k от длины волны. Для этого он, введя в рассмотрение инерцию и трение колеблющихся ионов вещества, дал математическую теорию спектрального рассеяния света и его поглощения (теория аномальной дисперсии). Из этой теории в частности вытекает известный опытный факт, что при больших T и λ квадрат показателя преломления должен быть равен диэлектрической проницаемости ϵ , измеренной в постоянном поле.

Теория Друде дает возможность также вычислить из оптических спектральных данных (напр. по спектру поглощения) отношение заряда к массе $\frac{e}{m}$ колеблющегося центра (иона). Если период собственных колебаний частиц — максимум абсорбции — лежит в спектре световых или ультрафиолетовых лучей, то получается $\frac{e}{m}$ электрона.

В этой области работали многие ученые.¹

Спектральные свойства металлов. Другим средством проверки теории Максвелла служили измерения оптических свойств металлов,

¹ Следует отметить работы по электромагнитной теории дисперсии Вуда, Гарбассо, Д. А. Гольдгаммера, Д. С. Рождественского, Т. П. Кравца, С. И. Вавилова, А. С. Предводителя и мн. др.

в частности — их отражательной способности R при отвесном падении лучей на плоскую поверхность металла. Если падает мощность, равная единице, то отражается мощность $R < 1$. Из теории Максвелла Друде вывел формулу

$$(12) \quad R = 1 - \frac{2}{c} \sqrt{\frac{\mu}{\gamma T}}.$$

В 1903 г. Рубенс и Хаген обнаружили, что в длинных инфракрасных волнах, длиной 10—26 μ , отражательная способность металлов R следует уравнению (12), причем магнитные металлы (сталь, никель) ведут себя, как немагнитные, обнаруживая магнитную проницаемость $\mu = 1$. Это значило, что они уклоняются от свойств, установленных теорией. Таким образом, Рубенс и Хаген нашли аномалию в металлах, подобную той, которую для воды обнаружили Кон и Аронс: у Рубенса и Хагена μ по отражению инфракрасных волн меньше μ обычного, равного десяткам и сотням единиц, а у Кона и Аронса n^2 воды по преломлению световых лучей меньше обычного значения диэлектрического коэффициента воды, равного 81.

Чтобы выяснить причину расхождения при учете магнитных свойств вещества, следовало поступать так же, как и при выяснении аномалии диэлектриков, например, глицерина, именно — измерить μ металлов в герцевых волнах: если в герцевых волнах μ окажется равным единице или близким к ней, то это будет означать, что отклонение уравнения (12) от действительности не противоречит электромагнитной природе инфракрасных волн, а обусловлено особенностями намагничивания вещества, которое обнаруживает запаздывание намагничивания в быстроменяющихся полях. Еще Герц, стр. 64, высказывал мысль о возможности такого запаздывания.

Опыты были выполнены путем измерения отражательной способности решеток [28], образованных рядом параллельных тонких проволок из разных металлов. Такой ряд представляет собой как бы весьма редкую решетку Герца (стр. 127).

Измерения, произведенные с волнами, длиной в 30, 11, 5,6 и 3 см, действительно обнаружили, что по мере укорочения волны магнитные свойства железных, стальных и никелевых проволок ослабевают, и проницаемость их обращается в единицу приблизительно при $\lambda = 3$ см.¹

¹ Подробнее см. В. К. Аркадьев, Электромагнитные процессы в металлах, ч. II, М., 1936.

Теория дисперсии в магнитных металлах. Это запаздывание намагничивания проволок послужило поводом к развитию теории магнитной дисперсии. Приписывая элементарным магнитам инерцию и трение при их движении, можно получить для процесса намагничивания уравнения, подобные уравнениям Друде для дисперсии света [29]. Последние показывают, что поглощение света в изоляторах при определенной длине волны происходит, если даже они и лишены обычной электропроводности γ . В них при известной частоте появляется некоторая фиктивная электропроводность, вследствие чего на ряду с током смещения

$$\frac{\epsilon_m}{4\pi} \cdot \frac{dE}{dt}$$

в уравнениях появляется член, аналогичный току проводимости γE , ср. (7).

Подобного же рода член пришлось ввести и в теории магнитной дисперсии [29]. Он был назван плотностью тока магнитной проводимости и обозначен ρH , где ρ — коэффициент удельной магнитной проводимости. Этот ток обуславливает собой поглощение энергии при перемагничивании и потому теперь применяется в теоретической электротехнике также и для учета потерь мощности вследствие гистерезиса.

Появление на ряду с током магнитного смещения тока магнитной проводимости ρH в выражении

$$(13) \quad j_m = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{dH}{dt} + \rho H$$

может быть истолковано как рост магнитной поляризации (намагниченности) в постоянном поле при $\frac{dH}{dt} = 0$; это действительно наблюдается в телах с магнитной вязкостью. Легко видеть, что симметричные выражения плотности электрического и магнитного токов (7) и (13) приводят к следующей симметричной форме уравнений Максвелла, применяемых теперь для решения конкретных задач в синусоидальных полях:

$$(14) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{rot } \bar{H} = 4\pi\gamma\bar{E} + \epsilon_m \frac{\partial \bar{E}}{\partial t}; \\ -\text{rot } \bar{E} = 4\pi\rho\bar{H} + \mu \frac{\partial \bar{H}}{\partial t}. \end{array} \right.$$

Таким образом, исследование веществ в герцевых волнах привело к обобщению уравнений Максвелла. Вместо трех (ϵ , γ и μ) теперь в них входят четыре коэффициента (ϵ , γ , μ и ρ). Уравнение (8) теперь уже является частным случаем более общего уравнения:

$$\epsilon_m \mu \frac{\partial^3 N}{\partial t^2} + 4\pi(\gamma\mu + \epsilon_m \rho) \frac{\partial N}{\partial t} + 16\pi^2 \gamma \rho N = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2}.$$

В формулах (9), (10) и (12) вместо μ появляются некоторые функции μ и ρ , обозначаемые μ_n и μ_k , именно в (9)

$$\mu_n = r_m - \rho'$$

и в (10) и (12)

$$\mu_k = r_m + \rho',$$

где $\rho' = 2\rho T$ и $r_m = \sqrt{\mu^2 + \rho'^2}$.

В уравнения этой расширенной теории четыре коэффициента вещества часто вводят в виде комплексных выражений $\epsilon' - i\gamma'$ и $\mu - i\rho'$. Коэффициент скорости n сам приобретает комплексное значение $n - ik$, и уравнение (6) переходит в форму

$$(n - ik)^2 = (\epsilon - i\gamma')(\mu - i\rho'),$$

где $\gamma' = 2\gamma T$. $\int \gamma' e^{-\gamma' z}$

Среде, обладающей комплексными ϵ и μ , дано название бикомплексной среды [30]. В настоящее время сделан дальнейший шаг в расширении этой теории; Феретти [31] допустил, что бикомплексная среда может иметь разные свойства в разных направлениях. Он дал общие уравнения для „анизотропного бикомплекса“, которые в частности могут быть применены для расчета электротехнических свойств трансформаторной стали, которая обычно имеет одно значение магнитной проницаемости в направлении прокатки и другое значение в других направлениях.

Четыре основных коэффициента ϵ , γ , μ и ρ , вообще говоря, зависят от периода протекающего в веществе процесса. Эта зависимость схематически охватывается уравнениями *общей электромагнитной спектроскопии* [32].

Общая электромагнитная спектроскопия. В зависимости от состояния вещества (газообразное, жидкое, твердое) и от его структуры (аморфное, кристаллическое, поликристаллическое) зависимость ϵ , γ , μ и ρ от периода может быть весьма различной. Часто движение частиц вещества (ионов, электронов, диполей или эле-

ментарных магнитов) в общей форме может быть схематически представлено уравнением

$$x \frac{d^2 u}{dt^2} + y \frac{du}{dt} + zu = qA.$$

Здесь x означает массу или момент инерции частицы, y — меру трения, z — квазиупругую силу, с которой частица удерживается в положении равновесия, и qA — силу воздействия внешнего поля A , вызывающего смещение частицы u . Поле A может представлять собой E или H . При отсутствии внешней периодической силы qA частица может совершать собственные колебания с известным периодом T_0 . Так как всякое вещество содержит в себе частицы разных родов, то каждый род частиц может иметь свой период собственных колебаний. Поэтому вещество характеризуется рядом собственных периодов $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$. Электроны, T_0 которых лежит в световой области электромагнитного спектра (фиг. 5), имеют все три характеристики — x, y и z . Диполи Дебая, определяющие диэлектрический коэффициент жидкостей (воды, глицерина и т. п.), имеют $x=0$; их собственная частота есть частота релаксации; она лежит в области от миллиметровых до декаметровых герцевых волн. Электроны, образующие слой Хивисайда в верхних слоях атмосферы (ионосферы), имеют $y=z=0$. В отсутствии магнитного поля они совершенно свободны, и их движение определяется только внешним полем E и массой частицы x .

Элементарные магниты в ферромагнитных телах заключены в так называемые элементарные области; последние могут иметь в сантиметровых волнах частоту собственных колебаний (Аркадьев, Ганс и др.). В меньших частотах обычно проявляется только вязкость, и частицы обнаруживают частоту релаксации порядка от мегагерцев до долей герца [33].

Такова общая картина поведения вещества в электромагнитном поле, в частности в поле световых волн. Общая теоретическая спектроскопия, получившая развитие в последние десятилетия в Москве, охватывает в общих уравнениях все эти свойства вещества самой разнообразной природы, от стали и глицерина до ионосферы, и притом почти на всем протяжении скалы электромагнитных волн. Эта теория объясняет и оптические свойства красок и поведение трансформаторной стали в звуковых и в радиочастотах.¹

¹ Подробнее см. В. К. Аркадьев, Магнитная спектроскопия, М., 1924 (Труды ГЭЭИ, № 6); он же, Электромагнитные процессы в металлах, ч. II, М., 1936.

Она создана в значительной мере в свете данных, полученных при помощи исследования вещества в волнах Герца.

Сказанным, однако, не ограничивается влияние открытия волн Герца на развитие физики. Существенное значение имеет обнаруженная Герцем конечная величина скорости распространения электрических и магнитных сил и участие среды в этом процессе. Мы не затронули вопроса о развитии теории электрических колебаний (Бьеркнес, М. Вин, Ценнек, Д. А. Рожанский и др.), повлиявшем на развитие общей теории колебаний (Буш, Ван дер Поль, Мандельштам, Папалекси, Андронов, Хайкин и др.), а также вопроса о развитии методики получения колебаний (Попов, Марconi, М. Вин, Поульсен, Браун и мн. др.), увенчавшемся переходом к получению незатухающих электрических колебаний. Мы уже указывали мимоходом, что открытия Герца стимулировали работы по теории излучения. Целый ряд областей науки, касающихся молекулярно-атомного строения материи, пользовался представлениями Герца. Его вибратор стал образом, наиболее часто используемым в теоретических построениях. Силы молекулярного взаимодействия нередко объяснялись как механические силы электродинамического действия вибраторов на резонаторы. Этому был посвящен ряд работ Лебедева [34]. И современные теоретические концепции, как бы далеки они ни были от „физики моделей“, имеют корни в бессмертных работах Герца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сl. Maxwell J. A dynamical theory of the electromagnetic field. Trans. Roy. Soc., 155, 8 dec. 1864.
2. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах, ч. I, стр. 152, 1935. Энергоиздат.
3. Feddersen B. W. Pogg. Ann., 103, 69, 1858; 116, 132, 1862.
4. Hertz Johanna. Heinrich Hertz. Erinnerungen, Briefe, Tagebücher. S. 179. Leipzig. 1927.
- 5—6. Hertz H. Wied. Ann., 34, 551, 1888.
7. Лебедев П. Н. Ж.Р.Ф.О., 27, 213, 1895; W. A., 56, 1, 1895.
8. Lampa A. Wien. Ber, 105, 2a, 587, 1049, 1896.
9. Rubens H. u. Aschkinass E. W. A., 65, 241, 1898.
10. Rubens H. u. v. Baeyer O. Berl. Ber., 606, 1911.
11. Lasky G. ZS. f. Phys., 10, 353, 1922.
12. Möbius W. Ann. d. Ph., 62; 293, 1920.

13. Nichols E. F. a. Tear J. D. *Phys. Rev.*, (2) 21, 537, 1923; *Astrophys. Journ.*, 61, 17, 1925.
14. Глаголева-Аркадьева А. А. Труды III съезда Российской ассоциации физиков 1922 г. Стр. 39. Нижний-Новгород, 1923. Труды ГЭИ, № 2. Изд. НТО ВСНХ, 1924; *Nature*, 113, 640, 1924; *ZS. f. Ph.*, 24, 153, 1924.
15. Глаголева-Аркадьева А. А. ДАН, т. III, № 6, 415, 1934.
16. Глаголева-Аркадьева А. А. Сб., посвященный десятилетию Моск. магнитной лаборатории (им. Максвелла), 87, М. 1929—1931; *ZS. f. Phys.*, 58, 134, 1929.
17. Левитская М. А. *Phys. ZS.*, 27, 177, 1926.
18. Лебедев П. Н. *Ж.Р.Ф.О.*, 32, 211, 1900; *Ann. d. Phys.*, 6, 433, 1901.
19. Righi A. *L'ottica delle oscillazioni elettriche*, Bologna, 1897.
20. Rubens H. u. Ritter R. *Ann. d. Ph.*, 40, 55, 1890.
21. Аркадьев В. *Ж.Р.Ф.О.*, 45, 46, 1913; *Ann. d. Ph.*, 45, 133, 1914.
22. Мандельштам Л. И. и Папалекси Н.Д. *Ж.Т.Ф.*, 7, 559, 1937.
23. Капцов Н. А. *Ann. d. Ph.*, 69, 122, 1922. Труды III съезда Российской ассоциации физиков. Стр. 23. Нижний-Новгород, 1923.
24. Аркадьев В. ДАН, № 6, 413, 1934; *Sov. Phys.*, 6, № 3, 327, 1934; *C. R.* 199, № 18, 848, 1934; *Ж. Э. Т. Ф.*, 7, 87, 1937.
25. Аркадьев В. и Морозова А. ДАН, № 7, 289, 1936.
26. Аркадьев В. К. *C. R.*, 199, № 18, 848, 1934.
27. Эйхенвальд А. А. *Ann. d. Ph.*, 62, 571, 1897.
28. Аркадьев В. *Ж.Р.Ф.О.*, 45, 46, 1913.
29. Аркадьев В. *Ж.Р.Ф.О.*, 45, 312, 1913; *Ph. ZS.*, 14, 928, 1913.
30. Аркадьев В. *Ж.Р.Ф.О.*, 56, 217, 1924.
31. Ferretti R. *Nuovo Cimento*, 13, 164, 1936.
32. Аркадьев В. *Ж.Р.Ф.О.*, 56; 194, 217, 321, 1924; *Phil. Mag.*, 50; 157, 1925; „Магнитная спектроскопия“, изд. НТО ВСНХ, М., 1924.
33. Аркадьев В. К. и Велецкая О. И. Изв. ОТН АН, № 2, 1938. Велецкая О. И. и Гойтанников В. М. „Практические проблемы электромагнетизма“, стр. 73. М. 1939. Изд. ОТН АН.
34. Лебедев П. Н. *W. A.*, 52, 621, 1894; 59, 116, 1896; 62, 158, 1897; Экспериментальное исследование действия волн на резонаторы, М., 1899.

ГЕНРИХ ГЕРЦ И СОВРЕМЕННАЯ РАДИОТЕХНИКА

Начало радиотехники неразрывно связано с именем одного из наиболее выдающихся физиков конца XIX столетия — Генриха Рудольфа Герца, доказавшего 50 лет тому назад существование электромагнитных волн. Нездолго перед тем работы Максвелла заставили многих усомниться в достоинствах теории дальнего действия, которая все электрические и магнитные явления описывала с точки зрения мгновенного действия на расстоянии. Эта теория, использовавшая понятие потенциала и аналогичную с явлением тяготения, хорошо объясняла электростатическое и магнитостатическое действия, но с большим трудом, несмотря на все остроумие Ампера и его последователей, укладывала в свои рамки взаимодействие электричества и магнетизма. Идеи Фарадея, приведшие его к такому фундаментальному открытию, как открытие электромагнитной индукции, полностью противоречили господствовавшей в то время теории. Придавая основное значение среде, Фарадей не мог признавать мгновенного действия на расстоянии. Максвелл, который принял физическую теорию Фарадея и придал ей математическое оформление, пришел к необходимости приписать электрическим и магнитным явлениям конечную скорость распространения, равную скорости света.

В теории Максвелла был, однако, один пункт, который должен был вызывать наибольшее сомнение. Для того чтобы всякий ток был замкнут, Максвелл ввел новое понятие о токе смещения. Этот ток смещения должен был существовать не только в диэлектриках, где его можно было объяснить перемещением зарядов (смещением электронов, как сказали бы сейчас), но и в эфире, где никаких зарядов быть не могло. Между тем, существование тока смещения и магнитного поля вокруг этого тока являлось краеугольным камнем теории Максвелла и основанием для утверждения о существовании электрических и магнитных явлений в пространстве без зарядов

и магнитных масс. Это положение, основанное на гипотезе, не проверенной опытом, хотя и придавшее стройность теории, но в корне противоречившее всем тогдашним взглядам, не могло быть приемлемо для большинства физиков второй половины XIX века. Знаменитые работы Максвелла „A Dynamical Theory of the Electro-magnetic Field“, написанная в 1864 г., и „Treatise on Electricity and Magnetism“, опубликованная в 1873 г., плохо воспринимались и по большей части считались мало обоснованными выдумками. Между тем, Максвелл был логичен до конца. Из его теории следовало, что электромагнитные возмущения могут существовать в диэлектрике лишь в виде поперечных волн, распространяющихся со скоростью света. Так как к тому времени уже восторжествовала волновая теория света, предложенная Гюйгенсом и разработанная Юнгом и Френелем, доказывавшая, что свет распространяется в „световом эфире“ в виде поперечных волн, то Максвелл, естественно, пришел к выводу об электромагнитной природе света.

Эту теорию, являвшуюся значительным шагом вперед по сравнению со старыми взглядами, теорию, которая произвела революцию в физике и дала основание для быстрого развития электродинамики, Герцу удалось обосновать рядом безукоризненных экспериментов.

Начиная с 1878 г., Герц размышляет о токе смещения. Необходимость высокой частоты для его доказательства еще тогда была ясна Герцу, но он не знал способов получения частот выше нескольких сот килогерц. Когда осенью 1886 г. при проведении опытов с возбуждением колебаний от простейшего искрового генератора ему удалось получить колебания с частотой порядка 60—70 MHz, он взялся за доказательство существования тока смещения, и в 1887 г. задача была решена. Применив открытый колебательный контур, Герц в 1888 г. доказал существование электромагнитных волн, конечную скорость их распространения и отражение от проводящих поверхностей. Однако для решающих опытов, которые должны были показать полную тождественность электромагнитных и световых волн, установить поляризацию волн и доказать существование не только их отражения, но и преломления, нужно было перейти к еще более коротким волнам. Герц получает волны, длиной приблизительно в 60 см (частота около 500 MHz), и с ними проводит последние опыты. Доклад об этих работах 13 декабря 1888 г., т. е. 50 лет тому назад, подвел итог двухлетним работам Герца, обесмертившим его имя.

Таким образом, Герц завершил развитие классической электродинамики, основы которой были заложены Фарадеем и Максвеллом. Он сделал понятными главные идеи этой теории и экспериментально доказал ее правоту. Недаром в дальнейшем, до создания электронной теории Лоренцом, теория электричества и магнетизма излагалась, а в значительной мере излагается и сейчас, в том виде, как она была оформлена Герцем и другим выдающимся ученым — Хевисайдом.

Однако, помимо этого, Герц своими опытами дал в руки физиков мощное экспериментальное орудие. Он не только показал, как надо работать на ультракоротких и даже на дециметровых волнах, но и построил излучающие и приемные устройства, направленные системы и целый ряд других элементов, которыми смогла воспользоваться народившаяся через несколько лет радиотехника. Хотя сам Герц и не думал о возможности практического применения своего открытия, передача электромагнитной энергии без проводов для целей связи получилась как естественное продолжение его опытов.

Надо сказать, что после своего доклада 13 декабря 1888 г., Герц сделался одним из самых популярных ученых. Его опыты были повторены чуть ли не всеми учеными, занимавшимися электромагнетизмом. Начали появляться усовершенствования. Из наиболее значительных надо упомянуть изобретение когерера Бранли. Вместо требующих чрезвычайно тонких измерений и неудобных приемных устройств с искровым разрядником были применены приемные устройства с когерером, которые значительно облегчали эксперимент. Благодаря применению когерера и воздушного провода, который мы теперь называем радиосетью или антенной, А. С. Попов мог построить свой „грозоотметчик“, т. е. практически первую в мире радиоприемную станцию. Правда, этот приемник принимал лишь грозовые разряды, но последние тоже представляют собой электромагнитные волны. После опытов с „грозоотметчиком“ А. С. Попову пришла мысль о возможности постройки и передающей станции, которая давала бы знаки азбуки Морзе. Аппаратура для приема электромагнитных волн была продемонстрирована А. С. Поповым на заседании Русского физико-химического общества 25 апреля (7 мая) 1895 г. через полтора года после смерти Герца. Этот момент и надо считать началом радиотехники.

А. С. Попов высказал свои соображения, что при помощи такой аппаратуры, которую он демонстрировал, возможна передача телеграмм без проводов.

В 1896 г. Маркони, использовав антенну, получил связь при помощи электромагнитных волн на расстояние в несколько километров и заявил патент на передачу телеграмм без проводов. В то время как Попов в России не мог добиться поддержки, Маркони организовал акционерное общество и получил деньги для проведения дальнейших опытов.

В 1901 г. была получена первая радиосвязь через Атлантический океан, и радиотехника вышла на широкую дорогу.

Значение опытов Герца неоднократно подчеркивалось всеми пионерами радиотехники. А. С. Попов, сумевший в 1895 г. передать телеграмму при помощи электромагнитных волн и тем положивший начало радиотелеграфии, говорил со свойственной ему скромностью, что он лишь повторил опыты Герца. Первая переданная им по радио телеграмма состояла лишь из двух слов: „Генрих Герц“. Однако при практическом применении электромагнитных волн радиоработники постепенно отходили от Герца.

Существенно новым в работах Попова и Маркони по сравнению с предыдущими опытами было применение антенны, давшее возможность значительно увеличить дальность действия. Применение антенны заставило радиотехнику отойти от того диапазона частот, на котором работал Герц. При первых опытах по радиосвязи искровой промежуток включался непосредственно в передающую антенну. Антенна возбуждалась на собственной длине волны. Как известно, собственная длина волны вертикального эземленного провода равна приблизительно учетверенной высоте. Так как дальность действия значительно увеличивается с увеличением высоты антенны, то радиосеть старались поднять возможно выше, и рабочая длина волны стала измеряться сначала десятками, а затем сотнями метров.

Опыты по связи на большие расстояния показали необходимость применения более длинных волн. Целым рядом измерений было показано, что напряженность электрического поля в среднем может определяться формулой:

$$E = 300 \sqrt{P_{\epsilon}} e^{-\frac{\alpha d}{\lambda \beta}},$$

где E — напряженность поля в mV/m , P_{ϵ} — мощность, излучаемая антенной, в kW , d — расстояние между передающей и приемной радиостанциями, λ — длина волны. Коэффициенты α и β могли быть с достаточной точностью приняты равными $\alpha = 0.0015$, $\beta = 0.5$, если

d и λ выражены в километрах. Надо сказать, что различные авторы предлагали те или иные изменения коэффициентов α и β , однако несомненным оставалось то обстоятельство, что с увеличением расстояния необходимо работать все большей и большей длиной волны. Поэтому в начале XX века наблюдается постепенный рост рабочих длин волн радиостанций. Максимум достигается к концу войны, к 1917—1918 г., когда трансатлантические станции строились на волнах 20 000 — 30 000 м.

Этому способствовало еще то обстоятельство, что к тому времени радиотехника отказалась от применения искровых радиостанций, дававших затухающие колебания. Начали применяться исключительно незатухающие колебания и в качестве генераторов — вольтова дуга и машина высокой частоты. Эти генераторы значительно лучше работали на длинных волнах.

Итак, за первые 30 лет, с 1888 по 1918 г., наблюдается постепенное увеличение длины волны, и радиотехника проходит весь диапазон частот от дециметровых волн до волн в десятки километров. Затем начинается обратный ход.

Этому способствовало прежде всего изобретение и усовершенствование электронной лампы. Передатчики с электронной лампой давали возможность получить любую длину волны, и преимущество, которое имели длинные волны при дуговых и машинных передатчиках, исчезло. Затем, при помощи ламповых приемников оказалось возможным вести прием при таких напряженностях поля, при которых ранее, на детекторных приемниках, нельзя было добиться радиоприема. Наконец, при помощи электронной лампы удалось достигнуть хорошей радиотелефонной передачи. Началось быстрое развитие радиовещания. Длинные волны для радиотелефонии неудобны, да к тому же они были заняты радиотелеграфной передатчей. Поэтому радиовещание, естественно, начало развиваться на средних волнах и постепенно заняло весь диапазон до 200 м. Приблизительно в то же время при помощи чувствительных ламповых приемников удалось доказать, что трансатлантическая связь вполне возможна на волнах порядка 100 м, что противоречило всей прежней практике радиотелеграфа. Более подробное рассмотрение этого вопроса показало, что законы распространения радиоволн короче 150—200 м отличаются от законов распространения длинных волн. Эти волны оказались весьма подходящими для связи на большие расстояния, причем чем большее расстояние надо перекрывать, тем более короткие волны надо применять.

Двадцатые годы этого столетия были заполнены освоением коротких волн и изучением законов их распространения. Эта работа в настоящее время может считаться почти законченной. И передатчики и приемники на коротких волнах являются технически достаточно совершенными. Связь на коротких волнах можно держать почти круглые сутки на тысячи километров. Скоро и этот диапазон оказался быстро заполненным, так как количество радиотелеграфных станций все увеличивалось. Этому способствовало то обстоятельство, что на коротких волнах оказалось возможным передавать радиограммы со скоростью 100 и более слов в минуту. И впервые в истории техники связи радиотелеграф не только мог конкурировать с передачей по кабелю, но и получил некоторое преимущество. Вместе с ростом числа телеграфных станций на короткие волны частично перешло и радиовещание, не только вследствие того, что на средних волнах не хватало места, но и потому, что почти во всех основных технически развитых странах появилось стремление к мировому радиовещанию, а передача на большие расстояния возможна лишь на коротких волнах. В настоящее время во всем коротковолновом диапазоне нет места, которое не было бы занято или радиовещательными или радиотелеграфными станциями.

В тридцатых годах начинается переход радиотехники на новый диапазон волн. Ультракороткие волны, которыми до этого времени занимались немногие лаборатории, становятся в центре внимания радиотехники. Сначала казалось, что затруднения в генерации и приеме ультракоротких волн слишком велики для того, чтобы можно было рассчитывать на уверенную работу на этих волнах. Законы распространения ультракоротких волн, ограничивающие передачу расстояниями, немного большими прямой видимости, казалось, не давали никаких новых перспектив в деле развития радиотехники на этом новом диапазоне.

Однако в последние годы оказалось, что этот пессимизм не был достаточно основателен: радиоаппаратура на ультракоротких волнах достигла высокой степени совершенства и в области передатчиков и в области приемников. Развитие местной связи, развитие связи между самолетами и землей, радионавигация и, в особенности, быстрое развитие телевидения повлекли за собой необходимость применения именно ультракоротких волн, так как эти волны для указанных выше целей оказались наиболее пригодными. Можно ожидать, что тридцатые годы нашего столетия так же закончат

освоение ультракоротковолновых диапазонов, как в 20-х годах был освоен коротковолновый диапазон. На очереди стало овладение новым диапазоном. Методика дециметровых волн, правда, еще разрабатывается в лабораториях, еще нет стабильных передатчиков на этих волнах, на этом диапазоне применяются самые примитивные приемники, и сделаны только первые шаги по изучению распространения этих волн и соответствующих антенных устройств. Однако большие возможности в области направленной передачи, секретной связи, большого количества радиостанций, которые могут поместиться на этом диапазоне, привлекают все передовые радиолaborатории к дециметровым волнам. Уже сейчас во многих радиожурналах статьи по ультракоротким и дециметровым волнам занимают более половины содержания. Пройдет еще несколько лет, и дециметровые волны станут основным рабочим диапазоном волн в радиотехнике.

Таким образом, после пятидесяти лет со времени опытов Герца радиотехника вернулась—правда, на новой основе—к тому диапазону волн, который впервые был получен Герцем и при помощи которого он устроил первую направленную радиосвязь. Переход на ультракороткие и дециметровые волны ставит перед радиотехникой снова те проблемы, которые интересовали Герца и в решении которых он был пионером.

Уже при изучении распространения коротких волн пришлось обратить особое внимание на поляризацию, интерференцию, преломление и отражение электромагнитных волн. Эти основные черты сходства радиоволн со световыми волнами еще резче проявляются в дециметровом диапазоне. Все законы оптики находят широкое применение при объяснении распространения ультракоротких и дециметровых волн. Если мы сейчас уже далеко ушли от примитивных опытов Герца и изучаем явления значительно более сложные и на значительно больших пространствах, то все же во многих случаях нам приходится оглядываться назад, возвращаться к самим истокам радиотехники.

И в области антенных устройств переход на ультракороткие и дециметровые волны привел к новым системам, приближающим современную радиотехнику к опытам Герца. Вместо сложных антенн, состоящих из множества диполей, или больших антенн, работающих бегущей волной, появились параболические рефлекторы, повторяющие герцевские. Правда, эти рефлекторы сейчас делаются не сплошными, а состоящими из отдельных проводов, — а далее

еще более будут совершенствоваться и усложняться, — но основная идея системы заимствована из оптики и поэтому является развитием идей Герца. Так как длина волны в несколько сантиметров достаточно мала, чтобы построить разнообразные системы, аналогичные оптическим, мы в ближайшем будущем в связи с работами по сантиметровым волнам увидим ряд замечательных систем. Некоторые из них начинают появляться. Для примера можно указать новые колебательные системы, имеющие не одно, а два главных измерения. Однако еще более замечательно то, что в излучающих системах напрашивается аналогия не только с оптикой, но и с акустикой. Новые диапазоны волн имеют длину того же порядка, что и звуковые волны. Следовательно, будущие излучающие системы позаимствуют многое не только от радиотехники и оптики, но и от акустики.

