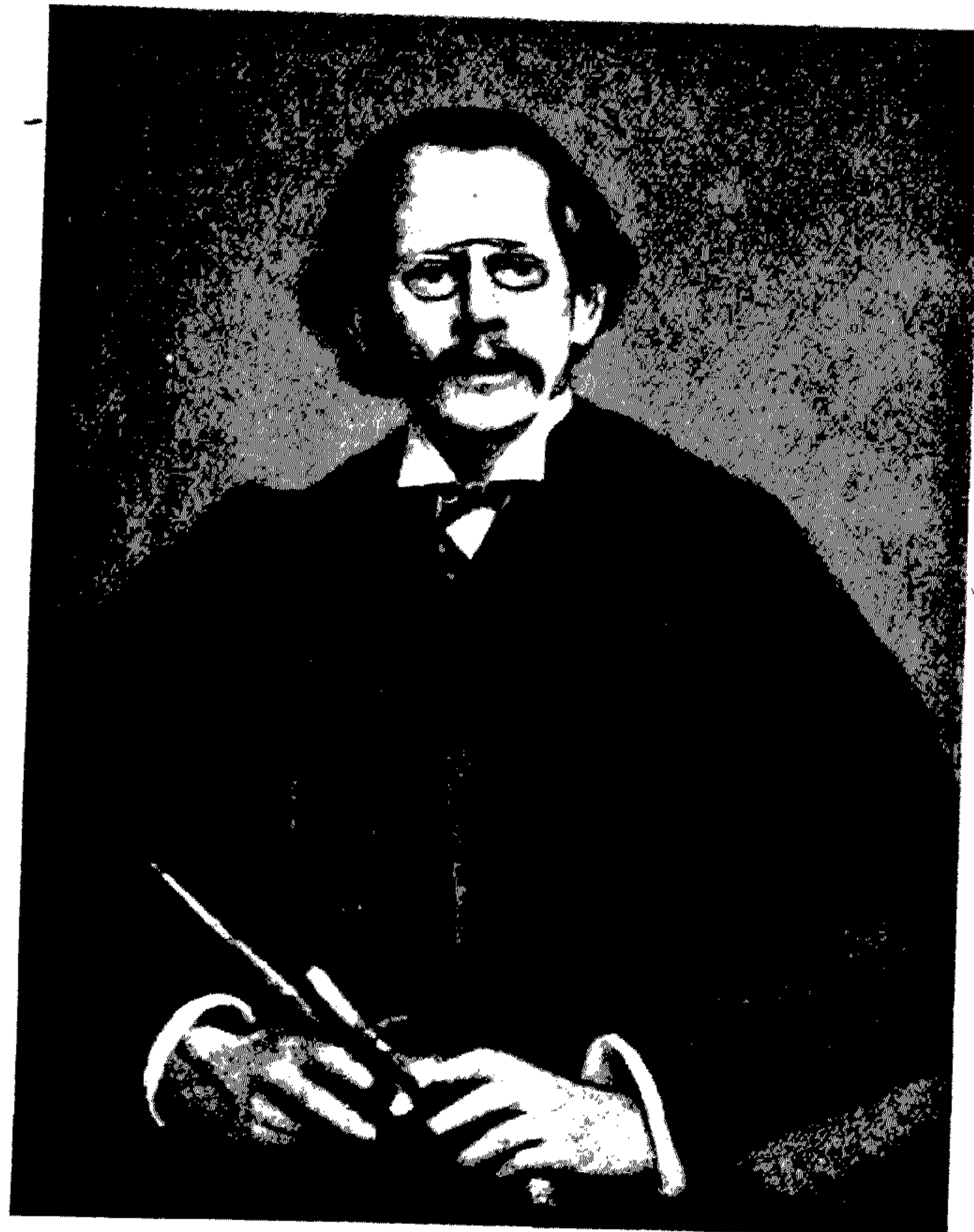


ДЖ. ДЖ. ТОМСОН

# ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАТЕРИЯ



ДЖ. ДЖ. ТОМСОН

Инв. № 21.062

ПЕРЕВОД С ПОСЛЕДНЕГО (5-го)

АНГЛИЙСКОГО ИЗДАНИЯ 1924 г.

С. ДАВЫДОВА и Н. ЛИХТГЕЙМА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ

проф. А. К. ТИМИРЯЗЕВА и З. А. ЦЕЙТЛИНА

С ПРЕДИСЛОВИЕМ

проф. А. К. ТИМИРЯЗЕВА

И МНОГИМИ ПРИЛОЖЕНИЯМИ

Проверено 193

Госуд. Науч.-Техн. и Экон.  
Библиотека  
Е. 1. 11



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКВА 1928 ЛЕНИНГРАД

1938  
ПРОВЕРЕНО

# ELECTRICITY AND MATTER

BY  
J. J. THOMSON  
NEW-HAVEN  
1924

**ПРОВЕРКА  
ИГНЕ 1949**

Сверено

Степная  
НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
— И. Г. П. —

Государственная  
НАУЧНАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
— И. Г. П. —

1936/43  
1935

ПРОВЕРЕНО  
1936 г. №

Государственное  
Издательство  
Типография  
И. Бухарина  
Ленинград

ВРЕМЯ

## ОГЛАВЛЕНИЕ.

Стр.

Дж. Дж. Томсон. Электричество и материя.

Предисловие проф. А. К. Тимирязева . . . . .	7
Предисловие Дж. Дж. Томсона . . . . .	9
Глава I. Изображение электрического поля при помощи силовых линий . . . . .	10
Теория силовых линий Фарадея . . . . .	13
Движение фарадеевских трубок . . . . .	18
Движения заряженной сферы . . . . .	20
Момент количества движения, произведенный наэлектризо- ванной точкой и магнитным полюсом . . . . .	23
Вектор-потенциал Максвелла . . . . .	27
Глава II. Электрическая и связанная масса . . . . .	31
Влияние скорости на связанную массу . . . . .	34
Глава III. Результаты ускорения фарадеевских трубок . . . . .	40
Лучи Рентгена и свет . . . . .	—
Глава IV. Атомное строение электричества . . . . .	50
Масса носителей электричества . . . . .	57
Величины $\frac{e}{m}$ для отрицательно наэлектризованных частиц в га- зах при низком давлении . . . . .	58
Носители положительного электричества . . . . .	59
Глава V. Строение атома . . . . .	60
Природа единицы, из которой построены атомы . . . . .	61
Как корпускулы в атоме теряют или приобретают кинетиче- скую энергию . . . . .	67
Глава VI. Радиоактивность и радиоактивные вещества . . . . .	85
Характер излучения . . . . .	86
Эманация радиоактивных веществ . . . . .	88
Индукцированная радиоактивность . . . . .	89
Выделение активной составной части тория . . . . .	90

\*



Приложения.		Стр.
Приложение I. Дж. Дж. Томсон. Материя и эфир. . . . .		98
Приложение II. Природа света . . . . .		113
1. Дж. Дж. Томсон. Структура света. . . . .		—
Предисловие . . . . .		—
Диффракция и интерференция . . . . .		129
Закон Планка . . . . .		130
2. З. Цейтлин. Развитие воззрений на природу света . . . . .		132
1. Древность и средние века. . . . .		—
2. Новое время . . . . .		134
3. Ньютонова теория света. . . . .		137
4. Лаплас, Юнг, Френель . . . . .		139
5. Послефренелевская оптика и электромагнитная теория света Максвелла . . . . .		144
6. Теория квант Планка . . . . .		146
7. Электромагнитная теория света Максвелла в истолковании Дж. Дж. Томсона . . . . .		151
8. Гипотеза Эйнштейна, дополняющая теорию излучения Томсона . . . . .		154
9. Критика теории Томсона — Эйнштейна . . . . .		155
10. Картина электромагнитного излучения по Г. Герцу . . . . .		159
11. Теория Бора . . . . .		161
12. Новая теория Дж. Дж. Томсона. . . . .		166
Приложение III. Вихревая теория материи. . . . .		172
1. Н. Е. Жуковский. Основы теории вихрей. . . . .		—
2. В. Томсон-Кельвин. О вихревых атомах. . . . .		184
3. З. Цейтлин. Вихревая теория материи, ее развитие и значение. . . . .		199
Приложение IV. Уравнения Максвелла-Герца . . . . .		218
1. Дж. Дж. Томсон. Фарадеевы силовые трубки и уравнения Максвелла . . . . .		—
1. Электрическое смещение и фарадеевы силовые трубки. . . . .		—
2. Фарадеевы трубки. . . . .		220
3. Механические силы в поле . . . . .		233
2. З. Цейтлин. Вихревая теория электромагнитного движения. . . . .		235
1—5. Вывод уравнений Максвелла-Герца . . . . .		—
6. Физический смысл константы Планка и вихревая теория водородного атома . . . . .		253

ДЖ. ДЖ. ТОМСОН

## ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАТЕРИЯ

## ПРЕДИСЛОВИЕ.

Книга Дж. Дж. Томсона „Электричество и материя“, появившаяся в 1903 году, сохраняет все свое значение и в настоящее время. Она представляет собой доступное изложение взглядов автора на строение электромагнитного поля. Максвелловская теория электромагнитного поля обыкновенно изображается как перевод великих идей Фарадея на современный математический язык. Теория Томсона представляет собой также перевод, но гораздо более близкий к подлиннику.

Оригинальные работы Дж. Дж. Томсона были напечатаны в промежуток времени от 1880 года до наших дней: они представляют собой одно стройное целое, поэтому появившиеся в 1924 и 1925 году замечательные работы Томсона, дающие синтез волновой и квантовой теории света, остались незамеченными, так как, будучи оторваны от всех предшествующих работ, они кажутся избыточными всякими произвольными допущениями. На самом же деле они находятся в стройной логической связи с тем, что было найдено Томсоном раньше и что, повидимому, основательно забыто.

Книга „Электричество и материя“ дает, как мы уже сказали, в сжатой и доступной форме основные взгляды Томсона на электромагнитное поле, которые сохранили все свое значение в наши дни, устарели лишь некоторые части V и VI глав, где речь идет о строении атома; к этим главам сделаны соответствующие примечания редакции. В качестве приложения к этой части дан перевод речи Дж. Дж. Томсона „Материя и эфир“. Вторая часть книги посвящена опубликованной в 1924 году замечательной работе Томсона „Структура света“ и связанным с этой работой вопросам. По Томсону квант света представляет замкнутую кольцеобразную фарадеевскую силовую линию или, как предпочитает выражаться Томсон, „световой квант есть замкнутая фарадеева трубка“. Свойства этих световых квант поразительно сходны со свойствами вихревых колец, поэтому в качестве приложения к этой части книги



даны статьи покойного проф. Н. Е. Жуковского „Основы учения о вихрях“, Вильяма Томсона (Лорда Кельвина) „О вихревом атоме“ и статьи З. А. Цейтлина, посвященные истории и методологии вихревой теории материи. В конце книги приложен перевод первой главы из сочинений Томсона „Новейшие исследования в области электричества и магнетизма“, где дается изложение взглядов Томсона, но уже в математической форме. Читатель, владеющий элементами математики, сейчас же увидит из этой статьи, насколько прочно обоснованы взгляды Томсона и насколько близка его теория электромагнитного поля к той картине, которую представлял себе Фарадей.

В заключение необходимо напомнить, что Томсон, работая изложенным в настоящей книге методом, первый пришел к понятию электромагнитной массы в 1881 году, первый установил изменение этой массы со скоростью, и притом данное им этим явлениям объяснение было обосновано на строго материалистической почве. Работы Томсона в то время остались незамеченными. Через 20 — 25 лет после работ Томсона понятие об электромагнитной массе стало выдвигаться на первый план, но, вследствие формального подхода тогдашних теоретиков, те же самые взгляды, которые были высказаны Томсоном, были изложены на идеалистический лад и привели к выводам о дематериализации материи. Блестящая материалистическая критика этого идеалистического учения дана у Ленина в 5 главе „Материализма и эмпириокритицизма“. Весьма характерно, что в последние годы трудности, на которые натолкнулась так называемая теория квант, привели к новой вспышке идеализма в физике, и в этой области мы видим опять, как Томсон пришел к синтезу основного противоречия теории квант и опять на строго материалистической почве. Уже по этой одной причине изложенные в настоящей книге взгляды Томсона заслуживают самого серьезного внимания тех, кто интересуется методологическими проблемами современного естествознания.

*А. Тимирязев.*

27/V 1927 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ ДЖ. ДЖ. ТОМСОНА

(1903 года).

В этих лекциях, читанных в Yale University в мае 1903 г., я сделал попытку рассмотреть значение последних успехов в области учения об электричестве для наших понятий о строении материи и природе электричества; последние вопросы, вероятно, настолько тесно связаны друг с другом, что решение одного из них дало бы решение другого. Характерной особенностью новейших изысканий в области электричества, как изучение и открытие катодных и рентгеновых лучей, радиоактивных веществ является то обстоятельство, что они указывают на тесную связь между материей и электричеством.

Избирая эту связь предметом „Лекций памяти Silliman'a“, мне казалось, что размышления о значении для этой связи последних работ в области электричества имеют тем большее значение, что такого рода рассмотрение возбуждает множество вопросов, которые могли бы служить некоторым из моих слушателей замечательными объектами для новых изысканий.

*Дж. Дж. Томсон.*

Кембридж. Август. 1903 г.



## ГЛАВА I. 1)

## ИЗОБРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ПОМОЩИ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ.

Предметом настоящих лекций будет изложение в простой и насколько возможно элементарной форме некоторых теорий, относящихся к природе электричества, к процессам, имеющим место в электрическом поле, к связи между электрической материей и обыкновенной, связи, на которую дают указания результаты последних исследований.

Прогресс науки об электричестве был сильно облегчен, благодаря чисто теоретическим рассуждениям о природе электричества. В самом деле, едва ли возможно переоценить услуги, которые были оказаны двумя теориями, которые так же стары, как и сама наука; я имею в виду теории, известные под именами дуалистической и унитарной теории электричества.

Дуалистическая теория объясняет явления электростатики, исходя из положения, что в природе существуют две несоздаваемые вновь и неуничтожаемые жидкости, присутствие которых вызывает электрические явления. Одна из этих жидкостей называется положительным электричеством, другая — отрицательным электричеством; электрические явления могут быть объяснены, если приписать этим жидкостям следующие свойства. Частицы положительного электричества взаимно отталкиваются с силами, изменяющимися обратно пропорционально квадрату расстояния между ними, точно так же, как и частицы отрицательного электричества. С другой стороны, частицы положительного электричества притягивают частицы отрицательного электричества. Притяжение между двумя зарядами противоположных знаков  $m$  и  $m'$ , по одному варианту этой теории, принимается в точности равным отталкиванию между двумя зарядами

$m$  и  $m'$  одного и того же знака, находящимися в тех же местах, что и предыдущие. По другому варианту этой теории принимается, что притяжение немного превышает отталкивание; это дает основание для возможности объяснения сил тяготения.

Жидкости предполагаются чрезвычайно подвижными и способными проходить с большой легкостью сквозь проводники. Электрическое состояние тела определяется разностью между количествами двух электрических жидкостей, в нем содержащихся; если тело содержит положительной жидкости больше, чем отрицательной, оно наэлектризовано положительно; если же оно содержит равные количества, оно не заряжено. Так как жидкости не могут быть ни созданы ни уничтожены, то появление положительной жидкости в одном месте должно сопровождаться исчезновением такого же количества в другом месте, так что получение электричества одного знака должно сопровождаться получением такого же количества электричества противоположного знака.

Согласно этой теории, любое тело состоит из 3 веществ: обыкновенной материи, положительного электричества и отрицательного электричества. Принимается, что последние действуют каждое само на себя и одно на другое, но в первоначальном варианте этой теории не предполагалось, что между обыкновенной материей и электрическими жидкостями существует взаимодействие; только в недавнее сравнительно время Гельмгольц ввел в науку идею о специфическом притяжении между обыкновенной материей и электрическими жидкостями. Он сделал это с целью объяснить явление контактной электризации (т. е. так называемую электризацию при соприкосновении), состоящее в том, что, когда два металла, напр., цинк и медь, приведены в соприкосновение, то происходит разделение электричеств, при чем цинк электризуется положительно, медь — отрицательно. Гельмгольц предположил, что между обыкновенной материей и электрическими жидкостями действуют силы, которые изменяются для различных видов материи; так, положительное электричество сильнее притягивается цинком, чем медью, так что, если привести в соприкосновение эти металлы, цинк отнимает у меди некоторое количество положительного электричества.

В дуалистической теории есть некоторая неопределенность, которая может быть иллюстрирована рассмотрением ненаэлектризованного тела. Дуалистическая теория говорит нам только то, что тело содержит одинаковые количества той и другой жидкости. Она не дает нам никаких указаний на количество каждой из жидкостей, она

1) Примечания к „Электричеству и материи“ и к Приложению IV написаны А. К. Тимирязевым.



предполагает только, что если равные количества двух жидкостей прибавлены к телу, последнее не подвергнется никаким изменениям, так как равные количества двух жидкостей совершенно нейтрализуют друг друга. Если рассматривать эти жидкости как нечто более вещественное, чем математические символы  $+$  и  $-$ , мы встретимся с затруднениями. Если мы будем их рассматривать, например, как физические жидкости, мы вынуждены будем предположить, что смесь двух жидкостей в одинаковых количествах есть нечто настолько лишенное физических свойств, что самое присутствие смеси никогда не может быть обнаружено.

Вторая теория, унитарная теория Вениамина Франклина, свободна от этого упрека. Согласно этой теории, есть только одна электрическая жидкость положительная; роль другой жидкости принимает на себя обыкновенная материя, частицы которой взаимно отталкиваются и притягивают положительную жидкость точно так, как это делают частицы отрицательной жидкости по дуалистической теории. Ненаэлектризованная материя предполагается соединенной с таким количеством электрической жидкости, что притяжение материей какой-либо внешней по отношению к ней электрической жидкости как раз таково, что уравнивает отталкивание этой внешней электрической жидкости той жидкостью, которая соединена с самой материей. С этой точки зрения, если количество материи в теле известно, количество электрической жидкости является также определенным.

Услуги, которые теории жидкостей оказали учению об электричестве, не зависят от понятия о жидкости, как о чем-то, обладающем определенными физическими свойствами. Жидкости были математическими фикциями, служившими для того, чтобы локализовать определенным образом притяжения и отталкивания между наэлектризованными телами; они явились средством, при помощи которого блестяще развитая теория сил, изменяющихся обратно пропорционально квадрату расстояния, теория, внушенная открытием тяготения, могла быть приложена к электрическим явлениям. До тех пор, пока мы ограничиваемся вопросами, которые вытекают из закона взаимодействия между наэлектризованными телами и явлениями одновременного возникновения равных количеств положительного и отрицательного электричества, обе теории должны давать одинаковые результаты, и нет ничего, что заставило бы сделать между ними выбор. Те физики и математики, которые больше всех способствовали развитию теорий жидкостей, ограничивались вопросами

такого рода; при этом они до такой степени утончали и идеализировали понятие об этих жидкостях, что всякий намек на их физические свойства стал почти неделикатным. Только при изучении явлений, касающихся физических свойств жидкости, мы можем надеяться сделать выбор между двумя соперничающими теориями. Возьмем случай, действительно, имевший место. Нам удалось измерить массы, соединенные с данными электрическими зарядами в газах при низких давлениях; при этом оказалось, что, масса, соединенная с положительным зарядом, неизменно больше массы, соединенной с отрицательным зарядом. Эту разницу мы должны были бы ожидать согласно унитарной теории Франклина, если ее видоизменить так, чтобы электрическая жидкость соответствовала отрицательному электричеству вместо положительного, между тем как у нас нет никаких оснований ожидать такой большой разницы с точки зрения дуалистической теории. Я уверен, что мы будем поражены сходством между некоторыми воззрениями, к которым привели нас самые последние открытия, и теми, которые установил Франклин, когда наша наука была еще в младенческом состоянии.

#### Теория силовых линий Фарадея.

Теории жидкостей, по самой природе своей, заключают в себе идею о действии на расстоянии. Хотя эта идея была принята большинством математиков, вследствие ее пригодности для математического анализа, многие великие физики чувствовали, что они не могут ее принять и посвятили много размышлений и труда на то, чтобы заменить ее чем-нибудь заключающим в себе механическую непрерывность. Самым выдающимся из них был Фарадей. Фарадей был глубоко убежден в аксиоме или, если хотите, в догме, что материя не может действовать там, где ее нет. Фарадей, обладавший, по моему, несравненной математической пронизательностью, не владел анализом, так что удобство идеи о действии на расстоянии для целей вычислительных не имело возможности ослабить то стращание, которое он испытывал к идее сил, действующих далеко от их источника и не имеющих физической связи с этим источником. Поэтому он искал способа представления действий в электрическом поле, который был бы свободен от идеи действия на расстоянии и заменил бы ее такою, которая выдвинула бы на первый план непрерывную связь, существующую между взаимодействующими телами. Ему удалось это сделать введением понятия о сило-



предполагает только, что если равные количества двух жидкостей прибавлены к телу, последнее не подвергнется никаким изменениям, так как равные количества двух жидкостей совершенно нейтрализуют друг друга. Если рассматривать эти жидкости как нечто более вещественное, чем математические символы  $+$  и  $-$ , мы встретимся с затруднениями. Если мы будем их рассматривать, например, как физические жидкости, мы вынуждены будем предположить, что смесь двух жидкостей в одинаковых количествах есть нечто настолько лишенное физических свойств, что самое присутствие смеси никогда не может быть обнаружено.

Вторая теория, унитарная теория Вениамина Франклина, свободна от этого упрека. Согласно этой теории, есть только одна электрическая жидкость положительная; роль другой жидкости принимает на себя обыкновенная материя, частицы которой взаимно отталкиваются и притягивают положительную жидкость точно так, как это делают частицы отрицательной жидкости по дуалистической теории. Ненаэлектризованная материя предполагается соединенной с таким количеством электрической жидкости, что притяжение материей какой-либо внешней по отношению к ней электрической жидкости как раз таково, что уравнивает отталкивание этой внешней электрической жидкости тою жидкостью, которая соединена с самой материей. С этой точки зрения, если количество материи в теле известно, количество электрической жидкости является также определенным.

Услуги, которые теории жидкостей оказали учению об электричестве, не зависят от понятия о жидкости, как о чем-то, обладающем определенными физическими свойствами. Жидкости были математическими фикциями, служившими для того, чтобы локализовать определенным образом притяжения и отталкивания между наэлектризованными телами; они явились средством, при помощи которого блестяще развитая теория сил, изменяющихся обратно пропорционально квадрату расстояния, теория, внушенная открытием тяготения, могла быть приложена к электрическим явлениям. До тех пор, пока мы ограничиваемся вопросами, которые вытекают из закона взаимодействия между наэлектризованными телами и явлениями одновременного возникновения равных количеств положительного и отрицательного электричества, обе теории должны давать одинаковые результаты, и нет ничего, что заставило бы сделать между ними выбор. Те физики и математики, которые больше всех способствовали развитию теорий жидкостей, ограничивались вопросами

такого рода; при этом они до такой степени утончали и идеализировали понятие об этих жидкостях, что всякий намек на их физические свойства стал почти неделикатным. Только при изучении явлений, касающихся физических свойств жидкости, мы можем надеяться сделать выбор между двумя соперничающими теориями. Возьмем случай, действительно, имевший место. Нам удалось измерить массы, соединенные с данными электрическими зарядами в газах при низких давлениях; при этом оказалось, что, масса, соединенная с положительным зарядом, неизменно больше массы, соединенной с отрицательным зарядом. Эту разницу мы должны были бы ожидать согласно унитарной теории Франклина, если ее видоизменить так, чтобы электрическая жидкость соответствовала отрицательному электричеству вместо положительного, между тем как у нас нет никаких оснований ожидать такой большой разницы с точки зрения дуалистической теории. Я уверен, что мы будем поражены сходством между некоторыми воззрениями, к которым привели нас самые последние открытия, и теми, которые установил Франклин, когда наша наука была еще в младенческом состоянии.

#### Теория силовых линий Фарадея.

Теории жидкостей, по самой природе своей, заключают в себе идею о действии на расстоянии. Хотя эта идея была принята большинством математиков, вследствие ее пригодности для математического анализа, многие великие физики чувствовали, что они не могут ее принять и посвятили много размышлений и труда на то, чтобы заменить ее чем-нибудь заключающим в себе механическую непрерывность. Самым выдающимся из них был Фарадей. Фарадей был глубоко убежден в аксиоме или, если хотите, в догме, что материя не может действовать там, где ее нет. Фарадей, обладавший, по моему, несравненной математической пронизательностью, не владел анализом, так что удобство идеи о действии на расстоянии для целей вычислительных не имело возможности ослабить то стращание, которое он испытывал к идее сил, действующих далеко от их источника и не имеющих физической связи с этим источником. Поэтому он искал способа представления действий в электрическом поле, который был бы свободен от идеи действия на расстоянии и заменил бы ее такою, которая выдвинула бы на первый план непрерывную связь, существующую между взаимодействующими телами. Ему удалось это сделать введением понятия о сило-



вых линиях. Так как я буду постоянно пользоваться этим методом и так как, по моему убеждению, его могущество и возможности не были никогда достаточно выявлены, я посвящу несколько времени изложению и развитию такого представления об электрическом поле.

К этому методу Фарадея привело рассмотрение силовых линий вокруг магнитного бруска. Если железные опилки рассыпать на гладкой поверхности около магнита, они сами расположатся, как на рис. 1; на нем хорошо видны линии, идущие от одного полюса магнита к другому; направление этих линий в каждой точке совпа-

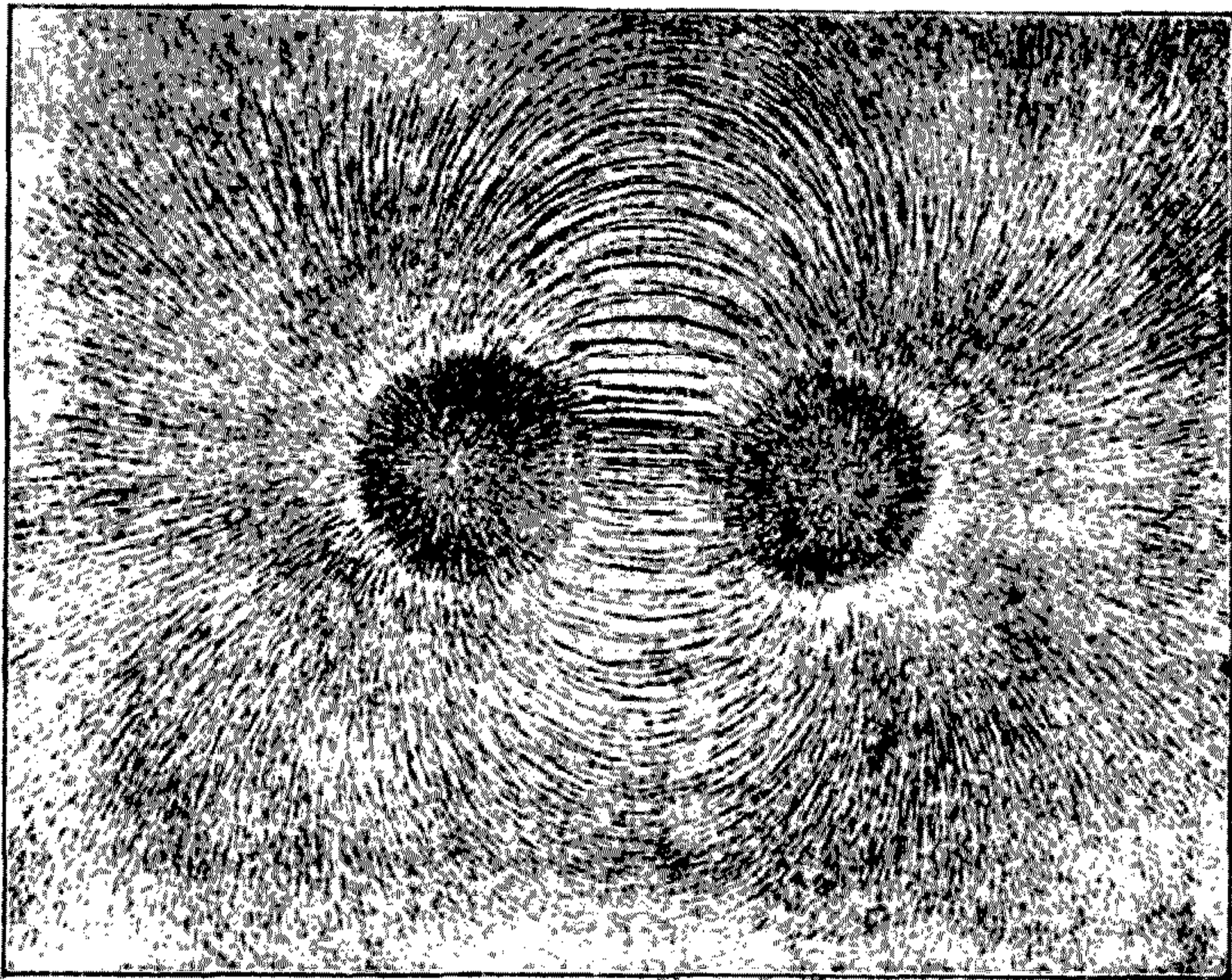


Рис. 1.

дает с направлением магнитной силы, между тем как напряженность силы указывается густотой линий. Отправляясь из какой-нибудь точки поля и двигаясь все время по направлению магнитной силы, мы проведем линию, которая не прервется, пока мы не дойдем до отрицательного полюса магнита; если такие линии будут проведены через все точки поля, пространство, в котором расположено магнитное поле, будет заполнено системой линий, придающей ему волокнистое строение, в роде того, которое имеет стог сена или соломы, при чем волокна расположены вдоль силовых линий. До сих пор я говорил о линиях магнитной силы; эти же рассуждения могут быть применены к электрическому полю, и мы можем рассматривать

электрическое поле, как наполненное линиями электрической силы, начинающимися на положительно наэлектризованных телах и оканчивающимися на отрицательно наэлектризованных. До этого пункта ход рассуждений был чисто геометрический и мог бы быть принят также и теми, кто смотрит на вопрос с точки зрения действия на расстоянии; для Фарадея, однако, линии сил были чем-то большим, чем математические абстракции, они были физическими реальностями. Фарадей материализовал силовые линии и наделил их электрическими свойствами для того, чтобы объяснить явления электрического поля. Так, он предположил, что они находятся в состоянии натяжения и отталкиваются друг от друга. Вместо неосязаемого действия на расстоянии между двумя наэлектризованными телами, Фарадей рассматривал все пространство между телами наполненным натянутыми и взаимно отталкивающимися пружинами. Электрические заряды, интерпретацию которых только и давали теории жидкостей, были с этой точки зрения концами этих пружин, и электрический заряд, вместо того, чтобы быть некоторым количеством жидкости, заключенным в наэлектризованном теле, являлся обширным арсеналом пружин, простиравшихся по всем направлениям во все части поля.

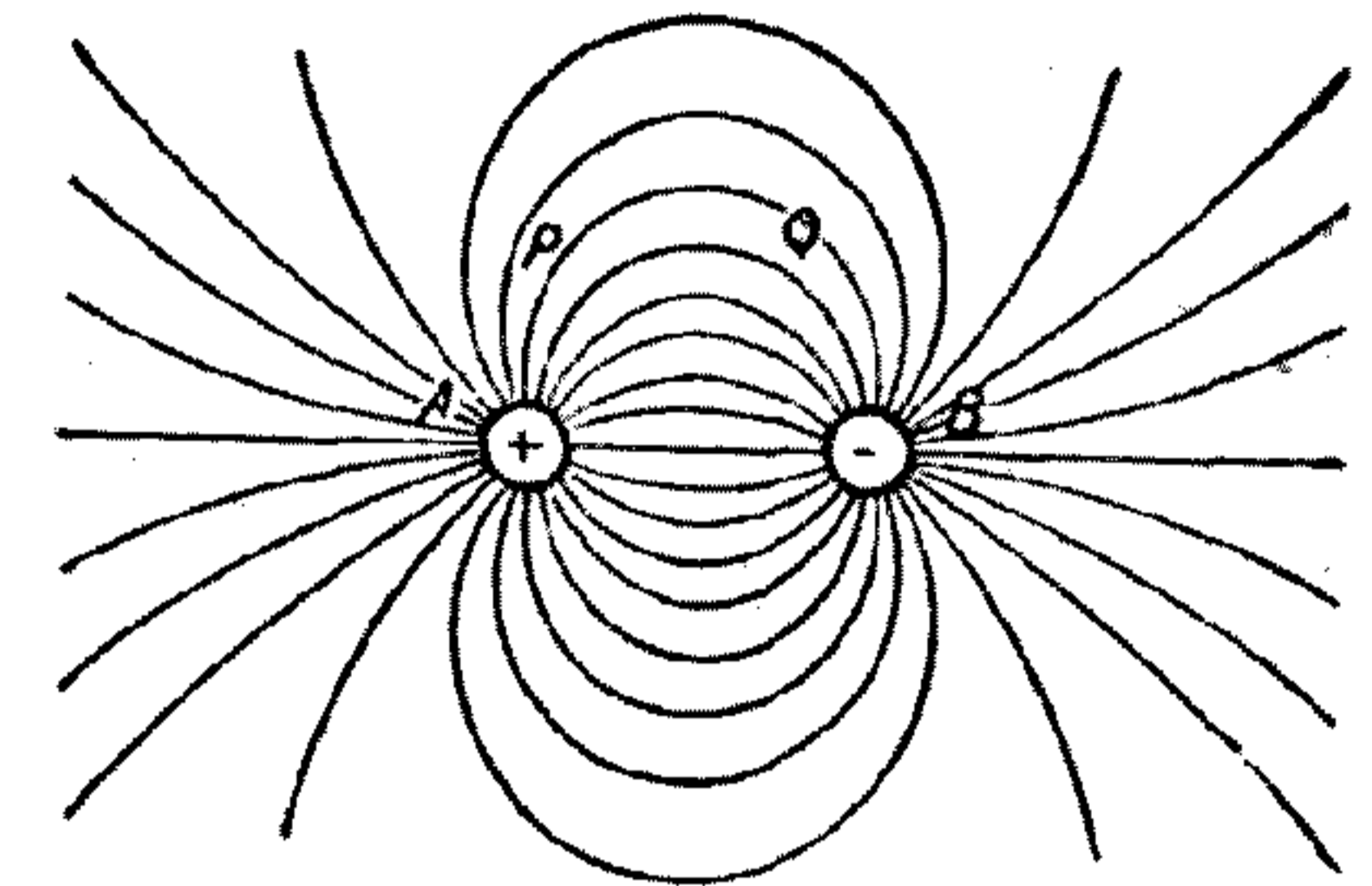


Рис. 2.

Чтобы пояснить нашу идею в этом пункте, рассмотрим несколько простых примеров с точки зрения Фарадея. Возьмем сначала случай с двумя телами, обладающими равными и противоположными зарядами; расположение силовых линий показано на рис. 2.

Вы замечаете, что силовые линии гуще всего вдоль прямой  $AB$ , соединяющей тела, и что больше силовых линий с той стороны  $A$ , которая ближе к  $B$ , чем с противоположной. Рассмотрим действие этих силовых линий на  $A$ ; линии находятся в состоянии натяжения и тянут  $A$  в разные стороны; но так как со стороны, ближайшей к  $B$ , на  $A$  действует больше силовых линий, чем с противоположной, то притяжение от  $A$  к  $B$  преодолевает притяжение в противоположную сторону, поэтому  $A$  будет стремиться двигаться к  $B$ ; таким образом Фарадей представлял себе притяжение между двумя противоположно наэлектризованными телами. Рассмотрим теперь состояние, в каком находится какая-нибудь криволинейная си-



ловая линия, напр.,  $PQ$ ; она находится в состоянии натяжения и стремится поэтому сама выпрямиться; что ей мешает сделать это и удерживает ее в равновесии в изогнутой форме? Мы найдем объяснение этому, если вспомним, что силовые линии отталкиваются друг от друга и что они сосредоточены в большем числе в области между  $PQ$  и  $AB$ , чем по другую сторону от  $PQ$ ; таким образом, отталкивание линий внутри  $PQ$  больше отталкивания внешних линий, и линия  $PQ$  будет поэтому выгнута наружу.

Перейдем теперь от случая двух противоположно наэлектризованных тел к случаю двух тел, наэлектризованных одноименно; силовые линии показаны на рис. 3.

Предположим, что  $A$  и  $B$  наэлектризованы положительно; так как силовые линии отходят от положительно наэлектризованного

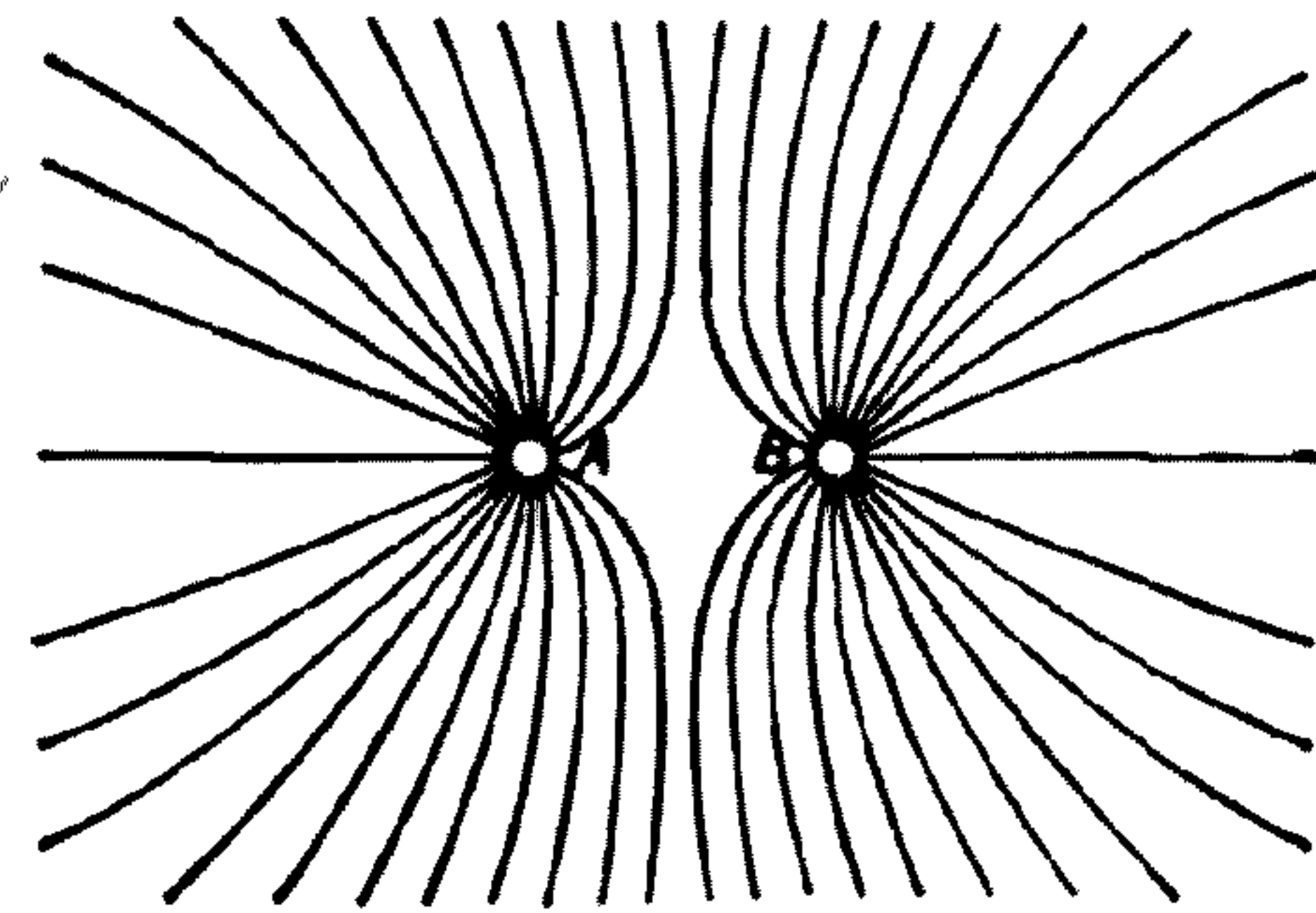


Рис. 3.

тела и оканчиваются на отрицательно наэлектризованном теле, то линии, отходящие от  $A$  и  $B$ , должны будут идти до какого-нибудь тела или тел, обладающих отрицательными зарядами, соответствующими положительным зарядам  $A$  и  $B$ ; предположим, что эти отрицательные заряды расположены на значительном расстоянии,

так что силовые линии, исходящие из  $A$ , расположились бы равномерно по всем направлениям в рассматриваемой части поля, если бы не было заряда  $B$ . Посмотрим теперь, что произойдет, если будем приближать друг к другу системы линий, связанных с  $A$  и  $B$ . Так как силовые линии отталкиваются друг от друга, то силовые линии с той стороны  $A$ , которая ближе к  $B$ , будут оттолкнуты на противоположную сторону  $A$ , так что теперь силовые линии будут сгущены на удаленной от  $B$  стороне  $A$ ; таким образом, притяжение  $A$  силовыми линиями сзади будет больше, чем спереди; в результате  $A$  будет отталкиваться от  $B$ . Мы видим, что механизм, вызывающий отталкивание, того же типа, что и механизм, вызывающий притяжение в предыдущем случае, и, если угодно, мы можем рассматривать отталкивание между  $A$  и  $B$ , как следствие притяжения их дополнительными отрицательными зарядами, которые должны существовать в других частях поля.

Результаты отталкивания силовых линий ясно показаны на рис. 4, изображающем случай двух противоположно наэлектризованных пластинок; вы замечаете, что силовые линии между пластинками суть прямые, за исключением тех, которые находятся у краев пластинок; этого как раз мы и должны были ожидать, так как в этой части поля давление сверху вниз, производимое силовыми линиями, находящимися над какой-либо линией, равно давлению снизу вверх силовых линий, находящихся под ней. Однако, для силовой линии, находящейся недалеко от края пластинки, давление внутренних силовых линий превосходит давление наружных, и силовая линия начнет изгибаться до тех пор, пока ее кривизна и натяжение не уравниваются давлением изнутри; это искривление ясно показано на рис. 4.

До сих пор мы пользовались силовыми линиями скорее как средством для описания, чем средством для вычислений; между тем, развить теорию настолько, чтобы сделать ее аппаратом для вычислений, не так трудно. Мы можем это сделать, введя понятие о *силовых трубках*. Если мы проведем силовую линию через все точки контура маленькой замкнутой кривой, находящейся в электрическом поле, эти линии образуют трубчатую поверхность, и если мы продолжим эти линии назад до положительно заряженной поверхности, из которой они исходят, и вперед до отрицательно заряженной поверхности, на которой они оканчиваются, мы можем доказать, что положительный заряд, находящийся в начале трубки, равен отрицательному заряду, находящемуся в конце трубки. Выбирая подходящим образом площадь малой кривой, через которую мы проводим силовые линии, мы можем сделать заряд, заключенный в трубке, равным единице заряда. Назовем такую трубку *фарадеевской трубкой*, тогда каждая единица положительного электричества в этом поле может быть рассматриваема, как начало, а каждая единица отрицательного электричества, как конец фарадеевской трубки. Мы приписываем фарадеевским трубкам направление; это направление совпадает с направлением электрической силы, так что положительное направление есть направление от положительного к отрицательному концу трубки. Если мы проведем в силовом поле замкнутую поверхность, то разность между числом фарадеевских

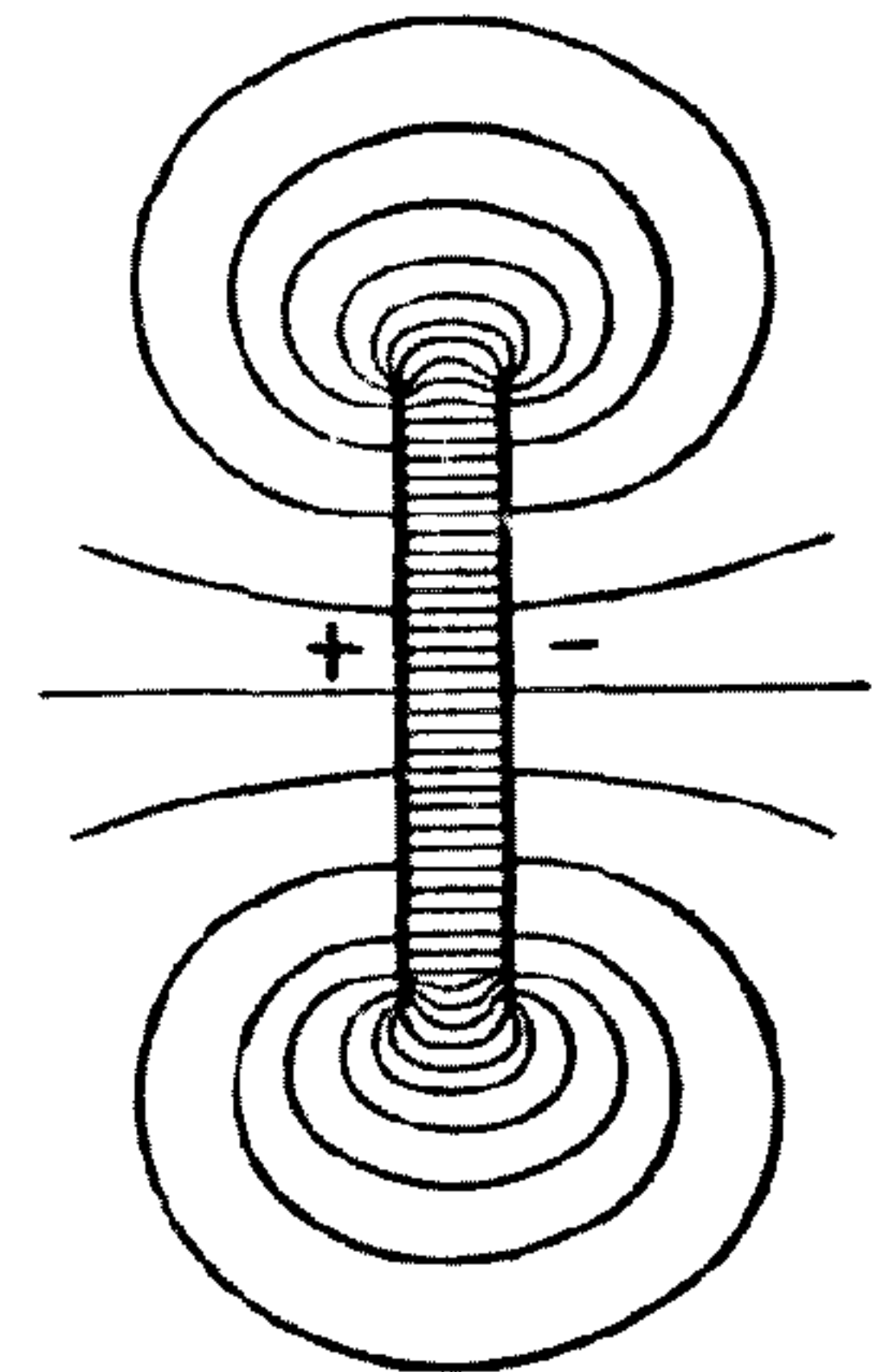


Рис. 4.



трубок, выходящих из поверхности и входящих в нее, будет равна алгебраической сумме зарядов внутри поверхности; эту сумму Максвелл назвал *электрическим смещением* сквозь поверхность. То, что Максвелл назвал *электрическим смещением* в точке по какому-либо направлению, есть число фарадеевских трубок, которые проходят сквозь единицу площади, проведенной под прямым углом к этому направлению, при чем число это считается алгебраическим, т. е. трубки, проходящие в одном направлении, считаются положительными, а в противоположном направлении — отрицательными, и число трубок, проходящих сквозь площадку, есть разность между числом трубок положительных и отрицательных.

С своей стороны, я нахожу, что понятие о фарадеевских трубках больше помогает нам представить себе мысленно картину процессов, происходящих в электрическом поле, чем понятие об электрическом смещении, поэтому уже много лет, как я оставил последний метод.

Максвелл остановился на вопросе о натяжении и давлении силовых линий в электрическом поле и продвинул эту проблему на шаг дальше, чем Фарадей. Подсчитывая величину этих натяжений, он показал, что механические действия в электрическом поле могут быть объяснены, если предположить, что каждая фарадеевская трубка испытывает натяжение, равное  $R$ , где  $R$  есть напряжение электрической силы, и что, кроме этого натяжения, в среде, сквозь которую проходят трубки, существует гидростатическое давление, равное  $\frac{1}{2}NR$ , где  $N$  есть густота фарадеевских трубок, т. е. число трубок, проходящих сквозь единицу площади, пересекающую под прямым углом направление электрических сил.

Если мы рассмотрим действие этих натяжений и давления на единицу объема среды, находящейся в электрическом поле, мы увидим, что оно эквивалентно натяжению  $\frac{1}{2}NR$  вдоль направления электрической силы и такой же величины давлению по всем направлениям, перпендикулярным к этой силе.

#### ДВИЖЕНИЕ ФАРАДЕЕВСКИХ ТРУБОК.

До сих пор мы предполагали, что фарадеевские трубки находятся в покое; перейдем теперь к изучению явлений, вызываемых движением этих трубок. Начнем с рассмотрения самого простого случая — двух параллельных пластинок  $A$  и  $B$ , из которых одна заряжена

положительным, другая отрицательным электричеством; предположим, что после заряжения пластинки соединяются проволочным проводником  $EFG$ .

Этот проводник пройдет через некоторые внешние трубки; находясь внутри проводника, трубки сокращаются до молекулярных размеров и потому исчезнет то отталкивание, которое они оказывали на соседние трубки. Рассмотрим влияние этого обстоятельства на трубку  $PQ$ , находящуюся между пластинками; первоначально  $PQ$  была в равновесии под влиянием собственного натяжения и отталкивания, производимого соседними трубками. Но отталкивание, которое производили трубки, перерезанные  $EFG$ , теперь исчезло, поэтому  $PQ$  не будет больше в равновесии, но будет толкаться по направлению к  $EFG$ . Итак, все больше и больше трубок будет вгоняться в  $EFG$ , и вся система трубок, находящихся между пластинками, продвинется по направлению к  $EFG$ . Таким образом, пока происходит разряд пластинок, трубки, находящиеся между ними, движутся перпендикулярно к самим себе. Какое физическое явление сопровождает это движение трубок? В результате соединения пластинок проводником  $EFG$  является электрический ток, текущий от положительно заряженной пластинки через  $EFG$  к отрицательно заряженной пластинке; как известно, это сопровождается появлением магнитной силы между пластинками.

Эта магнитная сила перпендикулярна к плоскости рисунка и равна силе тока в пластинке, умноженной на  $4\pi$ ; или, если  $\sigma$  есть плотность электрического заряда на пластинках, а  $v$  скорость, с которой движется заряд, магнитная сила равна  $4\pi\sigma v$ .<sup>1)</sup>

Здесь мы наблюдаем два явления, которые не имеют места в постоянном электростатическом поле: одно — движение фарадеевских тру-

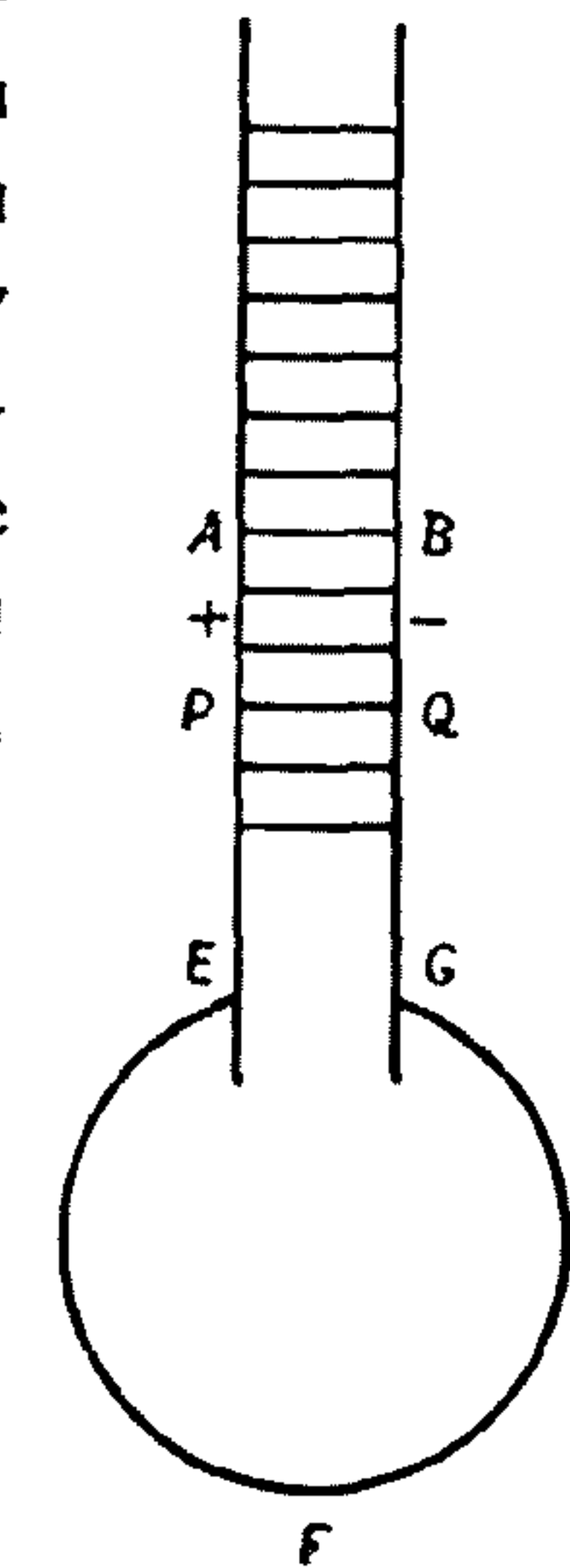


Рис. 5.

<sup>1)</sup> Томсон делает предположение, что каждая фарадеевская трубка дает начало магнитному полю, напряжение которого  $M = 4\pi v$ , где  $v$  скорость движения трубки, при чем направление  $M$  должно быть перпендикулярно к направлению трубки и направлению ее скорости. В данном случае, если число трубок на единицу площади будет  $\sigma$ , т. е. плотность заряда  $\sigma$ , то для напряжения магнитного поля имеем  $M = 4\pi\sigma v$ . Если трубки движутся по направлению, образуя угол  $\theta$  с их собственным направлением, то  $M = 4\pi\sigma v \sin \theta$ . Подробнее об этом см. добавление IV. (Прим. ред.)



бок, другое — существование магнитной силы; это внушает мысль, что существует связь между этими двумя явлениями и что движение фарадеевских трубок сопровождается появлением магнитной силы. Я развил следствия из этого предположения и показал, что если между магнитной силой и движением трубок существует та именно зависимость, которая указана дальше, то эта точка зрения может объяснить законы Ампера, касающиеся связи между током и магнитной силой, и законы Фарадея об индукции токов. Великий вклад Максвелла в теорию электричества, именно положение его, что изменение электрического смещения в диэлектрике вызывает магнитную силу, непосредственно следует из этой точки зрения. <sup>1)</sup> Действительно, если электрическое смещение измеряется плотностью фарадеевских трубок, то при изменении электрического смещения в каком-нибудь месте фарадеевские трубки должны двигаться к этому месту или от него, а движение фарадеевских трубок, согласно гипотезе, вызывает магнитную силу.

Закон, связывающий магнитную силу с движением фарадеевских трубок, следующий: фарадеевская трубка в точке  $P$ , движущаяся со скоростью  $v$ , вызывает в  $P$  магнитную силу, равную  $4\pi v \sin \Theta$ , <sup>2)</sup> при чем направление магнитной силы перпендикулярно к фарадеевской трубке и к направлению движения;  $\Theta$  есть угол между фарадеевской трубкой и направлением ее движения. Мы видим, что только движение трубки, направленное под прямым углом к ней самой, производит магнитную силу; такая сила не возникает при скольжении трубки вдоль ее длины.

#### Движение заряженной сферы.

Приложим эти результаты к очень простому, но важному случаю равномерного движения заряженной сферы. Если скорость сферы мала сравнительно со скоростью света, то фарадеевские трубки будут равномерно распределены по радиальным направлениям, как если бы сфера была в покое. Они будут перемещаться вместе со сферою. Если  $e$  есть заряд на сфере,  $O$  — ее центр, то плотность фарадеевских трубок в точке  $P$  будет  $\frac{e}{4\pi \cdot OP^2}$ ; поэтому, если  $v$  есть скорость сферы,  $\Theta$  — угол между  $OP$  и направлением движения сферы,

<sup>1)</sup> Этот вывод дан в добавлении IV. (Прим. ред.)

<sup>2)</sup> Получается из выражения, данного в примечании на предшествующей странице при  $\sigma = 1$ , т. е. считая, что на  $cm^2$  приходится только одна трубка.

то, согласно вышенаписанному закону, магнитная сила в  $P$  будет  $\frac{ev \sin \Theta}{r^2}$ , направление силы будет перпендикулярно к  $OP$  и к направлению движения сферы; линии магнитной силы окажутся окружностями, центры которых лежат на траектории центра сферы, а их плоскости перпендикулярны к той же траектории. Таким образом, движущийся заряд электричества сопровождается магнитным полем. Существование магнитного поля предполагает наличие энергии; мы

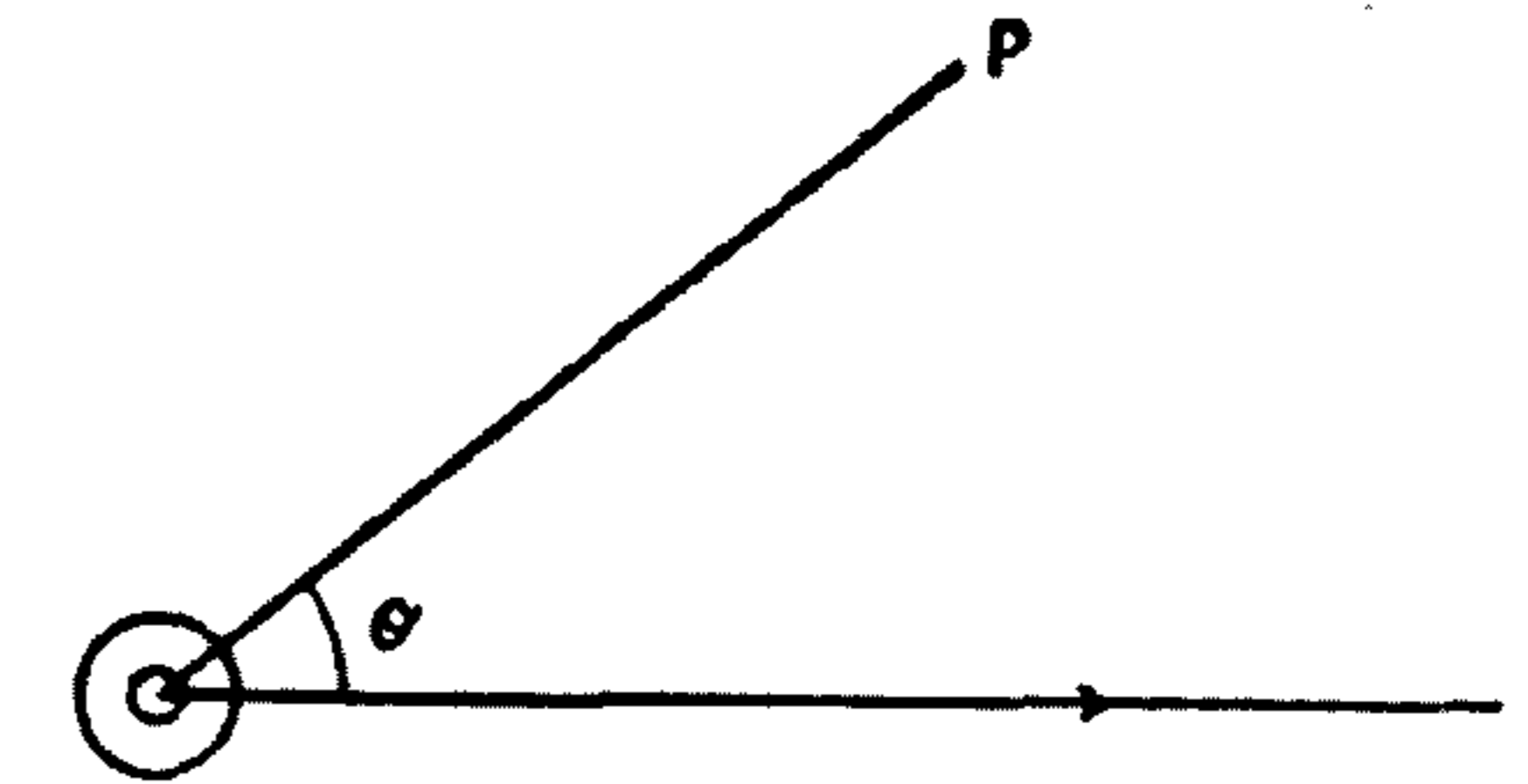


Рис. 6.