Интересно, что и в области передачи высокой частоты появляются новые пути, правда, также основанные на старых идеях. До сих пор мы привыкли считать, что электромагнитная энергия направляется проводами, что они служат, так сказать, рельсами для направления электромагнитной энергии. Однако, исходя из эквивалентности тока смещения и тока проводимости, можно предугадать, что возможно в некоторых случаях заменить провод диэлектриком.

И здесь Герц оказался пионером. Он предложил применить для приема рамку из диэлектрика и даже отлил замкнутое кольцо из парафина.

В настоящее время эти вопросы обследуются достаточно детально. Доказано, что при помощи кабеля из диэлектрика можно с успехом передавать электромагнитную энергию. Однако это имеет смысл делать лишь при длинах волн, сравнимых с периметром кабеля. Поэтому даже при дециметровых волнах такие кабели применять еще не следует, и лишь при переходе на сантиметровые волны этот вопрос станет технически актуальным.

Таким образом, и в области излучения, приема и направления электромагнитных волн современная радиотехника, постепенно развиваясь, дошла до такой ступени, когда вновь следует просмотреть самые основные принципы электромагнитного поля. Поэтому мы возвращаемся к тем вопросам, которые волновали Герца и в которых он проложил первые пути.

Было бы непростительным упустить из вида еще одно обстоятельство. Герц в 1887 г. открыл фотоэлектрический эффект. Это открытие он сделал мимоходом при опытах с колебаниями высокой

частоты, так как заметил, что искра в первичном контуре влияет на искру во вторичном контуре. Со свойственной ему добросовестностью, Герц исследовал это явление, збросив даже свою основную работу, пока не разобрал все до конца. Дальнейшие работы Хальвакса, Столетова, Эльстера и Гейтеля показали во всей широте это интереснейшее явление, разбор которого имел громадное значение для развития новой физики.

Не заставило себя ждать и техническое применение фотоэффекта. Наиболее существенным применением его надо считать телевидение. Эта область радиотехники развивается в удивительных темпах, и скоро передача телевидения будет таким же общедоступным делом, как и передача музыки в радиовещании. Уже сейчас телевидение достигло высокой степени совершенства. Сотни людей, смотревших высококачественное телевидение, с восторгом рассказывают о нем. И действительно, телевидение перестало быть техническим фокусом, а превратилось в культурное развлечение, и будущность его трудно переоценить.

Однако расширение высококачественного телевидения потребовало от радиотехники широкой полосы частот для неискаженной передачи. При той „тесноте в эфире“, о которой говорилось ранее, не могло быть и речи о передаче телевидения на средних или коротких волнах. Телевидение с трудом поместилось на ультракоротких волнах, и можно, пожалуй, предвидеть, что потребуется в скором времени дальнейшее укорочение волны.

Таким образом, в телевидении гармонично слились два открытия Герца — фотоэлектрический эффект и ультракороткие волны.

В связи с этим интересно отметить, что в последние годы своей жизни Герц занимался электронным потоком — катодными лучами. Известно, какую значительную роль играют электронные потоки в современной радиотехнике, а тем более в телевидении. И может быть, если бы преждевременная смерть не прекратила его работы, наша наука обязана была бы Герцу рядом открытий и в этой важнейшей области.

В теории электродинамики Герц сделал также очень много. Он не только дал излучающую систему — диполь Герца, но вывел его теорию из уравнений Максвелла. Применение функции, которая затем была обобщена и названа вектором Герца, относится к замечательнейшим страницам математической физики. Несколько исчерпывающим было то, что сделал Герц, можно судить хотя бы по тому, что во всех курсах радиотехники и электродинамики при-

водятся выводы Герца почти без изменения. Картина отщуровывания электрических силовых линий от диполя со времени Герца почти не изменилась и приводится в том виде, как ее создал Герц.

Поставив вопрос об излучении, Герц дал поле вблизи от провода и поле распространяющихся электромагнитных волн, но он не решил вопроса о природе самого излучения. Над этим вопросом после Герца работали многие ученые. Только Лоренцу удалось кое-чего добиться и получить излучение как результат колебательного движения электронов, но все же задача не была решена окончательно. Квантовая механика поставила этот вопрос на другую почву, но разрыв между излучением антенны и поведением электронов в атоме до сих пор не ззполнен.

До сих пор в радиотехнике излагают вопрос об излучении по Герцу с некоторыми дополнениями, которыми мы обязаны Лоренцу и Бриллюэну. Поэтому неудивительно, что излучение серьезно интересует радиоинженеров и современная теоретическая радиотехника стремится продолжить теорию Герца.

Из нашего обзора видно, что современная радиотехника, можно сказать, закончила „первый виток спирали“ и на новой основе подошла к вопросам ультравысокой частоты, которыми занимался 50 лет тому назад Герц. Работы Герца остались в науке как замечательное начало радиотехники, как непревзойденные образцы физического эксперимента. Мы сейчас продвинулись значительно дальше и в знании электромагнитного поля и в оснащении приборами для проведения физического и технического эксперимента. Овладение тем диапазоном волн, которым занимался Герц, обеспечено такими приборами, как электронная лампа, такими материалами, как современные керамические, имеющие ничтожные потери даже на этих ультравысоких частотах.

Уже одно имя Попова показывает, что могли бы сделать наши ученые, если бы в старой России были благоприятные условия работы. В Советской стране, где мудрым руководством партии и правительства обеспечены все условия для научной работы, для дерзания в науке, — ученые физики и радиотехники имеют все возможности создать новые „чудеса“ в науке и выдвинуться на первое место во всем мире. Изучение работ Герца, пятидесятилетие которых мы отмечаем, и работ других ученых поможет нам в наших новых достижениях.

ИССЛЕДОВАНИЯ

О

РАСПРОСТРАНЕНИИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЫ

Д-ра ГЕНРИХА ГЕРЦА

ПРОФЕССОРА ФИЗИКИ БОННСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

С 40 ФИГУРАМИ В ТЕКСТЕ

ЛЕЙПЦИГ

1892

UNTERSUCHUNGEN

UEBER DIE

AUSBREITUNG

DER ELEKTRISCHEN KRAFT

VON

DR. HEINRICH HERTZ

PROFESSOR DER PHYSIK AN DER UNIVERSITÄT BONN

MIT 40 FIGUREN IM TEXT



LEIPZIG

JOHANN AMBROSIVS BARTH

1892

СОДЕРЖАНИЕ

- О весьма быстрых электрических колебаниях 45
Предварительные опыты. — Индукционные действия незамкнутых токов. — Явления резонанса. — Узлы колебаний. — К теории вопроса. —
- Об электродинамических волнах в воздухе и об их отражении 76
- Силы электрических колебаний, рассматриваемые с точки зрения теории Максвелла 92
Формулы. — Силы вокруг прямолинейного вибратора. — Интерференционные опыты. — Волны в проволочных проводниках. —
- О лучах электрической силы 120
Приборы. — Возбудитель луча. — Прямолинейное распространение. — Поляризация. — Отражение. — Преломление. — Пояснения к рисункам. —
- О действии ультрафиолетового света на разряд электричества 136



ГЕНРИХ РУДОЛЬФ ГЕРЦ

О ВЕСЬМА БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ

(Über sehr schnelle elektrische Schwingungen. Wied. Ann., 31, 421, 1887).

ПЕРИОД электрических колебаний в разомкнутых индукционных катушках измеряется десятитысячными долями секунды. Приблизительно в сто раз быстрее совершаются колебательные разряды лейденской банки, которые наблюдал Феддерсен.¹ Теоретически возможны еще более быстрые колебания в незамкнутых проволоках из хорошо проводящего материала, концы которых не нагружены большими емкостями; но, конечно, теория не в состоянии решить, возможно ли в действительности возбудить эти колебания такой интенсивности, чтобы они стали заметными. На основании некоторых явлений я пришел к предположению, что колебания последнего рода действительно могут возникнуть при известных условиях, причем интенсивность колебаний настолько значительна, что действие их доступно наблюдению на расстоянии. Дальнейшие опыты подтвердили мое предположение, в виду чего здесь будут изложены наблюденные мною явления и произведенные опыты.

Колебания, о которых здесь будет идти речь, в свою очередь, приблизительно в сто раз быстрее наблюденных Феддерсеном. Период этих колебаний, определяемый, конечно, лишь при помощи теории, измеряется стотысячными долями секунды. Следовательно, в отношении продолжительности они занимают среднее место между звуковыми колебаниями весомых тел и световыми колебаниями эфира. Последнее обстоятельство и объясняет интерес, представляемый этими колебаниями, помимо того, что изучение их может оказаться полезным для теории электродинамики.

¹ Литературу см. Р. Колли, Wied. Ann., 26, 432, 1885 (а также примечание I в конце статьи).

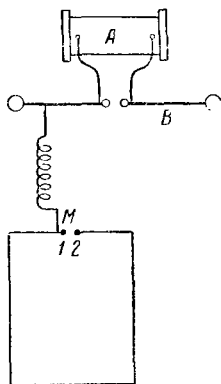
Предварительные опыты

Если в разрядную цепь индукционной катушки последовательно с искровым промежутком включить искровой микрометр Риса, полюсы которого соединены между собой длинным металлическим ответвлением, то, — если только длина воздушного промежутка микрометра не превысит известного предела, — разряд пройдет скорее через воздушный промежуток, чем через металлический провод. Это явление не ново; как известно, построение громкоотводов для телеграфных проводов имеет своим основанием именно это явление. Только в том случае, если металлическое ответвление коротко и обладает небольшим сопротивлением, можно рассчитывать на исчезновение искры в микрометре. И на самом деле длина получаемой искры уменьшается вместе с длиной ответвления, но, вообще говоря, полного потухания ее едва ли можно достигнуть. Даже и в том случае, когда оба шарика микрометра соединены толстой медной проволокой, длиной всего в несколько сантиметров, можно наблюдать искорки, хотя и очень короткие.

Этот опыт непосредственно доказывает, что в момент разряда потенциал изменяется вдоль разрядной цепи на величину в сотни вольт на протяжении всего лишь нескольких сантиметров, косвенно же он показывает, что скорость, с которой происходит разряд, чрезвычайно велика. Это объясняется тем, что разность потенциалов у шариков искромера может рассматриваться как результат действия самоиндукции в металлическом ответвлении. Время, в течение которого потенциал на одном шарике испытывает заметные изменения, будет того же порядка, что и время, в продолжение которого изменения доходят до другого шарика через короткий отрезок хорошего проводника. Можно было бы предположить, пожалуй, столь большую плотность разрядного тока, что одно лишь сопротивление ответвления обусловит разность потенциалов на шариках микрометра. Но приблизительное рассмотрение количественных условий показывает, что такое предположение не основательно, а в дальнейших опытах такое предположение не может быть вовсе сделано.

Замкнем опять искровой микрометр при помощи хорошего металлического провода, например медной проволоки, диаметром 2 мм и длиной 0.5 м, согнутой в прямоугольник; но при этом мы не включаем его в разрядную цепь индукционной катушки, а соединяем только один из ее полюсов с какой-нибудь точкой разрядной цепи при помощи промежуточной проволоки. На фиг. 1 представлено расположение приборов: *A* схематически изображает индукционную катушку, *B* — разрядник, *M* — микрометр. Во время действия индукционной катушки мы будем опять наблюдать в микрометре поток искр, достигающий иногда длины в несколько миллиметров.

Этот опыт показывает, во-первых, что в момент разряда интенсивные электрические движения происходят не только в разряднике, но и во всех соединенных с ним проводах; во-вторых, он показывает нагляднее, чем предыдущий опыт, что эти движения происходят очень быстро и поэтому должен быть принят во внимание даже тот промежуток времени, в продолжение которого электрические волны проходят через короткие металлические провода. В самом деле, опыт этот можно объяснить только таким образом, что изменение потенциала, создаваемое индукционной катушкой, достигнет шарика 1 раньше, чем шарика 2, причем различие во времени оказывается доступным наблюдению. Это явление становится поразительным, если принять во внимание, что электрические волны, насколько это нам известно, распространяются в медной проволоке почти со скоростью света. Поэтому мне казалось достойным труда исследовать, какие условия будут способствовать появлению сильных искр в микрометре. Для краткости эту искру в противоположность собственно разряднику мы будем называть смежной искрой и разрядную цепь микрометра — смежной цепью.



Фиг. 1

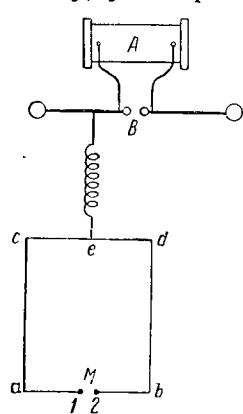
Прежде всего оказалось, что для достижения смежных искр, длиной в несколько миллиметров, требуются сильные разряды. Поэтому для всех дальнейших опытов я пользовался большой индукционной катушкой Румкорфа, длиной в 52 см, диаметром в 20 см; катушка была снабжена ртутным прерывателем и возбуждалась шестью большими элементами Бунзена. При маленьких индукционных катушках получались в качественном отношении те же результаты, но смежные искры были в этом случае короче, и поэтому наблюдать различие между ними было труднее. То же самое имело место и при разряде лейденских банок или батарей, которые были включены вместо индукционной катушки. Далее оказалось, что и в случае применения одного и того же прибора большое значение имеет характер возбуждающей искры в разряднике. Если искра будет возникать между двумя остриями или между острием и пластиной, она вызывает лишь весьма слабые смежные искры; точно так же не производит действия разряд через разреженные газы или в трубке Гейслера. Хорошее действие получается только при искре между двумя шариками, причем искра не должна быть ни короткой ни длинной. Если она короче 0.5 см, то смежные искры будут слабыми, если же длиннее 1.5 см, то они почти совершенно не появляются.

При дальнейших опытах оказалось самым подходящим брать длину искры приблизительно в 0.75 см и диаметр латунных шариков в 3 см. Но и такие искры не всегда одинаково проявляли свое действие; малейшие обстоятельства, часто не находящиеся в видимой связи, могли вызвать бездеятельную искру вместо деятельной. После некоторого упражнения по виду и шуму искры можно судить о ее способности возбуждать смежные искры. Деятельные искры белого блестящего цвета, слегка зазубрены и сопровождаются резким треском. Легко показать, что искра в разряднике является существенным условием для смежной искры; для этого нужно раздвинуть разрядные шарики настолько, чтобы перейти пробивное расстояние индукционной катушки; тогда исчезнет всякий след смежной искры, хотя появляющиеся напряжения будут больше, чем раньше.

Понятно, что длина цепи микрометра имеет большое влияние на длину искры в ней. Чем цепь длиннее, тем больше будет замедление, которое испытывает проходящая электрическая волна между появлением ее на одном и на другом шариках микрометра. Если ответвления взять весьма небольшой длины, то смежные искры будут очень короткими, но едва ли возможно составить такую цепь, в которой при благоприятных условиях все-таки не появились бы искры. Если толстую медную проволоку длиной 4—6 см заострить на концах, загнуть в почти замкнутый круг, изолировать ее и прикоснуться затем этой маленькой проволочной цепью к разряднику, то разряды индукционной катушки будут вообще сопровождаться некоторым, весьма коротким потоком искр между остриями. Толщина и материал, следовательно, и сопротивление цепи ответвления имеют весьма незначительное влияние на длину смежной искры. Поэтому мы были в праве отрицать, что сопротивление вызывает появление разности потенциалов. И на основании нашего представления об этих явлениях мы не должны удивляться тому, что сопротивление почти совсем не играет роли, так как скорость распространения электрической волны в проволоке зависит только от ее емкости и самоиндукции, но не от ее сопротивления. Точно так же не оказывает существенного влияния и длина соединительной проволоки между главной цепью и смежной, если только она не превысит длины в несколько метров. Можно предположить, что электрическое возмущение, идущее от главной цепи, распространяется через эту проволоку без значительного ослабления.

Но зато положение точки приключения соединяющего провода к смежной цепи оказывает весьма значительное влияние на длину смежной искры. Этого и приходится ожидать, если наше толкование явления вообще верно. В самом деле, если место приключения расположить так, чтобы пути от него до обоих шариков микрометра были равны, то каждое изменение, распространяющееся через соединительный провод, будет достигать обоих шариков в одинаковых фазах, и разность потенциалов между ними не может появиться. Это предположение подтверждается

опытом. Так, если мы место подвода к смежной цепи, которое мы до сих пор представляли находящимся у одного из шариков микрометра, будем удалять все больше и больше от последнего, то длина искры будет уменьшаться; при некотором положении искры потухнут совершенно или почти совершенно; искры будут увеличиваться опять, по мере того как место подвода будет приближаться ко второму шарiku микрометра, и достигнут здесь такой же длины, как и у первого шарика. Точку, у которой наступает минимальная длина искры, мы назовем нейтральной точкой. Обыкновенно положение ее можно определить с точностью до нескольких сантиметров.



Фиг. 2

Оказывается, что она находится почти посередине проволоки, соединяющей шарики микрометра. Если провод вправо и влево от соединительного проводника между микрометром и нейтральной точкой симметричен, то всегда происходит совершенное затухание искры. Явление это можно наблюдать даже в очень короткой ответвленной цепи. Фигура 2 показывает целесообразное расположение этого опыта. *abcd* представляют прямоугольник из голой медной проволоки, диаметром в 2 мм, изолированный на сургучных подставках.¹ В моих опытах ширина прямоугольника была равна 80 см, а длина — 125 см. Если подводящий провод будет присоединен к шарикам 1 или 2 либо между точками *a* и *b*, то между шариками 1 и 2 появятся искры, длиной в 3—4 мм; при подводе к точке *e*, как показано на фигуре, получить искры совершенно невозможно; при перемещении места подвода на несколько сантиметров вправо или влево в микрометре появятся искры. Нужно иметь в виду, что искры, длиной в несколько сотых миллиметра, мы считаем уже заметными.

¹ См. примечание 2 в конце статьи.

Следующий опыт показывает, что наше толкование явления не достаточно полно. А именно: если после того, как соединительный провод будет приключен в нейтральной точке, к одному из шариков микрометра присоединить еще добавочный провод, то опять появятся интенсивные искры. Одновременный приход волн, исходящих из e в 1 и 2 , не может быть изменен этим добавочным проводом. Между тем легко объяснить и этот опыт: происходящее явление не ограничивается однократным пробегом волны к a и b , но волны отражаются и несколько, а может быть и много раз пробегают по смежной цепи и таким образом вызывают в ней стоячие волны. Если пути esa 1 и edb 2 равны, то и отраженные волны придут одновременно в 1 и 2 . Если же будет отсутствовать волна, отраженная от одного из шариков, как в последнем опыте, то искры будут вызваны, хотя и не первым импульсом, идущим от e , но все же отраженными волнами. Следовательно, мы должны себе представить, что внезапное изменение, достигающее e , возбуждает собственные колебания в смежной цепи, вроде того как удар молотком вызывает собственные колебания упругого стержня. Если такое представление верно, то существенным условием для исчезновения искр в M должно быть равенство периодов колебаний обоих отрезков $e1$ и $e2$. Эти периоды колебаний определяются произведением коэффициента самоиндукции этого отрезка провода на емкость его концов; они почти не зависят от сопротивления отрезка. Нижеследующие опыты могут послужить для проверки этого вывода, их результаты оказываются в согласии с ним.

Если подвод установить в нейтральной точке и прикоснуться к одному из шариков микрометра изолированным проводником, то сейчас же опять появятся искры, так как емкость ветви будет увеличена. Достаточно даже изолированного шарика, диаметром в 2—4 см; чем больше присоединенная емкость, тем интенсивнее будут искры. Прикосновение к нейтральной точке e не будет оказывать никакого влияния, так как последнее передается на обе ветви равномерно. Действие присоединения емкости к одной ветви может быть уничтожено присоединением равной емкости к другой ветви. Это действие

может быть также уничтожено перемещением подводящего провода по направлению к нагруженной ветви, т. е. посредством уменьшения самоиндукции последней. Такое же действие, как и присоединение емкости, производит увеличение коэффициента самоиндукции. Если разрезать одну ветвь и вставить несколько сантиметров или дециметров свернутой в катушку медной проволоки, то опять появятся искры. Произведенное изменение может быть уничтожено посредством включения медной проволоки одинаковой длины в другую ветвь, или посредством перемещения соединительной проволоки по направлению к измененной ветви, или посредством присоединения подходящей емкости к другой ветви. Но следует заметить, что если ветви неодинаковы, то можно достигнуть лишь минимальной длины искры, но не полного ее потухания.

Сопротивление ветвей оказывает очень незначительное влияние на явления. Когда в одной ветви толстая медная проволока была заменена значительно более тонкими проволоками из меди или нейзильбера, то равновесие ветвей этим не было нарушено, хотя сопротивление одной ветви было во сто раз больше сопротивления другой. Правда, очень большие жидкие сопротивления делали невозможной установку на потухание искры; такое же влияние оказывали короткие воздушные промежутки, включенные в одну из ветвей.

Коэффициент самоиндукции железных проволок при медленно изменяющихся токах приблизительно в 8—10 раз больше коэффициента самоиндукции медной проволоки одинаковой длины и толщины. Поэтому я полагал, что короткие железные проволоки будут уравновешивать длинные медные проволоки. Это предположение не оправдалось; равновесие между ветвями сохранялось, когда медная проволока заменялась железной проволокой одинаковой длины. Если наше представление о наблюдаемом явлении верно, то это можно объяснить только тем, что магнитные свойства железа не могут проявиться при таких быстрых колебаниях, как в данном случае. Один из нижеприведенных опытов, повидимому, подтверждает это заключение.

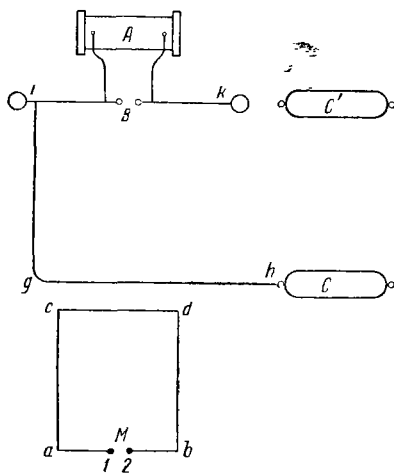
Индукционные действия незамкнутых токов

Искры, появлявшиеся при предыдущих опытах, возникают, по нашему предположению, благодаря самоиндукции. Но если принять во внимание, что это индукционное действие вызывается крайне слабыми токами в коротких прямых проводах, то мы в праве усомниться, действительно ли его можно считать достаточным объяснением появления искры. Для того чтобы устранить это сомнение, я старался узнать, не вызывают ли наблюдаемые электрические движения соответственных по силе действий также и в соседних проводах. Для этого я приготовил из медной проволоки прямоугольники со сторонами в 10 — 20 см, имевшие весьма короткий искровой промежуток. Эти прямоугольники, будучи изолированными, приближались к прямым проводам, в которых возбуждалось движение электричества, и притом так, что одна сторона прямоугольника была параллельна проводу. При достаточном приближении в том проводнике, который приближали, всегда появлялся поток искр, сопровождающий разряды индукционной катушки. Интенсивнее всего появлялись эти индуктивные искры вблизи разрядника, но наблюдались также и около провода, ведущего к ответвлению, а также у ветвей этого последнего.

Между индуктирующим и индуктируемым проводами разряд не происходил, — это было тщательно констатировано; возможность такого разряда специально устранялась прокладкой твердого изолятора. В этом отношении ошибка в истолковании явления едва ли возможна. То обстоятельство, что индукция между двумя простыми короткими отрезками проволоки, в которых движутся лишь небольшие количества электричества, может все-таки возрасти до образования искры, снова указывает, что время, в продолжение которого эти небольшие количества электричества двигаются в проводах туда и обратно, необычайно мало.

Для того чтобы изучить эти явления поближе, я опять воспользовался прямоугольником, который раньше мне служил ответвлением, применяя его в качестве индуктируемого проводника. Как показывает фиг. 3, вдоль корот-

кой стороны прямоугольника на расстоянии 3 см была натянута вторая медная проволока gh , которая соединялась с какой-нибудь точкой разрядника. Пока конец h проволоки gh был свободен, в микрометре M появлялись лишь совершенно ничтожные искорки, которые возникали под влиянием разрядных токов проволоки gh . Но в микрометре появлялись искры, длиной от одного до двух миллиметров, когда к h был подвешен изолированный кондуктор C , отделенный от электростатической машины, так



Фиг. 3

что через проволоку должны были проходить большие количества электричества. Причиной этого не была электростатическая индукция кондуктора: когда он был подвешен вместо h в g , он не оказывал никакого действия. Зарядный ток кондуктора также не был тому причиной; это было исключительно действие внезапного разряда, вызванного искрой. В самом деле, когда шарики разрядника индуктора были раздвинуты на-

столько, что между ними не проскакивала искра, то и в индуктированной цепи искра также совсем не появлялась.

Не всякого рода искра вызывала достаточно сильно действующий разряд; только те искры, которые вызывали раньше сильные смежные искры, оказывались способными возбудить в данном случае индукционное действие. Во вторичной цепи возбужденные искры переходили не только между шариками микрометра, но также и от последних к другим изолированным проводникам, которые приближались ко вторичной цепи. Искры заметно укорачивались при соединении шариков с кондукторами большой емкости или при прикосновении к одному из них рукой;

очевидно, количество электричества, приведенное в движение, было слишком мало, чтобы зарядить до полного напряжения проводник большой емкости. Наоборот, соединение обоих шариков микрометра посредством короткой влажной нитки не оказывало особенного влияния на появление искры. Физиологические действия индуктированного тока не замечались; можно было, не ощущая сотрясения, прикасаться ко вторичному проводу, замыкать его через тело.

Некоторые побочные явления привели меня к предположению, что движение электричества по проволоке gh потому производит такое сильное индуктирующее действие, что оно не состоит из простого разрядного тока, а имеет колебательный характер. Поэтому я старался усилить индукцию тем, что достигал более благоприятных условий для возникновения сильных колебаний. Нижеследующее устройство опыта особенно соответствовало моей цели. Я подвесил, как и раньше, кондуктор C к проводу gh и раздвинул шарики искромера настолько, что проскакивали лишь редкие искры. Далее, ко второму свободному полюсу разрядника k (фиг. 3) я подвесил второй кондуктор C' , приблизительно такой же, как и первый. Благодаря этому получился опять очень сильный поток искр, и при дальнейшем раздвигании микрометра можно было получить заметно более длинные искры, чем раньше. Причиной этого не может быть непосредственное действие провода ik , так как оно должно было бы ослаблять действие тока, идущего по gh , следовательно, должно иметь место действие конденсатора C' на разрядный ток C . Если мы примем, что разряд кондуктора C аperiодический, то такое действие является необъяснимым. Но оно будет понятным, если мы сделаем допущение, что индуктирующий ток в gh представляет собой электрические колебания, которые происходят один раз в системе C —проводка gh —разрядник, другой раз в системе C —проводка gh —проводка ik — C' . Ясно, во-первых, что вторая система обладает более интенсивным собственным колебанием и, во-вторых, что искра в ней расположена на более подходящем месте для возбуждения колебаний.

Предоставим нижеследующему подтвердить далее наше представление. Но уже теперь мы можем в пользу его привести то обстоятельство, что оно позволяет более точное обследование той роли, которую играет в опыте разряд катушки Румкорфа. А именно, если для получения индукционного действия требуются колебательные движения в проводе $C—C'$, то недостаточно, если и искра в этом проводе появится на чрезвычайно короткое время; она должна еще и уменьшить сопротивление провода ниже известного значения, а для этого необходимо, чтобы, начиная с первого момента, плотность тока не падала ниже некоторого предельного значения. Поэтому мы получим лишь чрезвычайно слабое индукционное действие, если станем заряжать кондукторы C и C' противоположными потенциалами не при помощи катушки Румкорфа, а посредством электростатической машины,¹ и затем дадим им разрядиться; поэтому действие будет точно так же весьма слабым при применении маленькой индукционной катушки или включении слишком большого искрового промежутка; во всех этих случаях движение будет аperiодическим. Наоборот, сильный разряд индукционной катушки вызывает колебания и вместе с этим сильное внешнее действие именно тем, что выполняет следующие функции: во-первых, он заряжает концы C и C' провода до высокого потенциала; во-вторых, он вызывает внезапную искру; в-третьих, по наступлении разряда он поддерживает сопротивление воздушного промежутка таким малым, что могут возникнуть колебания. Если емкость концов провода очень велика, как, например, у обкладок батареи, то, как мы знаем, разрядный ток этих емкостей сам в состоянии достаточно понизить сопротивление искрового промежутка; при малых же емкостях эту функцию должен выполнять посторонний разряд, и по этой причине в условиях нашего опыта для возбуждения колебаний необходим разряд катушки Румкорфа.

Так как при только что описанном опыте индуктированные искры достигали длины в несколько миллиметров, то я не сомневался, что и при значительно большем

¹ См. примечание 3 в конце статьи.

расстоянии между действующими отрезками проволок можно было еще получить искры, и поэтому я произвел в опыте несколько изменений, представляющих интерес. Индуцирующему току я придал вид прямой линии (фиг. 4). Концы его образовывали кондукторы C и C' . Последние находились на расстоянии 3 м друг от друга и были соединены медной проволокой, толщиной в 2 мм, в середине которой находился разрядник индукционной катушки. Индуцируемая цепь была такой же, как и в предыдущих опытах, т. е. шириной 80, длиной 120 см. Когда наименьшее расстояние между обоими проводами было взято в 50 см, то еще получались индуцированные искры длиной 2 мм; когда же расстояние увеличивалось, длина искры быстро уменьшалась, но и при наименьшем расстоянии в 1.5 м еще замечался равномерный поток искр. Без ущерба для опыта можно было двигаться между индуцирующим проводом и индуцируемым. То обстоятельство, что наблюдаемое явление действительно имело своей причиной прямолинейный ток, было подтверждено опять несколькими проверочными опытами. Когда я удалял одну или обе половины прямолинейного провода, искры в микрометре прекращались, хотя индукционная катушка и продолжала действовать. Точно так же искры прекращались, когда шарики разрядника были раздвинуты настолько, что это препятствовало появлению в нем искр. При этом, однако, электростатические напряжения на концах кондукторов C и C' только возрастают; это и служит доказательством, что не они являются причиной искр в микрометре.