знаем, что в единице объема поля, где магнитная сила  $H$ , заключает  $\frac{\mu H^2}{8\pi}$  единиц энергии, при чем  $\mu$  есть магнитная проницаемость среды. В случае движения сферы энергия на единицу объема в  $P$  будет равна  $\frac{\mu e^2 v^2 \sin^2 \Theta}{8\pi OP^4}$ . Суммируя энергию для всех частей поля, <sup>1)</sup> кроме сферы, мы находим, что она равна  $\frac{\mu e^2 v^2}{3a}$ , где  $a$  — радиус сферы. Если  $m$  есть масса сферы, то кинетическая энергия сферы есть  $\frac{1}{2} m v^2$ ; к ней надо добавить энергию вне сферы, которая равна, как мы видели,  $\frac{\mu e^2 v^2}{3a}$ ; поэтому полная кинетическая энергия системы равна  $\frac{1}{2} \left( m + \frac{2\mu}{3} \frac{e^2}{a} \right) v^2$ , иначе, энергия такова, как если бы масса сферы была  $m + \frac{2\mu}{3} \frac{e^2}{a}$  вместо  $m$ . Итак, вследствие электрического заряда масса сферы увеличилась на  $\frac{2\mu e^2}{3a}$ . Это очень важный результат, так как он показывает, что часть массы заряженной сферы обязана своим происхождением ее заряду. Позже я предложу вам соображения, которые показывают возможность того, что вся масса тела имеет такое же происхождение.

Однако, прежде чем перейти к этому пункту, я хотел бы иллю-

<sup>1)</sup> Для того, чтобы просуммировать, надо взять энергию для единицы объема  $\frac{\mu^2 e^2 v^2 \sin^2 \Theta}{8\pi OP^4}$ , умножить на элемент объема  $2\pi OP \sin \Theta \cdot OP d\Theta \cdot dOP$  и проинтегрировать по  $\Theta$  от 0 до  $\pi$  и по  $OP$  от  $a$  до  $\infty$ :

$$\frac{\mu e^2 v^2}{4} \int_a^\infty \frac{d \cdot OP}{OP^2} \int_0^\pi \sin^3 \Theta d\Theta = \frac{\mu e^2 v^2}{3a}.$$

(Прим. ред.)



стрировать это увеличение массы сферы некоторыми аналогиями из других отделов физики. Первая из них есть случай сферы, движущейся в жидкости без трения. Когда сфера движется, она заставляет двигаться окружающую жидкость со скоростью, пропорциональной собственной скорости, так что, двигая сферу, мы должны приводить в движение не только вещество самой сферы, но и окружающую жидкость; в результате сфера ведет себя так, как будто ее масса увеличилась на некоторый определенный объем жидкости. Этот объем, как было показано Гринном в 1833 г., равен половине объема сферы. В случае цилиндра, движущегося перпендикулярно к своей длине, масса его увеличивается на массу равного ему объема жидкости. В случае удлиненного тела, в роде цилиндра, величина, на которую возрастает масса, зависит от направления движения тела, делаясь наименьшим, когда тело движется концами вперед, чем при движении боком. Масса такого тела зависит от направления, в котором оно движется.

Возвратимся, однако, к движению наэлектризованной сферы. Мы видели, что благодаря заряду ее масса увеличилась на  $\frac{2\mu e^2}{3a}$ ; поэтому если она движется со скоростью  $v$ , количество движения будет не  $mv$ , но  $(m + \frac{2\mu e^2}{3a})v$ . Добавочное количество движения  $\frac{2\mu e^2}{3a}v$  находится не в сфере, а в пространстве, окружающем сферу. Пространство будет иметь обыкновенное механическое количество движения, результирующая которого есть  $\frac{2\mu e^2}{3a}v$  и направление которого параллельно направлению движения сферы. Важно помнить, что это количество движения ни в каком отношении не отличается от обыкновенного механического количества движения и может быть прибавлено или отнято от количества движения движущихся тел. Я хотел бы представить перед вами существование этого количества движения настолько возможно ярко и убедительно, потому что после признания этого факта состояние электрического поля делается вполне аналогичным состоянию механической системы. Например, по третьему закону Ньютона действие и противодействие равны и противоположны, так что в изолированной системе количество движения в каком-либо направлении неизменно. Но во многих электрических системах как-будто нарушается этот принцип, напр., в случае покоящегося заряженного тела, на которое действует электрический импульс; заряженное тело под влиянием электрической силы этого импульса приобретает скорость и количество движения, так что количество движения после прохождения импульса уже не то, что в начале.

Таким образом, если мы сосредоточили наше внимание только на количестве движения заряженного тела, т. е. если мы предположим, что количество движения обязательно ограничивается тем, что мы рассматриваем, как обыкновенную материю, то будем иметь отступление от третьего закона движения, потому что количество движения, рассматриваемое с этой узкой точки зрения, изменилось. Однако явление это находится в полном согласии с законом, если признать существование количества движения в электрическом поле, потому что, с этой точки зрения, прежде чем импульс достиг заряженного тела, количество движения было сосредоточено в электрическом импульсе, а не в теле; после того как импульс коснулся тела, в последнем появилось некоторое количество движения, в импульсе же оно уменьшилось так, что количество движения, приобретенное телом, как раз равняется количеству движения, потерянного импульсом.

Перейдем теперь к более подробному рассмотрению количества движения. В своих „Новых исследованиях по электричеству и магнетизму“ („Recent Researches on Electricity and Magnetism“, <sup>1)</sup>) я подсчитал величину количества движения для любой точки электрического поля и показал, что, если  $N$  есть число фарадеевских трубок, проходящих сквозь единицу поверхности, перпендикулярной к их направлению,  $B$  — магнитная индукция,  $\Theta$  — угол между индукцией и фарадеевскими трубками, то количество движения, приходящееся на единицу объема, равно  $NB \sin \Theta$ , направление же его перпендикулярно к магнитной индукции и фарадеевским трубкам. <sup>2)</sup> Многие из вас заметят, что количество движения параллельно так называемому вектору Пойнтинга, направление которого совпадает с направлением распространения энергии в поле.

**Момент количества движения, произведенный наэлектризованной точкой и магнитным полюсом.**

Чтобы освоиться с распределением количества движения, рассмотрим детально несколько простых случаев. Начнем с простейшего, соответствующего наэлектризованной точке и магнитному полюсу; пусть  $A$  (рис. 7) будет точкой, а  $B$  — полюсом. Так как количество движения в какой-нибудь точке  $P$  перпендикулярно к  $AP$  — направлению фарадеевских трубок и к  $BP$  — магнитной

<sup>1)</sup> Первая часть первой главы этой книги приведена в настоящем издании (см. приложение IV).

<sup>2)</sup> См. приложение IV.



индукции, то количество движения будет перпендикулярно к плоскости  $ABP$ ; таким образом, если проведем серию линий, направление которых в каждой точке совпадает с направлением количества движения в той же точке, то эти линии образуют серию окружностей, плоскости которых перпендикулярны к прямой  $AB$ , а центры лежат на этой же прямой. Это распределение количества движения, поскольку дело идет о направлении, будет то самое, каким обладает волчок, вращающийся вокруг оси  $AB$ . Найдем теперь, чему эквивалентно такое распределение количества движения по всему полю.

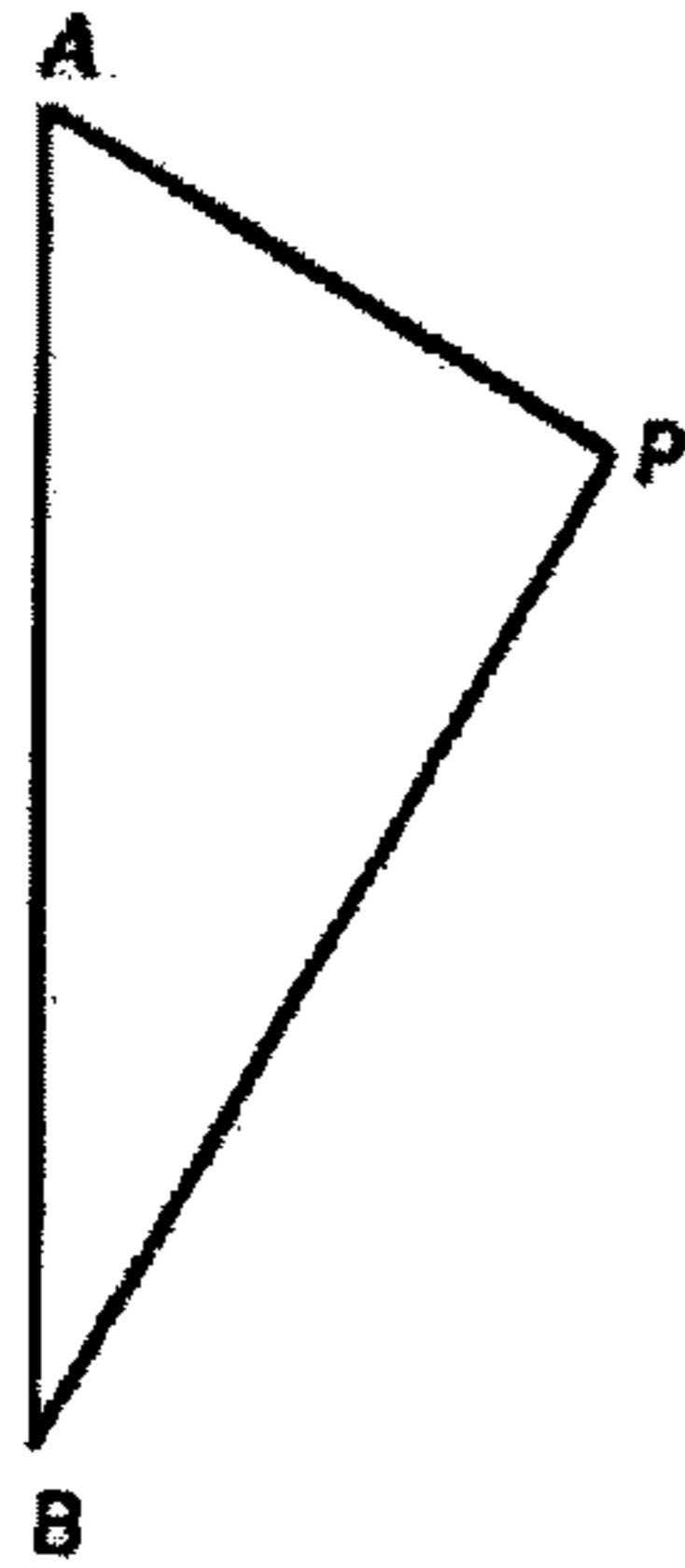


Рис. 7.

Очевидно, что результирующее количество движения в каком-либо направлении равно нулю, но так как система вращается вокруг оси  $AB$  и направление вращения везде одно и то же, то должен существовать конечный момент количества движения относительно оси  $AB$ . Подсчитывая его величину на основании выражения, данного выше для количества движения, мы получим для величины момента количества движения относительно оси  $AB$  очень простое выражение, а именно:  $em^1$ ) где  $e$

<sup>1)</sup> Вычисление момента количества движения в приведенном примере производится следующим образом. Поместим начало координат в точке  $A$  (см. рис. 7а). Количество движения в поле вблизи  $P$  будет  $\frac{e}{4\pi r^2} \frac{m}{R^2} \sin \theta$ . Момент этого количества относительно оси  $AB$  будет:  $\frac{e}{4\pi r^2} \frac{m}{R^2} \sin \theta \cdot r \sin \alpha$ . Элемент объема поля, охватывающий области, где момент одинаков, будет  $2\pi r \sin \theta r dx dr$ . Выражая  $\sin \theta$  через  $\sin \alpha$  на основании равенства  $\frac{\sin \theta}{a} = \frac{\sin \alpha}{R}$ , мы получаем:  $\frac{aem}{2} \frac{\sin^2 \alpha dx}{R^3} r dr$ , где  $\alpha$  изменяется от 0 до  $\pi$ , а  $r$  от 0 до  $\infty$ . Интегрирование можно осуществить следующим образом: вместо  $\alpha$  ввести переменное  $R$ , связанное с  $\alpha$  следующим соотношением:

$$R^2 = r^2 + a^2 + 2ar \cos \alpha \dots \dots \dots (1),$$

откуда для  $R$  получаем следующие пределы: от  $a+r$  до  $a-r$  или  $r-a$ , смотря по тому  $a > r$  или  $a < r$ . Заменяя  $\sin^2 \alpha = 1 - \frac{[R^2 - (a^2 + r^2)]^2}{4a^2 r^2}$  и  $\sin \alpha dx = -\frac{R dr}{ar}$ , мы получаем возможность выполнить интегрирование по  $R$  в указанных пределах,

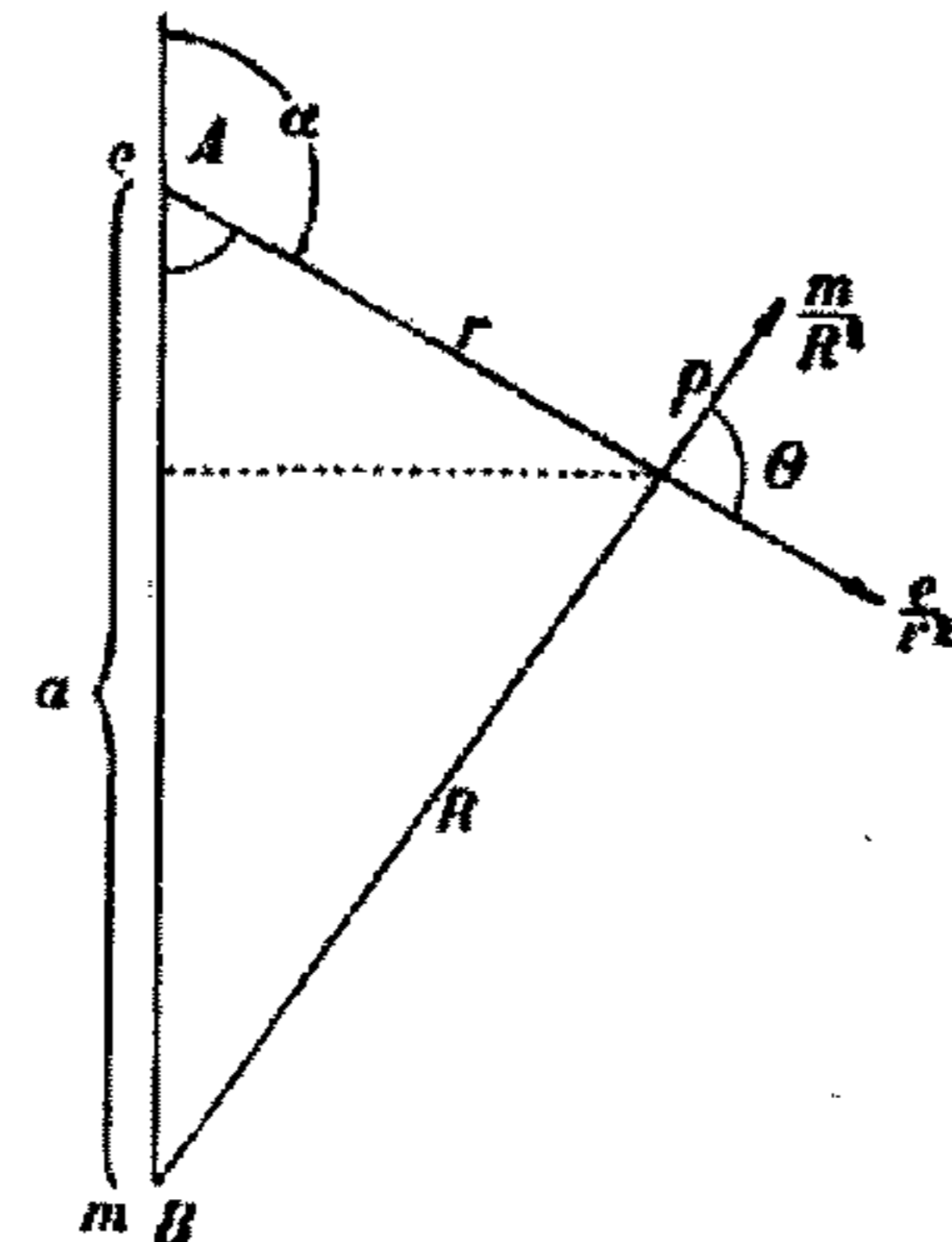


Рис. 7а.

есть заряд точки, а  $m$  — магнитная масса полюса. При помощи этого выражения мы можем сразу определить момент количества движения для любого распределения наэлектризованных точек и магнитных полюсов.

Вернемся снова к системе точки и полюса. Понятие о количестве движения системы приводит нас непосредственно к определению силы, действующей на движущийся электрический заряд или движущийся магнитный полюс. Для этого предположим, что за время  $\delta t$  наэлектризованная точка переместится из  $A$  в  $A'$ , момент количества движения будет попрежнему  $em$ , но осью его будет  $A'B$  вместо  $AB$ . Итак, момент количества движения поля изменился, но результирующий момент количества движения всей системы, охватывающей точку, полюс и поле, должен оставаться постоянным; поэтому изменение момента количества движения поля должно компенсироваться равным и противоположным изменением момента количества движения полюса и точки. Количество движения, приобретенное точкою, должно быть равно и противоположно количеству движения, приобретенному полюсом, так как полное количество движения равно нулю. Если  $\Theta$  есть угол  $ABA'$ , изменение момента количества движения будет  $em \sin \Theta$  с осью, перпендикулярной к  $AB$  и лежащей в плоскости рисунка. Пусть  $\delta J$  будет изменение количества движения в  $A$ , а  $-\delta J$  изменение в  $B$ , тогда  $\delta J$  и  $-\delta J$  должны быть эквивалентны такой паре, ось которой лежит в плоскости рисунка и перпендикулярна к  $AB$ , а момент равен  $em \sin \Theta$ . Таким образом,  $\delta J$  должно быть перпендикулярно к плоскости рисунка и

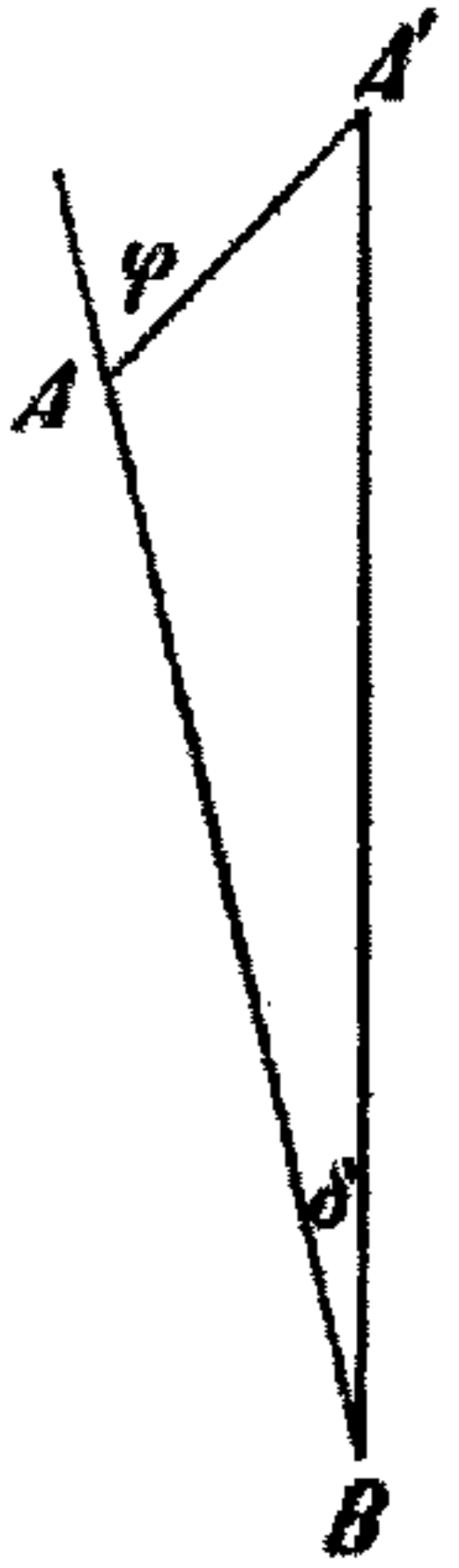


Рис. 8.

$$\delta J \cdot AB = em \sin \Theta = \frac{em AA' \sin \varphi}{AB}, \text{ где } \varphi \text{ есть угол } BAA'.$$

Если  $v$  есть скорость точки  $A$ ,  $AA' = v \cdot \delta t$ , и мы получим:

$$\delta J = \frac{emv \sin \varphi \delta t}{AB^2}.$$

Изменение количества движения может быть рассматриваемо, как результат действия силы  $F$ , перпендикулярной к плоскости рисунка

разбивая интеграл на две части от  $a+r$  до  $a-r$  и от  $a+r$  до  $r-a$ . Полученные выражения интегрируем еще раз по  $r$  в пределах от 0 до  $a$  в первом случае и от  $a$  до  $\infty$  во втором. Сумма полученных таким образом интегралов дает величину  $e \cdot m$ . (Прим. ред.)



и равной скорости возрастания количества движения, или  $\frac{\delta J}{\delta t}$ . Мы получим, таким образом,  $F = \frac{emv \sin \varphi}{AB}$ , т. е. точка  $A$  испытывает действие силы, равной  $e$ , умноженному на составляющую магнитной силы по направлению, перпендикулярному к направлению движения. Направление силы, действующей на точку, перпендикулярно к ее скорости и к магнитной силе. На магнитный полюс действует равная и противоположная сила.

Значение, которое мы нашли для  $F$ , есть обычное выражение для механической силы, действующей на заряженную частицу, дви-

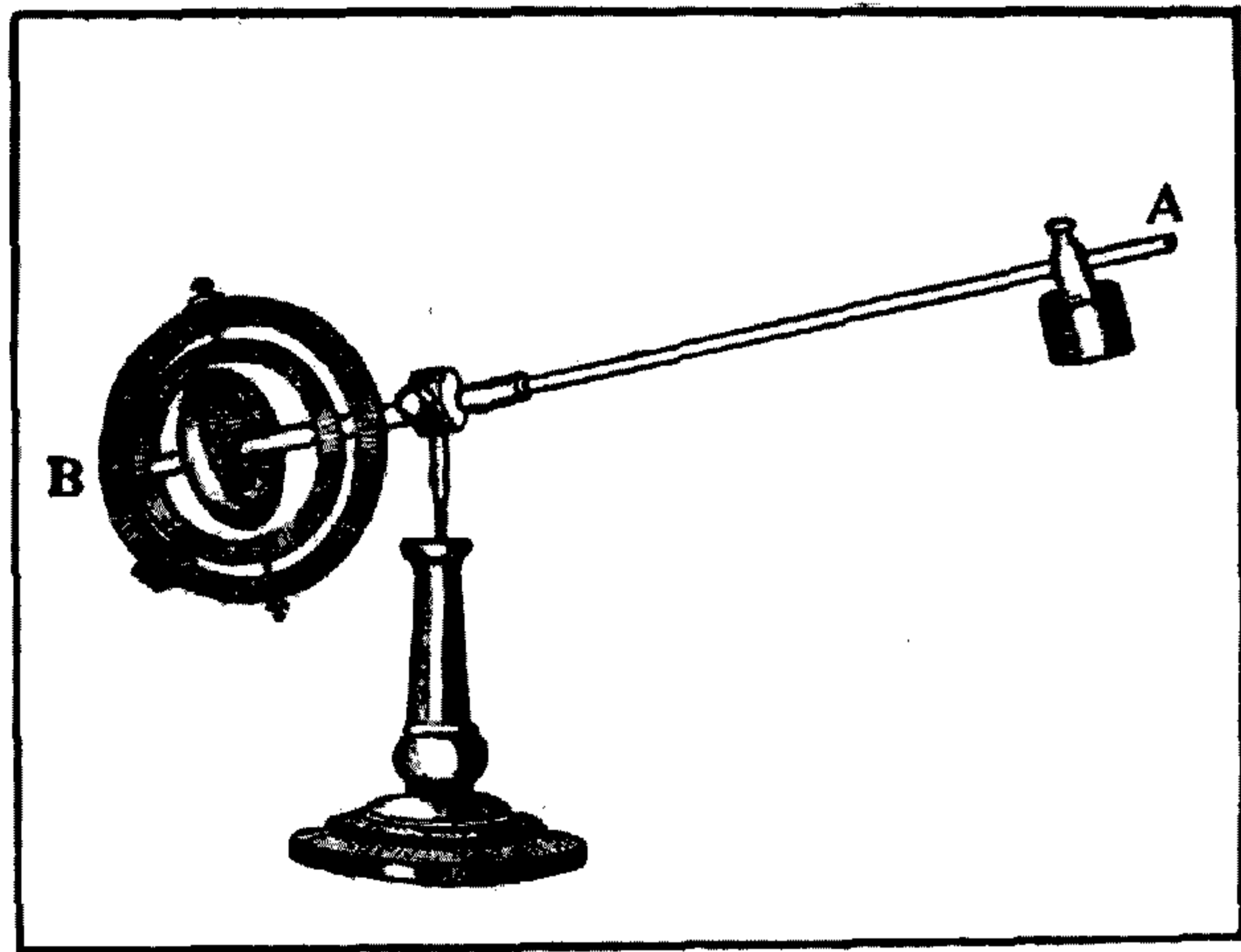


Рис. 9.

жущуюся в магнитном поле; оно может быть записано так:  $evH \sin \varphi$ , где  $H$  есть напряжение магнитного поля. Поэтому сила, действующая на единицу заряда, есть  $vH \sin \varphi$ . Таким образом, эту механическую силу можно считать происходящей от электрической силы  $vH \sin \varphi$ , и мы можем выразить результат, говоря, что, когда заряженное тело движется в магнитном поле, возникает электрическая сила  $vH \sin \varphi$ . Эта сила есть хорошо известная электродвижущая сила индукции, вызванная движением в магнитном поле.

Силы, о которых здесь идет речь, вызываются относительным движением точки и поля; если последние движутся с одной и той же скоростью, линия, их соединяющая, не изменит своего направления, момент количества движения системы останется неизменным, и поэтому не будет сил, действующих ни на точку ни на полюс.

Распределение количества движения в системе, состоящей из полюса и точки, подобно в некоторых отношениях распределению количества движения в волчке, вращающемся вокруг прямой  $AB$ . Мы можем иллюстрировать силы, действующие на движущееся наэлектризованное тело, при помощи такого волчка. Рис. 9 представляет уравновешенный гироскоп, вращающийся вокруг оси  $AB$ ; пусть груз в точке  $A$  изображает наэлектризованную точку, а груз в  $B$  — магнитный полюс. Предположим, что гироскоп вращается, когда ось  $AB$  горизонтальна; тогда, если я вертикально расположенной палочкой буду толкать  $AB$  в горизонтальном направлении, точка  $A$  будет двигаться не только горизонтально вперед в том направлении, в каком ее толкают, но будет двигаться вертикально вверх или вниз, совершенно так же, как это делала бы заряженная точка, толкаемая вперед в том же направлении и находящаяся под воздействием магнитного полюса в  $B$ .