Индуцированный ток был до сих пор замкнутым, но легко можно было предположить, что в незамкнутом проводнике индукция проявилась бы в такой же степени. Поэтому параллельно прямолинейной проволоке предыдущего опыта на расстоянии 60 см была натянута вторая медная изолированная проволока. Последняя была несколько короче первой, на ее концах были укреплены два изолированных шара, диаметром в 10 см; в середине ее был введен искровой микрометр. Когда индукционная катушка была приведена в действие, поток искр катушки сопровождался потоком искр во вторичном проводе.

Здесь, однако, нужно быть осторожным в толковании опыта, так как наблюдаемые искры не являются исключительно следствием индукции. Переменное движение в проводе CC' налагается на разряд собственно катушки Румкорфа. Последний же в продолжение всего своего действия обуславливает заряд кондуктора C одним знаком, кондуктора C' другим. Эти заряды вовсе не оказывали действия на замкнутую цепь предыдущего опыта, но в теперешнем разомкнутом проводе, благодаря исключительно электростатической индукции, они обуславливают противоположные заряды обеих его частей, а вместе с этим и искры в микрометре. И на самом деле, если мы в данном случае раздвинем шарики разрядника до потухания в нем искр, то в микрометре будут все еще проскакивать искры, хотя и более слабые. Эти искры зависят от электростатической индукции, присоединяющейся к тому действию, которое мы хотим выделить.

Между тем, существует простой способ устранить мешающие искры. Они исчезнут, если мы устроим плохо проводящее соединение между шариками микрометра, лучше всего при помощи влажной нитки. Очевидно, что проводимость этой нитки достаточна для того, чтобы позволить току следовать за сравнительно медленными изменениями разряда катушки Румкорфа, но она недостаточна, как мы уже видели, для того, чтобы способствовать выравниванию электричества при крайне быстрых колебаниях в прямолинейном проводе. Если мы после присоединения нитки вызовем опять в первичной цепи искру, то и во вторичном проводе опять появятся сильные искры, но они обусловлены уже исключительно действием быстрых колебаний в первичном прямолинейном проводе. Я испытывал, на каком расстоянии будет все еще проявляться это действие. При расстоянии в 1.2 м между параллельными проволоками искры были еще достаточно заметны; наибольшее расстояние по перпендикуляру, на котором можно еще было устойчиво наблюдать появление искр, было 3 м. Так как электрическое действие с расстоянием уменьшается быстрее индукционного, то при больших расстояниях было излишним усложнять опыт применением влажной нитки; даже и без послед-

ней только такие разряды, которые возбуждают в первичной проволоке колебания, вызывали искры во вторичном проводе.

Я думаю, что здесь впервые было показано на опыте взаимодействие прямолинейных разомкнутых токов, имеющее такое большое значение для теории.

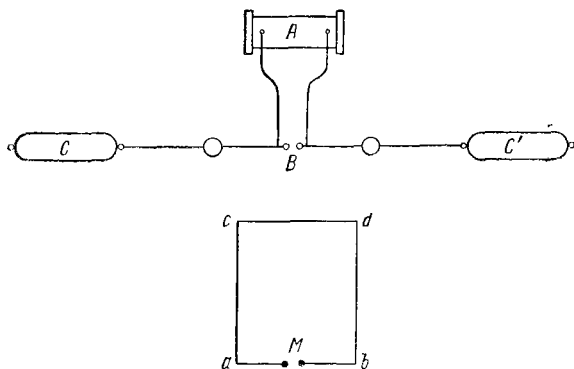
Явления резонанса

Можно считать доказанным на опыте существование весьма быстро изменяющихся токов с сильным индукционным действием на провода, которые находятся в связи с разрядной цепью. До сих пор существование правильных колебаний было принято только для того, чтобы объяснить сравнительно немногие явления, которые, быть может, допускают и другое толкование; однако, существование таких колебаний было бы доказано, как мне думалось, если бы удалось показать, что между обеими цепями тока, действующими друг на друга, существуют резонансные отношения. По принципу резонанса строго колебательный ток при прочих равных условиях должен произвести гораздо большее индукционное действие на цепь с одинаковым периодом колебания, чем на такую, период которой несколько иной.¹ Следовательно, если заставить действовать друг на друга такие две цепи тока, относительно которых можно предположить, что они имеют почти одинаковый период колебания, и если изменять затем непрерывно емкость или коэффициент самоиндукции, а вместе с этим и период колебаний одной из них, то резонанс должен будет выразиться в том, что при определенных значениях этих величин индукционное действие будет сильнее, чем при близких значениях с обеих сторон.

По этому принципу были произведены следующие опыты, которые после некоторых попыток, привели к результату, соответствующему ожиданиям. Устройство опыта почти такое же, как показанное на фиг. 4, лишь размеры проводов были несколько изменены. Первичным

¹ Ср. Oberbeck, Wied. Ann., Bd. 26, S. 245. 1885.

проводником служила совершенно прямая медная проволока, длиной 2.0 м и толщиной 5 мм. В середине она была разрезана для введения возбуждающего искрового промежутка. Оба маленьких шарика, между которыми происходил разряд, были насажены непосредственно на проволоку и соединены с полюсами индукционной катушки. На концах проволоки были расположены два шара диаметром 30 см, изготовленные из толстого цинкового листа. Эти шары можно было передвигать по проволоке. Так как в электрическом смысле они образовывали



Фиг. 4

всегда концы цепи, то можно было легко укорачивать или удлинять эту цепь. Вторичный провод имел такие размеры, что он должен был иметь несколько более короткий период колебания, чем первичный; он состоял из медной проволоки, диаметром 2 мм, и имел вид квадрата со стороной в 75 см. Наикратчайшее расстояние между обоими проводниками было взято равным 30 см, и первичному току была придана полная длина. При этих условиях длина наибольшей искры в индуктированной цепи была равна 0.9 мм. Когда к обоим полюсам этой цепи прикасались двумя изолированными металлическими шариками, диаметром 8 см, то длина искры увеличивалась, и при известном приближении обоих шаров друг к другу могла быть доведена до 2.5 мм. Наоборот, если к обоим

полюсам прикасались двумя кондукторами с весьма большой поверхностью, то длина искры уменьшалась до малой доли миллиметра. Совершенно аналогичные явления имели место, когда полюсы вторичной цепи были соединены с пластинами конденсатора Кольрауша. При большом расстоянии между пластинами это увеличение емкости действовало благоприятно на длину искры, при приближении пластин друг к другу длина искры опять уменьшалась до весьма малых значений. Емкость вторичной цепи удобнее всего было регулировать тем, что над ее обоими концами были подвешены два параллельные куска проволоки, расстояние между которыми и длина которых изменялись. При тщательном регулировании длина искры повышалась до 3 мм и после этого уменьшалась как при увеличении, так и при уменьшении длины проволоки. То обстоятельство, что с увеличением емкости уменьшается длина искры, является естественным, а то, что при этом она увеличивается, можно объяснить только резонансом.

Если предыдущие опыты были истолкованы правильно, то вторичная цепь тока без присоединенной емкости имела несколько более короткий период, чем первичная. Поэтому, если ускорять колебания первичной цепи, должен возникнуть резонанс. И на самом деле, когда длину первичной цепи я уменьшал вышеуказанным образом, длина искры увеличивалась, она снова достигала максимума в 3 мм, когда расстояние между центрами шаров равнялось приблизительно 1.5 м, и уменьшалась опять при дальнейшем их сближении. Можно было бы думать, что длина искры будет теперь увеличиваться еще дальше, если снова увеличивать, как раньше, емкость вторичной цепи. Но это не происходит — подвешивание тех же самых проволок, которые раньше увеличивали длину искры, уменьшает ее теперь приблизительно до 1 мм. Это соответствует нашему толкованию явления: что раньше приводило к равенству периодов колебаний, нарушает теперь это равенство, достигнутое другим путем. Убедительнее всего был опыт, когда его производили следующим образом. Искровой микрометр был установлен на постоянную длину искры в 2 мм. Если теперь

вторичная цепь имела первоначальное устройство и первичная цепь была длиной 1.5 м, то искры проскакивали регулярно. Искры потухали совершенно, когда ко вторичной цепи была присоединена вышеупомянутым образом небольшая емкость; искры появлялись опять, когда после этого первичная цепь была доведена до длины 2.6 м; они потухали во второй раз, когда емкость, присоединенная ко вторичной цепи, была удвоена, и их можно было заставить еще раз появиться и исчезнуть путем непрерывного увеличения емкости удлиненной первичной цепи. Этот опыт показывает довольно наглядно, что причину, обуславливающую сильное действие, нужно искать не в соотношениях для каждой из цепей, а в одинаковости их для обеих цепей.

Длина индуктированной искры при большем сближении обоих проводов становилась значительно больше приведенных до сих пор значений. При расстоянии в 7 см между обеими цепями и при установке на точный резонанс удалось получить индуктированные искры, длиной 7 мм; при этом электродвижущие силы, появляющиеся в индуктируемом проводнике, были почти такой же величины, как и в индуктирующем.

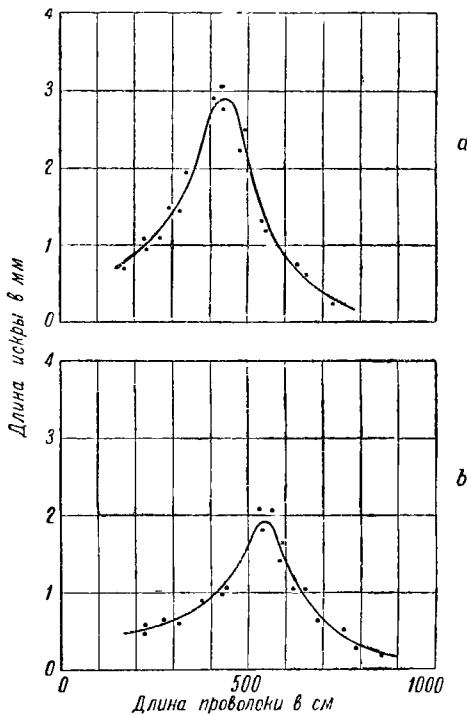
В предыдущих опытах резонанс был достигнут посредством изменения коэффициента самоиндукции и емкости первичной цепи, а также и емкости вторичной цепи. Дальнейшие опыты показывают, что можно воспользоваться также изменением самоиндукции вторичной цепи. Был изготовлен ряд прямоугольников $acdb$ (фиг. 4), в которых стороны ab и cd были взяты одной и той же длины, но для сторон ac и bd брались проволоки все большей длины, начиная от 10 до 250 см. Ясно выраженный максимум длины искры получался при длине прямоугольника в 1.8 м. Для того, чтобы можно было иметь почву для суждения о количественных условиях, я измерял наибольшие появлявшиеся искры при различных длинах индуктируемой цепи. На фиг. 5, *a* представлены результаты.¹ Абсциссы определяют полную длину индуктируемого провода, ординаты — максимальные дли-

¹ См. примечание 4 в конце статьи.

ны искр. Точки изображают отдельные наблюдения. Эти измерения, как и все измерения длин искр, весьма ненадежны; но их ненадежность не в состоянии затемнить главный результат. В другом ряде опытов была сохранена не только длина сторон ab и cd , но также и их расстояния в 30 см и положение; стороны же ac и bd составлялись из свернутых спиралью проволок, длина которых бралась все больше и больше. Фигура 5, b изображает полученные результаты. Максимум здесь получается при несколько более длинной проволоке. Это, по видимому, можно объяснить тем, что здесь при удлинении увеличивается только коэффициент самоиндукции, а в предыдущем случае — как коэффициент самоиндукции, так и емкость.

Несколько опытов было произведено для определения того, как изменяется явление

при изменении сопротивления вторичного провода. Для этой цели сторона прямоугольника была заменяема различными тонкими проволоками из меди и нейзильбера, благодаря чему сопротивление вторичной цепи увеличивалось во сто раз. На длину искры это изменение имело весьма небольшое влияние, на явление же резонанса, т. е. на период колебаний, совершенно никакого.



Фиг. 5

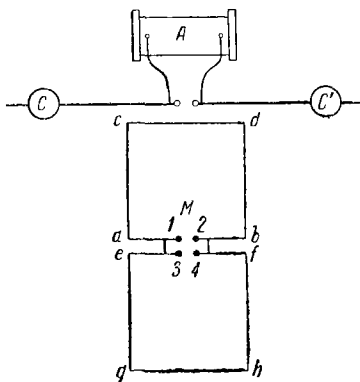
Дальнейшие опыты должны были выяснить влияние железа. При этом проволока *cd* иногда помещалась в железную трубку, иногда заменялась железной проволокой. Ни одно из этих изменений не произвело заметного влияния в каком-нибудь направлении. И в данном случае вероятным будет предположение, что магнетизм железа не в состоянии поспевать за крайне быстрыми колебаниями и остается бездейственным по отношению к ним. К сожалению, нет никаких опытных данных о том, какое влияние оказывает присутствие железа на колебательный разряд лейденских банок.

Узлы колебаний

Колебания, которые были вызваны в индуктируемой цепи и которые были измерены нами при помощи искр в микрометре, не представляют собой единственно возможных колебаний в данном проводе, они лишь наиболее простые из возможных. В то время как на концах потенциал все время колеблется то в одном, то в другом направлении между двумя пределами, в середине проводника он сохраняет постоянно одно и то же среднее значение. Поэтому эта середина образует узловую точку электрического колебания, и колебание имеет только одну эту узловую точку. Существование ее можно доказать также путем опыта и притом двумя способами. Это может быть достигнуто, во-первых, тем, что к проводу приближают изолированный маленький шарик. Среднее значение потенциала этого шарика не может заметно отличаться от такового же в ближайшем отрезке проволоки, поэтому появление искр между шариком и проволокой может быть объяснено только тем, что потенциал соседней точки провода совершает достаточно большие колебания около среднего значения. Поэтому интенсивные искры должны появиться в концах провода, а вблизи узловой точки они должны отсутствовать. В действительности так и бывает, но только, конечно, полного отсутствия искры при прикосновении к узловой точке не наблюдается, а имеет место уменьшение ее до

минимального значения. Второй способ доказательства существования узловой точки нагляднее. Индуктируемую цепь регулируют на резонанс с индуктирующей и устанавливают искровой микрометр на такую длину искры, при которой вне условий резонанса искра не может пройти. Если прикоснуться кондуктором с некоторой емкостью к какой-нибудь точке провода, то нужно ожидать, что этим, вообще говоря, будет нарушен резонанс, и искры потухнут; только прикосновение в узловой точке не отзовется на периоде колебания. Это подтверждается на опыте. Можно прикоснуться к середине проволоки cd изолированным шариком или рукой, или можно даже соединить это место при помощи металлического провода с газопроводом, изменение искры не произойдет; если же проделать то же самое на боковых ветвях или полюсах, то искры потухнут.

После того как явилась возможность доказать путем опыта существование узловой точки, мне показалось интересным попытаться получить индуктированное колебание с двумя узловыми точками. При этом я поступил следующим образом. Прямой индуктирующий ток CC' и индуктированный прямоугольник $acdb$ были устроены, как при предыдущих опытах, и установлены на резонанс. Далее, прямоугольнику $acdb$ был противопоставлен совершенно такой же прямоугольник $eghf$, как это указано на фиг. 6; соседние полюсы обоих прямоугольников были соединены друг с другом, т. е. 1 с 3 и 2 с 4. Вся система образует мегаллически замкнутую цепь тока, и наиболее низкое колебание, или основной тон, какой в ней возможен, имеет две узловые точки. Так как период этого колебания должен совпадать с периодом каждой из обеих половин и таким образом почти совпадать и с пе-



Фиг. 6

риодом первичного проводника, то я предполагал, что должны были бы появиться колебания, которые имеют в местах соединений $1, 3$ и $2, 4$ две пучности, в серединах же cd и gh — две узловые точки. Эти колебания еще измерялись длиной искры между полюсами 1 и 2 , которые представляли собой шарики микрометра. Результаты опыта были следующие. Прежде всего, вопреки ожиданию, оказалось, что от присоединения прямоугольника $eghf$ значительно уменьшилось расстояние, пробиваемое искрой между 1 и 2 . С величины приблизительно в 3 мм оно уменьшилось до 1 мм. Но тем не менее, оказалось, что между первичной цепью и вторичной все еще имел место резонанс. Ибо всякое изменение в $eghf$ еще больше уменьшало длину искры, все равно, состояло ли оно в удлинении или укорачивании прямоугольника. Далее обнаружилось, что обе узловые точки, как предполагалось, существовали на самом деле. При приближении шарика к cd и gh получались гораздо более слабые искры, чем при поднесении его к ae и bf . Можно было также доказать, что эти узловые точки относились именно к тому колебанию, которое, будучи усилено резонансом, давало искры между 1 и 2 , ибо прикосновение в cd или gh не уменьшало длины искры между 1 и 2 , но это уменьшение неминуемо происходило при прикосновении ко всякому другому месту.

Опыт можно видоизменить, уничтожив одно из соединений $1-3$ или $2-4$, например, — последнее. Так как в этих местах для возбужденного колебания сила тока всегда равна нулю, такое изменение не может существенно повлиять на колебание. И на самом деле, прервав соединение, можно показать таким же образом, как и раньше, что резонанс имеет место и что колебание, соответствующее этому резонансу, имеет два узла в тех же самых местах, что и раньше. Между тем, обстоятельства теперь настолько другие, что колебание с двумя узловыми точками не является уже наиболее низким возможным колебанием; колебание с наибольшим периодом будет теперь то, которое обладает только одной узловой точкой между a и e и для которого наибольшие напряжения появляются на полюсах 2 и 4 . Если шарики,

находящиеся на этих полюсах, приблизим один к другому, то найдем, что и между ними имеет место слабое искробразование, и можно будет предположить, что эти искры нужно приписать возбуждению основного колебания, хотя и слабому. Это предположение может быть доведено почти до уверенности, если продолжить опыт следующим образом. Мы прерываем искру между 1 и 2 и обращаем наше внимание на длину искры между 2 и 4, которая дает меру интенсивности основного колебания. Увеличим период колебания первичного проводника, доведя его до полной длины и затем прибавляя емкость. Мы найдем, что при этом наблюдаемые искры увеличиваются до максимальной длины в несколько миллиметров и затем уменьшаются опять. Наибольшее значение они имеют, очевидно, тогда, когда период колебания первичного тока совпадает с периодом основного колебания. В то время, когда искры между 2 и 4 имеют наибольшую длину, можно легко показать, что этим искрам теперь будет соответствовать лишь одна узловая точка, ибо теперь без всякого влияния на искру к проводу можно прикоснуться только между a и e , в то время как прикосновение к прежним узловым точкам прервет поток искр. Следовательно, описываемым путем достигается возможность вызвать в одном и том же проводнике один раз преимущественно основное колебание, в другой раз — преимущественно первое гармоническое.

Я не старался пока решать вопрос о том, возможно ли также доказать существование колебаний с большим числом узлов, а также и ряд дальнейших вопросов. Так как найденные до сих пор результаты можно было получить, лишь обращая внимание на малейшие изменения, то я не предполагал, что можно получить точный ответ на эти более сложные вопросы. Представляющиеся трудности заключаются как в методе наблюдения, так и в природе наблюдаемых электрических движений. Хотя последние, несомненно, являлись колебаниями, они, с другой стороны, не проявляли характера совершенно правильных колебаний. Их интенсивность значительно изменяется от разряда к разряду; сравнительно нерезкое проявление резонанса приводит к заключению о большом затухании;

некоторые побочные явления показывают, что к правильным колебаниям примешиваются нерегулярные движения, как это и следовало ожидать в сложной системе проводов. Если мы захотим сравнить наши колебания в отношении их математических условий с каким-либо частным случаем звуковых колебаний, то мы не должны выбирать гармонические колебания камертонов или струн, долго сохраняющих неизменную интенсивность, а должны взять быстро затухающие колебания, смешанные с нерегулярными движениями, которые получаются, например, при ударе молотком о деревянный брус.¹ Так же и в акустике мы должны довольствоваться лишь указаниями на резонанс, на образование узлов и т. д., когда дело идет о колебаниях такого рода.

Для того чтобы дать возможность повторять эти опыты с одинаковым успехом, я должен прибавить еще одно замечание, значение которого должно сначала показаться неясным. При всех описанных опытах приборы располагались таким образом, что искра индукционной катушки была видна с места искры в микрометре. Если изменить это условие, то в качественном отношении получаются одинаковые явления, но длины искр будут укорочены. Этому явлению я посвятил особое исследование, которое я намерен опубликовать отдельно от настоящего.²

К теории вопроса

Было бы в высшей степени желательно получить из опыта понятие о количественных условиях колебаний. Но так как для этого пока еще не имеется пути, обратимся к теории, чтобы получить по крайней мере почву для суждения об этих условиях. Теория электрических колебаний, получившая развитие в трудах В. Томсона, Гельмгольца и Кирхгофа, оправдывается как для колебаний разомкнутых индукционных приборов, так и для колебательного разряда лейденской банки;³ поэтому мы

¹ См. примечание 5 в конце статьи.

² Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die Elektrische Entladung, Wied. Ann., Bd. 31, S. 983, 1887.

³ Lorenz. Wied. Ann., Bd. 7, S. 161. 1879.

уверены, что и при применении этой теории к настоящим явлениям получатся правильные результаты, по крайней мере, в отношении порядка величин.

Самым важным является прежде всего период колебания. Как пример, поддающийся расчету, возьмем определение периода (простого или половинного) колебания T , который имел место для первичного проводника, взятого нами для опытов с резонансом. Через P обозначим коэффициент самоиндукции этого проводника, измеренный в электромагнитной системе единиц в сантиметрах, через C — емкость одного конца провода в электростатической системе единиц, т. е. измеренную также в сантиметрах; наконец, через A — скорость света в см. сек. Отсюда, если предположить, что сопротивление мало, найдем

$$T = \pi \sqrt{PC/A}.$$

При наших опытах емкость концов провода состояла, главным образом, из емкости шаров, помещенных на этих концах; мы не сделаем особенной ошибки, если для C возьмем радиус этих шаров или положим $C = 15$ см.¹ Что касается коэффициента самоиндукции P , то он равнялся коэффициенту самоиндукции прямой проволоки, диаметр которой для случая резонанса был равен $d = 0.5$ см и длина которой $L = 150$ см. Вычисляя по формуле Неймана

$$P = \iint \cos \varepsilon r ds ds',$$

получим для данной проволоки

$$P = 2L \{ \ln(4L/d) - 0.75 \},$$

для нашего опыта:

$$P = 1902 \text{ см.}$$

Конечно, мы не можем быть вполне уверены, применима ли формула Неймана для незамкнутых токов; самая общая формула, согласная с произведенными до сих пор

¹ См. примечание 6 в конце статьи.

опытами, предложенная Гельмгольцем,¹ заключает в себе еще неизвестную постоянную K . Вычисляя по общей формуле для прямолинейной цилиндрической проволоки, имеющей длину L и диаметр d , получим:

$$P = 2L \left\{ \ln \frac{4L}{d} - 0.75 + \frac{1}{2} (1 - K) \right\}.$$

Если подставим сюда $K=1$, то придем опять к значениям Неймана, если примем $K=0$ или $K=-1$, то получим значения, соответствующие теориям Максвелла и Вебера. Если допустим, что по крайней мере одно из этих значений правильно, и поэтому исключим предположение, что K имеет весьма большую отрицательную или положительную величину, то истинное значение K для нас становится мало интересным, ибо коэффициенты самоиндукции, вычисленные для различных значений K , различаются между собой меньше чем на одну шестую своей величины, и если, следовательно, $P=1902$ см не будет относиться, например, к проволоке длиной 150 см, то все-таки он относится к некоторой длине нашего первичного проводника, не намного отличающейся от этого значения. Из значений для P и C длина $\pi\sqrt{PC}$ получается равной 531 см. Такое расстояние проходит свет за время одного простого колебания; это расстояние есть в то же время длина электродинамической волны², которая, по взглядам Максвелла, является внешним результатом колебаний. Сам период колебания T получается из этой длины равным 1.77 стомиллионных долей секунды, и этим подтверждается предположение, сделанное нами в начале, относительно порядка его величины.

Обратим теперь наше внимание на то небольшое, что может дать теория об условиях затухания колебаний. Для того чтобы вообще в незамкнутом проводе колебания были возможны, сопротивление его должно быть меньше $2A\sqrt{PC}$. Для нашего первичного провода имеем

¹ Helmholtz, Abhandlungen, Bd. 1, S. 567.

² По нашим обозначениям — полуволны (примечание переводчика).

$\sqrt{P_1 C} = 11.25$, а так как скорость A равна 30 земным квадрантам в секунду, следовательно, равна 30Ω , то для нашего опыта допускаемый предел для ω равен 676Ω . Вполне вероятно, что действительно сопротивление при сильном разряде лежит ниже этого предела и, следовательно, теория вовсе не противоречит предположению о существовании колебаний. Если истинное значение сопротивления значительно меньше указанного предельного значения, то амплитуда каждого колебания относится к амплитуде колебания, следующего непосредственно за ним, как $1:e^{-(\omega T/2P)}$. Число колебаний, происходящих до уменьшения амплитуды в 2.71 раза, будет поэтому равно

$$2P/\omega T \text{ или } 2A/\sqrt{P C}/\pi\omega.$$

Следовательно, это число относится к единице, как деленное на π вычисленное предельное значение к истинному значению сопротивления, или как 215Ω к ω . К сожалению, истинное значение сопротивления искрового промежутка нельзя определить даже примерно. Быть может, мы будем правы, предполагая, что это сопротивление не меньше нескольких омов, так как сопротивление даже мощных вольтовых дуг не меньше таких значений. Отсюда следовало бы, что число рассматриваемых волн должно измеряться десятками, а не сотнями или тысячами.¹ Это вполне соответствует характеру явлений, как было указано в конце предыдущей главы. Это соответствует также и характеру среднего явления — колебательного разряда лейденской банки, при котором мы также наблюдаем лишь довольно ограниченное число колебаний заметной интенсивности.

Иначе, чем в первичном проводе, который мы до сих пор рассматривали, обстоит дело в чисто металлических вторичных проводах. Здесь, с точки зрения теории, возбужденное движение прекратилось бы лишь после нескольких тысяч колебаний. Нет основания сомневаться в правильности этого результата; более полная теория, конечно, должна была бы принять во внимание еще и

¹ См. примечание 7 в конце статьи.

обратное действие на первичный провод, и нужно полагать, что при этом и для вторичной цепи также получились бы большие значения для затухания.

В заключение мы поставим еще вопрос, являются ли наблюдаемые нами индукционные действия колебаний действиями того порядка, который предполагает теория, или здесь обнаруживается прямое противоречие между явлениями и нашим объяснением их? Мы можем ответить на этот вопрос при помощи следующего рассуждения. Прежде всего, заметим, что максимальное значение электродвижущей силы, которая индуктируется при колебании в том же самом проводе, должно быть почти равно максимальной разности потенциалов на концах. В самом деле, если бы колебания были без затухания, то между обеими величинами имело бы место даже совершенное равенство, так как тогда в каждый момент уравнивались бы разность потенциалов на концах и электродвижущая сила индукции. При наших опытах разность потенциалов на концах имеет величину, которой соответствует длина искры приблизительно в 7-8 мм, и эта длина искры характеризует, следовательно, величину наибольшего индукционного действия колебания в его собственном контуре. Далее, заметим, что в каждый момент электродвижущая сила, индуктированная во вторичной цепи, относится к электродвижущей силе, индуктированной в первичной цепи, как коэффициент взаимной индукции M первичной цепи на вторичную к коэффициенту самоиндукции P первичной цепи. Для наших явлений резонанса приближенное вычисление M по известным формулам не представляет никаких затруднений, и в различных опытах для M получилось значение между одной девятой и одной двенадцатой P . Отсюда мы можем заключить, что максимальная электродвижущая сила, вызывающая наше колебание во вторичной цепи, получится такой значительной, что вызовет искры длиной от $\frac{1}{2}$ до $\frac{2}{3}$ мм. Таким образом, с одной стороны, теория позволяет рассчитывать на видимые искры во вторичной цепи, с другой же стороны, — мы видим также, что для искр, длиной в несколько миллиметров, мы можем найти объяснение только тогда, когда предположим, что не-

сколько индукционных действий усиливаются, следуя одно за другим. Следовательно, и теория принуждает нас приписывать наблюдаемые явления действию резонанса.

Дальнейшее применение теории к данным явлениям может принести пользу только после того, как удастся каким-нибудь образом измерить непосредственно период колебаний. Такое измерение дало бы больше, чем простое подтверждение теории, оно послужило бы к ее расширению. Цель предлагаемого труда ограничивается желанием показать, что и в коротких металлических проводниках могут быть возбуждены колебания, свойственные этим проводникам, и каким образом они могут быть осуществлены.

Примечания, сделанные Г. Герцем в 1891 г.

1. Гельмгольц в 1847 г. первый высказал в своем сочинении „О сохранении силы“ утверждение, что разряды лейденской банки носят колебательный характер. Он пришел к этому заключению, исходя из того факта, что разряд намагничивает железо попеременно противоположными знаками, а также из опыта над разложением воды при помощи электрического импульса, при котором на обоих электродах выделяются оба газа. Вильям Томсон теоретически обосновал подобное же утверждение, к которому он пришел самостоятельно, и дал в 1853 г. (*Phil. Mag.* (4) 5, 393) способ математического расчета, сохраняющий свое значение еще и в настоящее время. Из более старой основной литературы могут быть названы следующие работы:

О разряде банок: В. W. Feddersen. *Pogg. Ann.*, 103, 69, 1858, 108, 497, 1859; 112, 452, 1861; 113, 437, 1861; 115, 336, 1862; 116, 132, 1862;

Raalzow, *Pogg. Ann.*, 112, 567, 1861; 118, 178, 357, 1863.

Oettingen, v. *Pogg. Ann.*, 115, 513, 1862; *Jubelb.* 269, 1874.

Kirchhoff, G. *Pogg. Ann.*, 121, 551, 1864, *Ges. Abh.*, 163.

L. Lorenz, *Wied. Ann.*, 7, 161, 1879.

Относительно колебаний в разомкнутом индукционном приборе: Helmholtz, H. v. *Pogg. Ann.*, 83, 505, 1851, *Ges. Abh.* 1, 429.