#### Вектор-потенциал Максвелла.

Существует очень тесная связь между количеством движения, происходящим от наэлектризованной точки и магнитной системы, и вектором-потенциалом этой системы, величиной, играющей большую роль в максвелловской теории электричества. Из выражения, которое мы дали для момента количества движения, вызванного наэлектризованной точкой и магнитным полюсом, мы можем сразу найти момент количества движения, образованного зарядом электричества  $e$  в точке  $P$  и маленьким магнитом  $AB$ ; пусть отрицательный полюс магнита будет в  $A$ , положительный — в  $B$ , и пусть  $m$  — магнитная масса каждого полюса. Простое вычисление показывает, что в этом случае ось результирующего момента количества движения находится в плоскости  $PAB$  и перпендикулярна к  $PO$ , где  $O$  — середина  $AB$ , и что величина момента количества движения равна  $e \cdot m \cdot AB \frac{\sin \varphi}{OP}$  <sup>1)</sup>, где  $\varphi$  есть угол, образованный прямыми  $AB$  и

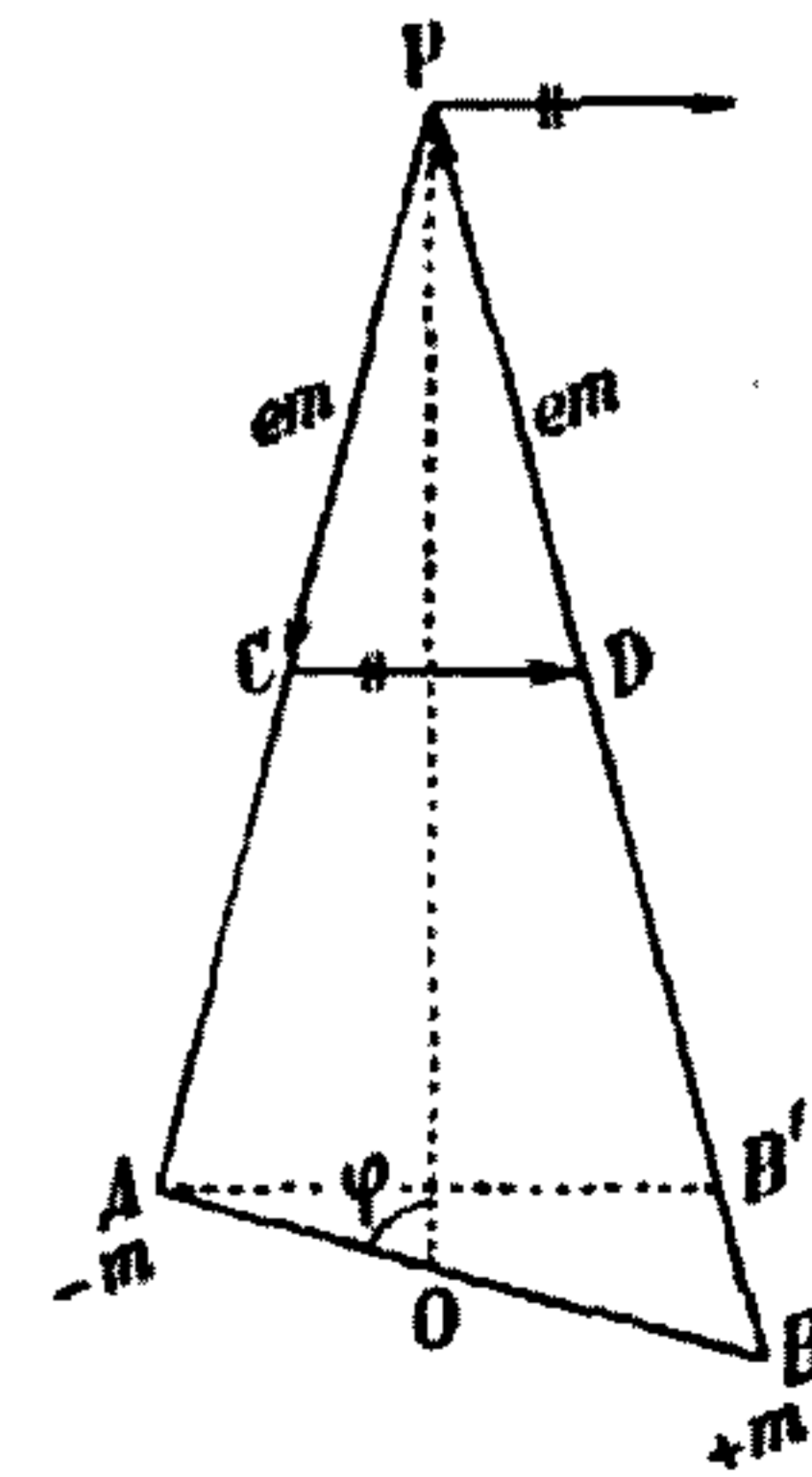


Рис. 9а.

<sup>1)</sup> По только-что доказанному, момент количества движения в поле бесконечно-малого магнита  $AB$  (см. рис. 9а) и заряда  $e$  в точке  $P$  получится как геометрическая сумма векторов  $PC$  и  $DP$ , численно равных  $em$ . Так как  $AB$  мало, то из подобных равнобедренных



$OP$ . Этот момент количества движения эквивалентен по направлению и величине моменту, вызванному количеством движения  $e \cdot m \cdot AB \frac{\sin \varphi}{OP^2}$  в точке  $P$ , направленным перпендикулярно к плоскости  $PAB$  и равным по величине, но противоположным по направлению количеству движения в точке  $O$ . Вектор  $emAB \frac{\sin \varphi}{OP^2}$  в точке  $P$ , перпендикулярный к плоскости  $PAB$ , есть вектор, названный Максвеллом вектором-потенциалом в точке  $P$ , образованным магнитом.

Обозначая этот вектор-потенциал через  $J$ , мы видим, что количество движения, вызванное зарядом и магнитом, эквивалентно количеству движения  $eJ$  в точке  $P$  и количеству движения  $-eJ$  в магните.

Мы можем, очевидно, распространить найденный результат на любую сложную систему магнитов, так что если  $J$  есть вектор-потенциал в точке  $P$ , то количество движения во всем поле эквивалентно количеству движения  $eJ$  в точке  $P$  вместе с количеством движения каждого магнита, равным  $-e$ , умноженным на вектор-потенциал в точке  $P$ , вызванный этим магнитом. Если магнитное поле образовано только электрическими токами вместо постоянных магнитов, количество движения системы, состоящей из одной наэлектризованной точки и токов, будет в некоторых отношениях отличаться от количества движения для случая, когда магнитное поле образовано постоянными магнитами. В последнем случае, как мы видели, имеется момент количества движения, но нет результирующего количества движения. Если же, однако, магнитное поле создано только электрическими токами, то легко показать, что существует результирующее количество движения, но момент количества движения относительно какой-нибудь прямой, проходящей через наэлектризованную точку, исчезает. Простой подсчет показывает, что полное количество движения в поле эквивалентно количеству движения  $eJ$  в наэлектризованной точке, при чем  $J$  — вектор-потенциал, созданный токами в точке  $P$ .

Итак, будет ли магнитное поле создано постоянными магнитами, или электрическими токами или частично тем, частично другим, — все

треугольников  $CPD$  и  $APB'$  имеем:  $\frac{CD}{AB'} = \frac{em}{PO}$ , так как, вследствие малости  $AB$ ,  $AP$  можно заменить через  $PO$ ;  $CD = \frac{em AB \sin \varphi}{OP}$ , этот момент можно рассматривать как количества движения  $\frac{em AB \sin \varphi}{PO^2}$ , приложенные в  $P$  и в  $O$  перпендикулярно к плоскости  $APB$  при плече в  $PO$ . (Прим. ред.)

равно количество движения, если наэлектризованная точка помещена в точку  $P$  поля, эквивалентно количеству движения  $eJ$  в точке  $P$ , где  $J$  есть вектор-потенциал в точке  $P$ . Если магнитное поле образовано только токами, это есть полное выражение количества движения в поле; если же магнитное поле отчасти создано магнитами, то к количеству движения в  $P$  надо добавить другие количества движения в магнитах; величина количества движения в каждом отдельном магните есть  $-e$ , умноженное на вектор-потенциал в точке  $P$ , созданный этим магнитом.

Хорошо известные выражения электродвижущей силы электромагнитной индукции сразу получаются из этого результата. На основании третьего закона движения, количество движения всякой замкнутой системы должно оставаться постоянным. Количество движения состоит из: (1) количества движения в поле, (2) количества движения наэлектризованной точки и (3) количества движения магнитов или токов.

Так как (1) эквивалентно количеству движения  $eJ$  в наэлектризованной частице, мы видим, что изменения количества движения поля должны компенсироваться изменениями количества движения частицы. Пусть  $M$  — масса наэлектризованной частицы,  $u, v, w$  — составляющие ее скорости, параллельные осям  $x, y, z$ ;  $F, G, H$  — составляющие вектора-потенциала в точке  $P$ , параллельные тем же осям; тогда количество движения поля эквивалентно количеству движения  $eF, eG, eH$  в точке  $P$ , параллельным осям  $x, y, z$ , а количество движения заряженной частицы в точке  $P$  имеет своими составляющими  $Mu, Mv, Mw$ . Так как количество движения остается постоянным,  $Mu + eF$  тоже постоянно; поэтому, если  $\delta u$  и  $\delta F$  — одновременные изменения  $u$  и  $F$ , то

$$M\delta u + e\delta F = 0 \text{ или } M \frac{du}{dt} = -e \frac{dF}{dt}.$$

Из этого уравнения мы видим, что заряженная точка ведет себя так, как если бы она подвергалась действию механической силы, параллельной оси  $x$  и равной  $-e \frac{dF}{dt}$ , т. е. электрической силы, равной  $-\frac{dF}{dt}$ . Тем же путем мы убедимся, что существуют электрические силы  $-\frac{dG}{dt}, -\frac{dH}{dt}$ , соответственно параллельные осям  $y$  и  $z$ . Это есть хорошо известные силы, созданные электромагнитной индукцией, и мы видим, что они представляют прямое следствие принципа: действие и противодействие равны и противоположны.



Читатели „Экспериментальных исследований“ Фарадея припомнят, что он постоянно ссылается на то, что было им названо „электротоническим состоянием“; так, он смотрит на проволоку, по которой идет ток, как на находящуюся в электротоническом состоянии, если она помещена в магнитном поле. Никаких следов этого состояния нельзя открыть, пока поле остается постоянным; оно обнаруживается только при изменениях поля.

Это электротоническое состояние Фарадея и есть как раз количество движения, существующее в поле.

## ГЛАВА II.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ И СВЯЗАННАЯ МАССА.

В этой главе я хочу рассмотреть связь между количеством движения в электрическом поле и фарадеевскими трубками, посредством которых, как я сказал в последней лекции, мы можем представить себе состояние такого поля.

Рассмотрим сначала случай заряженной сферы, находящейся в движении.

Линии электрической силы направлены по радиусам; линии магнитной силы будут окружностями, для которых линия движения центра сферы будет служить общей осью, количество движения в точке  $P$  перпендикулярно к этим направлениям и, таким образом, перпендикулярно к  $OP$  и лежит в плоскости, содержащей точку  $P$  и траекторию центра сферы. Если  $N$  есть число фарадеевских трубок, проходящих через единицу площади в  $P$ , проведенной перпендикулярно к  $OP$ ,  $\mu$  — магнитная проницаемость среды, окружающей сферу, то магнитная индукция в  $P$  будет  $4\pi\mu Nv \sin \theta$ , где  $v$  — скорость движения сферы,  $\theta$  — угол, который  $OP$  образует с направлением движения сферы. По правилу, данному на стр. 23, количество движения в единице объема среды в  $P$  есть  $N \times 4\pi\mu Nv \sin \theta$  или  $4\pi\mu N^2 v \sin \theta$  и имеет направление составляющей скорости фарадеевских трубок, перпендикулярной к их длине. Это есть в точности то количество движения, которое появилось бы, если бы трубки, двигаясь под прямым углом к своей длине, увлекали с собой из окружающей среды массу, равную  $4\pi\mu N^2$  на единицу объема, причем сами трубки совсем бы не обладали массой и не увлекали бы с собой массы из среды, когда они скользят параллельно своей

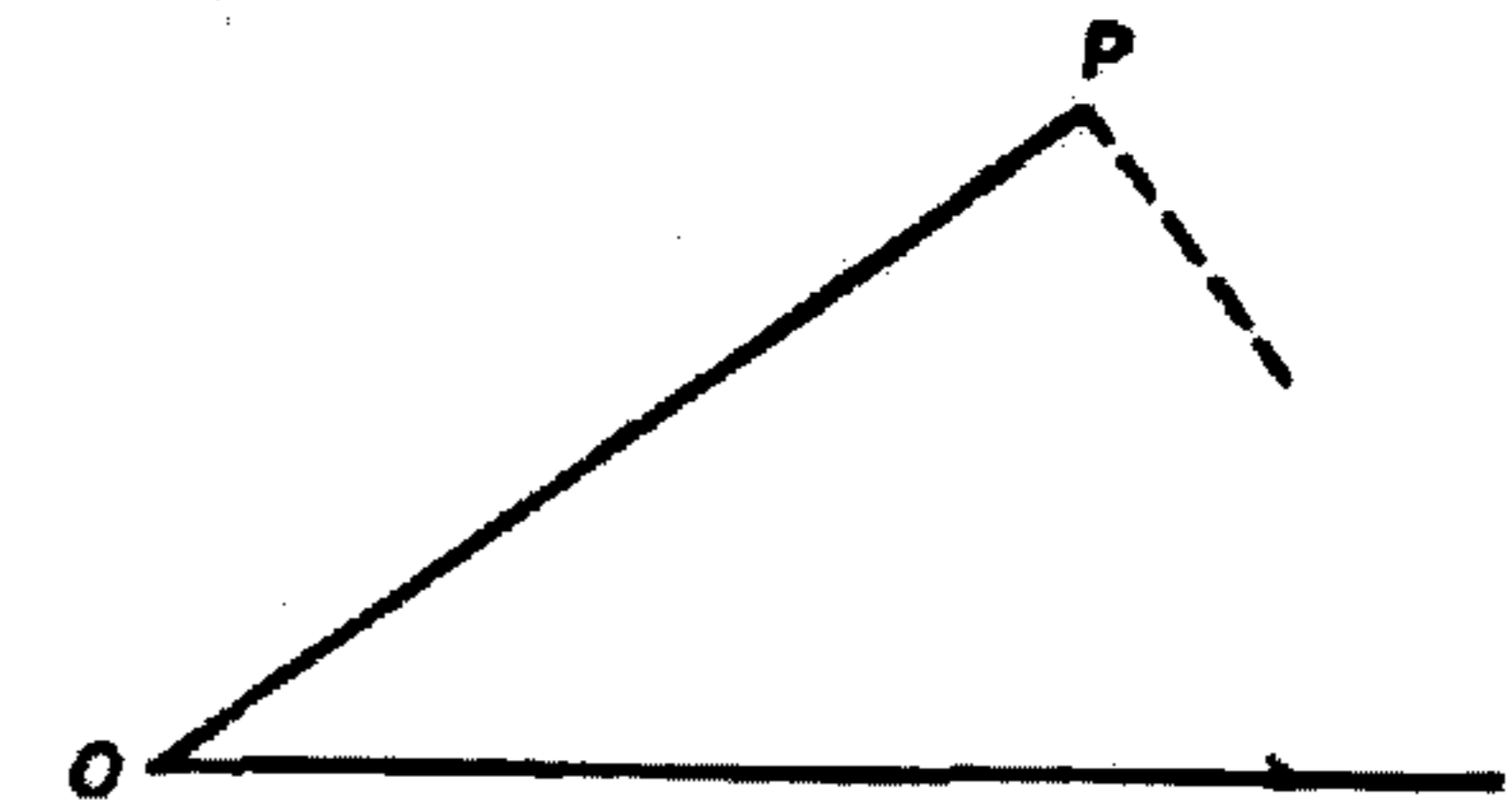


Рис. 10.



длине. Предположим, в самом деле, что трубки ведут себя приблизительно так же, как длинные, узкие цилиндры, движущиеся в воде; последние, двигаясь концами вперед, т. е. параллельно своей длине, увлекают очень малое количество воды, тогда как при боковом движении, т. е. перпендикулярно оси, каждая единица длины трубки увлекает с собою некоторую конечную массу воды. Когда длина цилиндра очень велика сравнительно с его шириной, то можно массой воды, увлекаемой им при движении концом вперед, пренебречь в сравнении с той, которая увлекается им при движении в сторону. Если трубка не имеет другой массы, кроме той, которую она получает вследствие смещения воды, то она будет иметь массу только при движении в сторону но не при движении концом вперед.

Назовем массу  $4\pi\mu N^2$ , увлекаемую трубками в единице объема, массой связанного эфира. Следует отметить тот факт, что электростатическая энергия  $E$  в единице объема пропорциональна  $M$  — массе связанного эфира в этом объеме. Это может быть легко доказано следующим образом:  $E = \frac{2\pi N^2}{K}$ , где  $K$  — диэлектрическая постоянная среды; так как  $M = 4\pi\mu N^2$ , то

$$E = \frac{1}{2} \frac{M}{\mu K};$$

но  $\frac{1}{\mu K} = V^2$ , где  $V$  скорость распространения света в рассматриваемой среде, поэтому

$$E = \frac{1}{2} MV^2; \quad 1)$$

таким образом,  $E$  равно кинетической энергии, которую обладает связанная масса, движущаяся со скоростью света.

Масса связанного эфира в единице объема равна  $4\pi\mu N^2$ , где  $N$  — число фарадеевских трубок, поэтому величина связанной массы, приходящейся на единицу длины каждой фарадеевской трубки, равна  $4\pi\mu N$ . Мы видели, что эта величина пропорциональна напряжению в каждой трубке, так что можем рассматривать фарадеевские трубки, как туго натянутые волокна с переменными массами и натяжениями, при чем натяжение везде пропорционально массе единицы длины волокна.

<sup>1)</sup> Получается формула, связывающая электрическую энергию  $E$  со скоростью света. Эта формула обычно приписывается Эйнштейну, который, однако, дал ее значительно позже. (Прим. ред.)

Так как масса эфира, захватываемого фарадеевской трубкой, пропорциональна  $N$ , числу фарадеевских трубок в единице объема, то отсюда видно, что масса и количество движения фарадеевской трубки зависят не только от очертания и скорости рассматриваемой трубки, но и от числа и скорости соседних фарадеевских трубок. Мы имеем некоторые аналогии этому в динамических системах; напр., в случае движения в несжимаемой жидкости нескольких близко расположенных цилиндров с параллельными осями, количество движения какого-нибудь цилиндра зависит от положения и скоростей соседних цилиндров. Следующая гидродинамическая система может послужить для иллюстрации того факта, что связанная масса пропорциональна квадрату числа фарадеевских трубок в единице объема.

Предположим, что у нас имеется цилиндрический вихревой столб силы  $m$ , помещенный в массу жидкости, скорость которой, если бы она не нарушалась вихревым столбом, оставалась бы постоянной по

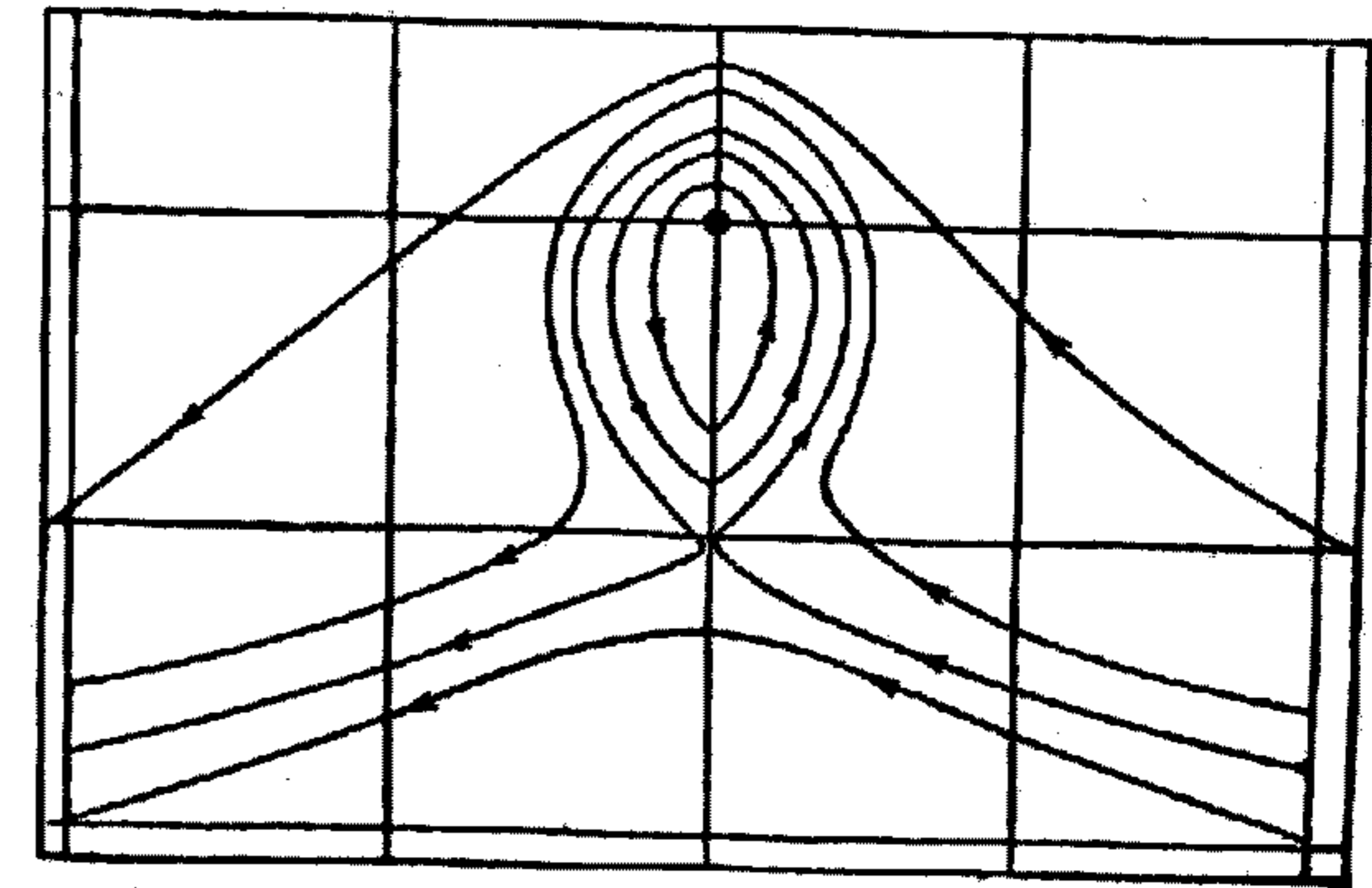


Рис. 11.

величине и направлению и перпендикулярной к оси вихревого столба.

Линии потоков для этого случая представлены на рис. 11, где  $A$  есть сечение вихревого столба, ось которого предполагается перпендикулярной к плоскости рисунка. Мы видим, что некоторые из этих линий в соседстве со столбом представляют замкнутые кривые. Так как линии потоков в жидкости не пересекаются, то жидкость, заключенная внутри замкнутой кривой, будет всегда оставаться в соседстве со столбом и вместе с ним перемещаться. Таким образом, столб увлечет с собою массу жидкости, равную массе, находящейся в самой большой из замкнутых линий потоков. Если  $m$  будет сила вихревого столба,  $a$  — скорость ненарушаемого вихрем течения жидкости, то можно легко показать, что масса увлекаемой столбом жидкости пропорциональна  $\frac{m^2}{a^2}$ . Таким образом, если будем считать  $m$  пропорциональным числу фарадеевских трубок в единице объема, эта система будет нам иллюстрировать связь, существующую между силой электрического поля и связанной массой.



## Влияние скорости на связанную массу.

Я рассмотрю теперь другое следствие, вытекающее из той идеи, что масса заряженной частицы обязана своим происхождением массе эфира, заключенного в фарадеевских трубках, связанных с зарядом. Когда эти трубки движутся нормально к своей длине, они увлекают с собою определенное количество эфира, сквозь который они движутся; когда же они перемещаются параллельно своей длине, они скользят сквозь эфир, не приводя его в движение. Рассмотрим теперь, как ведет себя схожий по форме с фарадеевской трубкой длинный и тонкий цилиндр, при движении в жидкости.

Такое тело, свободно поворачивающееся в любом направлении, не будет, как можно было бы ожидать с первого взгляда, перемещаться концом вперед, но наклоняется к направлению движения, при чем наклоняется так, чтобы увлечь с собою насколько возможно больше той жидкости, сквозь которую движется. Можно было бы привести не одно явление, иллюстрирующее этот принцип; одно из наиболее доступных — падение листьев: они не падают на землю краем вперед, но плавно спускаются вниз, сохраняя свою плоскость более или менее горизонтальной.

Если применим этот принцип к заряженной сфере, то увидим, что фарадеевские трубки, связанные со сферою, стремятся расположиться перпендикулярно к направлению движения сферы, так что, если бы приходилось считаться только с этим принципом, то все фарадеевские трубки оказались бы сосредоточенными в экваториальной плоскости, т. е. плоскости, перпендикулярной к направлению движения сферы, так как при таком положении они все будут перемещаться перпендикулярно к своей длине. Мы должны, однако, вспомнить, что фарадеевские трубки взаимно отталкиваются, так что, если бы они все столпились в экваториальной плоскости, давление там было бы больше, чем у полюса. Это отбросит фарадеевские трубки назад в то положение, при котором они были равномерно распределены вокруг сферы. Действительное распределение фарадеевских трубок представляет компромисс между этими крайними случаями. Они не столпятся все в экваториальной плоскости и не распределятся равномерно, но в экваториальной области их будет больше, чем в других, при этом плотность их в экваториальной области возрастает вместе со скоростью движения заряда. Когда фарадеевская трубка расположена в экваториальной области, она захватывает с собою больше эфира чем тогда, когда она находится

вблизи полюса; поэтому смещение фарадеевских трубок от полюса к экватору увеличивает общее количество увлекаемого трубками эфира, а следовательно, и массу тела.

Было доказано (см. Heaviside, Phil. Mag., April, 1889, „Recent Researches“, стр. 19), что в результате движения сферы каждая фарадеевская трубка смещается по направлению к экваториальной плоскости, т. е. плоскости, проходящей через центр сферы и перпендикулярной к направлению движения. При этом смещение происходит таким образом, чтобы проекция трубки на эту плоскость оставалась такою же, как при равномерном распределении трубок, а расстояние каждой точки трубки от экваториальной плоскости уменьшалось в отношении  $\sqrt{V^2 - v^2}$  к  $V$ , где  $V$  — скорость распространения света в среде, а  $v$  — скорость движения заряженного тела.

Этот результат показывает, что только в том случае изменение в распределении фарадеевских трубок, вызванное движением тела, делается заметным, когда скорость заряженного тела сравнима со скоростью света.

В „Recent Researches on Electricity and Magnetism“, стр. 21, я подсчитал количество движения  $J$  в пространстве, окружающем сферу радиуса  $a$ , центр которой находится на движущемся заряженном теле, и показал, что значение  $J$  дается следующим выражением:

$$J = \frac{e^2}{2a} \frac{V^2}{(V^2 - v^2)^{3/2}} \left\{ \Theta \left( 1 - \frac{1}{4} \frac{V^2}{v^2} \right) + \frac{1}{2} \sin 2\Theta \left( 1 + \frac{1}{4} \frac{V^2}{v^2} \cos 2\Theta \right) \right\} \quad (1),$$

где, как и раньше  $v$  и  $V$  суть соответственно скорость частицы и скорость света, угол  $\Theta$  определяется из уравнения

$$\sin \Theta = \frac{v}{V}.$$

Масса сферы вследствие заряда возрастает на  $\frac{J}{v}$ , и, таким образом, как показывает уравнение (1), для скоростей заряженного тела, сравнимых со скоростью света, масса тела возрастает вместе со скоростью.

Из уравнения (1) очевидно, что для того, чтобы обнаружить влияние скорости на массу, мы должны воспользоваться чрезвычайно маленькими частицами, движущимися с очень большими скоростями. Частицы, имеющие массу значительно меньшую, чем масса какого-либо известного нам атома или молекулы, вылетают из радия со скоростями, приближающимися в некоторых случаях к скорости



света; отношение электрического заряда к массе для частиц такого рода было недавно предметом исследования Кауфманна, результаты которого приведены в следующей таблице. В первом столбце находятся значения скоростей частицы, выраженные в сантиметрах в секунду, второй столбец содержит значения дроби  $\frac{e}{m}$ , где  $e$  — заряд, а  $m$  — масса частицы.

Таблица I

$v \times 10^{-10}$	$\frac{e}{m} \times 10^{-7}$
2,83	0,62
2,72	0,77
2,59	0,975
2,48	1,17
2,36	1,31.

Эти цифры показывают, что значение  $\frac{e}{m}$  уменьшается с возрастанием скорости; если предположим, что заряд остается неизменным, то это означает, что масса возрастает вместе со скоростью. Результаты опытов Кауфманна дают нам возможность сравнить ту часть массы, которая обусловлена электрическим зарядом, с той частью, которая не зависит от электризации; эта вторая часть массы не зависит от скорости. Если мы находим, что масса заметно изменяется со скоростью, мы заключаем, что часть массы, обязанная своим происхождением заряду, должна быть значительной по сравнению с той, которая не зависит от заряда. Чтобы подсчитать влияние скорости на массу электрической системы, мы должны сделать некоторые предположения относительно природы этой системы, так как влияние на заряженную сферу, например, не то же самое, что на заряженный эллипсоид; но, сделав эти предположения и вычислив теоретически влияние скорости на массу, легко найти отношение той части массы, которая не зависит от заряда, к той части, которая при некоторой скорости, зависит от заряда. Положим, что часть массы, созданная электризацией, при скорости  $v$  равна  $m_0 f(v)$ , где  $f(v)$  есть известная функция  $v$ ; тогда если  $M_v$ ,  $M_{v_1}$  представляют наблюдаемые массы соответственно при скоростях  $v$  и  $v_1$ , а  $M$  есть часть массы, не зависящая от заряда, получим два уравнения:

$$M_v = M + m_0 f(v)$$

$$M_{v_1} = M + m_0 f(v_1),$$

из которых можно определить  $M$  и  $m_0$ . Сделав предположение, что заряженное тело ведет себя как металлическая сфера, для которой

распределение силовых линий при движении было определено Сирлом (G. F. C. Searle), Кауфманн пришел к заключению, что когда частица медленно движется, ее „электрическая масса“ составляет приблизительно четвертую часть всей массы. Он настоятельно указывает, что эта дробь зависит от тех предположений, которые мы делаем относительно природы движущегося тела, например, будет ли оно сферическим или эллипсоидальным, изолятором или проводником, и что при других предположениях его опыты могли бы показать, что вся масса — электрическая, что он, очевидно, считал наиболее вероятным.