В этой работе заключается в скрытом виде уже и теория, хотя и не примененная явно к какому-либо особому случаю колебаний. Helmholtz H. v., *Ges. Abh.*, 1, 531, 1869.

Bernstein, *Pogg. Ann.*, 142, 54, 1871.

Schiller, N. *Pogg. Ann.*, 152, 535, 1872.

2. Сначала я изолировал тщательно сургучем и т. п. Но затем я все более убеждался, что для всех описываемых здесь опытов

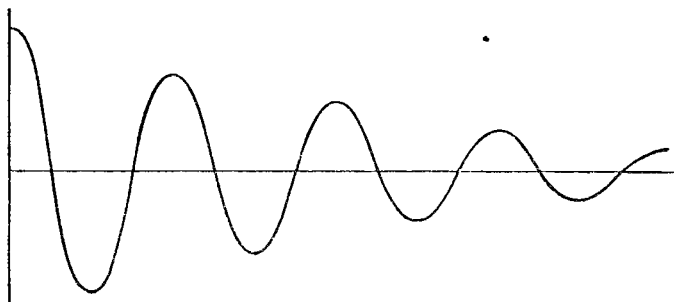
сухое дерево представляет собой вполне достаточную изоляцию. В позднейших работах никакой другой изолирующий материал употреблен не был.

3. Я думаю, что хорошее действие индукционного прибора происходит отчасти потому, что его напряжение непосредственно перед разрядом возрастает очень быстро. Из различных побочных явлений я заключаю, что при таком быстром нарастании напряжение поднимается выше того, при котором искра уже проскакивает, если напряжение растет медленно, и что поэтому разряд наступает в более короткое время и энергичнее, чем разряд статического варяда.

4. Ср. с этими кривыми близкие к ним кривые резонанса, полученные Бьеркнесом более точным методом.

V. Bjerknæs, Wied. Ann., 44, 74, 1891.

5. Это замечание в моей первой работе ясно показывает, что я никогда не представлял себе колебания моего первичного про-



Фиг. 7

водника вполне правильными и долго продолжающимися. Величина затухания в последнее время очень тщательно определена Бьеркнесом (Wied. Ann., 44, 74, 513, 1891). Фигура 7 дает представление о колебаниях, происходящих, согласно данным его опытов, в проводнике, подобном нашему первичному проводнику.

6. В этом месте в вычислениях вкралась роковая ошибка, искажающее влияние которой распространяется и на позднейшие работы.

Емкость C в формуле $T = \pi \sqrt{PC/A}$ обозначает количество электричества, находящееся на одном конце колеблющегося проводника, если разность потенциалов между обоими концами равна единице. Если эти концы состоят из двух, далеко друг от друга удаленных шаров и разность потенциалов между ними равна единице, то потенциал каждого из них относительно окружающего пространства равен $1/2$, а следовательно, на каждом находится количество электричества, величину которого мы получим в абсолютной мере, если разделим градус, измеренный в сантиметрах,

т. е. емкость шара, на 2. Поэтому мы должны положить не $C = 15$ см, но $C = \frac{15}{2}$ см. Период T получается тогда меньше в отношении

$1:\sqrt{2}$; таким образом, теперь $T = 1.26 \cdot 10^{-8}$ сек.

Впервые указал на эту ошибку А. Пуанкаре (С. R., 111, 322, 1891).

7. Результат этот, пожалуй, верен, но вывод его неправилен. Не говоря уже о том, что в вычислении нужно было бы исправить вышеупомянутую ошибку, здесь не принято во внимание затухание от излучения, о котором я еще не думал при составлении этой статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Colli, Wied. Ann., 26, 432, 1885.
 2. Oberbeck, A., Wied. Ann., 26, 245, 1885.
 3. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die Elektrische Entladung. Wied. Ann., 31, 983, 1887. В настоящем сборнике стр. 136.
 4. Lorenz L., Wied. Ann., 7, 161, 1879.
 5. Helmholtz H. v., Abhandlungen, 1, 567.
-

ОБ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛНАХ В ВОЗДУХЕ И ОБ ИХ ОТРАЖЕНИИ

(Ueber elektrodynamische Wellen im Luftraume und deren Reflexion.
Wied. Ann. 34, 610, 1888)

НЕДАВНО я пытался доказать на опыте, что индукционное действие распространяется в воздухе с конечной скоростью.¹ Соображения, на которых базировалось это доказательство, представляются мне вполне убедительными. Однако, поскольку они выводились сравнительно сложным образом из довольно сложных фактов, постольку они могут показаться не вполне очевидными тем, кто с самого начала относится к этим рассуждениям с некоторым предубеждением. Поэтому целесообразно дополнить предыдущее доказательство рассмотрением описываемых ниже явлений, в которых волнообразное распространение индукции в воздухе делается почти непосредственно осязаемым. Кроме того, новые явления допускают возможность непосредственного измерения длины волны в воздухе. То обстоятельство, что эта непосредственно измеренная длина лишь очень мало отличается от косвенных измерений, произведенных ранее с тем же аппаратом, служит свидетельством, что предыдущее доказательство в основном было правильным.

Производя опыты по изучению влияния прямолинейного вибратора на некоторый вторичный проводник, я неоднократно наблюдал явления, которые, повидимому, объяснялись отражением индукционного влияния от стен помещения. Так, например, во многих случаях удавалось наблюдать слабые искры во вторичном контуре в таких положениях, для которых уже из геометрических соображений можно было предвидеть несимметричное распределение непосредственного воздействия, главным об-

¹ Wied. Ann. 34, 551, 1888.

разом, вблизи массивных стен. Особенно показательными представляются мне следующие наблюдения: изучая искры во вторичном проводнике на больших расстояниях от первичного, где, разумеется, искры должны быть очень слабыми, я замечал, что в некоторых положениях вторичного контура, например при приближении к стене, искры снова делаются вполне отчетливыми, но в непосредственной близости к стене они внезапно снова исчезают. Простейшим объяснением казалось мне следующее: волнообразно распространяющееся индукционное действие отражается от стен, причем отраженные волны в некоторых местах усиливают падающие, в других — ослабляют, в результате чего, благодаря интерференции обеих волн, в воздухе образуются стоячие волны. По мере улучшения условий отражения явление делалось все более отчетливым, и предложенное объяснение казалось все более вероятным. Я не буду останавливаться здесь на предварительных опытах, но непосредственно перейду к описанию основных исследований.

Физическая аудитория, в которой производились эти опыты, имеет 15 м длины, 14 м ширины и 6 м высоты. Параллельно двум длинным стенам расположены два ряда железных колонн, совокупность которых в отношении электродинамического действия ведет себя подобно сплошной стене, вследствие чего пространство, находящееся за ними, не должно приниматься во внимание. Благодаря этому для опытов остается пространство в 15 м длины, 8.5 м ширины, 6 м высоты. Из этого пространства были удалены подводящие газовые трубы и металлические подсвечники, так что в нем остались только деревянные столы и скамейки, вынести которые было затруднительно, но которые едва ли могли оказать заметное влияние на опыты.

Одна из стен, от которой должно было происходить отражение, представляла массивную стену из песчаника; в ней имелись две двери; на стене находилось значительное количество газовых труб. Чтобы придать стене свойства проводящей поверхности, на ней был укреплен цинковый лист в 4 м высоты и 2 м ширины. При помощи проволоки он был соединен с газопроводом и водо-

проводом, причем особое внимание уделялось тому, чтобы по возможности облегчить утечку электричества, могущего скопиться на верхнем и нижнем концах листа.

Против середины этой стены на расстоянии 13 м, т. е. в двух метрах от противоположной стены, был установлен первичный контур. Это был тот же самый контур, который применялся при прежних исследованиях скорости распространения. Этот контур был теперь установлен вертикально, так что исследуемая сила колебалась в вертикальном направлении. Середина первичного проводника была поднята над полом на 2.5 м. На такой же высоте производились и наблюдения, причем между столами и скамьями был оставлен проход для наблюдателя. Назовем перпендикуляр, опущенный из середины первичного контура на отражающую поверхность, нормалью. Наши наблюдения производились вблизи нее. Опыты при больших углах падения значительно усложняются тем, что нужно считаться с возможностью различной поляризации волн. Вертикальная плоскость, параллельная нормали, является в наших опытах плоскостью колебаний; плоскость, перпендикулярную к нормали, назовем плоскостью волн.

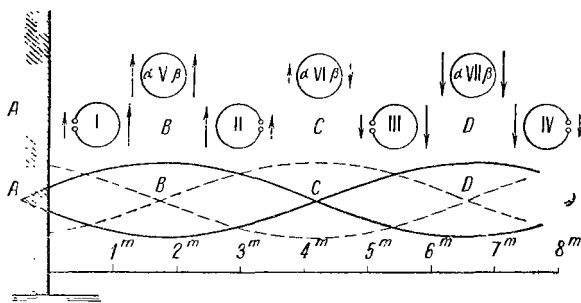
Вторичный контур представлял собой уже использованный ранее проводник, согнутый по кругу радиуса 35 см. Он мог вращаться вокруг оси, проходящей через его середину и перпендикулярной его плоскости. Эта ось при опытах была горизонтальна. Она была укреплена в деревянной подставке таким образом, что можно было вращать ее вместе с контуром вокруг вертикальной оси. Правда, в большинстве опытов проводник, закрепленный в деревянной подставке, можно держать в руке и устанавливать желательным образом. Но так как тело наблюдателя всегда оказывает некоторое влияние, то наблюдения, сделанные таким образом, необходимо контролировать потом наблюдениями с большого расстояния. При этом искры были достаточно сильны, чтобы их можно было заметить в затемненном помещении на расстоянии нескольких метров, в светлом же помещении описываемые явления незаметны даже на близком расстоянии.

Явление, которое при этих условиях наиболее важно, заключается в следующем: мы совмещаем среднюю точку нашего вторичного контура с нормалью, располагаем его плоскость в плоскости колебаний и затем поворачиваем искровой промежуток сначала к отражающей стене, затем в противоположном направлении. Обычно в обоих положениях искры представляются весьма различными. Так, если производить опыт на расстоянии 0.8 м от стены, искры получаются более сильными, если искровой промежуток обращен к стене. Можно отрегулировать длину искр таким образом, что при обращении искрового промежутка к стене получаются устойчивые искры, но в противоположном положении искры совершенно не наблюдаются. Если повторить опыт на расстоянии 3 м от стены, устойчивые искры получаются при расположении искрового промежутка вдали от стены, если же он обращен к стене, — искры исчезают. Если теперь удалиться от стены на 5.5 м, то явление снова изменится: искры будут получаться на стороне, обращенной к стене, но они исчезнут на другой стороне. Наконец, на расстоянии 8 м от стены мы снова будем наблюдать обратную картину, искры получаются более сильными на стороне, удаленной от стены, но различие делается менее отчетливым. В дальнейшем обращении явление не происходит, так как вблизи первичного контура оно маскируется сильным влиянием первичных колебаний и усложненной картиной поля вблизи первичного контура.

На фиг. 1, где указан масштаб расстояния от стены, в местах *I*, *II*, *III* и *IV*, вторичный контур изображен в положениях, соответствующих наиболее сильному образованию искр. Переменный характер состояния пространства отчетливо выявляется на этой фигуре.

В положениях, лежащих между вышеуказанными, искры в обоих случаях получаются одинаково интенсивными, причем в непосредственной близости к стене различие в качестве искр также отсутствует. Поэтому мы можем условно назвать эти точки (обозначенные на чертеже буквами *A*, *B*, *C*, *D*) узловыми точками. Однако мы не должны считать, что расстояние от одной из этих точек до другой равно половине длины волны. Дело

в том, что если бы все электрические движения изменяли свое направление при переходе через одну из подобных точек, то явления во вторичном контуре должны были бы повторяться без всяких изменений, так как направление колебаний не влияет на длину искры. Более правильным представляется заключение, что при переходе через одну из подобных точек часть действий обращается, другая же часть остается без изменений. Поэтому более приемлемым является допущение, что половине длины волны соответствует удвоенное расстояние между



Фиг. 1

подобными точками, так что эти точки могут быть названы концами четверти длины волны. Действительно, исходя из этого предположения, мы придем к полному истолкованию явления.

Представим себе, что волна вертикальной электрической силы, распространяющаяся к стене, отражается с мало измененной интенсивностью, благодаря чему возникают стоячие волны. Если бы стена была идеально проводящей, то на ее поверхности обязательно образовалась бы узловая точка. Действительно, электрическая сила внутри и на границе идеального проводника должна быть исчезающе малой. Но наша стена не является идеально проводящей, так как, во-первых, она не целиком металлическая и, во-вторых, участки, покрытые металлом, не слишком велики. Поэтому на ее поверхности сила имеет еще некоторое значение, знак которого

определяется приходящей волной. Поэтому узловая точка, которая в случае идеально проводящей стенки образовалась бы на ее поверхности, в действительности образуется сзади стены, например в точке A .

Если удвоенное расстояние AB , т. е. расстояние AC , соответствует половине длины волны, то геометрическое изображение стоячей волны определится кривой, изображенной на фигуре сплошными линиями. Силы, действующие на обе стороны кругового проводника в положениях I , II , III , IV , для некоторого момента времени изображаются по величине и направлению стрелками, помещенными около соответствующих положений контура. Таким образом, если вблизи узловой точки искровой промежуток обращен к ней, то более значительная сила действует в более благоприятных условиях, чем противоположная ей слабая сила, действующая в менее благоприятных условиях. Если же искровой промежуток обращен в сторону, противоположную узловой точке, то большая сила находится в менее благоприятных условиях, чем противоположная ей меньшая сила, условия действия которой более благоприятны. Какая бы из сил ни перевесила в последнем случае, несомненно, что искры окажутся более слабыми, чем в первом случае; этим и объясняется изменение знака нашего явления в каждой четверти длины волны.

Наше толкование может быть проверено еще следующим образом. Если оно верно, то изменения знака в точках B и D должны происходить совсем не так, как в точке C . Цифрами V , VI , VII помечены положения контура для этих точек и соответствующие силы. При этом выясняется, что если мы, находясь в положении B или D , будем вращать контур, переводя искровой промежуток из положения α в положение β , то колебание изменит свое направление относительно некоторого фиксированного направления в контуре, а потому при вращении контура искры должны обращаться в нуль один раз или же нечетное число раз. Напротив, при аналогичном процессе в C колебание не изменяет своего направления, а потому искры не должны исчезать совершенно или же могут исчезать четное число раз. Действительно, если

привести соответствующий опыт, то мы заметим, что в B интенсивность искр падает при удалении искрового промежутка из положения α , обращается в нуль в наивысшей точке и снова возрастает до первоначального значения при приближении к положению β . То же наблюдается и в D . Но в C вращение не изменяет картины искр; они лишь немного усиливаются в наивысшей и наинизшей точках.

Далее, наблюдатель может установить, что изменение знака в C возникает при значительно меньших смещениях, чем в B и D , так что и в этом отношении изменение знака в точках B и D происходит отлично от изменений в точке C .¹

Полученную нами картину электрических волн можно подтвердить еще другим способом. Именно, если расположить плоскость нашего контура не в плоскости колебаний, но в волновой плоскости, то электрическая сила во всех участках контура будет одинакова, и при неизменной длине искрового промежутка интенсивность искр будет пропорциональна электрической силе. При этом, как и ожидается, на любых расстояниях от стены искры отсутствуют в наивысшей и наинизшей точках контура; они получают наиболее сильными в точках, лежащих в общей горизонтальной плоскости с нормалью. Установим теперь искровой промежуток в одном из последних положений и будем медленно удаляться от стены. При этом мы заметим, что в непосредственной близости к проводящей металлической поверхности искры отсутствуют, уже на небольших расстояниях от нее они появляются, в дальнейшем интенсивность их возрастает, достигая в точке B довольно большого значения; далее интенсивность искр падает. В точке C они делаются чрезвычайно слабыми, а при дальнейшем перемещении снова возрастают. Однако следующее исчезновение искр не наблюдается, но искры непрерывно усиливаются благодаря чрезмерному приближению к первичному контуру. Если изобразить интенсивность искр на участке AD в виде кривой, которая построена с учетом поло-

¹ Очевидно, речь идет об изменении знака при перемещении вторичного контура вдоль волны (прим. переводчика).

жительного и отрицательного знаков, то снова получится уже рассмотренная сплошная кривая.

Может быть, лучше было бы начать изложение с этого опыта. Однако практически он оказывается не столь наглядным, как вышеописанный, и, кроме того, периодическое изменение знака представляется более убедительным доказательством волнового движения, чем периодическое возрастание и убывание.

Теперь мы можем быть уверены, что в точках *A* и *C* получаются узловые точки электрической волны, а в точках *B* и *D* — ее пучности. В другом же смысле мы можем назвать узловыми точками точки *B* и *D*. Именно эти точки являются узлами стоячей волны магнитной силы, которая, согласно теории, сопровождает электрическую волну и смещена относительно нее на четверть длины волны. Это утверждение может быть подтверждено опытом следующим образом. Снова расположим наш контур в плоскости колебаний, поместив искровой промежуток в самой высокой точке. В этом положении электрическая сила не сможет создать искр, если она будет однородна во всем пространстве вторичного контура. Но ее действие может проявиться, если она различна в различных участках контура, так что ее интеграл, взятый по контуру, не равен нулю. Этот интеграл пропорционален числу магнитных силовых линий, пронизывающих наш контур. Поэтому можно сказать, что в этом положении искры являются мерой магнитной силы, перпендикулярной к плоскости контура.¹

При этом положении искрового промежутка мы наблюдаем интенсивные искры вблизи стены; далее они быстро убывают, исчезают в *B*, снова возрастают до точки *C*, снова убывают до отчетливого минимума, наблюдаемого в *D*, а при дальнейшем приближении к первичному контуру непрерывно усиливаются. Если изобразить интенсивность этих искр ординатами с положительным и отрицательным знаками, то получится пунктирная кривая нашего чертежа, характеризующая распределение магнитной волны. Описанное нами в на-

¹ См. примечание 1 в конце этой статьи.

чале статьи явления мы можем истолковать как результат взаимного действия электрической и магнитной сил. Первая изменяет свой знак в точках A и C , вторая — в точках B и D . В каждой из этих точек одно из действий изменяет знак, другое же его сохраняет; при этом результирующее действие (произведение) изменяет знак в каждой из этих точек. Разумеется, это объяснение отличается от первоначального не по смыслу, но лишь по способу выражения.

До сих пор мы изучали явления при определенном избранном положении контура и искрового промежутка. Число различных комбинаций обоих положений является неопределенно большим. Рассмотрим явления для случая, когда плоскость контура совпадает с плоскостью колебаний. Вблизи стены искры имеют максимум на стороне, обращенной к стене, минимум — на противоположной стороне; при вращении контура вдоль самого себя искры переходят от одного значения к другому, принимая только промежуточные значения. Таким образом, нулевые точки в этом случае отсутствуют. Если мы будем удаляться от стены, то на стороне, обращенной к стене, искры будут постепенно ослабевать и исчезнут на расстоянии, которое может быть определено с точностью до нескольких сантиметров, именно, когда центр круга будет отстоять от стены на 1.08 м. Если мы будем отодвигаться дальше, искры опять возникнут в искровом промежутке, обращенном в сторону, противоположную стене, причем они сначала будут слабее, чем искры, получаемые в положении, обращенном к стене; однако интенсивность искр не будет переходить непосредственно от одного значения к другому, но при вращении контура вдоль самого себя искры исчезнут один раз в верхнем положении, а другой раз в нижнем положении искрового промежутка. Обе нулевые точки получаются из одной, которую мы наблюдали вначале, и удаляются друг от друга, пока в положении B они не совпадут с наивысшей и наименьшей точками контура. Этим удастся довольно точно определить положение точки B ; однако более точными являются дальнейшие наблюдения нулевых точек. При дальнейшем перемещении нулевые точки пере-

мещаются по стороне, обращенной к стене, приближаются друг к другу и, наконец, совпадают при строго определенном удалении от стены. При этом расстояние от центра проводника до стены составляет 2.35 м. Как раз посредине между этой точкой и первой аналогичной точкой, т. е. на расстоянии 1.72 м от стены, должна располагаться точка *B*, что с точностью до нескольких сантиметров подтверждается наблюдениями. Если двигаться дальше к точке *C*, то искры во всех точках контура выравниваются, делаясь одинаковыми в *C*. За точкой *C* описанный процесс возобновляется. В этой области нулевые точки не наблюдаются. Однако положение точки *C* может быть определено довольно точно, так как первый из описанных процессов быстро изменяется вблизи нее. В моих опытах точка *C* лежала на расстоянии 4.10—4.15 м от стены, в среднем на расстоянии 4.12 м. Точка *D* не могла быть точно определена, так как вблизи нее явление было значительно ослаблено, можно лишь сказать, что она располагалась на расстоянии 6—7.5 м от стены. Объяснение деталей описанного явления было дано в одной из предшествующих работ.¹ Имеющиеся там математические выкладки могут быть использованы и здесь. Впрочем, опыты представляются понятными и без вычислений.

Расстояние между *B* и *C* по нашим измерениям составляет 2.4 м. Если принять это значение за истинное, то узловая точка *A* лежит на расстоянии 0.68 м за стеной, точка *D* на расстоянии 6.52 м перед стеной, что примерно соответствует опыту. При этом половина длины волны составляет 4.8 м. Для подобного же аппарата я получил косвенным методом половину длины волны, равной 4.5 м; различие обоих результатов невелико, так что мы можем рассматривать новые измерения как подтверждение старых.² Если в прежних измерениях длины волны в проволоках заменить 2.8 на 2.9 м, 7.1 на 7.5 м, что вполне совместимо с результатами наблюдений, то из старых наблюдений мы получим новое значение длины волны. Впрочем, возможно, что более вероятным является

¹ Wied. Ann., 34, 155, 1888.

² См. примечание 2 в конце статьи.

среднее значение, так как мне представляется мало вероятным, чтобы узловая точка лежала в точности на 0.7 м позади металлической стены. Период нашего аппарата равен 1.55 стомиллионных долей секунды (если принять среднее значение длины волны и считать скорость распространения, совпадающей со скоростью света) вместо вычисленных ранее 1.4 стомиллионных долей секунды.

Я производил опыты в несколько измененных условиях. Изменение расстояния первичного проводника от отражающей стены не дало ничего нового. Если бы можно было значительно увеличить это расстояние, то можно было бы доказать отчетливое образование второй и третьей волн, но это увеличение не допускалось размерами помещения. При уменьшении расстояния явление теряет интерес, так как вследствие влияния первичного контура отчетливость явления уменьшается, и изменения знака исчезают одно за другим. Более важно произвести исследования с колебаниями другого периода, чтобы доказать, что рассмотренные нами особенные точки обусловлены не конструкцией стены или помещения, но определяются размерами первичного и вторичного контуров. Поэтому в некоторых опытах я применял вторичный контур радиусом 17.5 см и первичный контур с той же продолжительностью колебания, что и вторичный. Первичный контур устанавливался на расстоянии 8—9 м от стены. Однако со столь маленьким аппаратом работать очень трудно. Не только искры оказываются весьма слабыми, но и явления резонанса и т. д. проявляются очень слабо. Я думаю, что столь быстрые колебания являются очень сильно затухающими. Поэтому не удастся наблюдать такого большого количества деталей, как с большими контурами. Но основное явление, описанное в начале статьи, проявляется и здесь достаточно отчетливо. Вблизи стены, а также на расстояниях 2.5 и 4.5 м от нее получают очень сильные искры на стороне, обращенной к стене, на расстояниях 1.5 и 3.5 м получают сильные искры на стороне, обращенной к первичному контуру. Таким образом, перемена знака происходит через каждый метр, так что половина длины волны составляет только 2 м, и частота колебаний более чем вдвое выше, чем в первом случае.

В заключение отмечу, что сложные приспособления не требуются, если желательно ограничиться лишь более или менее поверхностным изучением явления. При некотором упражнении удастся заметить отражение от любой стены. Даже каждая из упомянутых выше железных колонн позволяла обнаружить отчетливую отраженную волну на стороне, обращенной к первичному контуру; на противоположной стороне можно было заметить электродинамическую тень.

Продолжим теперь наши исследования в другом направлении. До сих пор вторичный проводник находился между отражающей стеной и первичным проводником, т. е. в пространстве, в котором прямая и отраженная волны распространяются во взаимно противоположных направлениях и, интерферируя, образуют стоячие волны. Если же первичный контур расположить между стеной и вторичным контуром, то последний будет находиться в пространстве, в котором прямая и отраженная волны распространяются в одинаковом направлении. В этом случае они будут складываться в общую бегущую волну, интенсивность которой будет, однако, зависеть от разности фаз обеих интерферирующих волн. Для получения отчетливой картины этого явления обе волны должны иметь приблизительно одинаковую интенсивность, а потому расстояние первичного проводника от стены не должно быть велико по сравнению с размерами стены и должно быть мало по сравнению с расстоянием до вторичного контура. Для выяснения вопроса о том, может ли это явление наблюдаться в действительности, я произвел следующий опыт.

Вторичный контур был расположен на расстоянии 14 м от отражающей стены, т. е. примерно на 1 м от противоположной стены. Его плоскость была параллельна вышеупомянутой колебательной плоскости, а искровой промежуток был обращен к более близкой стене, так что условия для возникновения в нем искр были наиболее благоприятными. Первичный контур, расположенный параллельно первоначальному положению, находился против середины отражающей стены, причем сначала был удален от нее на очень малое расстояние —

около 30 см. При этом искры во вторичном контуре были весьма слабы; искровой промежуток был отрегулирован таким образом, чтобы искры совершенно исчезли. Теперь первичный контур постепенно удалялся от стены. Вскоре во вторичном контуре появились отдельные искры, перешедшие в дальнейшем в непрерывную искру, когда первичный проводник находился на расстоянии 1.5—2 м от стены (отражающей), т. е. приблизительно в точке *B*. Это можно было приписать влиянию уменьшения расстояния между обоими проводниками. Однако при дальнейшем удалении первичного проводника от отражающей стены, т. е. при приближении его ко вторичному проводнику, искры снова ослаблялись, и непрерывная искра прекратилась, когда первичный проводник достиг точки *C*; при дальнейшем приближении искры непрерывно усиливались.

Точное измерение длины волны в этих опытах невозможно, но из сказанного выше следует, что полученная ранее длина волны соответствует рассматриваемому явлению. Подобные же опыты могут быть произведены и с маленьким аппаратом. Соответствующий первичный проводник был установлен на расстоянии 1 м от отражающей стены, а вторичный проводник — на расстоянии 9 м. При этом искры в последнем были весьма слабы, но все же вполне доступны наблюдению. Они погасли, когда первичный проводник был смещен из первоначального положения, причем его можно было смещать как в направлении к стене, так и в направлении ко вторичному проводнику. Но когда расстояние его до стены составило 3 м, искры снова возникли, а при дальнейшем приближении ко вторичному проводнику уже не исчезали. Замечательно, что на одном и том же расстоянии (около 2 м) присутствие стены оказывается благоприятным в случае более медленных колебаний, но ухудшает условия распространения индукции в случае более быстрых колебаний. Это с очевидностью доказывает, что положение особых точек волны определяется размерами колебательных контуров, но не размерами стены или помещения.

Описанному опыту соответствует в акустике опыт,

показывающий, что при приближении камертона к твердой стене звук его на определенных расстояниях усиливается, на других же ослабляется. В оптике аналогией нашему опыту является опыт Ллойда с зеркалами Френеля.¹ В оптике и акустике эти опыты рассматриваются как доказательства волновой природы света и звука, поэтому описанные здесь явления следует рассматривать как доказательства волнового распространения индукционного действия электрических колебаний.

Опыты, описанные в настоящей статье, как и предшествующие опыты по распространению индукции, изложены без ссылок на какую-либо специальную теорию, так как убедительность этих опытов независима от какой бы то ни было теории. Однако ясно, что эти опыты могут служить обоснованием теории электродинамических явлений, разработанной Максвеллом, базировавшимся на представлениях Фарадея. Мне кажется, что в настоящее время связанная с этой теорией гипотеза о природе света получает еще бóльшую убедительность, чем до настоящего времени. Весьма интересна идея, что изученные нами процессы в воздухе представляют те же явления, которые происходят между ньютоновскими стеклами или вблизи зеркал Френеля, но в нашем случае эти процессы увеличены в миллионы раз.

Максвелловская теория, несмотря на ее внутреннюю убедительность, нуждается как в описанных подтверждениях, так и в дальнейших. Это доказывается — если вообще требуется подобное доказательство — тем фактом, что скорость распространения электрических действий по хорошо проводящим проволокам не совпадает со скоростью распространения их в воздухе. До настоящего времени все теории, в том числе и максвелловская, приводят к заключению, что электричество распространяется по проволокам со скоростью света. Я надеюсь, что со временем мне удастся сообщить об опытах, объясняющих причину этого расхождения между теорией и опытом.²

¹ См. примечание 3 в конце статьи.

² См. примечание 4 в конце статьи.

Примечания.

1. Нужно подчеркнуть, что определение положения магнитной силы производится здесь чисто теоретически. Опыты не позволяют сделать заключения о существовании каких-либо сил, кроме электрической силы. Оставаясь на почве опыта, мы должны рассматривать выражение „магнитная сила“ лишь как краткое обозначение некоторого распределения электрической силы. Доказательство действия магнитной силы, которое не может быть объяснено электрической силой, было получено при изучении волн в проволоках (Wied. Ann., 42, 407, 1891).

2. Измеренная длина волны определяется в основном расстоянием между B и C , т. е. предположением, что C еще измеряется вполне точно. Но если допустить, что положение C искажено вследствие незначительности помещения, то первая узловая точка должна расположиться ближе к стене, а потому для длины волны мы получим меньшее значение. Впрочем, опыт не дает оснований предполагать, что положение точки C является не вполне правильным.

3. Опыт Ллойда является оптической аналогией опытам, в которых первичный проводник постепенно удалялся от стены. Опыты первого рода, при которых вторичный проводник удалялся от отражающей стены, также имеют оптическую аналогию, именно, прекрасные опыты, описанные Винером в статье „Стоячие световые волны и направление колебаний поляризованного света“ (Wied. Ann., 40, 203, 1891).