При современном состоянии наших знаний о строении материи, я не думаю, чтобы мы что-нибудь выиграли, приписывая маленьким, отрицательно заряженным частицам, выделяемым радием и другими телами, свойства металлической проводимости; я предпочитаю более простое предположение, что распределение силовых линий вокруг частицы то же самое, как у силовых линий заряженной точки, если только мы ограничим наше внимание полем, окружающим малую сферу радиуса  $a$ , имеющую центр в заряженной точке; при таком предположении часть массы, созданная зарядом, равна значению  $\frac{J}{v}$  в уравнении (1) на стр. 35. Я подсчитал из этого выражения отношение масс быстро движущихся частичек, испускаемых радием, к массе тех же частичек, пребывающих в покое или медленно движущихся, при том предположении, что вся масса создана зарядом, и сравнил эти результаты со значениями того же отношения, определенными на основании опытов Кауфманна. Эти результаты приведены в таблице (II), первый столбец которой содержит значение  $v$ , скорости частиц; второй —  $\rho$  — число, показывающее на основании уравнения (1), во сколько раз масса частицы, движущейся с этой скоростью, превосходит массу той же частицы, находящейся в покое; третий столбец —  $\rho_1$  — значения той же величины, найденные Кауфманном из его опытов.

Таблица II.

$v \times 10^{-10} \frac{cm}{sc}$	$\rho$	$\rho_1$
2,85	3,1	3,09
2,72	2,42	2,43
2,59	2,0	2,04
2,48	1,66	1,83
2,36	1,5	1,65



Эти результаты подтверждают тот взгляд, что вся масса наэлектризованных частичек происходит от их заряда.

Мы уже видели, что если рассматривать фарадеевские трубки, связанные с этими движущимися частицами, как обусловленные движущейся заряженной точкой, и ограничить свое внимание той частью поля, которая находится вне сферы радиуса  $a$ , концентричной с зарядом, то в случае медленного движения частицы масса  $m$ , обусловленная зарядом  $e$  на частице, определяется из уравнения:

$$m = \frac{2}{3} \frac{\mu e^2}{a}.$$

В одной из следующих лекций я объясню, как определяются значения  $m$  и  $e$ ; результаты этих определений таковы:  $\frac{m}{e} = 10^{-7}$  и  $e = 1,2 \times 10^{-20}$  в *C.G.S* электростатических единицах. Подставляя эти значения в выражение для  $m$ , мы находим, что  $a$  равно приблизительно  $5 \times 10^{-14}$  см, длина очень маленькая в сравнении с величиной  $10^{-8}$  см, которая обыкновенно берется, как хорошее приближение к размеру молекулы.

Мы рассматривали массу в данном случае как массу эфира, увлекаемого фарадеевскими трубками, связанными с зарядом. Так как трубки простираются на бесконечное расстояние, масса частицы как бы рассеяна во всем пространстве и не имеет определенных границ. Однако, благодаря тому, что частица имеет очень малые размеры, а масса эфира, увлекаемого трубками, будучи пропорциональна квадрату плотности фарадеевских трубок, изменяется обратно пропорционально четвертой степени расстояния от частицы, мы простым вычислением находим, что вся масса, за исключением очень незначительной части, находится на конечном расстоянии от частицы, которое в действительности очень мало сравнительно с теми размерами, которые обычно приписывают атомам.

В любой системе, содержащей наэлектризованные тела, часть массы состоит из массы эфира, увлекаемого фарадеевскими трубками, связанными с электризацией. Согласно одному из взглядов на строение материи, который я надеюсь развить в одной из последующих лекций, атомы различных элементов представляют совокупности положительных и отрицательных зарядов, удерживающихся вместе, главным образом, электрическими притяжениями; кроме того, отрицательно заряженные частицы в атоме (я назвал их корпускулами) идентичны с теми маленькими отрицательно заряженными частицами, свойства которых мы исследовали. С этой точки зрения на строение

материи, часть массы какого-нибудь тела представляет собою массу эфира, увлекаемого фарадеевскими трубками, пронизывающими атом между его положительными и отрицательными элементами. Взгляд, который я хочу перед вами развить, состоит в том, что не только часть массы какого-либо тела происходит таким путем, но что *вся* масса любого тела есть как раз масса эфира, окружающего тело и увлекаемого фарадеевскими трубками, связанными с атомами тела. Одним словом, вся масса есть масса эфира, всякое количество движения есть количество движения эфира, всякая кинетическая энергия есть кинетическая энергия эфира. Надо сказать, что этот взгляд требует, чтобы плотность эфира была неизмеримо больше, чем плотность любого известного нам вещества. <sup>1)</sup>

Можно возразить, что, так как масса увлекается фарадеевскими трубками и так как расположение последних зависит от относительного положения наэлектризованных тел, то масса какой-нибудь совокупности положительно и отрицательно наэлектризованных тел постоянно менялась бы с положением этих тел и, таким образом вместо того, чтобы быть, как показывают наблюдения и опыты, постоянной с очень высокой степенью приближения, масса должна была бы меняться вместе с изменениями в физическом и химическом состоянии тела.

Однако, эти возражения не применимы к такому случаю, который рассматривался вышеизложенной теорией, где размеры одной группы наэлектризованных тел — отрицательных — чрезвычайно малы сравнительно с расстояниями, разделяющими различные члены системы наэлектризованных тел. В этом случае концентрация силовых линий на маленьких отрицательных телах — корпускулах — так велика, что практически весь связанный эфир расположен, вокруг этих тел, и количество его зависит от их объема и заряда. <sup>2)</sup> Таким образом, если мы только не меняем числа или характера корпускул, изменения массы, происходящие вследствие какого-либо изменения в их относительном положении, будут совершенно незначительны в сравнении с массой тела.

<sup>1)</sup> Этот взгляд приводит нас к единству электричества, материи и эфира.  
(Прим. ред.)

<sup>2)</sup> Изменения массы, повидимому, достигают заметных величин при построении ядра атома из «протонов» и «электронов». Так, например, четыре протона + два электрона, образующие ядро гелия, имеют массу = 4, тогда как «протон» или ядро атома водорода имеет массу 1,008.

(Прим. ред.)



ГЛАВА III.

РЕЗУЛЬТАТЫ УСКОРЕНИЯ ФАРАДЕЕВСКИХ ТРУБОК.

Лучи Рентгена и свет.

Мы рассмотрели, как ведут себя силовые линии, когда они находятся в покое или в равномерном движении; в этой главе мы рассмотрим те явления, которые получаются в результате неравномерного движения.

Начнем со случая движущейся заряженной точки, движущейся так медленно, что силовые линии вокруг нее распределены равномерно, и посмотрим, что должно случиться, если мы внезапно остановим точку. Фарадеевские трубки, соединенные со сферой, обладают инерцией; они находятся также в состоянии натяжения, при чем натяжение в какой-либо точке пропорционально массе единицы длины. Поэтому любое возмущение, сообщенное одному концу трубки, пройдет вдоль нее с постоянной и конечной скоростью; действительно,

фарадеевская трубка представляет замечательную аналогию с натянутой струной. Положим, что имеем туго натянутую вертикальную струну, движущуюся равномерно справа налево; когда мы внезапно остановим этот конец, напр., *A*, что случится со струной? Конец *A* сразу придет в состояние покоя, но силы, при этом обнаруживающиеся, распространяются с ко-

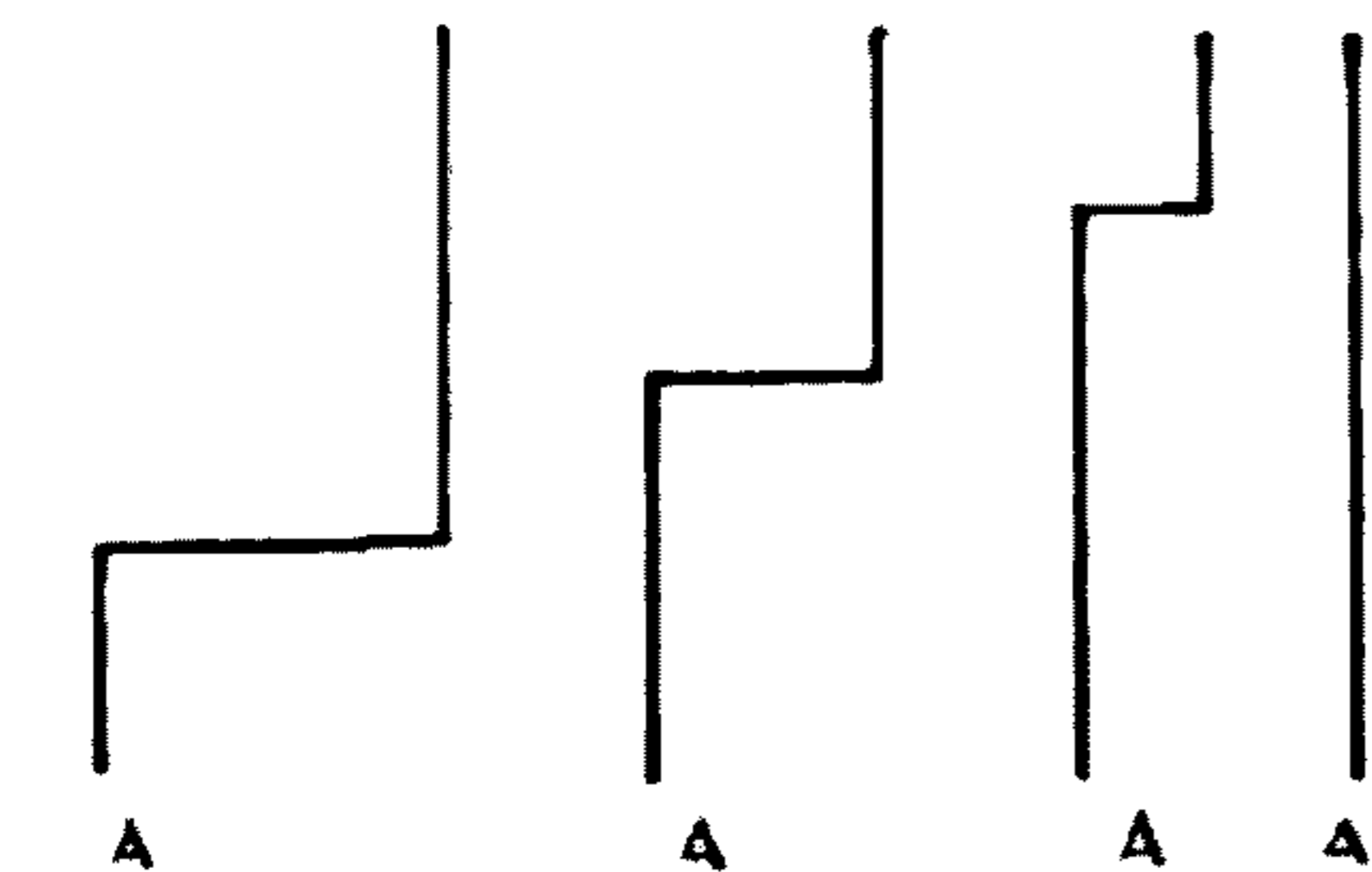


Рис. 12.

нечной скоростью, и каждая часть струны будет по инерции двигаться, как будто ничего не случилось с концом *A*, до тех пор, пока возмущение, выходящее из точки *A*, не достигнет ее. Итак, если *V* есть скорость, с которой возмущение перемещается вдоль струны, а *t* есть время, которое протекло после остановки *A*, то части струны, находящиеся от *A* на расстояниях больших, чем *Vt*, не по-

чувствуют остановки и будут иметь те же скорости и положения, какие они имели бы, если бы струна продолжала равномерно двигаться вперед. Форма струны через последовательные промежутки времени показана на рис. 12; длина горизонтальной части убывает по мере увеличения расстояния от неподвижного конца.

Возвратимся теперь к тому случаю, когда движущаяся заряженная частица внезапно останавливается, при чем на остановку тратится время  $\tau$ . Чтобы найти конфигурацию фарадеевских трубок после того, как от начала процесса остановки заряженной частицы прошло время *t*, опишем из заряженной частицы, как из центра, две сферы, одну радиусом *Vt*, другую — радиусом *V(t — τ)*; так как возмущение еще не достигло тех частей фарадеевских трубок, которые расположены вне нашей внешней сферы, то эти трубки будут в том же положении, в каком они находились бы, если бы продолжали двигаться вперед с той скоростью, какой они обладали в момент остановки частицы, между тем как трубки, находящиеся внутри внутренней сферы, зай-

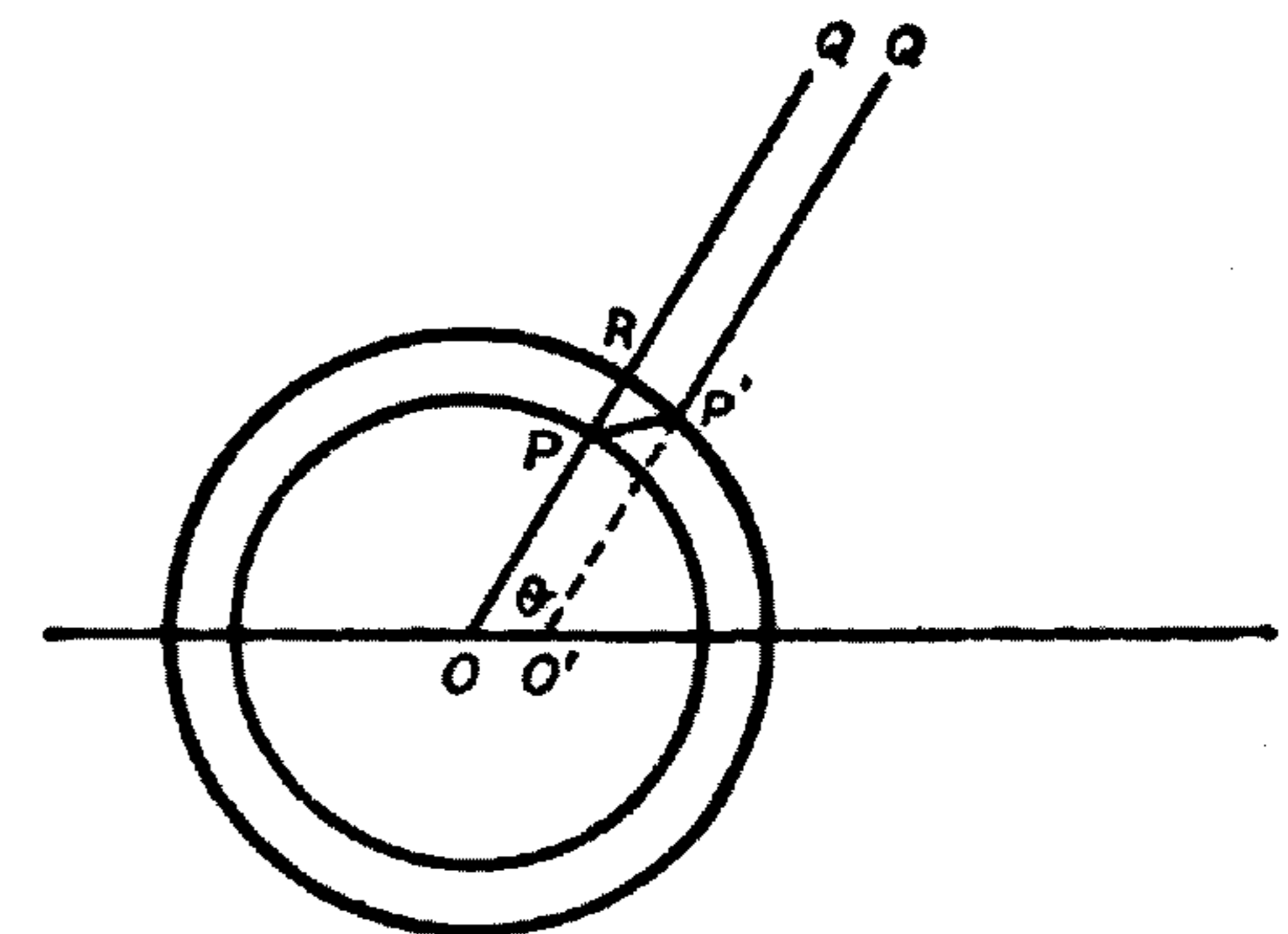


Рис. 13.

мут свое конечное положение, так как возмущение уже прошло через них. Так, рассмотрим трубку, которая была расположена вдоль линии *OPQ* (рис. 13), когда частица остановилась. Это будет конечным положением трубки, так как в момент *t* часть трубки в пространстве внутренней сферы займет положение *OP*, между тем как часть *P'Q'* вне внешней сферы будет в том положении, какое она занимала бы, если бы частица не остановилась, т. е. если *O'* есть положение, которое занимала бы частица, если бы она не остановилась. *P'Q'* будет прямой линией, проходящей через *O'*. Чтобы сохранить свою непрерывность, трубка должна изогнуться в промежутке между обеими сферами и примет поэтому форму *OPP'Q'*.

Таким образом, трубка, которая до остановки частицы была радиальной, имеет теперь в промежутке между сферами тангенциальную составляющую, обуславливающую тангенциальную электрическую силу. Остановка частицы вызывает радикальное изменение



в электрическом поле, созданном частицей и, как показывает ниже-следующее вычисление, вызывает электрические и магнитные силы более значительные чем те, которые существуют в поле, когда частица движется равномерно.

Если мы предположим, что толщина  $\delta$  промежутка так мала, что часть фарадеевской трубки внутри его может быть рассматриваема, как прямая, тогда, если  $T$  есть тангенциальная электрическая сила внутри волнового импульса,  $R$  — радиальная сила, будем иметь:

$$\frac{T}{R} = \frac{P'R}{PR} = \frac{OO' \sin \theta}{\delta} = \frac{vt \sin \theta}{\delta} \dots \dots (1).$$

Здесь  $v$  есть скорость, с которой частица движется до остановки,  $\theta$  — угол, который  $OP$  образует с направлением движения частицы,  $t$  — время, протекшее после остановки частицы; так как  $R = \frac{e}{OP^2}$  и  $OP = Vt$ , где  $V$  — скорость света, получим, если  $r = OP$ ,

$$T = \frac{ev \sin \theta}{V r^2} \dots \dots \dots (2)^1$$

Тангенциальная фарадеевская трубка, движущаяся вперед со скоростью  $V$ , вызывает в  $P$  магнитную силу  $H$ , равную  $VT$ ; эта сила будет перпендикулярна к плоскости чертежа и будет по направлению противоположна магнитной силе, существовавшей в  $P$  до остановки частицы; так как ее величина определяется уравнением

$$H = \frac{ev \sin \theta}{r^2},$$

то она превосходит магнитную силу  $\frac{eV \sin \theta}{r^2}$ , ранее существовавшую, в отношении  $r$  к  $\delta$ . Таким образом, волновой импульс, вызванный остановкою частицы, есть место действия интенсивных электрических и магнитных сил, которые изменяются обратно пропорционально расстоянию от заряженной частицы, тогда как силы, имевшие место до остановки частицы, изменялись обратно пропорционально квадрату расстояния; этот волновой импульс распространяется во вне со скоростью света и составляет, по моему мнению, рентгеновские лучи, которые появляются, когда отрицательно заряженные частицы из которых состоят катодные лучи, внезапно останавливаются, ударяясь о твердое препятствие.

<sup>1)</sup> Ур-ие (2) получается, если один из множителей  $r$  мы заменим величиной  $Vt$ , так как, по определению,  $r$  есть путь, пройденный светом за время  $t$ . (Прим. ред.)

Легко показать, что энергия, заключенная в волновом импульсе, равна

$$\frac{2}{3} \frac{e^2 v^2}{\delta}; ^1)$$

эта энергия излучается в пространство. Количество излучаемой энергии зависит от  $\delta$ , толщины волнового импульса, т. е. от быстроты, с которой остановилась частица; если частица остановилась мгновенно, вся энергия в поле поглотится волновым импульсом, будет излучена и во вне; если же она постепенно останавливалась, только часть энергии излучится в пространство, а остальная часть обратится в тепло в том месте, где катодные лучи остановились.

Легко показать, что количество движения в волне в какой-нибудь момент равно и противоположно количеству движения в поле вне волны; так как в пространстве, сквозь которое прошла волна, нет никакого количества движения, то полное количество движения в поле после остановки частицы равно нулю.

Предыдущие рассуждения приложимы только к тому случаю, когда частица движется так медленно, что фарадеевские трубки до остановки частицы равномерно распределены; однако, эти же принципы позволят нам определить результаты остановки заряженной частицы во всех тех случаях, когда задано распределение фарадеевских трубок при равномерном движении.

Возьмем, для примера, случай, когда частица вначале движется со скоростью света; правило, указанное на стр. 35, показывает, что до остановки фарадеевские трубки были все сгруппированы в экваториальной плоскости движущейся частицы. Чтобы найти конфигурацию фарадеевских трубок через промежуток времени  $t$ , мы, поступая так же, как раньше, находим конфигурацию трубок для этого момента, если бы частица не остановилась. Трубки в этом случае были бы расположены в плоскости на расстоянии  $Vt$  впереди частицы.

<sup>1)</sup> Электромагнитная энергия, отнесенная к единице объема в области  $P$ , выражается через  $u_e + u_m = \frac{1}{4\pi} \frac{e^2 v^2}{r^2 \delta^2} \sin^2 \theta$ . Чтобы вычислить всю энергию во всем волновом импульсе, надо это выражение умножить на элемент объема  $2\pi r \sin \theta r \delta \delta \delta$  (во всех точках этого объема  $\theta$  с точностью до бесконечно малых  $d\theta$  одно и то же), проинтегрировав по  $\theta$  от 0 до  $\pi$ . Получаем:

$$u_e + u_m = \frac{1}{2} \frac{e^2 v^2}{\delta} \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta = \frac{2}{3} \frac{e^2 v^2}{\delta}.$$

(Прим. ред.)



Проведем две сферы, центры которых в частице, а радиусы соответственно равны  $Vt$  и  $V(t-\tau)$ , где  $\tau$  есть время, затрачиваемое на остановку; за внешней сферой конфигурация трубок будет такая же, как если бы частица не остановилась, т. е. трубки будут в плоскости на расстоянии  $Vt$  впереди частицы; плоскость эта коснется внешней сферы. Внутри

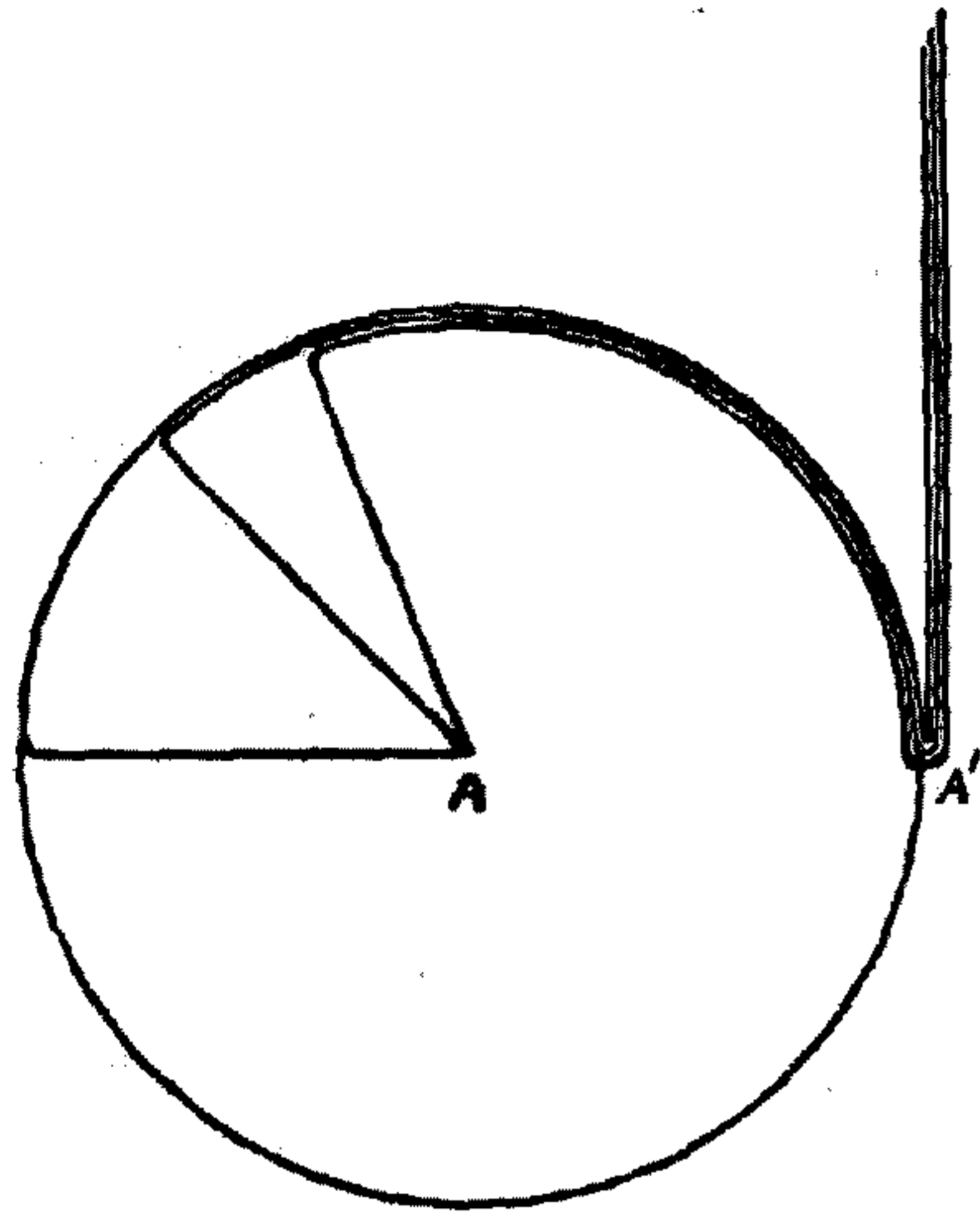


Рис. 14.

внутри внутренней сферы трубки будут равномерно распределены, поэтому для сохранения непрерывности трубки внутри промежутка между сферами должны изгибаться, как это показано на рис. 14; таким образом, мы имеем в этом случае две волны, одну — плоскую, распространяющуюся в том направлении, в каком частица двигалась до остановки, другую — сферическую, распространяющуюся во всех направлениях.

Преыдуший метод может быть приложен и к тому случаю, когда заряженная частица, вместо того,

чтобы остановиться, изменила каким-либо образом свою скорость; так, если скорость частицы, вместо того, чтобы дойти до нуля, уменьшается на  $\Delta v$ , то можно показать, как на стр. 42, что это вызовет волну, в которой магнитная сила  $H$  определяется уравнением

$$H = \frac{e \Delta v \sin \theta}{r \delta},$$

а тангенциальная электрическая сила  $T$  определяется уравнением

$$T = \frac{e \cdot \Delta v \cdot \sin \theta}{V \cdot r \cdot \delta}$$

Теперь, толщина волны  $\delta$  есть пространство, пройденное светом в продолжение того промежутка времени, в течение которого скорость частицы менялась; поэтому, если  $\Delta t$  есть время, нужное для того, чтобы вызвать изменение скорости  $\Delta v$ , то  $\delta = V \cdot \Delta t$  и потому имеем:

$$H = \frac{e}{V} \frac{\Delta v}{\Delta t} \cdot \frac{\sin \theta}{r}, \quad T = \frac{e}{V^2} \frac{\Delta v}{\Delta t} \cdot \frac{\sin \theta}{r};$$

но  $\frac{\Delta v}{\Delta t}$  равно  $-f$ , где  $f$  есть ускорение частицы, поэтому имеем:

$$H = \frac{-e}{V} f \frac{\sin \theta}{r}, \quad T = \frac{-e}{V^2} f \frac{\sin \theta}{r}.$$

Эти уравнения показывают, что заряженная частица с ускоренным движением вызывает волну электрических и магнитных сил, при чем силы изменяются обратно пропорционально расстоянию от частицы.

Отсюда следует, что если заставить заряженное тело вибрировать таким образом, чтобы его ускорение периодически изменялось, то от заряженного тела будут исходить периодические волны электрических и магнитных сил. Согласно электромагнитной теории света, эти волны должны быть световыми волнами, если только периодические изменения в ускорении заряженного тела происходят с достаточной быстротой.

Тот метод исследования, который мы употребляли для определения влияния изменений в движении тела на конфигурацию фарадеевских трубок, приводит нас к очень простому способу представления тех процессов, которые происходят при распространении световой волны в эфире. Мы рассматривали эти явления, как вызванные распространением поперечных колебаний вдоль туго натянутых фарадеевских трубок; таким образом, мы должны были усвоить те же взгляды на распространение света, какие были выработаны самим Фарадеем, как это показывают следующие выдержки из статьи „Thoughts on Ray Vibrations“ („Мысли о световых колебаниях“).

„Взгляд, который я так смело предлагаю, рассматривает излучения, как очень тонкий род колебаний силовых линий, которые, как известно, соединяют частицы с массами“.

Такой взгляд на свет, как на что-то, вызванное колебаниями туго натянутых фарадеевских трубок, возбуждает один вопрос, по моему, никем еще не отмеченный. Нельзя думать, что фарадеевские трубки, простирающиеся в эфире, всецело заполняют его. Надо скорее смотреть на них, как на отдельные нити, находящиеся в эфире и придающие последнему волокнистое строение; в таком случае с той точки зрения на световую волну, которую мы приняли, сама волна должна иметь известное строение, и фронт волны, вместо того, чтобы быть равномерно освещенным, должен был бы представлять серию светлых пятен на темном фоне, при чем светлые пятна соответствовали бы тем местам, где фарадеевские трубки перерезают фронт волны.



Такой взгляд на строение световой волны может объяснить одно явление, которое меня всегда поражало, как весьма замечательное и трудно согласуемое со взглядом, что световая волна или, скорее в данном случае, рентгеновский луч не имеет определенного строения. Мы видели, что способ распространения и строение рентгеновского луча те же, что и у световой волны; поэтому общие соображения относительно строения рентгеновских лучей могут быть применены и к световым волнам. Явление, о котором идет речь, следующее: рентгеновские лучи могут проходить довольно большие расстояния через газы, при этом прохождении они ионизируют газ, разбивая его молекулы на положительные и отрицательные ионы; число расщепленных таким образом молекул, даже для сильных лучей, составляет чрезвычайно малую часть, меньшую, чем одна миллиардная всех молекул газа. Теперь, если условия впереди волны однообразны, все молекулы газа находятся в одинаковых условиях; почему же расщепляется только такая их незначительная часть? Это можно объяснить тем, что расщепление происходит при наличии некоторого специального условия, например, если молекулы обладают количеством кинетической энергии, настолько превосходящим среднюю кинетическую энергию газовых молекул, что, согласно закону Максвелла о распределении кинетической энергии, их число должно быть чрезвычайно малым в сравнении с общим числом молекул газа. Но если бы в этом заключалась причина рассматриваемого явления, то самый закон распределения показывает, что число молекул, находящихся в ненормальных условиях, довольно быстро возрастает вместе с температурой, так что ионизация, созданная рентгеновскими лучами, должна быстро возрастать с температурой. Последние опыты М. Клуна (M. Clung) в лаборатории имени Кавендиша показывают, что при увеличении температуры газа от 15°C до 200°C не произошло какого-либо заметного усиления ионизации, между тем, как число молекул, обладающих ненормально большим количеством энергии, чрезмерно возросло при таком повышении температуры. Трудность в объяснении этой слабой ионизации отпадает, если, вместо того, чтобы рассматривать фронт рентгеновской волны однообразным, мы предположим, что он состоит из очень ярких пятен, разделенных промежутками, где яркость очень мала, потому что в этом случае не только все молекулы, а, вероятно, даже разные части одной и той же молекулы, подвергаются различным условиям; этот случай аналогичен пучку катодных лучей, проходящих через газ; при этом число молекул, приходящих в столк-

новение с лучами, может быть очень малой частью всего числа молекул.

Вернемся, однако, к случаю заряженной частицы с ускоренным движением; мы уже видели, что из частицы выходят электрическая и магнитная силы и распространяются по радиусам со скоростью света и что силы и радиальные и магнитные перпендикулярны к тому направлению, в котором они распространяются; но, так как каждая единица объема электромагнитного поля имеет (см. стр. 23) количество движения, равное произведению из плотности фарадеевских трубок и магнитной силы, при чем направление количества движения перпендикулярно к обоим этим величинам, то должно существовать в той волне, которая вызвана ускорением заряженной частицы, как и вообще во всякой электрической или световой волне, определенное количество движения в направлении распространения волны. Таким образом, если какая-нибудь волна, напр., световая, поглощается тем веществом, сквозь которое проходит, то количество движения волны сообщится поглощающему веществу, которое будет поэтому испытывать силу, которая стремится его толкать по направлению распространения света. Так, когда свет падает нормально на поглощающее черное вещество, он отталкивает это вещество. Максвелл показал, что это отталкивание, вызываемое излучением, есть следствие электромагнитной теории света; оно было недавно открыто и измерено Лебедевым при помощи очень красивых опытов, которые были подтверждены и разработаны Никольсом и Гуллем (Nichols, Hull).

Давление, испытываемое поглощающим веществом, пропорционально его площади, тогда как вес вещества пропорционален его объему. Поэтому, если мы линейные размеры уменьшим вдвое, то вес уменьшится в восемь раз, между тем как давление излучения уменьшится только в четыре раза; поэтому, уменьшив достаточно размеры поглощающего тела, мы придем к такому положению, когда силы, обусловленные излучением, превзойдут те, которые, подобно весу, пропорциональны объему вещества. Исходя из этого принципа и зная напряженность солнечной радиации, Аррениус показал, что для непрозрачной сферы, плотность которой единица, а диаметр —  $10^{-5}$  см, давление, вызванное излучением солнца, должно как раз уравновесить солнечное притяжение, между тем, как более мелкие тела должны отталкиваться от солнца. Аррениус применил этот принцип к объяснению явлений, связанных с кометными хвостами. Пойнтинг (Poynting) недавно показал, что если две сферы,



у которых плотность равна единице, а диаметр около 39 см, находятся при температуре в  $27^{\circ}$  С и защищены от внешних излучений, то отталкивание, вызванное излучениями сфер, превышает их взаимное тяготение, так что сферы будут отталкивать друг друга.

С другой стороны, когда свет преломляется и отражается от прозрачной поверхности, направление света, а потому и направление количества движения, изменяется, так что преломляющее вещество должно получить некоторое количество движения. Нетрудно доказать, что даже при наклонном падении света количество движения, сообщаемое веществу, нормально к отражающей поверхности. Есть немало интересных вопросов, связанных с силами, которые действуют на преломляющие призмы при прохождении через них света, вопросов, которые сами собой возникнут перед вами, когда вы будете рассматривать изменения в количестве движения, испытываемые световой волной при прохождении сквозь призму. Тангенциальные силы, обусловленные светом, до сих пор, насколько я знаю, не открыты еще экспериментально. Однако, в некоторых случаях они должны существовать, например, в том случае, когда световой луч, падающий наклонно, <sup>1)</sup> не вполне отражается от металлической поверхности.

Волны электрической и магнитной силы, которые излучает заряженная частица, движущаяся с ускорением, несут с собою запас энергии. Эта энергия излучается в пространство, так что частица постоянно теряет энергию. Легко показать, что скорость излучения энергии частицей равна  $\frac{2}{3} \frac{e^2 f^2}{V}$ , <sup>2)</sup> где  $e$  — заряд частицы,  $f$  — ее ускорение, а  $V$  — скорость света. Если мы примем в расчет ту потерю энергии частицей, когда ее движение ускорено, мы найдем несколько интересных результатов. Так, например, если частица с массой  $m$  и зарядом  $e$  выходит из состояния покоя, под действием постоянной электрической силы  $X$ , то частица не сразу достигнет ускорения  $\frac{Xe}{m}$ , как это было бы при отсутствии потери энергии излучением, на-

<sup>1)</sup> Опыты в том направлении были сделаны Пойнтингом в 1905 году.  
(Прим. ред.)

<sup>2)</sup> Общее количество энергии, излучаемое в волновом импульсе, как мы видели, равно  $\frac{2}{3} \frac{e^2 v^2}{\delta}$ . Эта энергия испускается тормозящимся телом за время  $\tau$ ; таким образом, в единицу времени испускание будет  $\frac{2}{3} \frac{e^2 v^2}{\delta \tau}$ ; заменяя  $\delta = V\tau$  и  $\frac{v}{\tau} = f$ , имеем  $\frac{2}{3} \frac{e^2 f^2}{V}$ . (Прим. ред.)

против, ускорение частицы в самом начале равно нулю, и только по прошествии времени, порядка  $\frac{e^2}{Vm}$ , частица получит заметную часть своего окончательного ускорения. Таким образом, скорость, с которой частица теряет энергию в продолжение времени  $\frac{e^2}{Vm}$ , очень мала в сравнении с окончательной скоростью. Поэтому, если бы частица подверглась действию волны электрической силы, которой нужно было бы время, порядка  $\frac{e^2}{Vm}$ , чтобы пройти через частицу, то количество энергии, излученной частицей, было бы гораздо меньшей частью энергии волны, чем это было бы, если бы волна для прохождения через частицу затратила время, многократно превышающее  $\frac{e^2}{Vm}$ . Это обстоятельство имеет важное применение при объяснении большей проникающей способности „жестких“ рентгеновских лучей в сравнении с „мягкими“ лучами. Жесткие лучи соответствуют волновым импульсам небольшой толщины, „мягкие“ лучи — толстым; таким образом, меньшая часть энергии излучается заряженными частицами, когда через них проходят „жесткие“ лучи, чем тогда, когда проходят „мягкие“ лучи.

Применяя закон, что скорость излучаемой энергии равна  $\frac{2}{3} \frac{e^2 f^2}{V}$ , к случаю заряженной частицы, описывающей круговую орбиту под влиянием притягательной силы, изменяющейся обратно пропорционально квадрату расстояния, мы найдем, что в этом случае скорость радиации пропорциональна восьмой степени скорости или четвертой степени энергии. Поэтому потеря энергии излучением возрастает гораздо быстрее, чем энергия движущегося тела.



## ГЛАВА IV.

## АТОМНОЕ СТРОЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.

До сих пор мы занимались большей частью свойствами силовых линий, их натяжением, массою эфира, ими увлекаемого, распространением по ним электрических возмущений; в этой главе мы исследуем природу электрических зарядов, образующих начала и концы этих линий. Мы покажем, что есть серьезные основания для предположения, что эти заряды имеют, так сказать, атомное строение; каждый заряд построен из некоторого конечного числа отдельных зарядов, равных между собою, подобно тому, как, согласно атомистической теории материи, какое-нибудь количество водорода построено из некоторого числа маленьких частиц, называемых атомами, при чем все атомы равны между собою. Если этот взгляд на строение электричества правилен, то любой конец фарадеевской трубки будет тем местом, откуда исходит постоянное, определенное количество трубок или куда они приходят.

Рассмотрим сначала доказательства, которые дают законы электролиза жидкостей. Фарадей показал, что когда электричество проходит через жидкий электролит, количество отрицательного электричества, выделяемого на положительном электроде, как и положительного электричества, выделяемого на отрицательном, пропорционально числу атомов, выделяющихся на электроде. Рассмотрим сначала одновалентные элементы, как водород, хлор, натрий и т. д. Фарадей показал, что когда одно и то же число атомов этих элементов передает свои заряды электроду, то количество сообщенного электричества одно и то же, безразлично, были ли носителями его атомы водорода, хлора или натрия; это указывает на то, что любой атом этих элементов несет с собою один и тот же электрический заряд. Перейдем теперь к двувалентным элементам. Мы находим опять, что ионы всех двувалентных элементов несут один и тот же заряд, но определенное число ионов двувалентного элемента несет вдвое больший заряд, чем тот, который переносит то же число ионов

одновалентного элемента; это показывает, что каждый ион двувалентного элемента несет вдвое больший заряд, чем одновалентный ион; дальше, трехвалентный ион несет утроенный заряд одновалентного, и т. д. Таким образом, при электролизе растворов, заряды, переносимые ионами, будут или зарядами водородного иона, или двойными такими зарядами, или тройными и т. д. Заряды, с которыми мы встречаемся, представляют всегда целое кратное заряда, переносимого водородным атомом; мы не встретим никогда дробной части этого заряда. Это замечательное обстоятельство показывает, как сказал Гельмгольц в своей лекции о Фарадее, что „если мы примем гипотезу, что элементарные вещества составлены из атомов, то не можем избежать того заключения, что электричество как положительное, так и отрицательное, разделяется на определенные элементарные частицы, которые играют роль атомов электричества“.

Когда мы рассматриваем прохождение электричества через газы, доказательства в пользу атомного характера электричества будут еще серьезнее, чем в случае прохождения через жидкости, главным образом, потому, что мы знаем больше о прохождении электричества через газы, чем через жидкости.

Рассмотрим некоторые свойства электропроводности газов. Когда газ приведен в состояние проводимости, например, под действием рентгеновских лучей, он остается в этом состоянии после прекращения действия лучей довольно продолжительное время, что дает возможность изучить его свойства. Мы находим, что можно газ лишить его проводимости, если пропустить его через хлопчатобумажную вату или через трубу с водой. Таким образом, проводимость принадлежит чему-то, смешанному с газом, что может быть отфильтровано от него; затем, газ может лишиться проводимости при пропускании через сильное электрическое поле. Эти результаты показывают, что та составная часть, которою обусловлена проводимость газа, состоит из заряженных частичек и что проводимость происходит от движения этих частичек в электрическом поле. В лаборатории имени Кавендиша мы измерили электрический заряд, связанный с этими частицами.

Принцип этого впервые употребленного метода следующий. Если в какой-нибудь момент в газе находятся  $n$  таких частичек, заряженных положительно, и  $m$ , заряженных отрицательно, и если каждая из них несет электрический заряд  $e$ , мы можем легко электрическими методами определить  $ne$ , количество электричества одного данного знака, находящегося в газе. Один из методов, при помощи



которых это может быть сделано, состоит в том, чтобы заключить этот газ между двумя параллельными металлическими пластинками, одна из которых изолирована. Теперь предположим, что мы внезапно электризуем другую пластинку до очень высокого потенциала; эта пластинка будет теперь отталкивать положительные частицы в газе, и эти последние, до того, как они успеют соединиться с отрицательными частицами, устремятся на изолированную пластинку. Таким образом, весь положительный заряд в газе будет перенесен на изолированную пластинку, где может быть измерен электрометром; если мы будем располагать способом для определения  $n$ , то будем в состоянии найти и  $e$ . Метод, посредством которого я определил  $n$ , основан на открытии Ч. Т. Р. Вильсона (C. T. R. Wilson), что заряженные частицы действуют как ядра, вокруг которых конденсируются маленькие капельки воды, если частицы окружены влажным воздухом, охлажденным ниже точки росы. В воздухе, свободном от пыли, очень трудно, как показал Эйткен (Aitken), получить туман охлаждением влажного воздуха, потому что нет ядер для конденсации окружающих капелек; однако, если в свободном от пыли воздухе находятся заряженные частицы, то на них будет осаждаться туман, хотя бы пересыщение было гораздо меньшим, чем то, которое необходимо, чтобы вызвать заметный эффект, когда заряженных частиц нет.

Таким образом, в достаточно пересыщенном влажном воздухе на заряженных частицах осаждается туман, и частицы делаются поэтому видимыми. Это есть первый шаг к тому, чтобы их подсчитать. Капельки, однако, слишком малы и слишком многочисленны, чтобы их можно было прямо сосчитывать. Между тем, можно косвенно определить их число следующим образом: предположим, что имеем некоторое число этих частиц в свободном от пыли воздухе в замкнутом сосуде, при чем воздух насыщен водяными парами; предположим теперь, что мы вызываем в сосуде внезапное расширение воздуха; это вызывает охлаждение воздуха, он окажется пересыщен парами, и капли осядут на заряженных частицах. Теперь, если знаем величину вызванного нами расширения, можем подсчитать охлаждение газа, а затем количество осажденной воды. Таким образом, мы знаем объем воды, находившейся в капельках; поэтому, если знаем объем одной капельки, можно вывести число капелек. Чтобы найти размеры капельки, воспользуемся исследованием Джорджа Стокса (George Stokes) о скорости падения маленьких шариков в воздухе. Вследствие вязкости воздуха маленькие тела падают чрезвычайно

медленно, и чем меньше тело, тем медленней оно падает. Стокс показал, что если  $a$  есть радиус водяной капельки, то скорость ее падения в воздухе  $V$  определяется уравнением:

$$V = \frac{2}{3} \frac{ga^2}{\mu},$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести — 981,  $\mu$  — коэффициент вязкости воздуха — 0,00018; таким образом,

$$V = 1,21 \times 10^6 a^2;$$

поэтому, если мы могли бы определить  $V$ , то определили бы и радиус,  $a$ , следовательно, и объем капли. Но  $V$  есть, очевидно, скорость, с которой облако, образовавшееся вокруг заряженных частиц, спускается вниз, и может быть легко измерено из наблюдений над движением вершины облака. Таким путем я нашел объем капельки, а затем —  $n$  — число частичек. Так как из электрических измерений было определено  $ne$ , то, зная  $n$ , можно было подсчитать значение  $e$ ; таким путем я нашел значение  $e$  равным

$$3,4 \times 10^{-10} \text{ электростатических C.G.S. единиц. } ^1)$$

Опыты были проделаны с воздухом, водородом, углекислотой и было найдено, что ионы имеют один и тот же заряд во всех этих газах, что является серьезным аргументом в пользу атомного характера электричества.

Заряд газообразного иона можно сравнить с зарядом, увлекаемым водородным ионом при электролизе растворов, следующим образом. Мы знаем, что прохождение одной электромагнитной единицы электрического заряда или  $3 \times 10^{10}$  электростатических единиц через подкисленную воду освобождает 1,23 куб. см водорода при температуре  $15^\circ\text{C}$  и давлении в 1 атмосферу; если при этой температуре и давлении в одном куб. см газа находятся  $N$  молекул, то число водородных ионов в 1,23 куб. см есть  $2,46 N$ , так что если  $E$  есть заряд водородного иона при электролизе растворов, получим

$$2,46 NE = 3 \times 10^{10}$$

$$\text{или } E = \frac{1,22}{N} \cdot 10^{10}.$$

<sup>1)</sup> По новейшим данным, это число равняется  $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$ .



Теперь,  $e$  — заряд газового иона равен  $3,4 \times 10^{-1}$ ; поэтому если  $N = 3,6 \times 10^{19}$  <sup>1)</sup>, то заряд газового иона равен заряду электролитического иона. В кинетической теории газов найдены способы определения количества  $N$  или, как его иногда называют, постоянной Авогадро; значения, полученные этой теорией, несколько различаются в зависимости от предположений, сделанных относительно природы молекулы и природы сил, которые молекула обнаруживает по отношению к соседним молекулам. Однако, значение  $3,6 \cdot 10^{19}$  находится в хорошем согласии с лучшими из этих определений; поэтому мы заключаем, что заряд газового иона равен заряду электролитического иона.

Доктор Г. А. Вильсон (H. A. Wilson) в лаборатории им. Кавендиша совершенно другим способом получил на опыте то же значение для  $e$ , что и вышеприведенное. Его способ был основан на открытии Ч. Т. Р. Вильсона (C. T. R. Wilson), что для осаждения тумана из влажного воздуха на отрицательных ионах требуется меньшее пересыщение, чем при осаждении на положительных. Таким образом, выбрав подходящее пересыщение, мы можем получить облако, осажденное только на одних отрицательных ионах, так что каждая капля в тумане будет отрицательно заряжена; наблюдая скорость падения тумана, мы можем, как было выше объяснено, определить вес каждой капли. Теперь положим, что мы помещаем над облаком положительно наэлектризованную пластинку, пластинка будет притягивать облако, и мы можем так подобрать заряд пластинки, что электрическое притяжение уравновесит вес капельки, а капли, подобно гробу Магомета, повиснут устойчиво в воздухе; если  $X$  есть электрическая сила, тогда электрическое притяжение капли есть  $Xe$ , где  $e$  — заряд капли. Так как  $Xe$  равно весу капли, который известен, а  $X$  можно измерить, то  $e$  может быть определено.

Таунсенд (Townsend), измеряя коэффициент диффузии газовых ионов и сравнивая его со скоростью, приобретаемой ионом под действием заданной электрической силы, показал, что заряд газового иона равен заряду водородного иона при обыкновенном электролизе. Рассмотрим случай, когда некоторый объем ионизированного газа помещен между двумя горизонтальными пластинками; предположим, что пока, мы находимся в одном каком-либо горизонтальном слое, число ионов остается тем же самым, но число это изменяется при переходе от одного слоя к другому; пусть  $x$  есть

<sup>1)</sup>  $N = 2,705 \cdot 10^{19}$  (по современным данным).

расстояние какого-нибудь слоя от нижней пластинки,  $n$  — число ионов одного знака в единице объема этого слоя, тогда, если  $D$  есть коэффициент диффузии ионов, то число ионов, которые в одну секунду проходят вниз сквозь единицу площади данного слоя, будет

$$D \frac{dn}{dx},$$

так что средняя скорость частиц, движущихся вниз, есть

$$\frac{D}{n} \frac{dn}{dx}.$$

Сила, вызывающая движение ионов, есть изменение парциального давления, обусловленного ионами; если это давление равно  $p$ , сила, действующая на ионы в единице объема, будет  $\frac{dp}{dx}$ , а средняя сила, приходящаяся на один ион, есть  $\frac{1}{n} \frac{dp}{dx}$ . Теперь можем найти скорость, которую приобретает ион под действием известной силы, измеряя, как это делали Рёзерфорд (Rutherford) и Зеленый (Zeleny), скорости, приобретенные ионами в электрическом поле. Они показали, что эта скорость пропорциональна силе, действующей на ион, так что, если  $A$  есть скорость, когда электрическая сила равна  $X$ , а сила, действующая на ион, есть поэтому  $Xe$ , то скорость, соответствующая единице силы, есть  $\frac{A}{Xe}$ ; когда же сила будет  $\frac{1}{n} \frac{dp}{dx}$  то скорость будет

$$\frac{1}{n} \frac{dp}{dx} \frac{A}{Xe};$$

мы, однако, видели, что эта скорость равна

$$\frac{D}{n} \frac{dn}{dx};$$

поэтому имеем:

$$\frac{dp}{dx} \frac{A}{Xe} = D \frac{dn}{dx} \dots \dots \dots (1)$$

Теперь, если ионы ведут себя, как совершенный газ, то давление  $p$  находится в постоянном отношении к  $n$ , числу ионов в единице объема. Это отношение постоянно для всех газов при одной и той же температуре, так что, если  $N$  есть постоянная Авогадро, т. е. число молекул в кубическом сантиметре газа при атмосферном давлении  $P$ , мы будем иметь:

$$\frac{p}{P} = \frac{n}{N},$$



а уравнение (1) дает нам:

$$\frac{PA}{XD} = Ne.$$

Так что, зная  $D$  и  $A$ , мы можем найти значение  $Ne$ . Таким путем Таунсенд нашел, что  $Ne$  одно и то же в воздухе, водороде, кислороде и в углекислоте, и средняя величина найденных им значений  $Ne$  была  $1,22 \times 10^{10}$ . Мы видели, что если  $E$  есть заряд водородного иона, то

$$NE = 1,22 \times 10^{10}.$$

Таким образом, эти опыты показали, что  $e = E$  или что заряд газообразного иона равен заряду, увлекаемому водородным ионом при электролизе растворов.

Равенство этих зарядов было также доказано очень простым путем Г. А. Вильсоном (H. A. Wilson), который вводил каждую секунду в некоторый объем воздуха при очень высокой температуре измеренное количество пара металлических солей. Этот пар подвергался ионизации, и смесь воздуха и пара приобретала очень значительную проводимость. Ток сквозь пар возрастал вначале вместе с электродвижущей силой, вызывавшей его движения сквозь газ, но это возрастание не шло до бесконечности; после того, как ток достигал известной величины, дальнейшее возрастание электродвижущей силы не вызывало изменений тока. Ток, как во всех случаях прохождения через газы, достигает наибольшей величины, называемой „током насыщения“ и не будет увеличиваться до тех пор, пока электрическое поле, приложенное к газу, не достигнет той интенсивности, при которой сквозь газ начинают проскакивать искры. Вильсон нашел, что ток насыщения сквозь пары соли как раз равен тому току, который, проходя через водяной раствор соли, разлагает в секунду такое же количество соли, какое впускалось каждую секунду в горячий воздух.

Нужно подчеркнуть, что этот результат дает нам способ определения постоянной Авогадро, который не зависит от какой-либо гипотезы относительно формы или размеров молекул или от вида их взаимодействий. Если  $N$  есть эта постоянная,  $e$  — заряд какого-либо иона, тогда  $Ne = 1,22 \times 10^{10}$ , а так как мы видели, что  $e = 3,4 \times 10^{-10}$ , то  $N = 3,9 \times 10^{19}$ .

Таким образом, изучаем ли мы прохождение электричества через газы или через жидкости, мы приходим к понятию естественной единицы или атома электричества; все заряды предста-

вляют целое кратное этого атома, подобно тому, как масса какого-нибудь количества водорода есть целое кратное массы водородного атома.

#### МАССА НОСИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.

Мы должны теперь перейти к рассмотрению природы систем, переносящих заряды, и для того, чтобы иметь как можно более простые условия, начнем со случая газа, находящегося при очень низком давлении, когда движение частиц не задерживается столкновениями с молекулами газа. Предположим, что имеем частицу массы  $m$ , переносящую заряд  $e$ , движущуюся в плоскости чертежа, и что на нее действует однородное магнитное поле, перпендикулярное к плоскости. Мы видели, что при этих обстоятельствах частица находится под действием механической силы, равной  $Hev$ , где  $H$  есть магнитная сила а  $v$  — скорость частицы. Направление этой силы лежит в плоскости чертежа и перпендикулярно к траектории частицы. Так как сила постоянно перпендикулярна к направлению движения частицы, скорость частицы, а поэтому и величина силы, действующей на частицу, не изменяются, так что траектория частицы будет такая же, как у тела, находящегося под действием постоянной нормальной силы. Легко показать, что эта траектория есть окружность, радиус которой определяется из уравнения

$$a = \frac{mv}{eH} \dots \dots \dots (1)$$

Скорость  $v$  частицы может быть определена следующим образом. Предположим, что частица движется горизонтально в плоскости чертежа.

В однородном магнитном поле  $H$ , перпендикулярном к этой плоскости, на частицу будет действовать вертикальная сила, равная  $Hev$ . Если мы сверх магнитной силы приложим вертикальную электрическую силу  $X$ , то последняя будет производить на движущуюся частицу вертикальное механическое действие  $Xe$ . Сообщим  $X$  такое направление, чтобы эта сила имела противоположное магнитной силе направление, и будем регулировать величину  $X$  так, чтобы обе силы были равны. Мы можем узнать, что это расположение достигнуто потому, что в этом случае движение частицы под влиянием электрической и магнитной силы таково, как будто обе эти силы отсутствовали. Когда обе силы равны, то мы имеем:

$$Xe = Hev$$



или

$$v = \frac{X}{H} \dots \dots \dots (2)$$

Поэтому, если мы имеем средства проследить движение частицы, то мы можем измерить радиус  $a$  круга, который она описывает под влиянием постоянной магнитной силы, и определить величину электрической силы, необходимой для того, чтобы уравновесить действие магнитной силы. Тогда уравнения (1) и (2) дадут нам возможность найти  $v$  и  $\frac{e}{m}$ .

Величины  $\frac{e}{m}$  для отрицательно наэлектризованных частиц в газах при низком давлении.

Этим путем была определена величина  $\frac{e}{m}$  для отрицательно заряженных частиц, образующих катодные лучи, которые составляют существенную часть электрического разряда через газ при низком давлении. Она была определена также для отрицательно наэлектризованных частиц, выделяемых металлами, 1) когда они подвергаются действию ультра-фиолетовых лучей, 2) когда они нагреваются до температуры белого каления. Эти опыты привели к тому замечательному результату, что величина  $\frac{e}{m}$  остается неизменной, какова бы ни была природа газа, в котором находится частица, и какова бы ни была природа металла, из которого она выделилась. Во всех случаях, когда определялась величина  $\frac{e}{m}$  для отрицательно наэлектризованных частиц, движущихся со скоростью значительно меньшей, чем скорость света, она всегда оказывалась постоянной около  $10^7$ , когда в качестве единиц выбирали сантиметр, грамм и секунду и когда заряд измерялся в электромагнитных единицах. Так как величина  $\frac{e}{m}$  для иона водорода при электролизе жидкостей составляет только  $10^4$ , и так как мы видели, что заряд газового иона равен заряду иона водорода при обыкновенном электролизе, то мы видим, что масса носителя отрицательного заряда должна быть равной приблизительно лишь тысячной доле атома водорода, долгое время считавшейся наименьшей, способной к самостоятельному существованию.

Для этих единиц отрицательного электричества я предложил название корпускул. Эти корпускулы всегда одинаковы, как бы ни возник электрический заряд, и где бы они ни находились. Таким образом, отрицательное электричество в газе при низком давлении имеет аналогичную структуру, как и газ, при чем корпускулы играют

роль молекул. Пользуясь старым названием, можно сказать, что „отрицательная электрическая жидкость“ подобна газообразной жидкости с корпускулярной вместо молекулярной структурой.

#### Носители положительного электричества.

Те же методы можно применить для определения величин  $\frac{e}{m}$  для носителей положительного электричества. Это сделал Вин (Wien) для положительного заряда, находимого в некоторых частях разряда в безвоздушной трубке, и я сам измерял  $\frac{e}{m}$  для положительного электричества, отдаваемого раскаленной проволокой. Результаты этих измерений представляют поразительный контраст с результатами измерений отрицательного заряда, так как вместо постоянной большой величины  $10^7$ , как при отрицательном заряде,  $\frac{e}{m}$  никогда не бывает больше  $10^4$ ; эту величину  $\frac{e}{m}$  может иметь, если носителем является атом водорода. Во многих случаях величина  $\frac{e}{m}$  гораздо меньше  $10^4$ , показывая этим, что положительный заряд несут атомы, имеющие массу большую, чем масса водородного атома. Величина  $\frac{e}{m}$  варьирует с природой электродов и с газом в разрядной трубке точно так, как будто носителями положительного заряда были атомы элементов, которые случайно присутствовали при возникновении положительного заряда. <sup>1)</sup>

Эти результаты ведут нас к взгляду на электричество, имеющему поразительное сходство с теорией Франклина об „одной электрической жидкости“. Но вместо того, чтобы подобно Франклину считать электрическую жидкость положительной, мы считаем ее отрицательной. „Электрическая жидкость“ Франклина соответствует собранию корпускул, а именно, это собрание корпускул образует отрицательное электричество. Перенос заряда с одного места на другое вызывается движением корпускул от места, где имеется избыток положительного электричества, к месту, где есть избыток отрицательного. Положительно наэлектризованное тело есть такое, которое потеряло часть своих корпускул. Мы видели, что масса и заряд корпускул определены непосредственно опытом. В действительности мы теперь знаем об „электрической жидкости“ больше, чем о жидкостях в роде воздуха или воды.