Что касается акустических аналогий, то я нашел, что явление, аналогичное опытам первого рода, было обнаружено Саваром уже много лет тому назад (Pogg., Ann., 46, 458, 1839; см. также целый ряд статей Зеебека в следующих томах). Если установить против плоской стены на расстоянии 15—20 м равномерно звучащий источник и слушать его звук вблизи стены, — лучше всего при помощи резонатора, — то можно заметить, что в некоторых точках — пучностях — звук усиливается, в других же — узлах — ослабляется. Для опытов второго рода, в которых первичный проводник перемещается относительно стены, аналогия была указана в тексте. Другую аналогию представляет следующий опыт, интересный сам по себе. Берут стеклянную трубу около 60 см длины и 2 см диаметром и медленно опускают ее над не слишком сильно горящей Бунзеновской горелкой. На некоторой высоте пламя горелки заставляет трубу издать сильный звук. В этом чувствительном положении горелку и трубу жестко соединяют друг с другом. Если теперь приближать систему к твердой стене, то в непосредственной близости к стене звук ослабляется, снова усиливается на расстоянии четверти длины волны и снова ослабляется на расстоянии полуволны. При очень чувствительной установке, которая не всегда удается, мне приходилось наблюдать два дальнейших усиления — ослабления звука, также располагавшихся на расстоянии полуволны. Полное объяснение этого явления мне неизвестно; вероятно, оно связано с другим явлением; именно, можно показать, что подобная труба замолкает, если к ее концу приблизить резонатор, настроенный на

ее собственный тон. Насколько мне известно, этот последний опыт принадлежит профессору Христиани (Verh. d. phys. Ges. zu Berlin, 15 Dec. 1882).

4. Это замечание касается опытов, производившихся мною во время писания статьи. К сожалению, высказанная мною надежда не оправдалась (замечание Герца, относящееся к 1891 г.).

Герцу не удалось объяснить расхождение между скоростью распространения волн в проволоках и в воздухе, которое, очевидно, было обусловлено влиянием искажающих процесс побочных емкостей. Но, как известно, убеждение Герца в фактическом равенстве обеих скоростей, требуемом теорией Максвелла, оказалось справедливым, что показали позднейшие более тщательные опыты (прим. переводчика).

СИЛЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ, РАССМАТРИВАЕМЫЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА

(Die Kräfte elektrischer Schwingungen, behandelt nach der Maxwell'schen Theorie. Wied. Ann., 36, 1, 1889)

РЕЗУЛЬТАТЫ произведенных мною опытов с быстрыми электрическими колебаниями свидетельствуют, по моему мнению, о преимуществе теории Максвелла перед другими теориями электродинамики. Я пытался сначала объяснить эти опыты, пользуясь старыми воззрениями, причем надеялся найти объяснение во взаимодействии электростатических и электродинамических сил. Максвелловской теории в ее чистом виде подобное разделение сил совершенно чуждо. Поэтому теперь я хочу показать, что явления могут быть объяснены на основании максвелловской теории без введения подобного разделения. Если это удастся, то тем самым отпадет как не имеющий смысла в максвелловской теории вопрос об особенностях распространения электростатических сил.

Но и помимо этой специальной цели, более подробное изучение распределения сил вокруг прямолинейного колебания не лишено интереса.

Формулы

В дальнейшем мы будем оперировать почти только с силами в свободном эфире. Пусть X , Y , Z представляют компоненты электрической силы по координатам x , y , z ,¹ а L , M , N — соответствующие компоненты магнитной си-

¹ Вообразим себя стоящими в начале координатной системы на плоскости xy . Пусть положительная ось x направлена от нас вперед, положительная ось z — вверх, тогда направление положительной оси y будет направо. Без этого условия знаки электрических и магнитных сил в дальнейших уравнениях не являются точно определенными.

лы; обе силы измерены в гауссовской системе;¹ t представляет время, а A — обратную величину скорости света. Тогда, по Максвеллу, зависимость изменений сил во времени от их пространственного распределения определяется следующими уравнениями:

$$(1) \begin{cases} A = \frac{dL}{dt} = \frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz}, \\ A = \frac{dM}{dt} = \frac{dX}{dz} - \frac{dZ}{dx}, \\ A = \frac{dN}{dt} = \frac{dY}{dx} - \frac{dX}{dy}, \end{cases} \quad (2) \begin{cases} A = \frac{dX}{dt} = \frac{dM}{dz} - \frac{dN}{dy}, \\ A = \frac{dY}{dt} = \frac{dN}{dx} - \frac{dL}{dz}, \\ A = \frac{dZ}{dt} = \frac{dL}{dy} - \frac{dM}{dx}. \end{cases}$$

В начальный момент выполняются равенства:

$$(3) \quad \frac{dL}{dx} + \frac{dM}{dy} + \frac{dN}{dz} = 0; \quad \frac{dX}{dx} + \frac{dY}{dy} + \frac{dZ}{dz} = 0,$$

справедливые и для любого следующего момента времени.

Электрическая энергия, содержащаяся в объеме τ эфира, равна

$$\frac{1}{8\pi} \int (X^2 + Y^2 + Z^2) d\tau,$$

магнитная энергия равна

$$\frac{1}{8\pi} \int (L^2 + M^2 + N^2) d\tau,$$

причем интегралы берутся по всему объему τ . Полная энергия равна сумме обеих энергий.

Поскольку речь идет об эфире, эти утверждения являются существеннейшей частью теории Максвелла. Максвелл получил их, исходя из представления о силах, действующих на расстоянии, и приписав эфиру свойства диэлектрической поляризующей среды. Но они могут быть получены и другими путями. Никакой путь не дал до сих пор непосредственного доказательства справедливости этих уравнений, базирующегося на опыте. Поэтому представляется наиболее последовательным рассмат-

¹ Н. v. Helmholtz, Wied. Ann., 17, S. 48, 1882.

ривать эти уравнения (независимо от способа их получения) как гипотетические допущения и проверять их справедливость на большом числе закономерностей, которые могут быть из них выведены. Если стоять на подобной точке зрения, то можно обойтись без целого ряда вспомогательных понятий, затрудняющих понимание теории Максвелла, причем в некоторых случаях эти затруднения объясняются совершенной ненужностью этих вспомогательных понятий;¹ в конце концов можно, таким образом, отказаться от представления о силах, действующих на расстоянии.

Умножая уравнения (1) на L , M , N , уравнения (2) — на X , Y , Z , складывая все уравнения и интегрируя по объему, элемент которого равен $d\tau$, а элемент поверхности $d\omega$, получаем:

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{8\pi} \int (X^2 + Y^2 + Z^2) d\tau + \frac{1}{8\pi} \int (L^2 + M^2 + N^2) d\tau \right\} = \\ \frac{1}{4\pi A} \int \left\{ (NY - MZ) \cos(n, x) + (LZ - NX) \cos(n, y) + \right. \\ \left. + (MX - LY) \cos(n, z) \right\} d\omega,$$

где (n, x) , (n, y) , (n, z) обозначают углы, образуемые нормалью к $d\omega$ с осями координат.

Последнее уравнение показывает, что прирост энергии в некотором объеме может рассматриваться как увеличение энергии за счет притока ее через поверхность. Количество энергии, проходящее через отдельные элементы поверхности, равно произведению компонент электрической и магнитной сил на этой поверхности, умноженному на синус угла, образуемого ими, и деленному на $4\pi A$. Как известно, базируясь на этом результате, Пойнтинг² разработал замечательную теорию о движении энергии в электромагнитном поле.

Что касается решения уравнений, то мы ограничимся частным, но весьма важным случаем, когда распределе-

¹ В качестве примера укажу на понятие диэлектрической постоянной эфира.

² J. H. Poynting, Phil. Trans., II, 343, 1884.

ние электрической силы обладает симметрией вокруг оси z , и притом такой, что эта сила в любой точке совпадает с меридиональной плоскостью, проходящей через ось z , и зависит только от координаты z этой точки и ее расстояния $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ от оси z . Компоненту электрической силы в направлении ρ , равною

$$\frac{Xx}{\rho} + \frac{Yy}{\rho},$$

обозначим R , компоненту магнитной силы, перпендикулярную меридиональной плоскости, равною $\frac{Ly}{\rho} - \frac{Mx}{\rho}$, назовем P . Выскажем следующее утверждение: если Π представляет произвольную функцию ρ, z, t , удовлетворяющую уравнению:

$$A^2 \frac{d^2 \Pi}{dt^2} = \Delta \Pi,$$

и если ввести

$$Q = \rho \frac{d\Pi}{d\rho},$$

то система

$$\begin{aligned} \rho z &= dQ/d\rho, & \rho P &= A dQ/dt, \\ \rho R &= -dQ/dz, & N &= 0 \end{aligned}$$

представляет одно из возможных решений наших уравнений.

Для доказательства этого утверждения заметим, что:

$$X = R \frac{d\rho}{dx} = -\frac{d^2 \Pi}{dx dz}; \quad L = P \frac{d\rho}{dy} = A \frac{d^2 \Pi}{dy dt};$$

$$Y = R \frac{d\rho}{dy} = -\frac{d^2 \Pi}{dy dz}; \quad M = -P \frac{d\rho}{dx} = -A \frac{d^2 \Pi}{dx dt};$$

$$Z = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{d\Pi}{d\rho} \right) = \frac{d^2 \Pi}{dx^2} + \frac{d^2 \Pi}{dy^2}; \quad N = 0.$$

Теперь нужно подставить эти выражения в уравнения (1), (2), (3), чтобы убедиться, что уравнения (2) и (3)

удовлетворяются тождественно, а уравнение (1) удовлетворяется благодаря существованию дифференциального уравнения для Π , написанного выше.

Укажем, что если отвлечься от практически несущественных ограничений, всякое возможное распределение электрической силы, симметричное относительно оси z , может быть представлено в вышеуказанной форме; для дальнейшего нет необходимости доказывать это утверждение.

Для нас важна функция Q . Линии, по которым поверхности вращения $Q = \text{const}$ пересекаются с меридиональными плоскостями, представляют электрические силовые линии. Построение их для какой-либо меридиональной плоскости для каждого момента времени дает наглядную картину распределения силовых линий. Если взять пространство, заключенное между поверхностями Q и $Q + dQ$, и пересечь его в различных местах поверхностями вращения вокруг оси z , то для каждого подобного сечения произведение электрической силы на сечение, называемое Максвеллом индукцией через сечение, будет постоянным. Если выбрать систему поверхностей $Q = \text{const}$ таким образом, что приращения dQ между соседними поверхностями будут одинаковыми, то вышеприведенное утверждение так же будет приложимо, если сопоставить друг с другом сечения объемов, заключенных между отдельными поверхностями.

В плоской фигуре, получающейся при пересечении меридиональной плоскости с равно отстоящими поверхностями $Q = \text{const}$, электрическая сила будет обратно пропорциональна расстоянию по нормали между двумя линиями $Q = \text{const}$ только в том случае, если рассматриваемые точки лежат на равных расстояниях от оси z . В общем же случае справедливо правило, что сила обратно пропорциональна произведению каждого расстояния на координату ρ рассматриваемой точки.

Кроме ρ и z мы введем в дальнейшем полярные координаты r и θ , которые связаны с ρ и z уравнениями:

$$\rho = r \sin \theta, \quad z = r \cos \theta;$$

при этом r характеризует расстояние от начала нашей системы координат.

Силы вокруг прямолинейного вибратора

Будем понимать под E количество электричества, под l длину, под $m = \frac{\pi}{\lambda}$ величину, обратную длине, и под $n = \frac{\pi}{T}$ величину, обратную времени. Положим

$$\Pi = El \frac{\sin (mr - nt)}{r}.$$

Это значение удовлетворяет уравнению

$$A^2 \frac{d^2 \Pi}{dt^2} = \Delta \Pi,$$

если принять, что

$$m : n = T : \lambda = A.$$

Таким образом, отношение λ/T должно равняться скорости света. При этом уравнение удовлетворяется во всем пространстве, кроме начала координат.

Чтобы выяснить, какие электрические процессы в начале координат соответствуют распределению силы, характеризуемому функцией Π , исследуем область, прилегающую к началу координат. Здесь можно пренебречь r по сравнению с λ и mr по сравнению с nt . Тогда получим:

$$\Pi = -\frac{1}{r} El \sin nt;$$

но так как

$$\left(\frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} \right) \left(\frac{1}{r} \right) = -\frac{d^2}{dz^2} \left(\frac{1}{r} \right),$$

то находим:

$$X = -\frac{d^2 \Pi}{dx dz}; \quad Y = -\frac{d^2 \Pi}{dy dz}; \quad Z = -\frac{d^2 \Pi}{dz dz}.$$

Таким образом, электрические силы являются здесь производными потенциалов:

$$\varphi = \frac{d\Pi}{dz} = -El \sin nt \cdot \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{r} \right),$$

что соответствует электрическому диполю, ось которого совпадает с осью z , а момент которого колеблется между

значениями $+El$ и $-El$ с периодом T . Таким образом, наше распределение силы представляет действие прямолинейного вибратора, имеющего весьма малую длину l , на полюсах которого скопляются максимальные количества электричества $+E$ и $-E$. Магнитная сила в непосредственной близости к вибратору перпендикулярна ему и равна:

$$P = AEln \frac{1}{r^2} \cos nt \sin \theta.$$

Согласно закону Био-Савара, это выражение представляет магнитную силу, создаваемую элементом тока длиной l , лежащим в направлении оси z , интенсивность которого, измеренная в магнитных единицах, колеблется между значениями $+\frac{\pi AE}{T}$ и $-\frac{\pi AE}{T}$. Действительно, перемещение количеств электричества E эквивалентно току этой величины.

Из выражения для Π получаем:

$$Q = Elm \left\{ \cos (mr - nt) - \frac{\sin (mr - nt)}{mr} \right\} \sin^2 \theta,$$

откуда дифференцированием могут быть найдены силы Z , R , P . В общем случае получаются весьма сложные формулы, которые не позволяют составить наглядного представления о распределении сил. Но для отдельных частных случаев результаты относительно просты. Отметим некоторые из них.

1. Область, непосредственно прилегающую к вибратору, мы уже исследовали.

2. На оси z , т. е. в направлении самого вибратора, мы имеем:

$$dp = r d\theta, \quad dz = dr, \quad \theta = 0,$$

откуда следует, что

$$R = 0, \quad P = 0,$$

$$Z = \frac{2Elm}{r^2} \left\{ \cos (mr - nt) - \frac{\sin (mr - nt)}{mr} \right\}.$$

Электрическая сила везде совпадает с направлением вибратора, на близких расстояниях она убывает обратно

пропорционально третьей степени расстояния, на больших расстояниях — обратно пропорционально квадрату расстояния.

3. В плоскости xy , т. е. при $z=0$, мы имеем:

$$dz = -r d\theta, \quad d\varphi = dr, \quad \theta = 90^\circ,$$

следовательно:

$$P = \frac{AEImn}{r} \left\{ \sin(mr - nt) + \frac{\cos(mr - nt)}{m^2} \right\},$$

$$R = 0,$$

$$Z = \frac{Elm^2}{r} \left\{ -\sin(mr - nt) - \frac{\cos(mr - nt)}{mr} + \right. \\ \left. + \frac{\sin(mr - nt)}{m^2 r^2} \right\}.$$

Таким образом, электрическая сила в экваториальной плоскости, проходящей через вибратор, параллельна вибратору, ее амплитуда равна: $El/r^3 \sqrt{1 - m^2 r^2} \sqrt{1 - m^4 r^4}$. С увеличением расстояния от вибратора сила непрерывно убывает, сначала быстро (обратно пропорционально третьей степени расстояния), а затем более медленно — обратно пропорционально расстоянию. На достаточно больших расстояниях влияние вибратора будет заметно только в экваториальной плоскости, но не на оси.

4. На очень больших расстояниях можно пренебречь высшими степенями $1/r$ по сравнению с низшими. Поэтому для таких расстояний получится:

$$Q = Elm \cos(mr - nt) \sin^2 \theta,$$

откуда находим:

$$P = AEImn \frac{1}{r} \sin(mr - nt) \sin \theta,$$

$$Z = -Elm^2 \frac{1}{r} \sin(mr - nt) \sin \theta,$$

$$R = Elm^2 \frac{1}{r} \sin(mr - nt) \sin \theta \cos \theta.$$

Отсюда следует, что $Z \cos \theta + R \sin \theta = 0$. Таким образом, направление силы на больших расстояниях везде

перпендикулярно направлению к начальной точке, следовательно, распространение происходит в виде чисто поперечной волны. Величина силы равна:

$$Elm^2 \frac{1}{r} \sin (mr - nt) \sin \theta,$$

т. е. сила убывает (при постоянном расстоянии от начала координат) по мере приближения к оси z , как расстояние до последней.

Для того чтобы определить распределение силы в остальных участках пространства, воспользуемся графическим представлением, изображая для определенных моментов времени линии электрической силы, т. е. кривые $Q = \text{const}$, равно отстоящие друг от друга (т. е. отличающиеся на одни и те же dQ). Так как Q определяется произведением двух факторов, один из которых зависит только от r , а другой только от θ , то построение этих кривых не представляет больших затруднений. Каждое значение Q , для которого мы хотим построить кривую, мы разлагаем различными способами на два множителя, определяем угол θ , для которого $\sin^2 \theta$ равен одному из множителей, и при помощи вспомогательной кривой находим значение r , при котором входящая в Q функция, зависящая от r , равна другому множителю; таким способом мы находим нужное число точек нашей кривой. При практическом осуществлении построения обнаруживается ряд упрощающих деталей, рассмотрение которых заведо бы нас слишком далеко. Мы ограничимся рассмотрением результатов этого построения, изображенных на фиг. 1 — 4. Эти фигуры представляют распределение силы для моментов времени

$$t = 0, \frac{T}{4}, \frac{T}{2}, \frac{3T}{4},$$

но при надлежащем изменении направления стрелок они пригодны для дальнейших моментов времени, которые являются целыми, кратными четверти периода. В начале координат в правильном положении и приблизительно правильном масштабе изображено приспособление, служив-

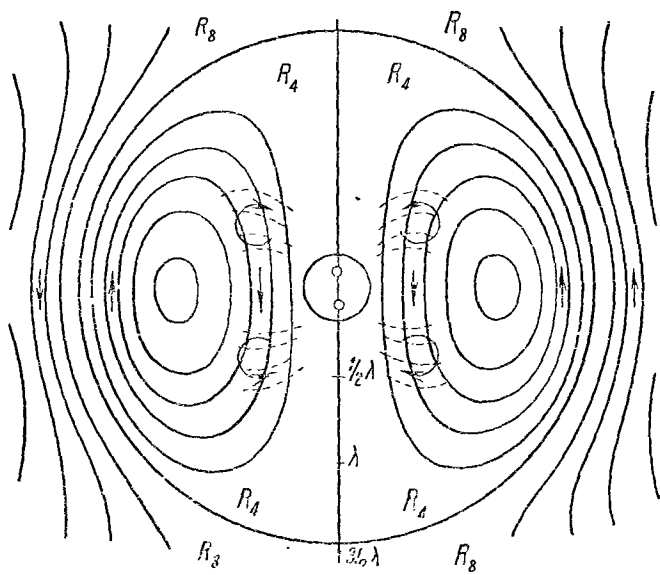
шее в наших прежних исследованиях для возбуждения колебаний. Силовые линии не вполне доходят до этого изображения, так как в наших формулах вибратор был принят бесконечно коротким, а потому эти формулы не приложимы к конечному вибратору в весьма близких ему точках.

Займемся теперь истолкованием фигур, начиная с фиг. 1. Здесь $t=0$, ток находится в состоянии наибольшего развития, но полюсы прямолинейного вибратора лишены электрических зарядов, с ними не связаны силовые линии. Эти силовые линии, начиная с момента $t=0$, возникают у полюсов; они заключены в сфере, соответствующей значению $Q=0$. На фиг. 1 эта сфера исчезающе мала, но она быстро увеличивается и к моменту $t=\frac{T}{4}$ (фиг. 2)

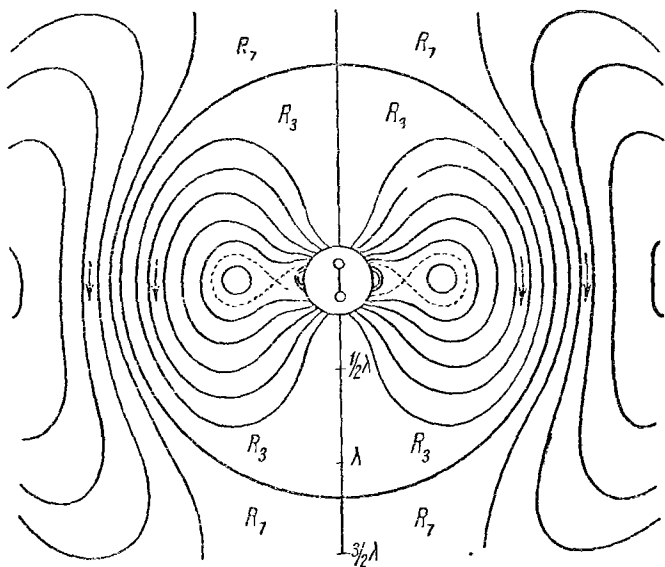
уже охватывает пространство R_1 . Распределение силовых линий внутри сферы примерно соответствует распределению силовых линий двух точечных электрических зарядов в электростатике. Скорость, с которой сферическая поверхность $Q=0$ удаляется от нулевой точки, вначале значительно больше, чем $1/A$. Действительно, последняя скорость за время $T/4$ соответствует изображенному на фигуре значению $\lambda/4$,¹ на бесконечно малых расстояниях от нулевой точки скорость распространения может быть бесконечно велика. Это и представляет явление, которое толковалось старыми теориями в том смысле, что на индукционное действие, распространяющееся со скоростью $1/A$, налагается электростатическая сила, распространяющаяся с бесконечной скоростью.

Более правильное толкование явления может быть дано в смысле нашей теории при учете того обстоятельства, что основой образования волны являются не только процессы в месте ее возникновения, но также состояния окружающего пространства, поскольку последнее с точки зрения нашей теории и является носителем энергии. Как уже указывалось, поверхность $Q=0$ расширяется со скоростью, непрерывно уменьшающейся

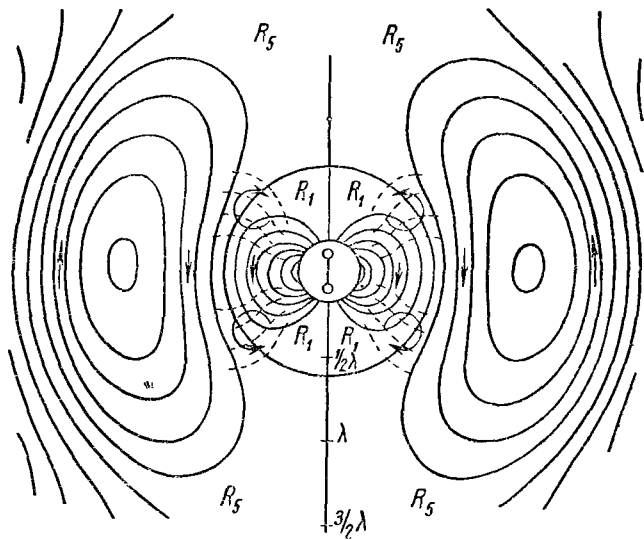
¹ Т. е. если бы скорость равнялась $1/A$, то радиус сферы $Q=0$ к моменту $t=T/4$ имел величину $\lambda/4$ (прим. переводчика).



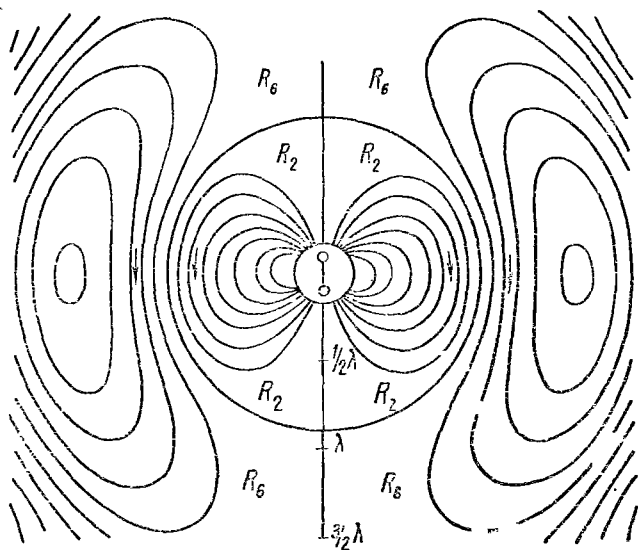
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

и стремящейся к значению $1/A$, причем в момент $t = \frac{T}{2}$ эта поверхность охватывает объем R_2 (фиг. 3). В этот момент электростатические заряды источника имеют наибольшую величину, и число силовых линий, соединяющих его полюсы, достигает максимума. При дальнейшем увеличении времени не только не происходит увеличения числа силовых линий, выходящих из полюсов, но уже имеющиеся линии начинают возвращаться в вибратор, где они — как электрические силовые линии — исчезают, причем их энергия переходит в магнитную энергию. При этом наблюдается замечательный факт, иллюстрируемый в своей начальной части фиг. 4 (для $t = \frac{3T}{4}$). Именно, силовые

линии, которые больше всего удалены от источника, при своем исчезновении проявляют тенденцию сжиматься и испытывают искривление, в результате которого от каждой из внешних силовых линий отщуровывается замкнутая на себя силовая линия, которая начинает самостоятельно двигаться в пространстве, в то время как остаток силовой линии возвращается в вибратор.

Таким образом, число линий, возвращающихся в вибратор, равно числу вышедших из него линий, но их энергия уменьшена на энергию, соответствующую энергии отщуровавшихся частей. Эта потеря энергии соответствует излучению в пространство. По этой причине колебания вибратора должны вскоре прекратиться, если какая-либо посторонняя сила не будет сообщать ему энергии, эквивалентной излученной. Рассматривая незатухающие колебания вибратора, мы молчаливо допускали существование подобной силы. На фиг. 1, к которой мы снова обращаемся в момент $t = T$ (причем направление стрелок должно быть изменено на обратное), отщуровавшаяся часть силовых линий занимает пространство R_4 , в то время как выходящие из полюсов силовые линии в этот момент полностью отсутствуют. Но в дальнейшем из полюсов выходят новые силовые линии и отталкивают линии, которые мы сейчас изучали, в пространство R_5 (фиг. 2).

Без дальнейших рассуждений ясно, как ведут себя эти силовые линии в последующие моменты времени

в пространствах R_6 (фиг. 3), R_7 (фиг. 4), R_8 (фиг. 1). Эти силовые линии все более и более переходят в чисто поперечную волну и, в виде таковой, теряются в пространстве. Для получения отчетливой картины развития силовых линий целесообразно изготовить чертежи для меньших промежутков времени и исследовать их при помощи стробоскопического диска.

Подробное изучение фигур показывает, что для точек, не совпадающих ни с осью z ни с плоскостью xy , направление силы меняется по времени. Поэтому, если изобразить силу в данной точке, как это общепринято, отрезком, выходящим из этой точки, то конечная точка отрезка в процессе колебания не будет двигаться взад и вперед вдоль прямой, но опишет эллипс. Для выяснения вопроса о том, существуют ли точки, для которых этот эллипс вырождается в окружность, т. е. в которых сила, не меняя своей величины, непрерывно изменяет свое направление, мы наложим друг на друга две фигуры, соответствующие моментам времени, удаленным на половину периода друг от друга, например фиг. 1 и 3 или фиг. 2 и 4. Для интересующих нас точек система линий одной из фигур должна быть перпендикулярна системе линий другой, а расстояния между линиями обеих фигур должны быть одинаковы. Маленькие четырехугольники, образуемые при пересечении обеих систем линий, должны, таким образом, обращаться в квадраты в интересующих нас точках. Действительно, удастся обнаружить области описанного типа. Они помечены на фиг. 1 круговыми стрелками, направление которых характеризует направление вращения силы. Для ясности на этих же фигурах изображены пунктирные линии, соответствующие линиям фиг. 3 и 4. Можно показать, что подобное поведение силы наблюдается не только в указанных точках, но и в прилегающих к ним узких областях, продолжающихся до оси z . Однако в этих направлениях сила так быстро убывает по величине, что отчетливое проявление описанной картины замечается только вблизи точек, отмеченных на фигурах.

Описанная система силовых линий, требуемая теорией, может быть воспроизведена в несовершенном экспери-

менте, описанном мною в одной из предыдущих работ.¹ Полная теория этого эксперимента отсутствует. -

Правда, наблюдения не позволяют проследить за всеми деталями рассмотренного процесса, но они подтверждают его важнейшие особенности. Наблюдение в согласии с теорией показывает, что распределение силы вблизи вибратора подобно электростатическому распределению. В согласии же с теорией наблюдение показывает, что сила распространяется в основном в экваториальной плоскости, причем она убывает сначала быстро, а затем медленно, не обращаясь в нуль на промежуточных расстояниях. В согласии с теорией наблюдение показывает, что в экваториальной плоскости, на оси и на больших расстояниях сила имеет неизменное направление и меняющуюся величину, в то время как в промежуточных точках меняется не столько ее величина, сколько ее направление. Но опыт не согласуется с теорией в том отношении, что на больших расстояниях, согласно теории, сила должна быть перпендикулярна прямой, проведенной к вибратору, в то время как по опытным данным она оказывается параллельной вибратору. Правда, вблизи экваториальной плоскости, где силы наиболее значительны, теория и опыт совпадают, но для направлений, расположенных между экваториальной плоскостью и осью, это не имеет места. Я думаю, что ошибочными являются наблюдения. В наших опытах направление вибратора было параллельно поверхности стен помещения, в котором производились наблюдения, вследствие чего компонента силы, параллельная вибратору, могла казаться усиленной по сравнению с перпендикулярной компонентой.

Поэтому я повторил опыты при изменении расположения вибратора, причем для некоторых его положений мне удалось получить полное согласие теории с опытом. Однако мне не удалось получить исчерпывающих доказательств. Было установлено только, что при больших расстояниях и в области незначительной интенсивности силы искажения, вносимые окружающими предметами, оказы-

¹ Wied. Ann., Bd. 34, S. 155, 1888.

ваются настолько значительными, что делают невозможными точные исследования.