<sup>1)</sup> В настоящее время Томсоном и его учеником Астоном разработаны методы измерения атомных весов по отклонению положительно заряженных частиц в электрическом и магнитном поле. (Прим. ред).



## ГЛАВА V. СТРОЕНИЕ АТОМА.<sup>1)</sup>

Мы видели, что безразлично, получаем ли мы корпускулы посредством катодных лучей, ультра-фиолетового излучения или раскаленных металлов, и каковы бы ни были присутствующие металлы или газы, — мы получаем всегда один и тот же род корпускул. Так как корпускулы, сходные во всех отношениях, могут быть получены от весьма различных агентов и материалов, и масса корпускулы меньше массы всякого известного атома, то мы видим, что корпускула должна быть составной частью атома весьма различных субстанций. Таким образом, атомы этих субстанций имеют нечто общее.

Перед нами возникает идея, что атомы химических элементов построены из более простых систем; эта мысль в разных видах высказывалась более, чем одним химиком. Так, Прют (Prout) в 1815 г. высказал гипотезу, что атомы всех химических элементов построены из атомов водорода. В таком случае, предполагая, что при соединении водородных атомов для образования атома другого элемента нет потери веса, атомные веса всех элементов должны бы быть целыми числами; это, однако, не согласуется с опытом. Чтобы избежать этого несогласия, Дюма (Dumas) предположил, что первоначальный атом не водородный, но меньший атом, имеющий лишь половину или четверть массы водородного атома. Идея о сложной природе атома получила дальнейшее подтверждение, благодаря открытию Ньюландса (Newlands) и Менделеева, известному под именем периодического закона, который показывает, что в свойствах элементов заметна периодичность, если элементы расположены в порядке возрастающих атомных весов. Простые отношения между

<sup>1)</sup> Эта глава в значительной степени устарела: в ней не учтены позднейшие работы как самого Томсона и его учеников, так и Резерфорда. Но несмотря на это, высказанные в ней замечательные мысли ни в коем случае не утратили своего значения. (Прим. ред.).

атомными весами некоторых элементов, имеющих подобные химические свойства, например, тот факт, что атомный вес натрия есть среднее арифметическое между атомными весами лития и калия, — все указывает на то, что атомы различных элементов имеют нечто общее. Это подтверждается также сходством в строении спектров элементов той же группы в периодическом ряду; это сходство с большой очевидностью установлено новейшими работами над рядами линий в спектрах, частота которых подчиняется определенным числовым отношениям. Сэр Норман Локиер (Lockyer), основываясь на спектроскопических наблюдениях, уже давно высказал мысль, что элементы в действительности это — соединения, которые при подходящих условиях могут быть разложены. В пользу этого взгляда говорят далее явления радиоактивности, о которых я буду говорить ниже, так как имеются достаточные основания для допущения, что радиоактивность зависит от изменений, происходящих в атомах радиоактивных веществ. Если это так, то мы должны обратиться к проблеме строения атома и посмотреть, не можем ли мы представить себе модель, которая могла бы объяснить замечательное свойство радиоактивных веществ. Поэтому не мешает рассмотреть, какое значение имеет существование корпускул для проблемы строения атома; и, если даже модель атома, к которой нас приведут эти соображения, будет груба и несовершенна, то, может быть, она покажет нам пути исследований, которые могут дать нам новые сведения о строении атома.

Природа единицы, из которой построены атомы.

Исходя из гипотезы, что атом есть агрегат известного числа более простых систем, рассмотрим, какова природа одной из этих систем. Мы видели, что корпускула, масса которой гораздо меньше массы атома, образует составную часть атома, и на корпускулу естественно смотреть, как на составную часть первоначальной системы. Но корпускула обладает определенным зарядом отрицательного электричества, а, так как со всяким зарядом электричества мы всегда ассоциируем равный заряд противоположного рода, то мы должны ожидать, что отрицательный заряд корпускулы соединен с равным зарядом положительного электричества. Поэтому представим себе нашу первоначальную систему электрической парой (дублетом) с отрицательной корпускулой на одном конце и равным положительным зарядом на другом; при этом оба конца соединены электриче-



скими силовыми линиями, которым мы приписываем материальное существование. По причинам, которые выяснятся позже, мы должны предположить, что объем, в котором распределено положительное электричество, гораздо больше объема корпускулы. <sup>1)</sup> Поэтому силовые линии близ корпускулы более сжаты, чем в других местах системы, и, следовательно, количество эфира, связанного силовыми линиями, массу которого мы рассматриваем, как массу системы, будет гораздо больше вблизи корпускулы, чем где-либо. Если, как мы предположили, объем корпускулы очень мал сравнительно с объемом, занятым положительным электричеством, то масса системы практически будет зависеть от массы эфира, связанного вблизи корпускулы. Таким образом, масса системы будет практически независима от положения ее положительного конца и приблизительно равна массе корпускул, если бы они одни находились в поле. Эта масса (см. стр. 38) для каждой корпускулы равна  $\frac{2e^2}{3a}$ , где  $e$  — заряд корпускулы,  $a$  — ее радиус, который, как мы видели, приблизительно равен  $10^{-13}$  см.

Теперь представим себе, что мир состоит из неизмеримого числа таких электрических пар, и мы рассматриваем его, как нашу первоначальную систему. Если бы они были в покое, то их взаимное притяжение сблизило бы их точно так, как притяжение сближает ряд маленьких магнитов, если они могут свободно двигаться, так что они образуют агрегаты более, чем одной системы.

Однако, если бы отдельные сист.мы двигались первоначально со значительными скоростями, то относительная скорость двух систем, когда они сближаются так, что оказывают друг на друга заметное притяжение, было бы достаточно, чтобы удалить системы друг от друга, несмотря на их взаимное притяжение. В этом случае образование агрегатов последовало бы лишь, когда кинетическая энергия единиц уменьшилась бы до такой степени, что при столкновении их стремление к разделению, зависящее от их относительного движения, было бы не достаточно, чтобы помешать им оставаться вместе под действием взаимного притяжения.

Рассмотрим, каким образом кинетическая энергия такого агрегата должна уменьшаться. Мы видели (стр. 48), что, когда скорость заряженного тела изменяется, то тело теряет энергию, так как

<sup>1)</sup> Теперь доказано, что объем положительного ядра значительно меньше объема корпускулы; таким образом, этот вывод Томсона опровергнут. (Прим. ред.)

тело порождает электрические волны, которые излучаются в пространство и несут с собой энергию. Поэтому, когда единицы сталкиваются, т. е. сближаются так тесно, что они взаимно ускоряют или замедляют заметным образом свое движение, то излучается энергия, которая не вполне поглощается соседними единицами. Поэтому энергия постоянно теряется и через известное, хотя, может быть, и очень долгое время, кинетическая энергия уменьшится до величины, при которой агрегат единиц начинает распадаться на группы по две единицы. Потом образуются агрегаты, содержащие большее число единиц.

Рассматривая вопрос о дальнейшем соединении этих сложных групп, мы должны помнить, что возможность соединения зависит не только от скорости агрегата, как целого, т. е. от скорости центра тяжести, но и от относительных скоростей корпускул внутри агрегата.

Представим себе агрегат, состоящий подобно атому Эпинуса у лорда Кельвина из сферы равномерно положительного заряда, обладающего радиальной электрической силой, которая у всякой внутренней точки пропорциональна расстоянию от центра. Допустим также, что внутри этой сферы вращаются гораздо меньшие отрицательно заряженные корпускулы. Число корпускул есть число единиц, образовавших агрегат, и общий отрицательный заряд корпускул равен положительному заряду сферы. Чтобы быть определеннее, возьмем пример, показанный на рис. 15, из трех корпускул А, В, С, расположенных внутри сферы по углам равностороннего треугольника, центр которого совпадает с центром сферы. Сначала предположим, что корпускулы находятся в покое; они будут в равновесии, когда они на таком расстоянии от центра сферы, что отталкивание между корпускулами, которое, очевидно, будет радиально, как раз уравнивает радиальное притяжение, производимое на корпускулы положительным зарядом сферы. Простое вычисление показывает, что это произойдет, когда расстояние корпускулы от центра будет равно 0,57 радиуса сферы. Теперь предположим, что корпускулы вместо того, чтобы быть в покое, описывают круговые орбиты вокруг центра сферы. Их центробежная сила увлечет их дальше от центра на расстояние, зависящее от скорости их вращения по орбитам. При возрастании этой скорости расстояние от центра сферы до корпускул будет возрастать до тех пор, пока при

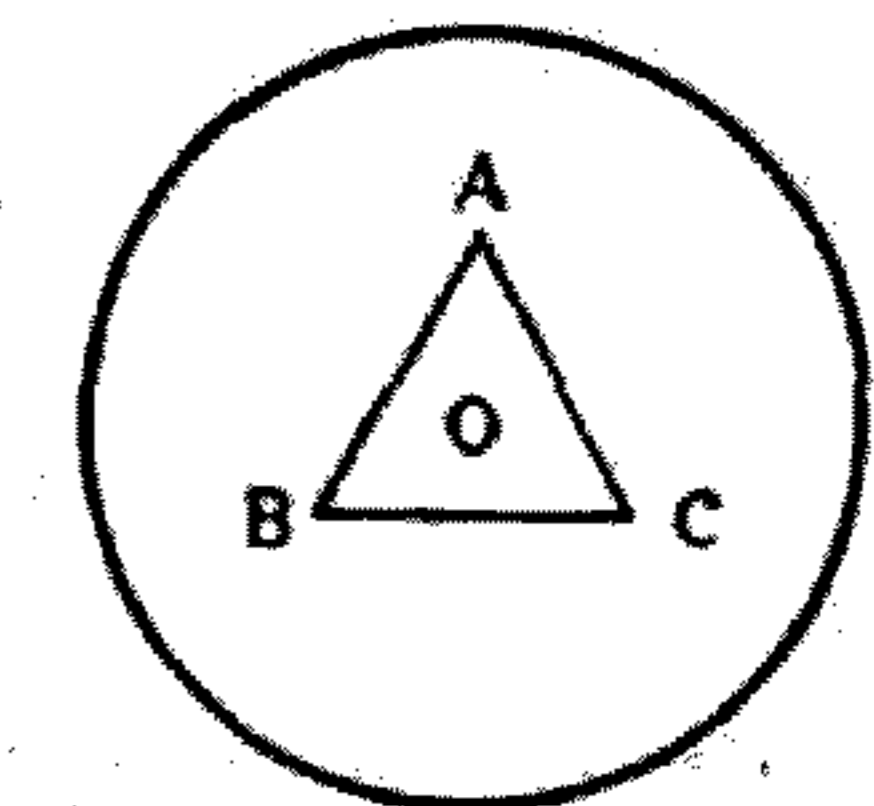


Рис. 15.



известной скорости корпускулы достигнут поверхности сферы. Дальнейшее возрастание скорости заставит их сначала вращаться вне сферы и, наконец, совсем покинуть сферу, когда атом уже распадется.

Таким образом, мы видим, что состав агрегата не постоянен, когда кинетическая энергия, зависящая от скорости корпускул внутри сферы относительно ее центра, превосходит известную величину. Ради краткости мы назовем эту кинетическую энергию корпускул внутри атома корпускулярной температурой атома. Предыдущий результат можно выразить иначе, сказав, что атом устойчив лишь до тех пор, пока его корпускулярная температура не превышает известной величины.

Мы должны тщательно различать корпускулярную температуру, которая представляет среднюю кинетическую энергию корпускул внутри атома, и молекулярную температуру, которая является средней кинетической энергией, зависящей от движения центра тяжести атома. Вероятно, эти температуры не находятся в тесной связи друг с другом. Они были бы пропорциональны друг другу, если бы здесь был приложен известный закон равного распределения энергии между различными степенями свободы атома. Но этот закон несовместим с физическими свойствами газов, и в кинетической теории газов доказательство его не принимает в расчет времени, необходимого для установления состояния, предполагаемого законом. Возможно, что это время так долго, что газы никогда не могут прийти в это состояние.

Возьмем теперь случай двух агрегатов А и В, корпускулярные температуры которых высоки, хотя не так, чтобы сделать А и В в отдельности неустойчивыми. Чтобы дать им наибольшую возможность соединения, предположим, что центры тяжести А и В, когда они сближены между собою, находятся в покое. Соединяются ли тогда А и В так, чтобы образовать более сложный агрегат, как это было бы, если бы корпускулы их были в покое? Я думаю, легко видеть, что это вовсе не необходимо. Ибо, когда А и В сближаются под влиянием взаимного притяжения, то потенциальная энергия, вызываемая расхождением А и В, уменьшится, а кинетическая энергия возрастет. Это увеличение кинетической энергии корпускул А и В увеличит стремление корпускул покинуть свои атомы, и, если приращение кинетической энергии значительно, то как А, так и В могут потерять одну или несколько корпускул. Отделение одной корпускулы оставит А и В положительно заряжен-

ными, и они будут стремиться к расхождению, благодаря отталкиванию их зарядов. Когда они разойдутся, то они будут оба положительно заряжены. Но, так как теперь в области, где расположены А и В, движутся свободные корпускулы с отрицательными зарядами, то эти положительные заряды наконец нейтрализуются корпускулами, которые сталкиваются с А и В и остаются в соединении с ними.

Итак, мы приходим к заключению, что соединение может быть устойчиво лишь тогда, когда корпускулярная температура после соединения меньше известной предельной величины; иначе образуемый комплекс будет неустойчив и неспособен к продолжительному существованию. Но корпускулярная температура агрегата, образуемого из А и В, зависит от корпускулярных температур А и В до соединения, а также от уменьшения потенциальной энергии системы, вызванного соединением А и В. Если корпускулярные температуры А и В до соединения были очень высоки, то корпускулярная температура после соединения будет также высока. Если они превосходят известный предел, то корпускулярная температура после соединения будет слишком высока для сохранения устойчивости агрегата АВ, и он не образуется. Таким образом, одним из условий для образования сложных агрегатов является требование, чтобы корпускулярная температура их составляющих до соединения была достаточно низка.

Если молекулярная температура газа, в котором А и В — молекулы, очень высока, то соединение их может быть задержано большой относительной скоростью А и В, которая, несмотря на их взаимное притяжение, удаляет их друг от друга. Но следует иметь в виду, что мы не можем вызвать соединение простым понижением молекулярной температуры, т. е. охлаждением газа. Соединение возможно лишь тогда, когда корпускулярная температура, т. е. кинетическая энергия, вызываемая движением корпускул внутри атома, уменьшена ниже известной величины. Мы можем предупредить соединение, повышая молекулярную температуру газа, но не можем вызвать соединение понижением ее.

Приведем определенный пример: причина, по которой с этой точки зрения атомы водорода, находящиеся на земле, не соединяются для образования другого элемента даже при крайне низкой температуре, когда водород становится жидким, — состоит в том, что даже при этой температуре кинетическая энергия корпускул внутри атома, т. е. корпускулярная температура, слишком высока.



Здесь будет полезно повторить то, что мы установили ранее, именно, что между корпускулярной и молекулярной температурами нет тесной связи, и что последнюю можно понизить почти до абсолютного нуля, не изменяя существенно первой.

Теперь мы должны перейти к обсуждению того значения, какое эти выводы имеют для теории, что различные химические элементы постепенно развились путем соединения первоначальных единиц.

Предположим, что достигнута первая ступень, и мы имеем известное число систем, образованных соединением двух единиц. Когда эти двойные системы, как мы можем их назвать, впервые образовались, то корпускулы в системе должны были иметь значительный запас кинетической энергии. Это должно быть так, потому что при соединении двух единиц должен был возникнуть запас кинетической энергии, равный уменьшению потенциальной энергии, благодаря соединению двух единиц. Так как эти двойные системы имеют первоначально высокую корпускулярную температуру, то они не легко будут соединяться друг с другом или с другой единицей. Прежде чем произойдет такое соединение, кинетическая энергия корпускул должна уменьшиться.

Сейчас мы должны перейти к обсуждению способа, каким происходит это уменьшение; но мы выскажем заранее вывод из этого обсуждения, сказав, что скорость убывания корпускулярной температуры, вероятно, сильно колеблется среди отдельных двойных систем.

Поэтому некоторые системы, вероятно, достигли состояния, когда они способны соединяться между собою или с отдельной единицей задолго раньше других. Системы первого рода будут соединяться, и мы будем иметь системы, из коих одни содержат три, другие — четыре единицы, тогда как в то же время остается много двойных систем. Таким образом, появление более сложных систем вовсе не вызывает одновременно исчезновения всех более простых.

Тот же принцип применяется к образованию дальнейших агрегатов из систем, содержащих три или четыре единицы. Одни из этих систем будут готовы к соединению ранее других, и возникнут системы, содержащие восемь единиц прежде, чем более устойчивые, содержащие четыре, три, две или одну только единицу, исчезнут. С дальнейшим ходом агрегации число наличных систем с различным числом единиц будет возрастать.

Таким образом, если мы допустим, что системы, содержащие различное число единиц соответствуют разным химическим элементам, то можно ожидать появления элементов все более высоких

атомных весов по мере того, как мир будет старше. Однако появление их не предполагает уничтожения элементов более низкого атомного веса. Во всяком случае число атомов последних будет уменьшаться, так как по нашей гипотезе более тяжелые элементы строятся из материала, доставляемого более легкими. Но не все атомы последних будут потреблены сразу, так что возможно одновременное существование большого числа элементов.

Однако, если корпускулярная температура атомов, благодаря излучению, постоянно падает, то более легкие элементы со временем исчезнут, и, если более тяжелые атомы не распадутся, то атомный вес самого легкого оставшегося элемента будет постоянно возрастать. По этой теории, так как водород — самый легкий известный элемент, и атом водорода содержит около тысячи корпускул,<sup>1)</sup> то все агрегаты из менее, чем тысячи единиц, вступили в соединение и не существуют более в свободном состоянии.

КАК КОРПУСКУЛЫ В АТОМЕ ТЕРЯЮТ ИЛИ ПРИОБРЕТАЮТ  
КИНЕТИЧЕСКУЮ ЭНЕРГИЮ.

Если бы кинетическая энергия, возникающая из движения корпускул относительно центра тяжести атома, могла превращаться благодаря столкновениям в кинетическую энергию, зависящую от движения атома, как целого, т. е. в молекулярную температуру, то так как число корпускул в атоме чрезвычайно велико, из кинетической теории газов следовало бы, что удельная теплота газа при постоянном давлении приблизительно равна удельной теплоте при постоянном объеме; но на самом деле этого нет ни в одном газе. Отсюда мы заключаем, что кинетическая энергия корпускул уменьшается не от столкновений.

Но мы видели (стр. 48), что движущаяся электрическая частица излучает энергию всякий раз, когда ее скорость изменяется по величине или направлению. Таким образом, корпускулы в атоме вызывают электрические волны, испускают лучистую энергию, теряя кинетическую.

<sup>1)</sup> Это вытекает из предположения, что ядро обладает малой массой и большим объемом. Теперь нам известно, что ядро атома водорода имеет размер меньший, чем электрон, и массу, в 1800 раз большую. В атоме водорода, как мы теперь предполагаем, только один электрон. Таким образом, в этой части мы далеко ушли вперед. Необходимо однако отметить, что изложенные в этой главе соображения были первой попыткой подойти к вопросу о строении атома. (Прим. ред.)



Количество энергии, которую корпускулы теряют таким образом, сильно изменяется в зависимости от числа корпускул и способа их движения. Таким образом, если одна корпускула описывает круговую орбиту радиуса  $a$  со скоростью  $v$ , то потеря энергии от радиации в секунду равна  $\frac{2e^2v^4}{3Va^2}$ , где  $e$  есть заряд корпускулы, а  $V$  — скорость света. Если вместо одной корпускулы на противоположных концах диаметра движутся все корпускулы по той же орбите с той же скоростью, как одна корпускула, то потеря энергии в секунду двумя корпускулами гораздо меньше потери энергии одной корпускулой, и, чем меньше скорость корпускулы, тем больше уменьшение потери энергии, вызываемой возрастанием числа корпускул. Влияние увеличения числа корпускул показано в следующей таблице, которая представляет размер излучения каждой корпускулы для разных чисел корпускул, расположенных на равных угловых расстояниях на круговой орбите.

Таблица относится к двум случаям: в одном — скорость корпускул равна десятой доле скорости света, в другом — одной сотой. В обоих случаях излучение одной корпускулы принято за единицу.

Излучение каждой корпускулы.

Число корпускул.	$v = \frac{V}{10}$	$v = \frac{V}{100}$
1 . . . . .	1	1
2 . . . . .	$9,6 \times 10^{-2}$	$9,6 \times 10^{-4}$
3 . . . . .	$4,6 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-7}$
4 . . . . .	$1,7 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-10}$
5 . . . . .	$5,6 \times 10^{-5}$	$5,6 \times 10^{-13}$
6 . . . . .	$1,6 \times 10^{-7}$	$1,6 \times 10^{-17}$

Таким образом, мы видим, что излучение от каждой из группы шести корпускул, движущихся с десятой долей скорости света, менее пятимиллионной части излучения одной корпускулы, описывающей ту же орбиту с той же скоростью. Если же скорость корпускул составляет лишь сотую часть скорости света, то уменьшение радиации гораздо больше.

Если корпускулы выведены из симметрического положения, в которых они находились на равных расстояниях вокруг центра, находящегося в покое, то излучение сильно увеличится. В атоме, содержащем большое число корпускул, количество излучаемой энергии изменяется очень быстро, смотря по роду движения корпускул в атоме. Так, например, если бы большое число корпускул двига-

лось близко друг от друга по круговой орбите, то излучение было бы крайне мало. Оно исчезло бы совершенно, если бы корпускулы были расположены так тесно, что образовали бы непрерывное кольцо отрицательного электричества. Если бы то же число частиц двигалось вокруг в беспорядке, то излучение, т. е. корпускулярное охлаждение, было бы значительно больше, хотя бы кинетическая энергия корпускул в последнем случае была не больше, чем в первом.

Таким образом излучение энергии корпускул, скорость которых не одинакова, представляет процесс, который постепенно понижает корпускулярную температуру атома и, если наш взгляд правилен, позволяет атому образовывать новые соединения, вызывая образование новых химических элементов.

Этот процесс охлаждения должен быть крайне медленным: хотя корпускулярная температура при образовании нового элемента, вероятно, также очень высока и должна значительно убывать прежде, чем атом может войти в новые соединения, однако, мы должны допустить, что некоторые элементы существовали без изменения много тысяч или даже миллионов лет. В самом деле мы не можем непосредственно доказать, что в атоме происходят изменения. Однако я думаю, что некоторые явления радиоактивности, которых я коснусь ниже, если не доказывают, то допускают вполне обоснованную гипотезу, что подобные вековые изменения происходят в атоме.

Мы должны также помнить, что корпускулы всякого атома получают и поглощают излучение других атомов. Это вызывает повышение корпускулярной температуры атома и таким образом способствует удлинению времени, необходимого для понижения температуры до того уровня, когда возможны новые соединения атома.

Тот факт, что сила излучения зависит в такой степени от пути и способа движения корпускул в атоме, показывает, что продолжительность жизни различных атомов отдельного элемента не одинакова. Некоторые из них готовы к новым изменениям гораздо раньше других. Важно выяснить, как велико количество энергии, необходимое для образования сложного атома или для перераспределения корпускул внутри его. Если атом содержит  $n$  корпускул, каждая с зарядом  $e$ , измеренным в электростатических единицах, то общее количество отрицательного электричества в атоме будет  $ne$ , и равное количество положительного электричества распределено по сфере, заряженной положительно. Поэтому работа, необходимая для разложения атома на его составные единицы, может выразиться через



$\frac{(ne)^2}{a}$ , где  $a$  радиус шара, содержащего корпускулы. А так как атом возник из соединения этих единиц, то  $\frac{(ne)^2}{a}$  будет того же порядка величины, как кинетическая энергия, сообщенная этим составным частям в течение всей их жизни со времени их возникновения, как отдельных данных, до момента их вступления в число членов нашего атома. В течение этого периода они должны были излучить большое количество энергии, но следующее вычисление покажет, какое огромное количество кинетической энергии должны содержать корпускулы в атоме даже, если они удержали лишь чрезвычайно малую долю сообщенной им энергии. Вычислим величину  $\frac{(ne)^2}{a}$  для всех атомов, находящихся в одном грамме вещества. Пусть  $N$  будет число этих атомов в грамме, тогда  $N \frac{(ne)^2}{e}$  есть величина энергии, полученной этими атомами. Если  $M$  есть масса атома, то  $NM = 1$ , так что

$$N \frac{(ne)^2}{a} = \frac{1}{M} \frac{(ne)^2}{a};$$

если  $m$  есть масса одной корпускулы, то

$$nm = M,$$

а потому

$$N \frac{(ne)^2}{a} = \frac{e}{m} \frac{ne}{a};$$

если же  $e$  измеряется в электростатических единицах, то

$$\frac{e}{m} = 3 \times 10^{17} \text{ и } e = 3,4 \times 10^{-10};$$

а потому

$$N \frac{(ne)^2}{a} = 10,2 \times 10^7 \times \frac{n}{a}. \quad (1)$$

В случае атома водорода  $n = 1000$ ,<sup>1)</sup> и, если мы за радиус этого атома  $a$  примем величину, обычно принимаемую в кинетической теории газов, т. е.  $10^{-8}$ , то

$$N \frac{(ne)^2}{a} = 1,02 \times 10^{19} \text{ эргов.}$$

Эта величина энергии была бы достаточна, чтобы поднять миллион тонн на высоту, значительно превосходящую 90 метров. Далее из уравнения (1) мы видим, что эта энергия пропорциональна числу корпускул, так что, чем больше молекулярный вес элемента, тем

<sup>1)</sup> Мы уже указывали, что для водорода  $n = 1$ . (Прим. ред.)

больше будет количество энергии, содержащейся в атомах каждого грамма.

Мы возвратимся к природе внутренних изменений в атоме при рассмотрении некоторых явлений радиоактивности; но прежде желательно рассмотреть ближе способ, которым корпускулы располагаются в атоме. Мы начнем со случая, когда корпускулы находятся в покое. Корпускулы предполагаются в сфере однородного положительного заряда, который оказывает радиальную притягательную силу на каждую корпускулу, пропорциональную ее расстоянию от центра сферы; и задача состоит в том, чтобы расположить корпускулы в сфере так, чтобы они были в равновесии под действием этого притяжения и их взаимных отталкиваний. Две корпускулы А и В, как легко видеть, находятся в равновесии, если они лежат на прямой линии с центром сферы (рис. 16), и  $OA = OB = \frac{1}{2}$  радиуса сферы.

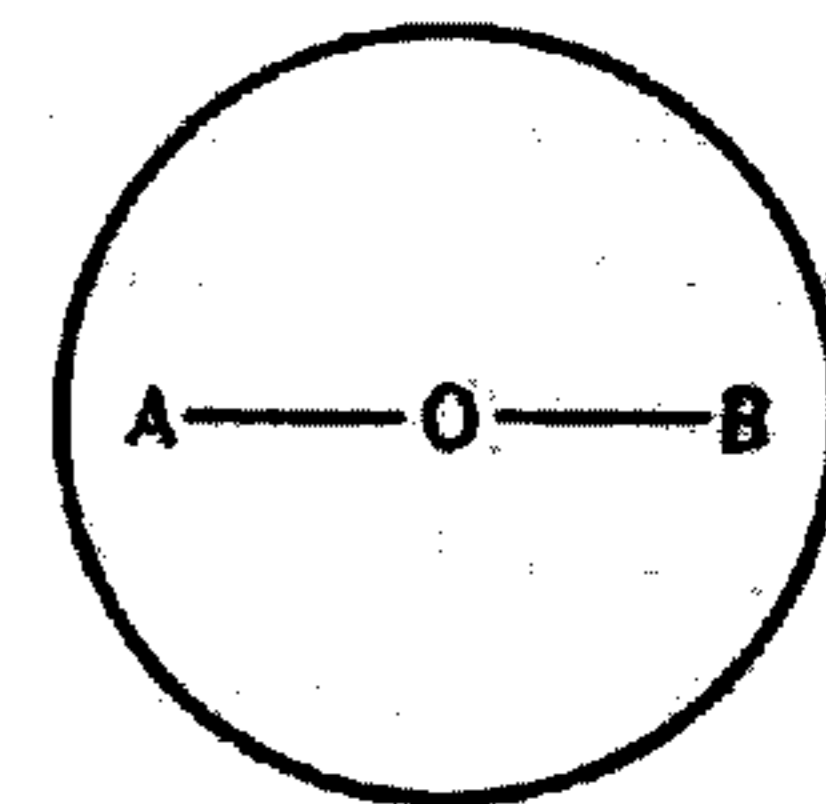


Рис. 16.

Три корпускулы А, В, С находятся в равновесии, если АВС представляет равносторонний треугольник с центром в О (рис. 17), и  $OA = OB = OC = \left(\frac{1}{5}\right)^{1/3}$  или 0,57 радиуса сферы.