Во время работы вибратора энергия колеблется между сферическими поверхностями, окружающими вибратор, то выходя из них, то возвращаясь обратно. Однако количество энергии, выходящей из каждой сферической поверхности за один период,¹ превышает энергию, возвращающуюся обратно, причем разность между этими величинами одинакова для всех сферических поверхностей. Эта разность определяет количество энергии, теряемое за один период благодаря излучению. Легко вычислить ее для сферических поверхностей, радиус r которых настолько велик, что допустимо пользование упрощенными формулами. Именно, за элемент времени dt через сферическую зону, лежащую между θ и $\theta + d\theta$, проходит энергия:

$$dt \cdot 2\pi r \sin \theta \cdot r d\theta \cdot \frac{1}{4\pi A} \cdot (Z \sin \theta - R \cos \theta) P.$$

Подставляя сюда значения Z , R , P для больших r и интегрируя по θ от 0 до π и по t от 0 до T , находим, что за половину полного колебания через всю сферу проходит энергия:

$$\frac{1}{3} E^2 l^2 m^3 n T = \frac{\pi^4 E^2 l^2}{3 \lambda^3}.$$

Попытаемся сделать приближенную оценку соотношений, имевшихся в наших опытах. В этих опытах два шара, радиусом 15 см, заряжались противоположными знаками до потенциала, соответствующего искровому промежутку в 1 см. Оценивая электростатическую разность потенциалов между шарами в $120 \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{1/2} \text{ сек.}^{-1}$, находим, что каждый шар заряжался до потенциала $\pm 60 \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{1/2} \text{ сек.}^{-1}$, так что получалось $E = 15 \times 60 = 900 \text{ г}^{1/2} \text{ см}^{3/2} \text{ сек.}^{-1}$. Общее количество энергии, которым вибратор обладал в начале процесса, составляло

$$2 \times 0.5 \times 900 \times 60 = 54\,000 \text{ г см}^2 \text{ сек.}^{-2},$$

¹ Под периодом T Герц понимает время, в течение которого вибратор меняет заряд от нуля до максимума и от максимума до нуля (прим. переводчика).

что соответствует энергии, запасаемой массой в 1 г, находящейся в поле тяжести, при падении ее с высоты 55 см. Длина вибратора составляла около 100 см, а длина волны около 480 см. Отсюда следует, что потеря энергии за полу-период достигала $2400 \text{ г см}^2 \text{ сек.}^{-2}$.¹ Ясно, что уже через одиннадцать периодов половина энергии должна была потеряться благодаря излучению. Таким образом, сильное затухание, характеризовавшее наши опыты, было обусловлено излучением и не могло быть устранено даже при значительном уменьшении сопротивления проводника и искры.

Отдача энергии в $2400 \text{ г см}^2 \text{ сек.}^{-2}$ за 1.5 стомиллионных долей секунды соответствует мощности в 22 л. с. Если желательно, чтобы возбуждение колебаний длительно происходило с неизменной интенсивностью, несмотря на излучение, необходимо подводить к вибратору количество энергии, не меньше указанного выше.

Во время нескольких первых колебаний интенсивность излучения на расстоянии 12 м от вибратора соответствовала интенсивности солнечного излучения на поверхности земли.

Интерференционные опыты

Для определения скорости распространения электрической силы в экваториальной плоскости мы заставляли излученную волну интерферировать с волной, распространяющейся с постоянной скоростью в проволоке.² Оказалось, что возникающая интерференция наблюдается не на равных расстояниях, но вблизи вибратора эти расстояния меньше, чем на больших удалениях от него. Это явление было объяснено предположением, что полная сила может быть разложена на две, из которых одна — электродинамическая — распространяется со скоростью света, а другая — электростатическая — с большей, возможно, бесконечной скоростью. Согласно рассматриваемой здесь теории, интересующая нас сила в экваториальной плоскости равна:

$$Z = Elm^3 \left\{ -\frac{\sin(mr - nt)}{mr} - \frac{\cos(mr - nt)}{m^2 r^2} + \frac{\sin(mr - nt)}{m^3 r^3} \right\}.$$

¹ См. примечание 1 в конце статьи.

² Wied. Ann., Bd. 34, S. 551, 1888.

Это выражение никаким способом не может быть представлено в виде двух отдельных волн, распространяющихся с различными скоростями. Поэтому, если постоянная теория справедлива, данное прежде объяснение является лишь некоторым приближением к истине. Исследуем, может ли настоящая теория дать какое-либо объяснение этого явления.

Мы можем написать:

$$Z = B \sin (nt - \delta_1),$$

где амплитуда силы равна

$$B = \frac{El}{r^3} \sqrt{1 - m^2 r^2 + m^4 r^4},$$

а фаза δ_1 определяется уравнением:

$$\operatorname{tg} \delta_1 = \frac{\frac{1}{mr} \sin mr + \frac{1}{m^2 r^2} \cos mr - \frac{1}{m^2 r^3} \sin mr}{\frac{1}{mr} \cos mr - \frac{1}{m^2 r^2} \sin mr - \frac{1}{m^2 r^3} \cos mr},$$

которое после преобразований принимает вид:

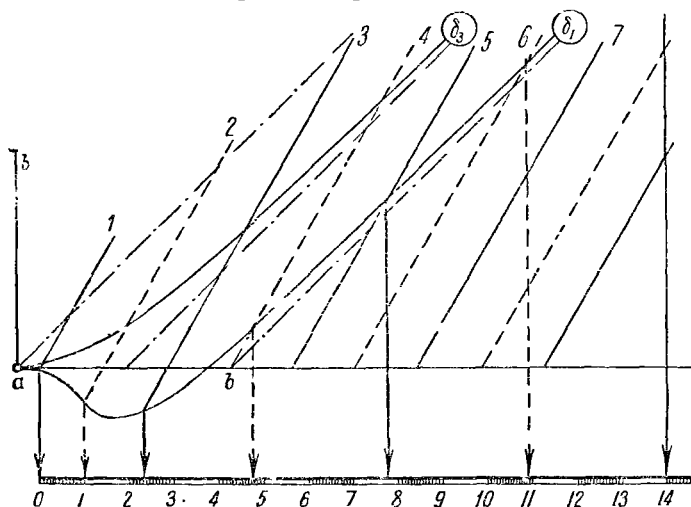
$$\delta_1 = mr - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{mr}{1 - m^2 r^2}.$$

На фиг. 5 кривая δ_1 представляет значения δ_1 в функции mr . При этом длина ab на обеих осях координат соответствует значению π . Если по оси абсцисс откладывать не значения mr , а величины r , то длина ab по этой оси будет соответствовать полуволне.

Для того чтобы перейти к опытам, которые мы хотим истолковать, полезно дать по оси абсцисс масштаб в метрах. Согласно непосредственным измерениям,¹ длина волны составляла 4.8 м, чем и определяется масштаб на фигуре. Начальную точку мы поместим не в начале координат (где находится вибратор), а на расстоянии 0.45 м от нее. Тогда шкала расстояния в метрах будет соответствовать шкале, использованной при измерениях интерференции. Из фигуры видно, что фаза не

¹ См. предыдущую статью в этом сборнике.

растет с самого начала, а распределена таким образом, как если бы волна возникала на расстоянии одной полу-волны (в пространстве) и затем распространялась частично к вибратору, частично в окружающее пространство. На больших расстояниях фаза оказывается уменьшенной на величину π по сравнению со значением, которое она имела бы в случае распространения волны с постоянной



Фиг. 5

скоростью от начальной точки. Таким образом, волна распределяется на больших расстояниях так, как если бы на протяжении первой полу-волны она распространялась с бесконечно большой скоростью.

Влияние w волны, распространяющейся в проволоке, на вторичный контур, расположенный в некотором месте, может быть представлено уравнением:

$$w = C \sin (nt - \delta_2),$$

где для сокращения принято:

$$\delta_2 = m_1 r + \delta = \frac{\pi r}{\lambda_1} + \delta ;$$

здесь λ представляет полуволну в проволоке, чему в наших опытах соответствует расстояние 2.8 м, а δ представляет фазу ее действия в точке $r=0$; эту фазу мы можем менять по произволу, изменяя длину проволоки. Подобным же образом мы можем изменять и амплитуду C , которая может быть сделана примерно равной амплитуде волны, распространяющейся в пространстве. Тогда фаза интерференции будет определяться только разностью между фазами δ_1 и δ_2 . При тех положениях вторичного контура, к которым приложимо наше выражение для w , усиление обоих действий (интерференция, помеченная в опытах знаком $+$) наблюдается в тех случаях, когда разность $\delta_1 - \delta_2$ равна нулю или целому, кратному 2π ; действия взаимно уничтожаются (интерференция, помеченная знаком $-$) при значениях $\delta_1 - \delta_2$, равных π или нечетному целому, кратному этой величины; наконец, интерференции не происходит (интерференция, помеченная знаком 0), если разность $\delta_1 - \delta_2$ равна нечетному целому, кратному $\frac{\pi}{2}$.

Допустим, что δ определена таким образом, что в начальной точке метровой шкалы фаза интерференции имеет некоторую определенную величину ε , так что $\delta_1 = \delta_2 + \varepsilon$. Прямая линия l нашей фигуры определит значения $\delta_2 + \varepsilon$ в функции расстояния. Эта линия проведена с таким наклоном, что возрастанию абсциссы на $\lambda = 2.8$ м соответствует возрастание ординаты на π , и расположена таким образом, что она пересекает кривую δ_1 в точке, абсцисса которой соответствует начальной точке метровой шкалы. Линии 2, 3, 4 и т. д. представляют ход значений

$$\delta_2 + \varepsilon - \frac{\pi}{2} + \varepsilon - \pi, \quad \delta_2 + \varepsilon - \frac{3\pi}{2}$$

и т. д. в функции расстояния. Эти линии параллельны линии l и проведены таким образом, что они пересекают одну и ту же ординату через каждые $\frac{\pi}{2}$ и одну и ту же абсциссу через каждые 1.4 м. Если спроектировать точки

пересечения этих прямых с кривой δ_1 на ось абсцисс, то мы получим расстояния, для которых

$$\delta_1 = \delta_2 + \varepsilon + \frac{\pi}{2}, \quad \delta_2 + \varepsilon + \pi, \quad \delta_2 + \varepsilon + \frac{3\pi}{2} \text{ и т. д.,}$$

т. е. такие расстояния, на которых фаза возрастает на $\frac{\pi}{2}$, π , $\frac{3\pi}{2}$ и т. д. по сравнению с фазой в начальной точке. При этом из чертежа непосредственно следует: если интерференция в начальной точке метровой шкалы имеет знак $+$ (\ominus), то она примет знак 0 в первый раз на расстоянии 1 м, знак $-$ (\oplus) на расстоянии 2.3 м, затем снова знак 0 на расстоянии 4.8 м, наконец, знак $+(-)$ она снова приобретет на расстоянии 7.6 м, затем примет знак 0 на расстоянии 11 м, после чего перемены знака будут происходить приблизительно через равные расстояния. Если в начальной точке интерференция имеет знак 0, то тот же знак она примет на расстояниях 2.3 м, 7.6 м и 14 м, положительный же или отрицательный знак она примет на расстояниях 1, 4.8 и 11 м от начальной точки. Для промежуточных значений фаз получатся промежуточные значения расстояний. Сравнивая этот результат теории с данными опыта, касающимися интерференции, возникающей при использовании проволоки в 100, 250, 400, 550 см, убеждаемся, что совпадение получается вполне удовлетворительным.

Интерференцию второго рода мне не удалось объяснить столь наглядно. Для получения этой интерференции использовались положения вторичного контура, при которых основную роль играла величина индукции по замкнутому контуру. Считая размеры последнего бесконечно малыми, мы можем принять интегральную величину индукции пропорциональной скорости измерения магнитной силы, перпендикулярной плоскости контура, т. е. пропорциональной выражению:

$$\frac{dP}{dt} = AEIm^2n^2 \left\{ -\frac{\cos(nr - nt)}{nr} + \frac{\sin(nr - nt)}{n^2r^2} \right\}.$$

Отсюда получаем для фазы

$$\operatorname{tg} \delta_3 = - \frac{\frac{1}{mr} \cos mr - \frac{1}{m^2 r^2} \sin mr}{\frac{1}{mr} \sin mr + \frac{1}{m^2 r^2} \cos mr},$$

что после преобразования дает:

$$\delta_3 = mr - \operatorname{arc} \operatorname{tg} mr.$$

Линия δ_3 на фиг. 5 представляет ход этой функции. Мы видим, что для этого случая фаза непрерывно возрастает с самого начала. Поэтому явления, свидетельствующие о конечной скорости распространения, должны наблюдаться в этом случае уже в непосредственной близости к вибратору. Так оно и происходило в опытах, и в этом-то и заключалось преимущество этого рода интерференции. Однако кажущаяся скорость распространения вблизи вибратора получалась большей, чем вдали от него, и нельзя отрицать того факта, что фаза интерференции, определяемая теоретически, изменяется быстрее, чем фаза, наблюдаемая на опыте; это различие невелико, но вполне отчетливо заметно. Мне думается, что более совершенная теория, учитывающая, что оба взаимодействующих контура не являются бесконечно малыми, либо же несколько иное предположение о длине волны λ обеспечит лучшее совпадение теории с опытом.

Важно отметить, что и при толковании опытов с точки зрения теории Максвелла необходимо делать существенное различие между скоростью распространения волн в проводниках и в свободном пространстве.

Волны в проводящих проводниках

Функция

$$K(p\rho) = \int_0^{\infty} e^{-\frac{p}{2} \rho (e^u + e^{-u})} du,$$

которая при больших значениях ρ принимает вид

$$\sqrt{\pi} \sqrt{2p\rho} \cdot e^{-p\rho},$$

а для исчезающе малых значений ρ обращается в $-\ln(p\rho/2) - 0.577$, удовлетворяет дифференциальному уравнению:

$$\frac{d^2K(p\rho)}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dK(p\rho)}{d\rho} - p^2K(p\rho) = 0.$$

Полагая

$$\Pi = \frac{2I}{An} \sin(mz - nt) K(p\rho),$$

убеждаемся, что Π удовлетворит уравнению

$$A^2 \frac{d^2\Pi}{dt^2} = \Delta\Pi,$$

если мы положим $p^2 = m^2 - A^2n^2$. При этом под I следует понимать силу тока, измеренную в магнитных единицах, под ρ и $m = \frac{\pi}{\lambda}$ — величины, обратные длине, под $n = \frac{\pi}{T}$ величину, обратную времени.

Функция Π удовлетворяет нашему уравнению во всем пространстве, кроме оси z , где она претерпевает разрыв. Таким образом, значения R , Z , P , N , определяемые из Π , представляют электрическое движение, происходящее в очень тонкой проволоке, натянутой вдоль оси z . В непосредственной близости к проволоке получаем (с точностью до величин, содержащих четные степени ρ):

$$Q = \frac{2I}{An} \sin(mz - nt),$$

следовательно:

$$R_0 = \frac{2Im}{An\rho} \cos(mz - nt),$$

$$P_0 = \frac{2I}{\rho} \cos(mz - nt),$$

где индекс 0 символизирует исчезающе малые значения ρ . Из значения R_0 следует, что свободное количество электричества e , находящееся на единице длины проволоки, равно:

$$e = \frac{1}{4\pi} 2\pi\rho R_0 = \frac{Im}{An} \cos(mz - nt).$$

Аналогично из выражения для P_0 получаем следующее значение силы тока i :

$$i = \frac{1}{4\pi} 2\pi\rho P_0 = I \cos(mz - nt).$$

Значения i и e удовлетворяют уравнению

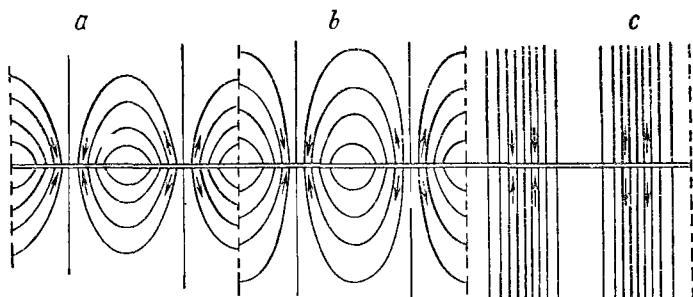
$$A = \frac{de}{dt} = \frac{di}{dz},$$

которое обязательно должно быть выполнено. Эти значения свидетельствуют о том, что рассматриваемое движение представляет синусоидальную электрическую волну, распространяющуюся по оси z в направлении возрастающих z ; половина длины волны равна λ , ее полупериод равен T , скорость имеет величину $\frac{\lambda}{T} = \frac{n}{m}$, что же касается интенсивности процесса, то наибольшие значения силы тока равны $\pm I$.

Остерегаясь произвольно распоряжаться сторонними силами, действующими в проводе, мы можем рассматривать λ и T как независимые друг от друга величины. Для каждого определенного отношения этих величин, т. е. для каждой определенной скорости волны, распределение линий электрической силы будет иметь определенный характер, причем это распределение, не зависящее от времени, будет распространяться вдоль по проволоке. Как и прежде, мы можем найти это распределение, строя линии $Q = \text{const}$.

На фиг. 6 приведены подобные распределения, причем на фиг. 6, *a* дано распределение для случая весьма малой скорости, т. е. для p , приблизительно равного m . Чертеж соответствует электростатическому распределению сил, получающемуся в том случае, когда электричество распределено по проводу таким образом, что плотность его является синусоидальной функцией длины проволоки. На фиг. 6, *b* изображено распределение силовых линий для скорости, составляющей 28,48 скорости света. Фигура показывает, что силовые линии в этом случае проходят большой путь от точки выхода из провода до точки возвращения в него. С точки зрения

старых представлений это обстоятельство было бы объяснено следующим образом: электродинамическая сила, направленная параллельно проводу, ослабляет параллельную ей компоненту электростатической силы, не оказывая никакого влияния на компоненту, перпендикулярную проволоке. Ослабление компоненты, параллельной проволоке, может продолжаться до полного уничтожения этой компоненты. Именно, если принять скорость распространения волны в проволоке равной скорости



Фиг. 6

света, то p обратится в нуль, а функция $K(p\rho)$ при любых значениях ρ будет равна $-\ln \rho + \text{const}$, так что при любых значениях ρ получится:

$$Q = -\frac{2I}{An} \sin(mz - nt),$$

следовательно:

$$R = \frac{2Im}{An\rho} \cos(mz - nt), \quad z = 0,$$

$$P = \frac{2I}{\rho} \cos(mz - nt), \quad N = 0.$$

В этом случае распределение силы является наиболее простым: электрическая сила везде направлена перпендикулярно проволоке и убывает обратно пропорционально расстоянию до проволоки. На фиг. 6, с изображено соответствующее распределение кривых Q , равно отстоящих друг от друга (т. е. отличающихся друг от

друга на одну и ту же величину dQ). Для волн, распространяющихся со скоростью, большей $1'A, p$ делается мнимым. Для этого случая наши формулы должны быть переработаны, чего мы не будем делать, так как этот случай не имеет никакого практического значения.

У поверхности проволоки компонента электрической силы, параллельная поверхности, непрерывно переходит внутрь проволоки. Максвелл называет идеальным проводником такой проводник, внутри которого могут существовать только исчезающие малые силы. Следовательно, на поверхности идеального проводника тангенциальная компонента силы должна обращаться в нуль. Если это утверждение верно, то в хорошо проводящих проволоках электрические волны должны распространяться со скоростью света и распределение сил должно совпадать с распределением, изображенным на фиг. 6, *b*. Действительно, при этом распределении силы везде перпендикулярны поверхности проводника. Следует отметить, что как теория Максвелла, так и более старые теории приводят к заключению, что в идеально проводящих проволоках электрические волны должны распространяться со скоростью света.

Однако, если верить нашим измерениям, этот результат является неверным, так как распространение происходит со значительно меньшей скоростью, причем распределение силы приблизительно соответствует фиг. 6, *b*. Этот результат тем более удивителен, что скорость распространения в проволоках оказывается, повидимому, совершенно независимой от материала проволоки. Я получал одну и ту же скорость в проволоках из самых разнообразных металлов, различной толщины, различной формы сечения, а также в столбах проводящих жидкостей. Причины, определяющие эту скорость, еще не выяснены. Но, во всяком случае, сопротивление не играет никакой роли. Одно время я предполагал, что может играть роль постоянная K , введением которой Гельмгольц расширил теорию Максвелла¹, но более тщательное рассмотрение вопроса заставило отказаться от этого пред-

¹ Н. v. Helmholtz, Ges. Abh., Bd. I, S. 545.

положения. Коль скоро рассмотренное выше граничное условие верно, всегда возможно распространение волны, подобной волне, изображенной на фиг. 6, с. Эта волна всегда должна быть чисто поперечной, а потому должна распространяться с той же скоростью, что и плоская поперечная волна в пространстве, независимо от того существует ли одновременно продольная волна. Поэтому конечное значение постоянной K , не внося ничего в объяснение расхождения наблюдаемой и теоретической скоростей, заставляет допустить существование двух типов волн, распространяющихся в проволоке с различными скоростями. Однако опыт не дает никаких указаний на подобное явление. Поэтому следует поставить под сомнение справедливость граничного условия в случае быстро меняющейся силы.

Представляется мало вероятным, чтобы волна, распространяющаяся по оси z , имела произвольно большую скорость, но, с другой стороны, вполне возможно допустить, что скорость может быть в какое угодно число раз меньше максимального значения, причем соответствующее распределение силы будет средним между распределениями, изображенными на фиг. 6, *a* и 6, *b*. Можно заставить волну распространяться через изогнутую или скрученную спираль проволоку. Например, я свернул проволоку длиной в 40 м в однослойную спираль диаметром 1 см, причем плотность витков была такова, что длина спирали составляла 1.6 м. При этом я мог наблюдать узловые точки на расстояниях около 0.31 м, в то время как в прямой проволоке расстояние между узлами составляло 2.8 м. При постепенном растяжении спирали одно значение переходило в другое. Таким образом, скорость распространения волны по оси z (оси спирали) была значительно меньше, чем в прямой проволоке. Но если рассчитать скорость по длине проволоки, то она получается больше. Подобное же явление наблюдается в проволоке, изогнутой зигзагообразно. Если я не ошибаюсь, теория Максвелла при допущении справедливости граничного условия для хорошего проводника не может объяснить этих явлений. Мне кажется, что согласно этой теории скорость распространения волны по оси z должна

совпадать со скоростью света при любой форме проволоки, если только можно не принимать во внимание сопротивление проволоки и если ее размеры (перпендикулярные оси) исчезающе малы по сравнению с длиной волны. Оба эти условия выполняются в металлической проволоке, свернутой спиралью, но выводы из теории противоречат опыту.

Пытаясь объяснить результаты наблюдений с точки зрения теории Максвелла, мы не смогли преодолеть всех трудностей. Однако полнота, с которой эта теория объясняет большую часть явлений, должна рассматриваться как серьезное доказательство ее справедливости.

Если же попытаться приложить к этим явлениям старые теории, то уже в простейших вопросах возникнет ряд противоречий, если только эти теории не будут уподоблены теории Максвелла путем введения представления об эфире — диэлектрике, как это было сделано Гельмгольцем.

Примечание

Этот расчет основывается на наблюдаемой длине волны в 480 см. Если эта длина была определена неверно, должен быть, соответственно, изменен и расчет. Относительно действительного значения затухания см. примечание 5 в конце статьи „О весьма быстрых электрических колебаниях“ (стр. 73—76).

ЛИТЕРАТУРА

1. H. v. Helmholtz, W. A. 17, 48, 1882.
2. J. H. Poynting, Phil. Trans., 1884, II, 343.
3. Wied. Ann., 34, 155, 1888.
4. Wied. Ann., 34, 551, 1888.
5. H. v. Helmholtz, Ges. Abh. 7, 545.

О ЛУЧАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЫ¹

(Ueber Strahlen elektrischer Kraft. Wied. Ann., 36, 769, 1889)

НЕПОСРЕДСТВЕННО после того, как мне удалось доказать, что действие электрического колебания распространяется в пространстве в виде волны, я сделал попытку усилить это действие и сделать его заметным на больших расстояниях, помещая возбуждаемый проводник в фокальной линии большого параболического вогнутого зеркала. Эти опыты не дали результата, причем мне стало ясно, что их неудача обусловлена неподходящими соотношениями между длиной использованной волны, составлявшей 4—5 м, и размерами зеркала, которым я пользовался.

Недавно я заметил, что описанные мной ранее опыты легко могут быть произведены при колебаниях, происходящих примерно в 10 раз быстрее, т. е. при волнах, в 10 раз более коротких, чем использованные ранее. Поэтому я снова обратился к использованию вогнутого зеркала и добился значительно бóльших успехов, чем рассчитывал. Мне удалось получить отчетливые лучи электрической силы и произвести при их помощи все элементарные опыты, которые производятся со световыми и тепловыми лучами. Эти опыты и описываются в дальнейшем.

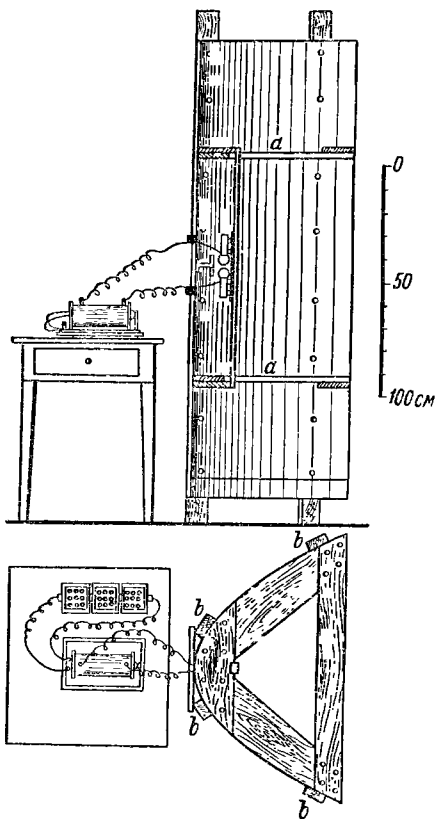
Приборы

Метод получения коротких волн был совершенно подобен методу, при помощи которого возбуждались длин-

¹ В примечании к повторному изданию этой статьи, относящемуся к 1891 г., Герц пишет, что термин „электрическая сила“ является лишь обозначением поляризационного состояния некоторой части пространства. Он указывает, что, возможно, следовало бы заменить этот термин термином „напряженность электрического поля“, предложенным Коном.

ные волны. Примененный в опытах первичный проводник был устроен следующим образом: представим себе (фиг. 1 и 2 и их объяснение — в конце статьи) цилиндрическое медное тело, диаметром в 3 см и длиной 26 см. Посредине оно разрезано и снабжено искровым промежутком, полюсы которого образованы двумя сферическими поверхностями с радиусом в 2 см. Длина проводника приблизительно равнялась половине длины волны, соответствующей колебанию, возникающему в прямом проводе. Уже отсюда можно было сделать примерное заключение о величине периода колебаний.

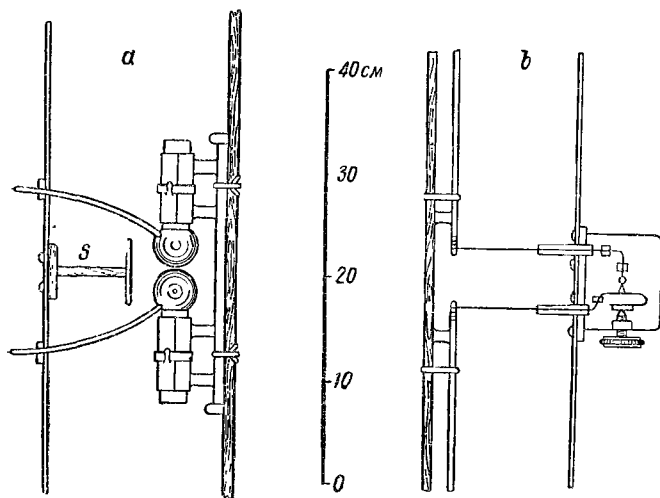
Необходимо, чтобы полюсы искрового промежутка часто отполировывались и предохранялись во время опыта от побочных разрядов, при которых колебания возникать не могут. Вид и звук искр легко позволяют судить о том, находится ли искровой промежуток в удовлетворительном состоянии. Разряд¹ подводился к обеим половинам проводника при помощи



Фиг. 1

¹ Словом „разряд“ автор обозначает подводимое высокое напряжение. — Прим. переводчика.

двух проводов, покрытых гуттаперчей; эти провода припаивались по обе стороны вблизи искрового промежутка. В качестве индуктора я применял вместо большого аппарата Румкорфа маленький аппарат Кайзера и Шмидта, который позволял получить между остриями искру длиной 4.5 см. Аппарат питался от трех аккумуляторов, причем между шариками первичного проводника удава-



Фиг. 2

лось получать искры длиной 1—2 см. Во время опытов длина искрового промежутка составляла 3 мм.

Для обнаружения электрической силы в пространстве использовались маленькие искры, создаваемые ею во вторичном проводнике. Иногда в качестве вторичного проводника применялся круговой проводник, имевший собственную частоту колебаний, примерно равную частоте первичного проводника. Радиус круга составлял 7.5 см; круг был сделан из медной проволоки толщиной в 1 мм. Один конец проволоки оканчивался латунным шариком диаметром в несколько миллиметров, другой конец был

заострен и мог быть установлен на очень маленьком расстоянии от латунного шарика при помощи микрометрического винта, изолированного от проволоки. Конечно, здесь получались лишь искры длиной в несколько сотых долей миллиметра; при некотором навыке удастся оценивать интенсивность процесса не столько по длине искр, сколько по их яркости.

Круговой проводник является непригодным для помещения в фокальной линии зеркала. Поэтому большая часть работы производилась с другим вторичным проводником, устроенным следующим образом: две прямых проволоки длиной по 50 см и диаметром 5 мм были установлены по одной прямой, причем их концы, обращенные друг к другу, находились на расстоянии 5 см. От этих концов вели две проволоки (15 см длиной, 1 мм диаметром), параллельные друг другу и перпендикулярные первым проволокам; они приключались к искровому промежутку, устроенному так же, как и в случае кругового проводника.

Было бы проще поместить искровой промежуток непосредственно между прямыми проволоками, но в этом случае было бы невозможно наблюдать его в фокальной линии зеркала, не закрывая своим телом отверстия зеркала. По этой причине и была выбрана конструкция, описанная выше.

Возбудитель луча

Если поместить первичный проводник в большом свободном пространстве, то при помощи кругового проводника можно наблюдать вблизи него все те явления, которые наблюдались при более медленных колебаниях и были описаны ранее.¹ Наибольшее расстояние, на котором еще наблюдались искры во вторичном проводнике, составляло 1.5 м, а при весьма хорошем состоянии первичного искрового промежутка — даже 2 м. Можно было усилить

¹ См. Wied. Ann. Bd. 34, S. 155, 1888; Bd. 34 S. 551, 1888; а также статью „Об электродинамических волнах в воздухе и их отражении“ (стр. 76).

эффект в одном направлении, располагая с противоположной стороны первичного излучателя на подходящем расстоянии плоскую проводящую стенку, параллельную излучателю. Именно, если расстояние было очень мало либо несколько превышало 30 см, то стенка оказывала лишь вредное влияние; она создавала значительное усиление при расстоянии 8—15 см, менее значительное усиление при расстоянии 45 см и не оказывала никакого влияния при еще больших расстояниях. Это явление мы уже объясняли ранее и могли заключить, что первичным колебаниям соответствует в воздухе волна, половина длины которой равна 30 см. Можно было ожидать значительного усиления эффекта при замене плоской стенки вогнутым зеркалом, имеющим формулу параболического цилиндра, фокальная линия которого совпадала бы с осью первичного проводника. Если вогнутое зеркало должно правильно концентрировать лучи, целесообразно делать его фокусное расстояние возможно меньшим. Если же действие прямой волны не должно уничтожаться отраженной, то фокусное расстояние не должно быть много меньше чем четверть длины волны. Поэтому я выбрал фокусное расстояние равным 12.5 см и изготовил вогнутое зеркало, взяв цинковый лист в 2 м длиной, 2 м шириной и $\frac{1}{2}$ мм толщиной; этот лист укреплялся на деревянной раме надлежащей формы. Таким образом, высота зеркала составляла 2 м, ширина его отверстия 1.2 м, его глубина 0.7 м. Первичный проводник устанавливался в середине фокальной линии. Проволоки, подводившие разряд, пропускались через стенку зеркала. Индуктор и элементы находились, таким образом, сзади зеркала и не оказывали вредного влияния. Если теперь исследовать колебания вокруг зеркала при помощи вторичного проводника, то позади зеркала и сбоку от него не наблюдается совершенно никаких действий, в направлении же оптической оси зеркала искры могут быть замечены на расстояниях порядка 5—6 м. Искры могут наблюдаться и на больших расстояниях, до 9—10 м, если на пути выходящей из зеркала волны установить перпендикулярно направлению ее распространения плоскую проводящую стенку. В этом случае отраженные стенкой волны в не-

которых точках усиливают приходящие волны. В других же точках обе волны ослабляют друг друга. При помощи прямолинейного проводника можно наблюдать перед стенкой отчетливые максимумы и минимумы, а при помощи кругового проводника — интерференционные явления, характерные для стоячих волн, которые были описаны ранее. Мне удавалось обнаружить четыре узловых точки, располагавшиеся у самой стенки и на расстояниях 33, 65 и 98 см от нее. Таким образом, с большим приближением можно считать, что половина длины волны равнялась 33 см, а период колебаний — $1.1 \cdot 10^{-9}$ сек.¹, если считать, что скорость распространения равна скорости света. В проволоках получалась длина полуволны, равная 29 см. Таким образом, и при этих коротких волнах скорость распространения их в проволоках получается несколько меньше, чем в воздухе, но отношение обеих скоростей очень близко к теоретическому значению, равному единице, и отличается от нее меньше, чем при наших опытах с длинными волнами. Это замечательное явление нуждается в дальнейшем изучении².

Так как явления наблюдаются лишь вблизи оптической оси зеркала, то мы можем сказать, что из зеркала выходит электрический луч.

Далее, я изготовил второе вогнутое зеркало, вполне подобное первому, и расположил в нем прямолинейный вторичный проводник таким образом, что обе проволоки, имевшие 50 см длины, совпадали с фокальной линией, а обе проволоки, ведущие к искровому промежутку, кратчайшим путем выходили через стенку зеркала, от которой они были изолированы. Таким образом, искровой промежуток находился как раз сзади зеркала, и наблюдатель

¹ Автор принимает за период время, равное половине периода, принимаемого нами теперь. — *Прим. переводчика.*

² Чрезвычайно характерно для Герца, что он упорно считал скорость распространения волн в воздухе и в проволоках одинаковой, что, как известно, справедливо с очень большой точностью. Расхождения в длинах волн для обоих случаев, которые Герц считал необходимым подвергнуть дальнейшему изучению, конечно, объясняются недостаточной точностью измерений и влиянием побочных емкостей, которое не могло быть им учтено. — *Прим. переводчика.*

мог устанавливать его и рассматривать, не искажая распространения волн. Я предполагал, что если устройство будет улавливать луч, то мне удастся проследить его на еще больших расстояниях; я убедился, что не ошибся. В пространстве, которым я располагал, мне удавалось наблюдать искры от одного конца до другого. Наибольшее расстояние, на котором я прослеживал луч (при этом приходилось открывать дверь), составляло 16 м.

Согласно результатам опытов с отражением, описываемых ниже, можно быть уверенным, что в открытом пространстве искры могут быть получены при расстояниях до 20 м. Но для дальнейших опытов такие большие расстояния не требуются, а практически удобно, если вторичные искры не слишком слабы. Поэтому для большинства опытов наиболее подходящим расстоянием является 6—10 м.

Теперь мы перейдем к простейшим явлениям, которые легко могут быть получены при помощи луча. Во всех случаях, где не сделана специальная оговорка, фокальные линии обоих зеркал нужно считать расположенными вертикально.

Прямолинейное распространение

Если на прямой, соединяющей зеркала, расположить перпендикулярно направлению луча экран из цинкового листа в 2 м высоты и 1 м ширины, то вторичные искры совершенно исчезают. Столь же полную тень дает ширма из станиоля или золотых листочков. Если ассистент пересекает луч, то вторичный искровой промежуток темнеет, как только ассистент входит в пространство луча, и снова загорается, как только он оттуда выходит. Изоляторы не задерживают луча, он проникает через деревянную стену или деревянную дверь, так что не без удивления можно наблюдать возникновение искр внутри закрытой комнаты.

Если установить две проводящих ширмы в 2 м высотой и 1 м шириной симметрично справа и слева от луча (перпендикулярно его распространению), то они не

оказывают влияния на вторичные искры, если ширина щели, образуемой ими, не меньше, чем отверстие зеркала, т. е. 1.2 м. Если щель сделать уже, то искры ослабевают и гаснут, когда ширина щели делается меньше 0.5 м. Если ширина щели сделана равной 1.2 м, но щель расположена сбоку от прямой, соединяющей зеркала, то искры гаснут. Если вращать оптическую ось излучающего зеркала вправо или влево из первоначального положения примерно на 10° , то вторичные искры ослабевают, при повороте приблизительно 15° они гаснут. Если луч имеет резкие геометрические границы, а тень их не имеет, то должны наблюдаться явления, соответствующие диффракции. Однако мне не удалось наблюдать максимумов и минимумов у края тени.¹

Поляризация

Из самого способа получения луча можно с полной достоверностью заключить, что луч образован поперечными колебаниями и является линейно поляризованным в оптическом смысле. Но мы можем подтвердить это и опытами. Если вращать приемное зеркало вокруг луча, пока его фокальная линия, а с ней и вторичный проводник не расположатся горизонтально, то можно заметить, что вторичные искры все более и более ослабевают, а при перекрещенном положении обеих фокальных линий совершенно исчезают, даже если поместить зеркала очень близко друг к другу. Оба зеркала играют роль поляризатора и анализатора поляризационного аппарата.

Я сделал восьмиугольную рамку в 2 м высоты и 2 м ширины и натянул на ней медные проволоки в 1 мм толщины, все проволоки были параллельны друг другу и располагались через каждые 3 см. Если установить фокальные линии обоих зеркал параллельно и располо-

¹ Конечно, неудача диффракционных опытов Герца объясняется недостаточной чувствительностью его приемника. Но наблюдавшееся им в опытах с длинными волнами несоответствие узла напряжения с поверхностью отражающей проводящей стенки малого размера является одним из доказательств диффрагирования электрических лучей. — *Прим. переводчика.*

жить между ними решетку перпендикулярно лучу, так чтобы направление проволок было перпендикулярно направлению фокальных линий, то наличие решетки не оказывает влияния на вторичные искры. Если же решетка установлена так, что ее проволоки параллельны фокальным линиям, то она полностью задерживает луч. Таким образом, в отношении проходящей энергии решетка ведет себя подобно турмалиновой пластинке, действующей на прямолинейно поляризованный оптический луч.

Если установить фокальную линию принимающего зеркала горизонтально, то, как указывалось, вторичные искры не возникают. При внесении решетки, проволоки которой вертикальны или горизонтальны, искры также отсутствуют. Но если решетка установлена таким образом, что ее проволоки образуют с горизонталью угол в 45° (возможен любой из этих двух углов), то вторичные искры появляются. Очевидно, решетка разлагает приходящее колебание на две компоненты и пропускает лишь ту, которая перпендикулярна направлению ее проволок. Эта компонента образует угол в 45° с фокальной линией второго зеркала и, будучи еще раз им разложена, оказывает влияние на вторичный проводник. Это явление вполне подобно возникновению освещения темного поля двух перекрещенных николей при помещении между ними надлежащим образом ориентированной турмалиновой пластинки.

В отношении поляризации следует сделать еще одно замечание: при помощи средств, которыми мы располагаем в настоящее время, возможно исследовать только электрическую силу. Несомненно, что ее колебания (при вертикальном расположении первичного проводника) происходят в вертикальной плоскости, проходящей через луч, и отсутствуют в горизонтальной. Согласно данным, полученным при изучении медленно меняющихся токов, не может быть никаких сомнений в том, что электрические колебания сопровождаются колебаниями магнитной силы, располагающимися в горизонтальной плоскости, проходящей через луч, и отсутствующими в вертикальной плоскости. Таким образом, поляризация луча состоит не в том, что колебания происходят лишь в вертикаль-

ной плоскости, но скорее в том, что в вертикальной плоскости возникают электрические, а в горизонтальной — магнитные колебания. Поэтому вопрос о том, в какой из плоскостей происходят колебания нашего луча, не может быть решен без указания, о каких колебаниях идет речь: электрических или магнитных. Этим и объясняется безрезультатность старых оптических дискуссий, на что впервые отчетливо указал Колачек.¹

Отражение

Мы уже доказали отражение волн от проводящих поверхностей, наблюдая интерференцию падающей и отраженной волн; кроме того, отражение было использовано при конструкции нашего вогнутого зеркала.

Теперь мы можем обе системы волн отделить друг от друга. Сначала я поставил в большом помещении оба вогнутых зеркала рядом таким образом, что их отверстия были обращены в одну и ту же сторону, а их оси пересекались в точке, удаленной от зеркал приблизительно на 3 м. При этом искровой промежуток в приемном зеркале оставался темным. Далее, я установил плоскую вертикальную стенку из цинкового листа в 2 м высоты и 2 м ширины в точке пересечения осей зеркал, причем она стояла перпендикулярно бисектрисе угла, образованного осями. При этом в приемном зеркале наблюдается интенсивное искрообразование, вызываемое лучом, отраженным от стенки. Искры исчезают при повороте стенки вокруг вертикальной оси примерно на 15° в ту или другую сторону из первоначального положения; это доказывает, что отражение является правильным, а не диффузным. Если удалять стенку от зеркал, сохраняя точку пересечения их осей на поверхности стенки, то искры медленно ослабевают. Мне удавалось обнаружить искры при удалении стенки на 10 м от зеркал, так что волны проходили путь в 20 м. Этот способ с успехом может применяться для сравнения скорости распространения в воздухе с другими (более медленными) скоростями распространения, например в кабеле.

¹ F. Kolaček, Wied. Ann., 34, S. 676, 1888.

Для получения отражения лучей при угле падения, значительно отличающемся от нуля, я направил луч параллельно стене комнаты, в которой имелась двустворчатая дверь. В соседней комнате, в которую веда эта дверь, я установил приемное зеркало таким образом, что его оптическая ось проходила через середину двери и пересекалась с направлением первичного луча под углом в 90° . Если теперь поместить в точке пересечения вертикальную плоскую проводящую стенку, образующую как с лучом, так и с осью приемного зеркала углы в 45° , то во вторичном проводнике возникают искры, не исчезающие даже при закрывании двери. Если отражающую стенку повернуть примерно на 10° из правильного положения, то искры гаснут. Следовательно, отражение является правильным, причем углы падения и отражения равны друг другу. Для доказательства того, что путь распространения возмущения от источника к плоскому зеркалу и оттуда ко вторичному проводнику совпадает с описанным, достаточно поместить в различных точках этого пути экранирующую ширму. При этом вторичные искры всегда исчезают; но при произвольном расположении ширмы в других частях комнаты она не оказывает никакого влияния. При помощи кругового вторичного проводника можно определить расположение волновой плоскости в луче; она оказывается перпендикулярной лучу как перед отражением, так и после него; таким образом, при отражении волновая плоскость поворачивается на 90° .

До сих пор фокальные линии зеркал были вертикальны и, следовательно, плоскость колебаний (электрической силы) была перпендикулярна плоскости падения. Для получения отражения, при котором колебания лежат в плоскости падения, я расположил фокальные линии обоих зеркал горизонтально. При этом наблюдались те же явления, что и раньше, причем различия в интенсивности отраженного луча для обоих случаев обнаружить не удалось. Если же фокальная линия одного из зеркал вертикальна, а другого — горизонтальна, то вторичные искры не наблюдаются. Таким образом, при отражении не происходит изменения наклона плоскости колебаний

относительно плоскости падения, по крайней мере, для двух ее положений, рассмотренных выше. В общем случае это утверждение может оказаться неверным. Именно, остается невыясненным, сохраняет ли луч после отражения прямолинейную поляризацию. Интерференция, возникающая перед зеркалом, где пересекаются обе системы волн, дающая характерные эффекты в круговых проводниках, возможно, позволит решить хорошо известные оптикам вопросы относительно изменений фазы и амплитуды при отражении.

Укажем еще опыт отражения от электрически анизотропных поверхностей. Оба зеркала были установлены, как в первом из опытов с отражением, но против них в качестве отражающей стенки ставилась упомянутая выше решетка из параллельных медных проволок. Оказалось, что вторичные искры погасают, если проволоки пересекают направление колебаний под прямым углом; если же проволоки параллельны направлению колебаний, то искры загораются. Таким образом, аналогия между нашей решеткой и турмалиновой пластинкой сохраняется лишь для проходящей части луча. Непроходящая часть поглощается турмалиновой пластинкой, но отражается нашей решеткой¹. Если в последнем опыте скрестить фокальные линии обоих зеркал, то при отражении от изотропной стенки во вторичном проводнике искры не возникают. Но я убедился, что можно получить искры при отражении от анизотропной проволочной решетки, если установить последнюю так, чтобы ее проволоки образовывали с обеими фокальными линиями угол в 45° . Объяснение этого опыта очевидно из предыдущих рассуждений.

Преломление

Для исследования вопроса о преломлении луча при переходе его из воздуха в другую изолирующую среду я изготовил большую призму из так называемой твердой смолы (асфальтообразная масса, Hartpetch). Сечение призмы представляло равнобедренный треугольник, длина

¹ См. примечание 1 в конце статьи.

сторон которого составляла 1.2 м, а преломляющий угол был близок к 30° . Высота всей призмы, преломляющее ребро которой было вертикально, составляла 1.5 м. Так как призма весила около 1.2 т, а потому ее трудно было перемещать, я изготовил ее из трех положенных друг на друга частей по 0.5 м высотой каждая. Масса наливалась в деревянные ящики; так как они не препятствовали опытам, масса из них не вынималась. Призма устанавливалась на подставке таких размеров, что середина преломляющего ребра оказывалась на одной высоте с первичным и вторичным искровыми промежутками. После того как я убедился, что преломление существует, и примерно оценил его величину, я произвел следующий опыт. Излучающее зеркало было установлено на расстоянии 2.6 м от призмы против одной из ее преломляющих поверхностей таким образом, что средняя линия луча по возможности совпадала с центром тяжести призмы, а преломляющая поверхность составляла с лучом угол в 65° (считая со стороны, противоположной преломляющему ребру). У преломляющего ребра призмы и у противоположной ее поверхности были установлены две проводящие ширмы, исключавшие возможность распространения луча по какому-либо направлению, помимо призмы. Со стороны выходящего луча на полу был описан круг радиусом 2.5 м, центр которого совпадал с центром тяжести призмы. По этому кругу и перемещалось приемное зеркало, причем его отверстие всегда было обращено к центру круга. Если установить зеркало на продолжении направления падающего луча, то искры в нем не получаются; следовательно, в этом направлении призма дает тень. Но искры возникают при перемещении зеркала к основанию призмы, причем начало их возникновения наблюдается при смещении зеркала из вышеуказанного положения на 11° . В дальнейшем интенсивность искр возрастает до угла поворота, равного 22° , а затем снова начинает уменьшаться. Последние, едва заметные искры наблюдаются при угле поворота приблизительно в 34° . Если установить зеркало в направлении, соответствующем наибольшему воздействию, и удалять его от призмы по радиусу круга, то искры могут быть прослежены на рас-

стоянии 5 или 6 м. Ассистент, становящийся перед призмой или сзади ее, вызывает потухание искр; это доказывает, что луч приходит к вторичному проводнику через призму, но не каким-либо другим путем.

В дальнейшем опыт был повторен при неизменном расположении призмы, но при горизонтальном положении фокальных линий обоих зеркал. При этом никаких изменений не наблюдалось. Преломляющему углу в 30° и отклонению в 22° , приблизительно соответствующему минимальному отклонению, отвечает показатель преломления, равный 1.69. Оптический показатель преломления для смодистых тел лежит между 1.5 и 1.6. Неточность наших измерений и недостаточная чистота использованного вещества не позволяют приписать этому расхождению сколько-нибудь существенного значения.¹

Исследованное нами явление мы назвали лучами электрической силы. Пожалуй, их можно было бы назвать световыми лучами с очень большой длиной волны. По крайней мере, мне представляется весьма вероятным, что описанные опыты доказывают идентичность света, тепловых лучей и электродинамического волнового движения. Я думаю, что теперь смело можно использовать все преимущества, которые допущение этой идентичности дает как для оптики, так и для учения об электричестве.

Пояснения к рисункам

Для облегчения повторения и расширения этих опытов я привожу на фиг. 1 и 2 схематические изображения использованных мной аппаратов, не претендуя на их долговечность, но оценивая их лишь с точки зрения удобства воспроизведения описанных выше опытов. На фиг. 1 в разрезе и плане изображено возбуждающее зеркало. Из фигуры очевидно, что основа зеркала состоит из двух горизонтальных рам параболической формы *a*, поддерживаемых четырьмя вертикальными стойками *b*, которые прикреплены к рамам винтами. Отражающий лист зажат между рамами и стойками и прикреплен к

¹ См. примечание 2 в конце статьи.

ним большим количеством винтов. Стойки выходят за пределы листа сверху и снизу, что облегчает переноску зеркала. На фиг. 2, *a* изображено устройство первичного проводника в увеличенном масштабе. Обе металлические части с трением входят в две гильзы из толстой бумаги, окруженные резиновой лентой. В свою очередь эти гильзы укреплены на дощечке при помощи четырех подставок из сургуча, а дощечка прикреплена к рейке, связанной с основными рамами зеркала (фиг. 1). Подводящие провода, заключенные в гуттаперчу, входят в две дырочки, просверленные в шариках первичного проводника. Это устройство обеспечивает необходимую подвижность отдельных частей прибора и может быть в течение нескольких минут разобрано и вновь собрано, что необходимо в связи с потребностью частой полировки шариков искрового промежутка. Там, где подводящие провода проходят через зеркало, в процессе разряда возникает голубоватое свечение. Для устранения его воздействия на искровой промежуток (под влиянием свечения возникновение колебаний затрудняется) применяется ширма *S*, сделанная из гладкой деревянной пластинки.

Наконец, на фиг. 2, *b* изображен вторичный искровой промежуток. Обе части вторичного проводника укреплены на рейке при помощи сургучных подставок и резиновой ленты. От внутренних концов обеих частей идут отводящие провода, заключенные в стеклянные трубки, проходящие через зеркало и приближающиеся друг к другу. На конце верхнего провода находится маленький латунный шарик. К концу нижнего провода припаян кусочек часовой пружины, несущий второй полюс — медное острие. Острие сознательно сделано из более мягкого металла, чем шарик. Без этой предосторожности оно легко вдавливается в шарик, и маленькие искры, возникающие в этом углублении, ускользают от наблюдения. На рисунке видно, каким образом острие перемещается при помощи винта, нажимающего на пружину, но изолированного от нее стеклянной пластинкой. Своеобразный изгиб пружины сделан для того, чтобы достичь незначительных перемещений острия, которые не могли бы быть получены при употреблении одного лишь винта.

Несомненно, описанные аппараты могут быть значительно изменены, причем эти изменения не ухудшат результатов опыта. По дружескому совету я пробовал заменить искровой промежуток во вторичном проводнике чувствительной к току лягушечьей лапкой; однако оказалось, что этот способ, столь чувствительный в других опытах, не пригоден в данном случае.¹

Примечания

1. Кениг (König, Wied. Ann., Bd. 37, S. 651, 1889) указал, что между отражением электрических волн от нашей решетки и отражением монохроматического света от поверхности дихроитического кристалла существует более полная аналогия, чем аналогия, указанная в тексте. Кениг указал также на связь между действием нашей решетки и известными поляризующими свойствами оптических решеток.

2. Лодж и Хувард показали, что можно наблюдать преломление и концентрацию электрических лучей при помощи больших линз (Lodge a. Howard, Phil. Mag., 27, 48, 1889).

3. В настоящее время удалось различными способами осуществить объективное наблюдение описываемых явлений. Риттеру (R. Ritter, Wied. Ann., Bd. 40, S. 53, 1890) удалось использовать лягушечью лапку. Драгумис (Dragoumis, „Nature“, 39, 548, 1890) использовал гейслерову трубку. Больцман (Boltzmann, Wied. Ann., Bd. 40, S. 399, 1890) предложил весьма удобный метод, в котором используется электроскоп с листочком. Клеменчич (Klemenčič, Wied. Ann., Bd. 42, S. 516, 1891) использовал термозлемент. Весьма наглядный и изящный метод предложен Рубенсом и Риттером (H. Rubens u. R. Ritter, Wied. Ann., Bd. 40, S. 55, 1890), которые воспользовались болометром для демонстрации опытов и ряда дальнейших весьма плодотворных исследований.

¹ См. примечание 3 в конце статьи.

О ДЕЙСТВИИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО СВЕТА НА РАЗРЯД ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

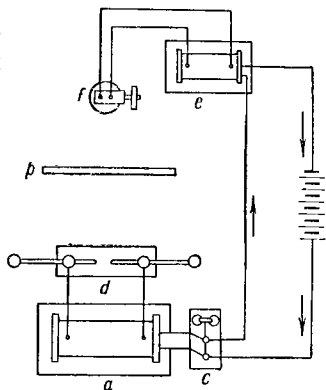
Heinrich Hertz. Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung. Berl. Ber. 9 Juni, 1887. W. A. 37, 983, 1887.

НЕДАВНО я опубликовал ряд опытов, произведенных мной над явлениями резонанса на очень быстрые электрические колебания; при этих опытах, благодаря одному и тому же разряду индукционной катушки, т. е. в одно и то же время, были возбуждаемы две электрические искры. Одна из них, искра *A*, была разрядной искрой индукционной катушки и служила для возбуждения первичных колебаний. Вторая, искра *B*, принадлежала индуктированному вторичному колебанию. Последняя была довольно слабо светящейся; при опытах нужно было точно измерять ее максимальную длину. Однажды, когда для облегчения наблюдения я заключил искру *B* в затемняющую коробку, я заметил, что внутри коробки максимальная длина искры стала весьма заметно меньшей, чем была раньше. При постепенном удалении отдельных частей коробки я нашел, что неблагоприятное действие оказывала только та ее часть, которая закрывала сторону искры *B*, обращенную к *A*. Стенка, помещающаяся с этой стороны, оказывала действие не только в том случае, когда она находилась в непосредственной близости с искрой *B*, но также и тогда, когда она была помещаема на более значительном расстоянии от *B* между искрами *A* и *B*. Это явление заслуживало более подробного изучения. Я сообщаю здесь те факты, которые я мог установить в продолжение исследования.

1. Это явление нельзя отнести к электростатическому или электродинамическому экранированию, ибо действие оказывали не только хорошие проводники,

помещенные между *A* и *B*, но также и тела, совершенно не проводящие, в особенности стекло, парафин, каучук, которые не могут служить экранами в указанном выше смысле. Металлические сетки с большими отверстиями также не оказывали влияния, в то время как для электрического экранирования они являются достаточными.

2. То обстоятельство, что обе искры *A* и *B* соответствовали синхронным, весьма быстрым колебаниям, не имело существенного значения, ибо это явление можно было вызвать также и в том случае, если каким-нибудь другим образом были возбуждены одновременно две искры. Явление это происходило и тогда, когда вместо индуктированной искры я пользовался смежной искрой (обозначение моей прежней статьи).¹ Оно наступало также и тогда, когда я в качестве искры *B* пользовался боковым разрядом (обозначение, употребляемое Рисом), который получается в том случае, если один полюс индукционной катушки соединить с изолированным кондуктором и включить искровой промежуток. Но



Фиг. 1

удобнее и нагляднее всего можно вызвать это явление, включая в одну и ту же цепь тока две индукционные катушки с общим прерывателем, из которых одна дает искру *A*, другая искру *B*. При дальнейших опытах я пользовался почти исключительно этим расположением приборов. Так как мне удалось опыты с целым рядом различных индукционных катушек, то, следовательно, эти опыты возможны с любой парой таких аппаратов. Все-таки мне кажется целесообразным точное описание того расположения приборов при опыте, которое дало мне лучшие резуль-

¹ См. статью „О весьма быстрых электрических колебаниях“, стр. 45 и сл. *Примечание переводчика.*

таты и которым я больше всего пользовался. Искру *A* давала большая индукционная катушка Румкорфа *a* (фиг. 1), длиной в 52 см и диаметром в 20 см, приводимая в действие шестью большими элементами Бунзена *b* и снабженная особым ртутным прерывателем *c*. Между острием и пластинкой катушка эта могла давать искры до 10 см длиной, между двумя шариками — искры приблизительно до 3 см длиной. Большею частью я пользовался искрой длиной в 1 см между остриями обыкновенного разрядника *d*. Искру *B* давала небольшая индукционная катушка *e*, предназначенная первоначально для медицинских целей; сила тока этой катушки была сравнительно большая, но максимальное расстояние, пробиваемое искрой, равнялось лишь 0.5 — 1 см. Так как она была включена в цепь большой индукционной катушки, то ее конденсатор не оказывал своего действия, и поэтому получались искры длиной всего лишь в 1—2 мм. Я пользовался искрами приблизительно в 1 мм между никелированными шариками искрового микрометра Риса *f* или между латунными шариками, диаметром 5—10 мм. Если при таком выборе приборов расположить оба искровых промежутка параллельно друг другу на не слишком большом расстоянии, привести в действие прерыватель и раздвинуть искровой микрометр настолько, чтобы искры могли еще проскакать в нем равномерно, то эти искры потухнут сейчас же и совершенно, если между обоими искровыми промежутками *d* и *f* поставить пластину *P* из металла, стекла и т. п. Искры опять сейчас же появятся, если пластина будет удалена.

3. Явление становится все более отчетливым, если искру *B* будем приближать к искре *A*. Расстояние между обеими искрами, при котором я в первый раз заметил это явление, равнялось 1.5 м, и следовательно, при таком расстоянии действие может быть еще достаточно заметным. По некоторым признакам я замечал наличие этого действия при расстоянии между искрами до 3 м. Однако при таких расстояниях явление обнаруживается только в большей или меньшей равномерности потока искр *B*; при расстояниях меньше 1 м интенсивность явления может быть измерена разностью между максимальной

длиной до и после помещения пластины. Для того чтобы можно было составить представление о величине действия, я привожу ниже следующие, — конечно, приближительные, — результаты наблюдений.

Таблица 1

Расстоя- ние меж- ду искра- ми, см	Длина искры <i>B</i> , мм до помещения пластины	после	Разность
∞	0.8	0.8	0
50	0.9	0.8	0.1
40	1.0	0.8	0.2
30	1.1	0.8	0.3
20	1.3	0.8	0.5
10	1.5	0.8	0.7
5	1.6	0.8	0.8
2	1.8	0.8	1.0

Как мы видим, расстояние, пробиваемое искрой, может иногда увеличиться вдвое при удалении экрана.

4. Приведенными данными можно воспользоваться для доказательства следующего положения, которое, конечно, можно было предугадать заранее: это явление заключается не в том, что экран мешает появлению искры *B*, а в том, что он уничтожает действие искры *A*, вследствие которого увеличивается пробиваемое искрой расстояние. Если при большом расстоянии между искрами *A* и *B* мы установим искровой микрометр так, что искра *B* уже не сможет более проскакивать, и приблизим затем искровой микрометр к искре *A*, то искра *B* опять появится — это будет действием; если мы теперь поместим экран, то искра опять исчезнет — это будет уничтожением действия. Поэтому экран является лишь средством для того, чтобы легко и отчетливо обнаружить действие искры *A*. В дальнейшем искру *A* я буду называть активной искрой, а искру *B* — пассивной.

5. Действие активной искры не зависит от ее особой формы. Действие проявляли искры между шариками и между остриями. Короткие, прямые искры обнаруживали влияние точно так же, как и длинные, зазубренные. Не

было никакого существенного различия между слабо светящимися голубоватыми искрами и яркими искрами блестящего, белого цвета. Даже искры длиной в 2 мм проявляли влияние на большом расстоянии. Далее, действие исходит не из какой-нибудь определенной части искры; в нем участвует каждая ее часть. Это утверждение можно доказать, если заключить искровой промежуток в стеклянную трубку. Стекло не пропускает действия и, следовательно, искра при таком устройстве является не действующей. Но как только мы откроем небольшую часть искры на одном из полюсов или в середине, действие тотчас проявится. Я не заметил, чтобы металл электродов искры оказывал влияние. То обстоятельство, что при нашем расположении приборов активная искра параллельна пассивной, не является существенным.

6. Наоборот, восприимчивость пассивных искр в отношении действия зависит в значительной степени от их формы. Я совершенно не заметил восприимчивости при длинных, зазубренных искрах между остриями; при коротких искрах между остриями небольшая восприимчивость замечалась. Лучше всего действие проявлялось при искрах между шариками, и здесь оно наблюдалось отчетливее всего опять-таки при коротких искрах. Выгоднее всего для опытов пользоваться искрой длиной в 1 мм, между шариками, диаметром в 5—10 мм. Однако я отчетливо заметил, что воздействие имело место и на искру длиной в 2 см. Быть может, абсолютное удлинение, испытываемое такими искрами, будет даже так же велико, как и абсолютное удлинение коротких искр, но, во всяком случае, их относительное удлинение гораздо меньше, и поэтому явление растворяется в тех различиях действия индукционной катушки, которые имеют место при отдельных ее разрядах. Я не нашел, чтобы материал электродов оказывал заметное влияние. Я исследовал искры между электродами из меди, латуни, железа, алюминия, олова, цинка, свинца. Пожалуй, железо немного предпочтительнее остальных металлов в отношении чувствительности искры. Электроды должны быть чистыми и гладкими; если они нечисты или разъедены

вследствие долгого употребления, то действие не будет проявляться.

7. Между обеими искрами имеет место взаимодействие. Это означает, что не только большая и более интенсивная искра увеличивает расстояние, пробиваемое меньшей искрой, но и, наоборот, меньшая искра увеличивает расстояние, пробиваемое большей. А именно, если при том расположении опыта, какое было до сих пор, мы установим искровой микрометр таким образом, что разряд в нем будет проскакивать наверное, а разрядник установим на такое расстояние, что искры от большой индукционной катушки не будут проскакивать, то мы найдем, что разряды этой катушки могут быть вновь вызваны приближением искрового микрометра, а введение экрана уничтожает это действие снова. Само собою разумеется, искра большой индукционной катушки должна быть восприимчивой; кроме того, воздействие при этом не будет таким отчетливым, как раньше, сообразно с меньшей чувствительностью длинных искр. Если обе индукционные катушки работают на наибольшие искры, то появляются осложнения, которые, повидимому, не имеют никакого отношения к настоящему вопросу.¹

Часто приходится наблюдать возникновение длинных искр благодаря другим, гораздо более коротким искрам, и некоторые из этих явлений, несомненно, можно отнести к исследуемому здесь действию. Если мы вызовем разряды индукционной катушки между шариками и раздвинем эти шарики настолько, что искры перестанут проскакивать, то искровой поток опять появится, если к одному из полюсных шариков мы приблизим изолированный проводник и при помощи последнего вызовем небольшие боковые искры. Я убедился в том, что при этом боковой разряд, несомненно, играет роль активной искры в смысле настоящего исследования. Достаточно также прикоснуться к одному из полюсных шариков непроводником или приблизить острие, чтобы вызвать такое же действие. Является по меньшей мере возможным, что едва видимый боковой разряд по по-

¹ См. примечание 1 в конце статьи.

верхности непроводника или из острия выполняет роль активной искры.

8. Действие активной искры распространяется во все стороны прямолинейно, образуя лучи, в точности по законам распространения света. Установим продольную ось обеих рассматриваемых искр перпендикулярно к горизонту и будем медленно сбоку вдвигать между искрами экран с вертикальным ребром. Мы найдем, что действие активной искры будет уничтожено не постепенно, а сразу, при определенном положении экрана. Если теперь с места пассивной искры мы будем визировать вдоль края пластины, то найдем, что активная искра как раз закрыта пластиной. Если мы поместим между обеими искрами пластину с вертикальным краем и будем медленно отодвигать ее в сторону, то действие проявится при вполне определенном положении, и мы найдем, что активная искра стала теперь видной с места пассивной искры, как раз рядом с вертикальным краем. Если мы поместим между искрами пластину с узким вертикальным отверстием и будем двигать ее в одну и другую стороны, то найдем, что действие пройдет насквозь лишь при вполне определенном положении, а именно тогда, когда активная искра будет видна через отверстие с места пассивной искры. Если мы станем вдвигать несколько пластинок с такими отверстиями одну за другой, то найдем, что при определенном положении действие пройдет через все пластины одну за другой. Если мы постараемся определить эти положения, то найдем — проще всего, конечно, при помощи визирования, — что все щели лежат в вертикальной плоскости, проходящей через обе искры. Если перед активной искрой поместить на некотором расстоянии небольшую пластину с отверстием любого очертания и при помощи передвигания пассивной искры в ту и другую стороны определить сзади пластины границы в пространстве, до которых проявляется действие, то границей окажется коническая поверхность, определяемая местом активной искры как вершиной и отверстием пластины. Если перед активной искрой мы установим на некотором расстоянии небольшую пластину, то при передвигании пас-

сивной искры в ту и другую стороны мы найдем, что пластина уничтожит действие активной искры как раз в том же пространстве, которое она экранирует от света искры. Почти само собой понятно, что действие отсутствует не только в тени, падающей от других тел, но также и в собственной тени полюсных шариков пассивной искры. В самом деле, если мы повернем последнюю таким образом, что ее продольное направление хотя и будет находиться в одной плоскости с осью активной искры, но перейдет из параллельного положения в перпендикулярное, то действие не будет проявляться.

9. Большинство, но не все твердые тела задерживают действие активной искры; некоторые оказываются проницаемыми для этого действия. Непроницаемы все металлы, исследованные мной, даже и в тонких листах, далее, парафин, сургуч, шеллак, смола, эбонит, каучук, всякого рода стекла, крашенные и некрашенные, полированные и неполированные, толстые и тонкие, фарфор, фаянс, дерево, картон, бумага, слоновая кость, рог, кожа животных, перья, наконец, агат и, замечательнее всего, — слюда, даже в очень тонких листках. Но при дальнейшем исследовании кристаллов наблюдалось отклонение от этого свойства. Правда, некоторые из них оказывались также непроницаемыми, например медный купорос, топаз, аметист; зато другие пропускали действие, хотя и ослабленное, например кристаллизованный сахар, квасцы, полевой шпат, каменная соль, и, наконец, некоторые кристаллы явились почти вполне проницаемыми, например гипс (*Marienglas*) и, главным образом, горный хрусталь, который не задерживал действия даже при толщине в несколько сантиметров. Опыты удобнее всего производить следующим образом. Пассивную искру устанавливают на расстоянии нескольких сантиметров от активной и доводят ее до максимальной длины. Затем вдвигают исследуемое тело. Если благодаря этому поток искр не будет прерван, то тело весьма проницаемо — в сильной степени. Если же искры прервутся, то длину искрового промежутка уменьшают до тех пор, пока искры не появятся снова. Затем, кроме исследуемого тела, вставляют еще непроницаемую пластину. Если

пластина прервет или ослабит искровой поток, то тело было, по крайней мере, несколько проницаемым, если же пластина не окажет более влияния, то тело было совершенно непроницаемым. Вместе с толщиной помещаемых тел усиливается их влияние, и это последнее может быть по справедливости определяемо как поглощение действия активной искры; однако и частично поглощающие тела оказывают влияние большей частью лишь в весьма тонких слоях.

10. Жидкости также оказываются частью проницаемыми, частью непроницаемыми для действия. Активная искра располагалась для опытов приблизительно на расстоянии в 10 см над пассивной по вертикали, и между обеими искрами помещался плоский сосуд с плоским дном из круглой кварцевой пластины толщиной 4 мм. В этот сосуд наливалась жидкость более или менее толстым слоем и затем определялось ее влияние точно так же, как и при твердых телах. Необычайно проницаемой оказалась вода, которая даже при слое глубиною в 5 см почти не ослабляла действия. В тонких слоях проницаемыми оказались также и концентрированная чистая серная кислота, винный спирт, эфир. В некоторой степени проницаемыми оказались чистая соляная кислота, чистая азотная кислота, нашатырный спирт. Почти совершенно непроницаемыми были расплавленный парафин, бензол, керосин, сероуглерод, раствор сернистого аммония, а также сильно окрашенные жидкости, как, например, раствор фуксина, раствор марганцево-кислого калия и т. д. Интерес представляли и опыты с растворами солей. В сосуд из горного хрусталя наливалась вода слоем в 1 см, в нее подливался по каплям концентрированный раствор соли, все перемешивалось, и наблюдалось действие. Для многих солей достаточно было прибавить несколько, даже одну каплю раствора, чтобы потушить пассивную искру. Это имело место, например, при азотно-кислой ртути, серноватисто-кислом натрия, бромистом калии, иодистом калии. При прибавлении медных и железных солей пассивная искра потухала прежде чем окрашивание воды становилось ясно заметным. Растворы нашатыря, цинкового купороса, по-

варенной соли¹ оказывали действие, будучи взяты в несколько большем количестве. Но, с другой стороны, сернокислый калий, натрий и магний были еще достаточно проницаемыми даже в концентрированном растворе.

11. Уже из того, что опыты производились в воздухе, ясно, что некоторые газы проницаемы для действия даже и в толстом слое. Но некоторые газы также в высшей степени непроницаемы для действия. Для опытов была помещена между активной и пассивной искрами стеклянная трубка длиной в 20 см и диаметром в 2.5 см, закрытая с обеих сторон тонкими кварцевыми пластинами; при помощи двух боковых отростков в эту трубку можно было ввести любой газ. Благодаря помещенной на пути диафрагме действие могло проходить только через стеклянную трубку. Водород не отличался заметно от воздуха. Действие почти не задерживалось также и при наполнении трубки углекислым газом. Когда же был введен светильный газ, то поток пассивных искр сейчас же прекратился. Когда светильный газ был вытеснен воздухом, искры опять начали проскакивать, и этот опыт можно было повторять каждый раз с одинаковым успехом. Неблагоприятно для действия отзывалось даже введение воздуха, смешанного с небольшим количеством светильного газа. Поэтому для уничтожения действия достаточно было прохождения через светильный газ даже на гораздо меньшем протяжении. Если предоставить светильному газу свободно выходить в воздух струей с диаметром в 1 см, то со стороны, противоположной активной искре, можно очень отчетливо заметить ее тень, т. е. более или менее полное уничтожение действия активной искры. Бурные пары азотистой кислоты поглощают так же сильно, как и светильный газ. И в этом случае для доказательства не требуется трубка с кварцевыми пластинами. Наоборот, хлор, пары брома и иода, хотя и задерживают действие, но далеко не в отношении их непрозрачности. Когда в трубку было введено такое

¹ По моим опытам, концентрированный раствор поваренной соли поглощает сильнее, чем кристаллическая каменная соль. Этот результат является слишком необычным, чтобы не нуждаться в подтверждении.

количество паров брома, что трубка стала заметно окрашенной, то поглощение еще не замечалось; когда пары брома были настолько сгущены, что активная искра едва была видна через трубку и казалась темнокрасной, то все же часть действия проходила насквозь.

12. При разрежении воздуха около пассивной искры интенсивность действия увеличивается, по крайней мере, до известного предела разреженности. При этом предполагается, что действие измеряется разностью между длинами экранированной и неэкранированной искр. При опытах пассивная искра получалась под колоколом воздушного насоса между двумя передвижными электродами, проходящими сквозь стенку колокола. Активная искра действовала снаружи через окно из горного хрусталя, вставленное в воздушный колокол. При таких условиях наблюдалась максимальная длина искры при одной и той же силе тока, но при различной упругости воздуха, сначала при открытом окне, а затем при закрытом. Следующие данные иллюстрируют ход опыта

Упругость воздуха в мм Hg	Длина пассивной искры в мм		Разность
	при закры- том окне	при откры- том окне	
760	0.8	1.5	0.7
500	0.9	2.3	1.4
300	1.0	2.7	2.7
100	2.0	6.2	4.2
80	сч. большая	сч. большая	неопреде- ленная

Как мы видим, с уменьшением упругости длина защищенной искры увеличивалась лишь весьма медленно, а незащищенной — быстрее, разность между ними возрастала. При некотором давлении голубоватое свечение распространялось по большей части поверхности катода, расстояние, пробиваемое искрой, делалось очень большим, разряд принимал другой характер, и уже не наблюдалось более влияние активной искры.

13. Явление имеет место и в том случае, когда искры возникают не в воздухе, а в каком-нибудь другом газе; оно наблюдается также и в том случае, когда обе

искры образуются в двух различных газах. При опытах обе искры получались в двух отдельных небольших трубчатых стеклянных сосудах, которые были закрыты пластинами из горного хрусталя и могли быть наполнены любым газом. Эти опыты были произведены главным образом в виду основанного на некоторых наблюдениях предположения, что искра в определенном газе действует на другую искру лишь в том случае, если последняя образуется в том же газе; поэтому были произведены исследования с четырьмя газами: водородом, воздухом, углекислым и светильным газами в шестнадцати различных комбинациях. Главным результатом этих исследований было то, что упомянутое предположение было признано ошибочным. Скорее можно утверждать следующее: примененные, в качестве активных, искры в различных газах заметно разнятся в производимом ими действии; если же пользоваться искрами как пассивными, то, наоборот, они показывают значительное различие в восприимчивости. Искры в водороде, при одинаковых прочих условиях, испытывали заметно большее удлинение, чем искры в воздухе; последние испытывали в свою очередь почти вдвое большее удлинение, чем искры в углекислом газе и светильном. При этом совсем не принималось в расчет влияние поглощения, так как при постановке этих опытов действие это не было еще известно; только при светильном газе оно могло иметь заметное влияние.

14. Не все части пассивной искры принимают одинаковое участие в действии; действие проявляется близ электродов, главным образом вблизи отрицательного.¹

Это можно показать, пользуясь пассивной искрой длиной в 1—2 см так, что различные части можно затенять отдельно. Затенение анода оказывает меньшее влияние, затенение катода уничтожает большую часть действия. Вследствие неотчетливости явления при длинных искрах констатировать вышесказанное несколько затруднительно. В случае коротких искр, при которых затенение отдельных частей невозможно, утверждение можно иллюстрировать следующим образом. Пассивную

¹ См. примечание 2 в конце статьи.

искру устанавливают параллельно активной, затем поворачивают ее вправо и влево из параллельного положения в перпендикулярное до тех пор, пока действие не будет уничтожено. Мы найдем при этом, что в одном направлении вращение должно быть сделано на больший угол, чем в другом, и что именно то направление вращения будет в более благоприятных условиях, при котором катод обращен к активной искре, и менее благоприятным то вращение, при котором катод обращен в противоположную сторону. Я не мог решить с достоверностью, имеет ли место воздействие исключительно на катод или только главным образом на него.

15. Действие активной искры отражается от большинства поверхностей. Отражение от полированной поверхности происходит по законам правильного отражения света. При более грубых опытах активная искра помещалась перед отверстием стеклянной трубки длиной в 50 см и шириной в 1 см, открытой с обеих сторон; трубка была вставлена в большой картонный лист, так что действие могло пройти только через трубку.

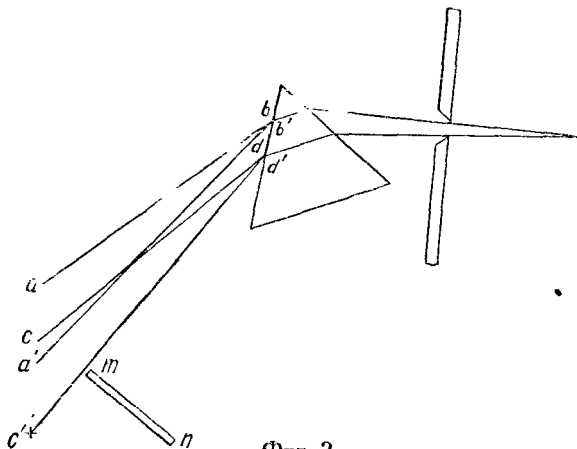
Если теперь позади другого отверстия трубки двигать пассивную искру в ту и другую стороны, то влияние на нее обнаруживается лишь в тех местах, которые служат продолжением полости трубки; но здесь обнаруживается гораздо более сильное влияние, чем если бы трубка была удалена и оставлена одна диафрагма. Это последнее явление и послужило поводом к тому, что я воспользовался трубкой; оно уже само доказывает существование отражения от стенок трубки. Затем искровой микрометр был установлен в стороне от луча, исходящего из трубки, таким образом, что длина искры была параллельна направлению луча. Если теперь едва раздвинуть шарики, чтобы не позволить проскакивать искрам в микрометре, то они опять появятся, когда в лучах, под углом в 45° к их направлению, будем держать плоскую поверхность таким образом, чтобы она отражала лучи на пассивную искру по обыкновенному закону отражения. Отражение имело место в большей или меньшей степени в случае стекла,

кристаллов, металлов, даже и тогда, когда эти тела не были особенно гладкими, а также и при таких телах, как фарфор, полированное дерево, белая бумага. Со стеклянной пластиной, густо покрытой сажой, я не наблюдал отражения.

При более точных опытах активная искра располагалась так, что образовывала вертикальную прямую линию: на небольшом расстоянии от нее была помещена довольно большая пластинка с вертикальной щелью, за которой помещались полированные плоские зеркала из различных металлов, стекла и из горного хрусталя. Перемещением пассивной искры были определены границы того пространства за отверстием, в котором проявлялось действие. Эти границы были очень резки и всегда совпадали с пределами того пространства, в котором было видно изображение искры в зеркале. С неполированными телами эти опыты нельзя было производить вследствие слабого действия; нужно допустить, что при таких телах происходит диффузное отражение.

16. При переходе действия активной искры из воздуха в твердую проницаемую среду происходит явление, аналогичное преломлению света, только более сильное, чем преломление видимого света. Для более грубых опытов служила опять та же самая стеклянная трубка, которая применялась в опытах с отражением. Пассивная искра помещалась в лучах, исходящих из трубки, на расстоянии приблизительно 30 см от отверстия, более удаленного от активной искры; затем сбоку к самому отверстию приближалась кварцевая призма преломляющим ребром вперед; несмотря на проницаемость кварца, действие на пассивную искру пропадало, как только призма закрывала отверстие трубки. Если же после этого передвигать искру по кругу вокруг призмы в ту сторону, в которую призма отклоняла световой луч, то скоро можно найти такие места, где влияние опять обнаруживалось. Если же поместить пассивную искру в том месте, где влияние оказывалось наиболее сильным и визировать с этого места через призму к трубе, то нельзя увидеть пространства внутри трубки и активной искры в ее конце; для того чтобы можно было

увидеть активную искру через трубу, нужно было передвинуть глаз на довольно заметное расстояние к первоначальному положению искры. Это явление наблюдалось также и при применении призмы из каменной соли. При более точных опытах активная искра снова была поставлена вертикально, и на некотором расстоянии от нее было помещено вертикальное отверстие, за которым находилась призма. Когда активная искра сделалась светящейся, благодаря включению лейденской банки, то легко можно было определить пространство

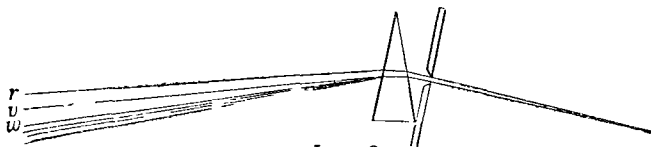


Фиг. 2

за призмой, заполненное светом. При помощи пассивной искры можно было ограничить пространство, заполненное рассматриваемым действием. Фигура 2 изображает результат, полученный непосредственно при помощи опыта, в горизонтальной проекции, в $1/2$ натуральной величины. Пространство $a b c d$ заполнено светом, пространство $a' b' c' d'$ — рассматриваемым нами действием. Так как пределы последнего пространства не были в данном случае резко разграниченными, то лучи $a' b'$ и $c' d'$ я определил следующим образом. Пассивная искра была помещена в отдаленной точке, например c' , на границе области, находящейся под действием. Затем

сбоку продвигался экран mn с вертикальным краем и настолько, чтобы он только что уничтожал действие.

Точка m его края являлась точкой луча $c'd'$. При других опытах применялась призма с небольшим преломляющим углом; расстояние искры от отверстия было взято настолько большим и ширина отверстия — настолько малой, насколько это было совместимо с возможностью наблюдать действие. Видимый свет был разложен в узкий спектр, и действие активной искры проявлялось в не особенно большом пространстве; оно было отклонено сильнее, чем видимый фиолетовый свет. Фигура 3 изображает эти отношения, вычерченные прямо на подставке для призмы; r означает направление красного



Фиг. 3

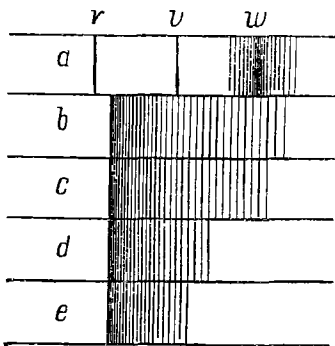
луча, v — фиолетового, w — то направление, в котором действие активной искры проявляется наиболее сильно.

Я не мог установить, происходит ли двойное преломление действия. При помощи моих кварцевых призм я не имел возможности разделить лучи в достаточной степени, имевшиеся в моем распоряжении куски известкового шпата оказались слишком непроницаемыми.¹

17. На основании сведений, сообщенных выше, нельзя отрицать, пока не будет доказано противоположное, что свет активной искры должен быть принимаем за ближайшую причину исходящего от нее действия. Всякое другое предположение, опирающееся на то, что известно, опровергается тем или другим опытом. Но если наблюдаемое явление есть вообще действие света, то все-таки, на основании результатов явлений преломления, его надо считать исключительно действием ультрафиолетового света. Что оно не является действием какого-нибудь рода видимых лучей, доказывается тем, что стекло и слюда

¹ См. примечание 3 в конце статьи.

непроницаемы для него, а для видимых лучей прозрачны. Но что, с другой стороны, действие производится ультрафиолетовым светом, это становится само по себе вероятным благодаря явлениям поглощения. Вода, горный хрусталь, сернистые соединения легких металлов в особой степени проницаемы для ультрафиолетового света и для исследуемого здесь действия; бензол и сродные с ним тела особенно непрозрачны для обоих. Впрочем, лучи, действующие при наших опытах, находятся, по-



Фиг. 4

видимому, на самом краю исследованного до настоящего времени (1887 г., переводчик) спектра.

По крайней мере, спектр искры, снятый на покупной чувствительной сухой пластинке, едва доходил до того места, в котором пассивная искра испытывала наибольшее действие. Наконец, фотографии почти не различались, прошел ли свет через светильный газ или нет, в то время как различие в действии на искру было очень велико. Фигура 4 показывает

протяжение нескольких снятых спектров. В ряду *a* место видимого красного луча обозначено через *r*, *v* означает место видимого фиолетового луча, *w* — место наиболее сильного действия на пассивную искру. В остальных рядах изображены ширина и положение фотографических отпечатков, *b* — при прохождении света только через воздух и кварц, *c* — при прохождении через светильный газ, *d* — через тонкую пластину из слюды, *e* — при прохождении через стекло.

18. Наше предположение, что рассматриваемое действие нужно приписать свету, подтверждается тем наблюдением, что такое же действие может быть вызвано целым рядом обыкновенных источников света. Конечно, сила света в обыкновенном смысле этого слова никоим образом не является масштабом действия, и для наших

опытов слабо видимая искра индуктория остается одним из наиболее действующих источников света. Если мы произведем искры между шариками от какой-либо индукционной катушки, раздвинем шарики настолько, чтобы искра только перестала проскакивать, и приблизим затем пламя свечи на расстояние приблизительно 8 см, то искры появятся опять. Сначала может показаться, что действие объясняется горячим воздухом пламени, но когда мы заметим, что небольшой и тонкий лист слюды, помещенный между ними, прекращает действие, а что большая кварцевая пластина не уничтожает действия, то мы опять узнаем рассматриваемое здесь действие. Подобно свечке действует всякое сродное с ней пламя газа, дерева, бензина и т. д. Действие проявляют также и несветящееся пламя винного спирта, горелки Бунзена, и при пламени свечи действие исходит, повидимому, более от нижней, несветящейся части, чем от верхней, светящейся. От небольшого водородного пламени действия почти нельзя получить. Также не проявляет действия свет платины, накаленной добела в пламени или при помощи гальванического тока, сильное пламя фосфора, горящего в непосредственной близости к искре, горящие натрий и калий. Горящая сера также не оказывала никакого влияния, но это объясняется, конечно, небольшой интенсивностью ее пламени, так как пламя сероуглерода оказывало некоторое действие. Гораздо более сильное действие, чем все названные источники света, оказывал свет магния, влияние которого обнаруживалось на расстоянии 1 м. Друммондов свет оказался несколько слабее и действовал на расстоянии, не большем 0,5 м; он был получен при помощи газо-кислородной горелки; однако действие его должно быть отнесено главным образом к газовому пламени, так как не представляло большого различия, был ли внесен в пламя известковый цилиндр или нет. От солнечного света я всегда получал сомнительное действие, в какое бы время дня и года мне ни случалось его испытывать. Когда солнечные лучи при помощи кварцевой чечевицы я собирал на искру, небольшое действие имело место, но это действие можно было получать также и при по-

мощи чечевицы из стекла, и поэтому его нужно было приписать нагреванию. Но из всех источников света наиболее действующим является вольтова дуга, и только ее можно поставить на ряду с искрой. Если раздвинуть полюсные шарики индукционной катушки настолько, чтобы искра только не проскакивала, и зажечь вольтову дугу на расстоянии 1, 2, 3 и даже 4 м, то одновременно с ней возникают искры, которые опять исчезают, когда вольтова дуга будет потушена. При помощи узкой диафрагмы, помещенной перед вольтовой дугой, можно отделить фиолетовый свет самой дуги, светящейся слабо, от фиолетового света накаленного добела угля; мы найдем при этом, что действие исходит главным образом от первого. Со светом вольтовой дуги я повторил большую часть вышеописанных опытов, как, например, опыты с прямолинейным распространением, с отражением, преломлением действия, а также и с поглощением действия стеклом, слюдой, светильным газом и другими телами.

Согласно результатам наших опытов, ультрафиолетовый свет обладает способностью увеличивать длину искры от разрядов индукционной катушки и сродных разрядов. Условия, при которых он проявляет свое действие на эти разряды, конечно, довольно сложны, и поэтому является желательным изучение действия также и при более простых условиях, в особенности без индукционной катушки. Стараясь достичь успеха в этом отношении, я встретил затруднения.¹ Поэтому в настоящее время я ограничиваюсь тем, что сообщаю установленные мною факты, не создавая никакой теории о том, каким образом возникают наблюдаемые явления.

Примечания, сделанные Г. Герцем в 1891 г.

1. Говоря об усложнениях и о зжигании длинных искр другими, гораздо более короткими искрами, я подразумевал следующие явления. Если включить первичные катушки двух индукционных приборов в одну и ту же цепь и установить их искровые промежутки таким образом, чтобы их действие было на пределе, то каждая причина, вызывающая одну искру, вызовет одновременно

¹ См. примечание 4 в конце статьи.

также и другую, совершенно независимо от действия света искр одной на другую, которое легко можно исключить. Или будут проскакивать обе искры или ни одна из них. Если пустить затем в быстрый ход электрофорную машину Теплер-Гольца с диаметром диска в 40 см, так что она будет давать максимальную длину искры в 15 см, и раздвинуть после этого полюсные шарики на 20—25 см, чтобы искры исчезли совершенно, то можно будет затем снова регулярно пслучать длинную трещащую искру каждый раз, когда из отрицательного кобдуктора будет извлечена небольшая искра при помощи сустава или шарика лейденской банки. Можно также соединить стрижательный полюс с длинной системой проводов и извлекать из последней искры — успех будет тот же самый. Действующая искра может быть совершенно короткой и слабой. Если извлечь ее при помощи шарика лейденской банки, то банка окажется лишь слабо заряженной. Нельзя достигнуть такого же действия, извлекая искры из положительного полюса. Это явление, конечно, должно было быть часто наблюдаемо; в литературе я не нашел указания о нем.

Я не в состоянии объяснить эти явления; очевидно, они одинакового происхождения с явлениями, описанными Г. Яумансом в его сочинении: „Влияние быстрых изменений потенциала на явление разряда“, G. Jumann, Sitzungsberichte d. Akad. d. Wissensch. zu Wien, 97, Abth. IIa, Juli, 1888.

Яуманс сводит эти явления к положению, что „не только форма, состояние и разность потенциалов разрядного поля“, но также и „характер изменения разности потенциалов, а именно вероятно, скорость изменения является существенным условием разряда“. Нужно надеяться, что эти явления будут еще более выяснены.

2. Е. Видеман и Г. Эберт доказали вскоре после этого, что только отрицательный полюс и исключительно его поверхность подвергается действию света. E. Wiedemann u. H. Ebert. Wied. Ann., 33, 241, 1888.

3. Несколько позже мне это все-таки удалось. Я предполагал, что состояние поляризации света влияет на действие, однако я не мог установить этого на опыте.

4. Этим я не хотел сказать, что мне не удалось наблюдать действие света на иные разряды, кроме разрядов индуктория, а только то, что мне не удалось найти условий, при которых явление искрового разряда, так мало разъясненное, было бы изменено более простым явлением. Это удалось впервые Хальваксу (Hallwachs, Wied. Ann., 33, 301, 1888). Самое простое действие, которого я достиг, было то, что действием света я заставлял разряд от батареи из 1000 маленьких аккумуляторов Планте происходить между латунными шариками на свободном воздухе при таком расстоянии шариков, которое разряд не мог преодолеть без помощи света.

Редактор издательства *З. Н. Перля*
Техн. редактор *В. М. Юрова*
Корректор *А. С. Шамбан*

Сдано в набор 27/ХІІ 1938 г.
Подписано к печати 14 января 1939 г.
Формат 82×110^{1/32} Объем 9^{3/4} п. л.
и 1 вкл. В 1 п. л. 32000 печ. зн. Уч.
авт. л. 7,94. Тираж 3 000 экз. Уполн.
Главлита А-712. Рйсо № 943. АНИ
№1299. Заказ № 5906

Цена 3 р. 50 к., перепл. 2 р. 50 к.

1-я Образцовая типография Огиза
РСФСР треста „Полиграфкнига“.
Москва, Валовая, 28.

ОПЕЧАТКИ

<i>Стр.</i>	<i>Строка</i>	<i>Напечатано</i>	<i>Должно быть</i>	<i>По чьей вине сделаны опечатки</i>
22	11	$4\gamma^2 T^2$	$4\gamma^2 \lambda^2$	автора
27	18	$2\gamma T$	$2\gamma T c^{-2}$	автора

50 лет волн Герца