Четыре корпускулы находятся в равновесии, если они расположены на вершинах углов правильного тетраэдра с центром, совпадающим с центром сферы. В этих случаях все корпускулы находятся на поверхности сферы, концентрической со сферой положительного заряда, и можно думать, что для всякого числа корпускул положение равновесия будет состоять в симметрическом расположении на поверхности сферы. Во всяком случае такое расположение технически должно представлять равновесие, но математическое вычисление показывает, что это расположение неустойчиво и не может сохраняться, кроме случая, когда число корпускул очень мало, около семи или по большей мере восьми. Когда число корпускул больше этого предельного числа, то корпускулы распадаются на две группы. Одна группа, содержащая меньшее число корпускул, находится на поверхности маленького тела, концентрического со сферой, другая — на поверхности большего концентрического тела. Когда число корпускул еще более возрастает, то наступает стадия, в которой равно-

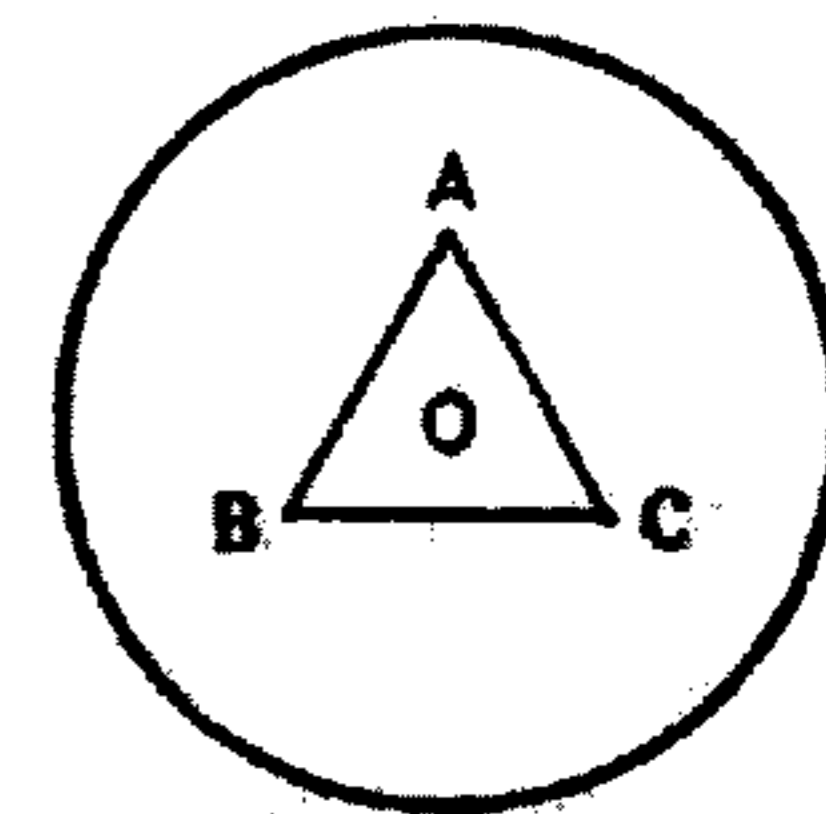


Рис. 17.



весие не может быть устойчиво даже при двух группах, и корпускулы делятся на три группы, расположенные на поверхностях концентрических шаров. Чем более возрастает число корпускул, тем более групп необходимо для равновесия. Для значительного числа корпускул задача нахождения равновесия становится слишком сложной для вычисления. Мы должны обратиться к опыту и попытаться устроить модель, в которой силы, вызывающие равновесие, подобны тем, которые мы предположили действующими в корпускуле. Такую модель представляет простой и изящный опыт, впервые произведенный, насколько мне известно, профессором Майером. В этом опыте несколько маленьких магнитов плавают в сосуде с водой. Магниты состоят из стальных иголок, намагниченных до равной силы, и плавают, воткнутые на маленьких кружках пробки. Магниты располо-

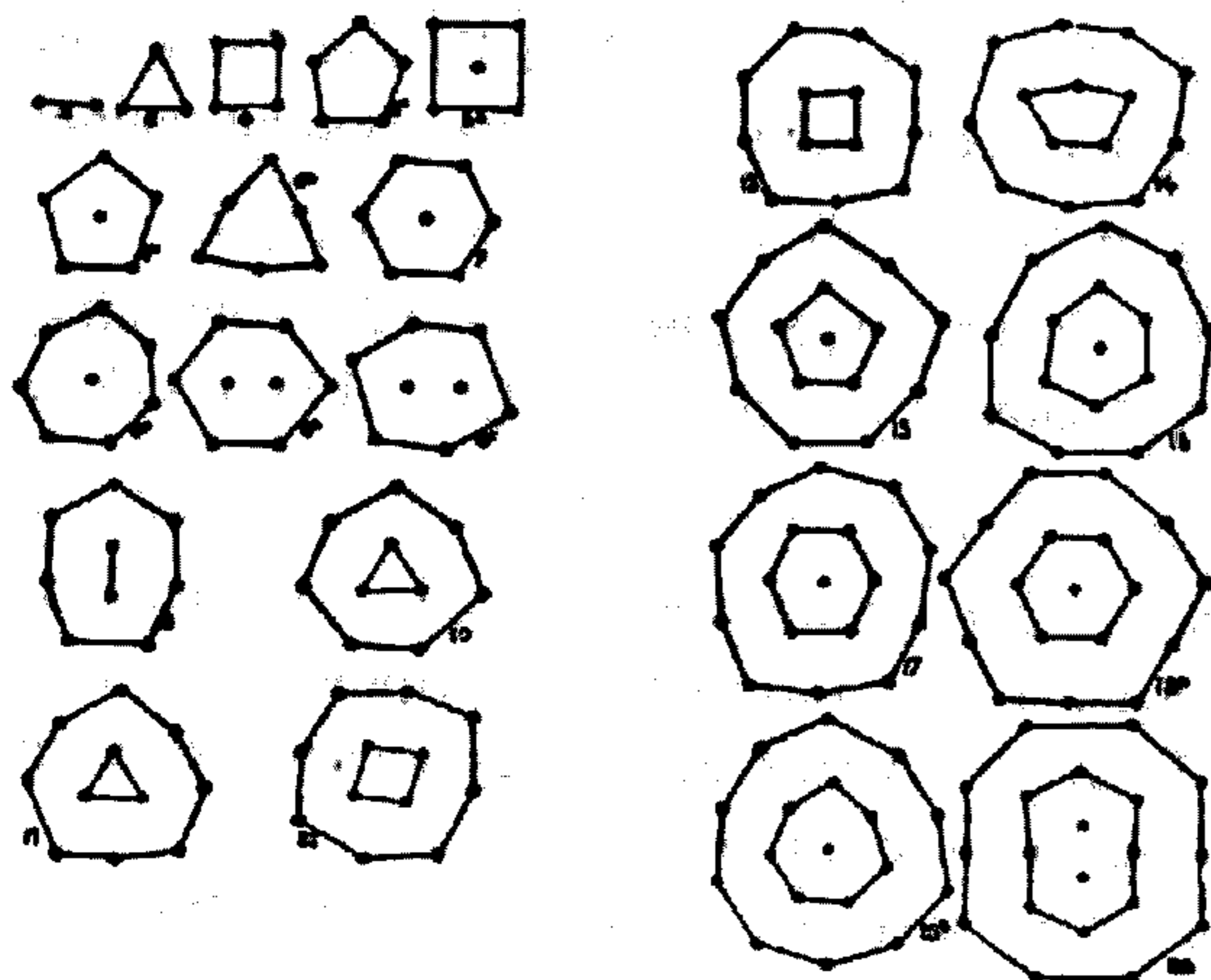


Рис. 18.

жены так, что все положительные полюсы находятся выше или ниже поверхности. Эти положительные полюсы подобно корпускулам отталкиваются друг от друга с силами, изменяющимися обратно пропорционально расстоянию между ними. Притягательная сила действует со стороны отрицательного полюса (если магниты имеют положительные полюсы над водой), подвешенного на некотором расстоянии над поверхностью воды. Этот полюс производит на положительные полюсы маленьких плавающих магнитов притягательную силу, составляющая которой, параллельная поверхности воды, будет направлена радиально к  $O$ , проекции отрицательного полюса на поверхности воды. Если отрицательный полюс находится на некотором расстоянии над поверхностью воды, то эта составляющая приблизительно пропорциональна расстоянию от  $O$ . Таким образом, силы на полюсах плавающих магнитов имеют большое сходство с силами, действующими на корпускулу в нашем гипотетическом атоме. Главное различие состоит в том, что корпускулы могут свободно двигаться

по всем направлениям в пространстве, тогда как полюсы плавающих магнитов принуждены двигаться в плоскости, параллельной поверхности воды.

Расположения, принимаемые плавающими магнитами по мере возрастания числа магнитов от двух до девятнадцати, представлены на чертеже 18, который дан Майером.

Конфигурации, принимаемые магнитами при еще большем числе их, могут быть получены из следующей таблицы, также данной Майером. Из этой таблицы можно видеть, что когда число плавающих магнитов не превосходит пяти, то магниты располагаются на углах правильного многоугольника, пять магнитов по углам пятиугольника, четыре по углам квадрата и т. д. Когда число больше пяти, то расположение становится иным. Так, шесть магнитов не располагаются на углах шестиугольника, но делятся на две системы, так что один находится в центре, а пять вне его по углам правильного пятиугольника. Это расположение в двух группах продолжается до тех пор, пока число их не достигнет пятнадцати, когда получатся три группы; при двадцати семи магнитах получатся четыре группы и т. д.

## РАСПОЛОЖЕНИЕ МАГНИТОВ (МАЙЕР).

1	2	3	4	5
$\begin{cases} 1 \cdot 5 \\ 1 \cdot 6 \\ 1 \cdot 7 \end{cases}$	$\begin{cases} 2 \cdot 6 \\ 2 \cdot 7 \end{cases}$	$\begin{cases} 3 \cdot 7 \\ 3 \cdot 8 \end{cases}$	$\begin{cases} 4 \cdot 8 \\ 4 \cdot 9 \end{cases}$	$\begin{cases} 5 \cdot 9 \end{cases}$
$\begin{cases} 1 \cdot 5 \cdot 9 \\ 1 \cdot 6 \cdot 9 \\ 1 \cdot 6 \cdot 10 \\ 1 \cdot 6 \cdot 11 \end{cases}$	$\begin{cases} 2 \cdot 7 \cdot 10 \\ 2 \cdot 8 \cdot 10 \\ 2 \cdot 7 \cdot 11 \end{cases}$	$\begin{cases} 3 \cdot 7 \cdot 10 \\ 3 \cdot 7 \cdot 11 \\ 3 \cdot 8 \cdot 10 \\ 3 \cdot 8 \cdot 11 \\ 3 \cdot 8 \cdot 12 \\ 3 \cdot 8 \cdot 13 \end{cases}$	$\begin{cases} 4 \cdot 8 \cdot 12 \\ 4 \cdot 8 \cdot 13 \\ 4 \cdot 9 \cdot 12 \\ 4 \cdot 9 \cdot 13 \end{cases}$	$\begin{cases} 5 \cdot 9 \cdot 12 \\ 5 \cdot 9 \cdot 13 \end{cases}$
1	2	3	4	
$\begin{cases} 1 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 12 \\ 1 \cdot 5 \cdot 9 \cdot 13 \\ 1 \cdot 6 \cdot 9 \cdot 12 \\ 1 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 12 \\ 1 \cdot 6 \cdot 10 \cdot 13 \\ 1 \cdot 6 \cdot 11 \cdot 2 \\ 1 \cdot 6 \cdot 11 \cdot 13 \\ 1 \cdot 6 \cdot 11 \cdot 14 \\ 1 \cdot 6 \cdot 11 \cdot 15 \end{cases}$	$\begin{cases} 2 \cdot 7 \cdot 10 \cdot 15 \\ 2 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 14 \end{cases}$	$\begin{cases} 3 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 13 \\ 3 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 14 \\ 3 \cdot 7 \cdot 13 \cdot 14 \\ 3 \cdot 7 \cdot 13 \cdot 15 \end{cases}$	$\begin{cases} 4 \cdot 9 \cdot 13 \cdot 14 \\ 4 \cdot 9 \cdot 13 \cdot 15 \\ 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot 15 \end{cases}$	



Здесь, например, формула  $3 \cdot 7 \cdot 12 \cdot 13$  обозначает, что тридцать пять магнитов располагаются так, что внутри образуется кольцо из трех магнитов, затем кольцо из семи, потом из двенадцати и одно из тринадцати — снаружи.

Я думаю, что эта таблица дает некоторые указания для объяснения некоторых свойств атомов. Возьмем, например, химический закон, называемый периодическим законом; согласно этому закону, если мы расположим элементы в порядке возрастания их атомных весов, то, взяв элемент низкого атомного веса, положим, литий, мы найдем известные свойства, связанные с ним. Этих свойств не обнаруживают элементы, непосредственно следующие за ним в ряду возрастающих атомных весов; но свойства появляются снова, когда мы достигнем натрия, затем они снова исчезают на время, но появляются опять, когда мы дойдем до калия, и т. д. Рассмотрим теперь расположения плавающих магнитов и допустим, что число их пропорционально атомному весу элемента. Тогда, если какое-либо свойство связано с треугольным расположением магнитов, то оно обнаруживалось бы элементами, коих атомный вес по этой шкале равен трем; но оно не появлялось бы, пока мы не достигли бы атомного веса десять, когда свойство снова показывается, так как здесь мы имеем снова треугольное расположение в середине и кольцо из семи магнитов снаружи. Когда число магнитов возрастает, то треугольное расположение исчезает на время, но появляется снова при двадцати магнитах и снова при тридцати пяти. Треугольное расположение появляется и исчезает таким же образом, как и свойства элементов в периодическом законе. Как пример свойства, которое может быть связано с особенной группировкой корпускул, возьмем числа колебаний системы, как они обнаруживаются положением линий в спектре элемента. Сначала возьмем случай 3 корпускул, когда они сами по себе находятся в положительно заряженном шаре. Три корпускулы имеют девять степеней свободы, так что здесь возможны девять периодов. Некоторые из этих периодов в данном случае бесконечно велики, а многие из возможных периодов равны между собою, так что здесь нет девяти различных периодов.

Допустим, что спектральные линии трех корпускул представлены на чер. 19, где цифры под линиями представляют число периодов, совпадающих на этой линии, т. е., если периоды даны уравнением с девятью корнями; допустим, что только один корень представляет период, соответствующий линии *A*, тогда как линии *B* соответствуют два равные корня, линии *C* — три, линии *D* — один и линии *E* — два

равные корня. Эти периоды имеют между собою известные численные отношения, независимые от заряда корпускул, от размера сферы, в которой они находятся или от их расстояния от центра сферы. Каждое из этих количеств, хотя не влияет на отношение периодов, имеет большое влияние на абсолютную величину каждого из них. Теперь предположим, что эти три корпускулы находятся в сфере не одни, но образуют лишь одну из многих групп в ней точно так, как треугольник из магнитов представляет составную часть групп, состоящих из 3, 10, 20 и 35 магнитов. Рассмотрим, как присутствие других групп влияет на периоды колебаний трех корпускул. Абсолютные величины периодов вообще были бы различны, но отношение между различными периодами было бы гораздо устойчивее, могло бы быть изменено, но не нарушено. Пользуясь терминологией теории планетных движений, мы можем считать движение трех корпускул „возмущенным“<sup>1)</sup> другими группами.

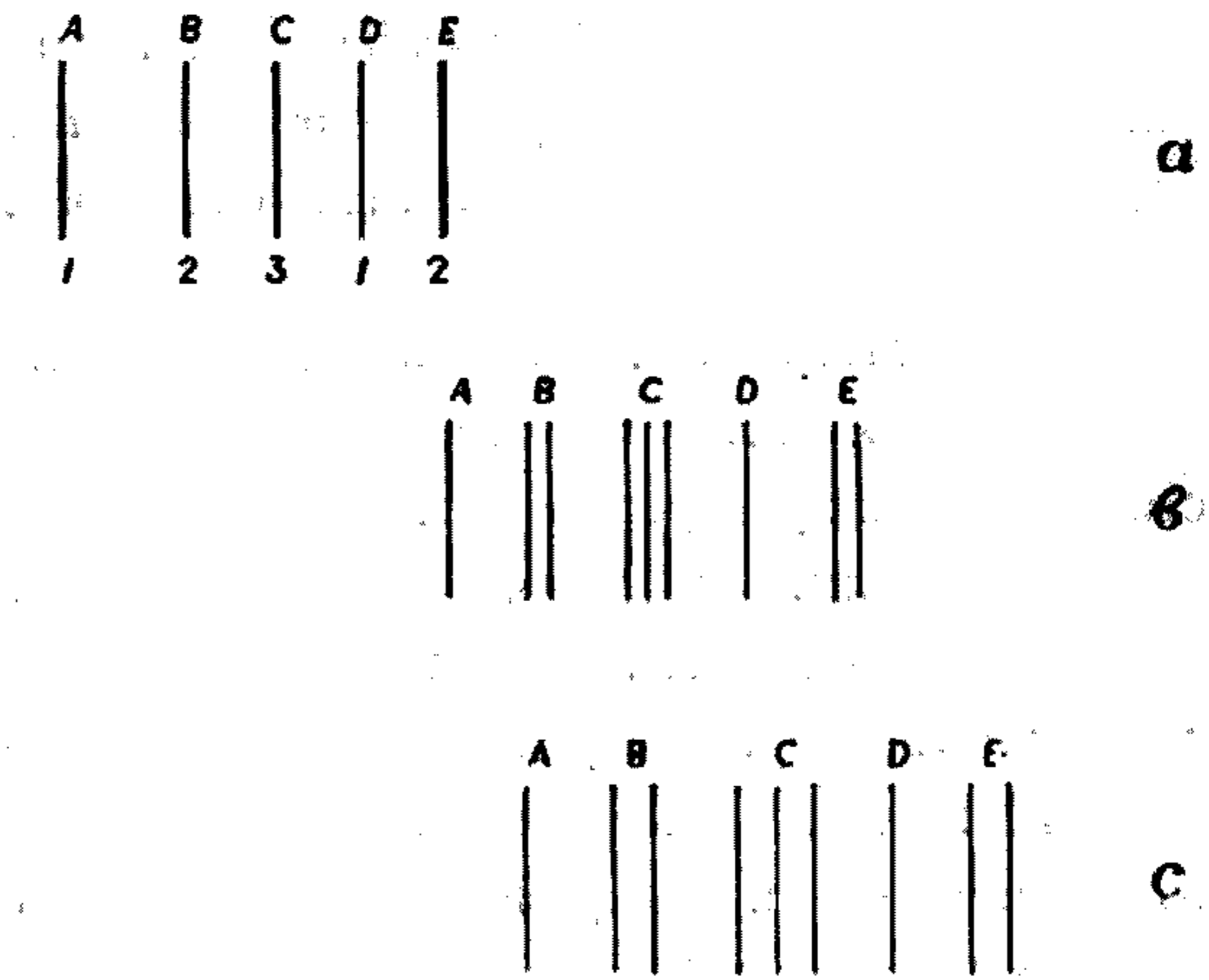


Рис. 19.

Когда группа трех корпускул была одна, здесь были различные смещения, которые имели тот же период колебаний; например, для линии *C* здесь были три смещения одинакового периода. Когда же здесь есть другие группы, то эти различные смещения уже не симметричны относительно этих групп, так что три периода уже не вполне равны между собою. Но они были бы приблизительно равны, если бы влияние других групп не было очень велико. Так, в спектре *C* вместо одной линии представило бы триплет, тогда как *B* и *E* дали бы дуплеты. *A* и *D* остались бы простыми линиями.

<sup>1)</sup> Хотя происхождение спектральных линий теперь объясняется перекачиванием электрона с одной устойчивой орбиты на другую, согласно теории Бора, однако, вопрос о „возмущении“ играет и теперь большую роль в теории спектров.

(Прим. ред.)



Таким образом, спектр теперь имел бы вид черт. 19а; чем больше число групп, окружающих группу трех корпускул, тем более движение последней будет возмущено, и тем больше будет расхождение составных частей триплетов и дублетов. Изображение по мере возрастания числа групп представлено на черт. 19 в, с. Поэтому, если мы допустим, что элемент, содержащий эту особенную группировку корпускул, принадлежит к той же группе в классификации элементов согласно периодическому закону, то получим в спектрах этих элементов гомологичные ряды линий, в которых расстояния между составляющими дублетов и триплетов возрастают с атомным весом элементов. Исследования Ридберга (Rydberg), Рунге (Runge) и Пашена (Paschen) и Кейзера (Keyser) показали присутствие в спектрах элементов той же группы рядов линий, имеющих во многих отношениях сходные свойства, как в описанных нами.

Другой интересный пункт в опытах Майера состоит в том, что для одного и того же числа магнитов существует более одной устойчивой конфигурации. Эти конфигурации соответствуют разным количествам потенциальной энергии, так что переход от конфигурации и большей потенциальной энергии к меньшей сообщит корпускуле кинетическую энергию. Из количеств потенциальной энергии, заключенных в атоме, которые мы определили на стр. 70, мы заключаем, что даже ничтожная перемена потенциальной энергии разовьет количество кинетической энергии, которое, будучи превращено в теплоту, далеко превзойдет количество теплоты, развиваемой при каком-либо известном химическом соединении атомов.

Рассмотрение таблицы показывает, что в ней есть известные места, где природа конфигурации меняется очень быстро с числом магнитов. Так, пять магнитов образуют одну группу, а шесть магнитов — две; четырнадцать магнитов образуют две группы, пятнадцать — три; двадцать семь магнитов образуют три группы, двадцать восемь — четыре и т. д. Если мы расположим химические элементы в порядке их атомных весов, то найдем, что в известных местах различие свойств последовательных элементов чрезвычайно велико; так, например, мы видим крайнее различие в свойствах между фтором и натрием. Затем наблюдается большая или меньшая непрерывность свойств, пока мы не дойдем до хлора, за которым следует калий; следующий перерыв лежит между бромом и рубидием и т. д. Это явление кажется аналогичным перегруппировке магнитов.

До сих пор мы предполагали, что корпускулы находятся в покое; если же они находятся в состоянии устойчивого движения и описывают круговые орбиты около центра сферы, то центробежная сила, возникающая из этого движения, будет удалять корпускулы от центра сферы, не нарушая во многих случаях конфигурации. Так, например, если в сфере находятся три корпускулы, то в состоянии равномерного движения они расположатся по углам равностороннего треугольника, как если бы они были в покое, но этот треугольник будет вращаться около центра сферы, и расстояние корпускул от центра будет больше, чем когда они в покое, и будет возрастать со скоростью корпускул.

Но во многих случаях вращение существенно для устойчивости конфигурации. Так, возьмем случай четырех корпускул. При быстром вращении они находятся в устойчивом равномерном движении, располагаясь по углам квадрата, плоскость которого перпендикулярна к оси вращения. Когда же скорость вращения корпускул падает ниже известной величины, то расположение четырех корпускул в одной плоскости становится неустойчивым, и корпускулы стремятся поместиться по углам правильного тетраэдра, который представляет устойчивое расположение, когда корпускулы находятся в покое. Систему четырех корпускул по углам квадрата можно сравнить с волчком, который подобно корпускулам устойчив лишь, когда его скорость вращения превосходит известную критическую величину. Предположим, что вначале скорость корпускул превосходит эту величину, но тем или иным способом корпускулы постепенно теряют свою кинетическую энергию; квадратное расположение сохранится, пока скорость корпускул не уменьшится до критической величины. Тогда расположение станет неустойчиво, и в системе произойдет сотрясение, сопровождаемое развитием большой кинетической энергии.

Полобные же рассуждения применяются ко многим группировкам корпускул. В таких случаях, когда корпускулы вращаются с большой скоростью (как в случае четырех корпускул), конфигурация будет существенно отлична от конфигурации того же числа корпускул, когда они в покое. Таким образом, должна быть критическая скорость корпускул, так что для скоростей больших, чем критическая, конфигурация устойчива; она неустойчива, когда скорость падает ниже критической величины. Когда наступает неустойчивость, то происходит известное содрогание или взрыв, сопровождаемый сильным уменьшением потенциальной энергии и соответ-



ственным увеличением кинетической энергии корпускул. Это возрастание кинетической энергии корпускул может быть достаточно для того, чтобы оторвать значительное число их от первоначальной системы.

Эти рассуждения имеют непосредственную связь с теорией строения атомов, принятой нами в этой главе. Именно они показывают, что в атомах особого рода, т. е. определенного атомного веса, корпускулярное охлаждение, вызываемое принятым нами медленным излучением движущихся корпускул, может по достижении известного предела вызвать внутри атома неустойчивость и такое увеличение кинетической энергии корпускул, что излучение сильно возрастет, и возможно отделение части атома. Атом станет выделять энергию, источник которой в потенциальной энергии, зависящей от расположения корпускул в атоме. При рассмотрении явлений радиоактивности мы увидим, что есть группа тел, которые обнаруживают явления, аналогичные только-что описанным.

Допустим, что сначала образуются более легкие элементы соединением пары единиц, отрицательный элемент которой образует корпускулы, а из соединения атомов более легких элементов происходят атомы более тяжелых элементов. Тогда мы должны ожидать, что корпускулы тяжелых атомов располагаются как бы в пучки, причем расположение корпускул в каждом пучке подобно расположению в атоме более легкого элемента. В более тяжелом атоме эти пучки будут играть роль вторичных единиц, так что каждый пучок соответствует одному из магнитов в модели, состоящей из плавающих магнитов, тогда как в самых пучках корпускулы аналогичны магнитам.

Теперь мы должны перейти к рассмотрению того, может ли атом, построенный предположенным нами способом, обладать некоторыми свойствами реального атома. Даст ли, например, эта модель атома объяснение электрохимических свойств реального атома, свойств в роде того, что химические элементы делятся на два класса, электроположительные и электроотрицательные. Почему, например, при таком составе атома, атом калия или натрия стремится приобрести положительное электричество, а атом хлора отрицательный заряд? Затем указывает ли что-нибудь в модели атома на присутствие такого свойства, как так называемая у химиков валентность, т. е. свойство, позволяющее нам делить элементы на группы и называть элементы одноатомными, двуатомными, трехатомными, так что молекула соединения двух элементов первой группы содержит то же число атомов каждого элемента, тогда как молекула соединения элемента А первой

группы с элементом В второй содержит вдвое более атомов А, чем В, и т. д.

Вернемся к свойствам модели атома. Она содержит очень большое число корпускул в быстром движении. Из явлений, связанных с проводимостью электричества через газы, мы знаем, что одна или несколько таких корпускул может быть отделена от атома. Они могут оторваться, благодаря их большой скорости, позволяющей им выйти из сферы притяжения атома. Они могут также оторваться, благодаря столкновению атома с другими быстро движущимися атомами или свободными корпускулами. Когда же корпускула оторвалась от атома, то последний будет заряжен положительно. Этим будет затруднено выделение второй отрицательно заряженной корпускулы, ибо, вследствие положительного заряда атома, он будет сильнее прежнего притягивать вторую корпускулу. Теперь нетрудно понять, что легкость, с которой частица может оторваться или быть выброшена из атома, может сильно изменяться в атомах разных элементов. В некоторых атомах скорости корпускул могут быть так велики, что корпускула сразу отрывается от атома. Может даже случиться, что после отделения одной притяжение оставшегося в атоме положительного электричества будет недостаточно, чтобы удержать вторую или даже третью корпускулу. Такие атомы получают положительные заряды одной, двух или трех единиц, смотря по тому, потеряли ли они одну, две или три корпускулы. С другой стороны, есть атомы, в которых скорости корпускул так малы, что лишь немногие или даже ни одна корпускула не отрывается сама собою. Атомы могут даже быть способны присоединять одну или даже более одной корпускулы прежде чем отталкивание, производимое отрицательным электричеством на эти чуждые корпускулы, заставит некоторые из первоначальных корпускул оторваться. Когда такие атомы вступают в область, где находятся корпускулы, то, благодаря соединению с этими корпускулами, атомы получают отрицательный заряд. Величина отрицательного заряда будет зависеть от силы, с которой атом удерживал свои корпускулы. Если бы отрицательный заряд одной корпускулы был недостаточен для вытеснения корпускулы, а отрицательный заряд двух корпускул был способен к этому, то максимальный отрицательный заряд атома был бы равен единице. Если бы две корпускулы были недостаточны для вытеснения корпускулы, а необходимы три, то максимальный отрицательный заряд был бы равен двум единицам и т. д.

Таким образом, атомы этого класса стремятся получить заряд



отрицательного электричества и соответствуют электроотрицательным химическим элементам, тогда как атомы класса, рассмотренного нами раньше и легко теряющие корпускулы, приобретают положительный заряд и соответствуют атомам электроположительных элементов. Мы можем представить себе атомы, в которых корпускулы так точно уравновешены, что, хотя они сами по себе не теряют корпускул и потому не получают положительного заряда, но отталкивание, вызываемое приближающейся к атому чуждой корпускулой, достаточно для того, чтобы вытеснить корпускулу. Такой атом не мог бы получить ни положительного ни отрицательного заряда.

Предположим, что известное число атомов, легко теряющих свои корпускулы, смешаны с известным числом атомов, не могущих удерживать чуждую корпускулу. Назовем атом первого класса А, атом второго класса В и предположим, что атомы А такого рода, что теряют одну корпускулу, тогда как атомы В такого рода, что могут удерживать одну, но не более одной корпускулы. Тогда корпускулы, выделяемые атомами А, пристанут, наконец, к атомам В, и, если число обоих родов атомов у нас равно, то наконец все атомы А будут заряжены единицей положительного электричества, а все атомы В единицей отрицательного электричества. Противоположно заряженные атомы будут притягивать друг друга, и возникнет соединение АВ. Если бы атомы А были такого рода, что теряли бы две корпускулы, а атомы В те же, что и прежде, то атомы А получили бы заряд двух положительных единиц, атомы В — заряд одной отрицательной единицы. Таким образом, для образования нейтральной системы два атома должны соединиться с одним атомом А, и возникло бы соединение АВ<sub>2</sub>.

Таким образом, с этой точки зрения одновалентный положительный атом имеет свойство при условиях, когда он соединяется с другим атомом, терять одну только корпускулу, прежде чем достигнет устойчивости. Одновалентный электроотрицательный атом может присоединять одну только корпускулу, не вытесняя других корпускул из атома. Двувалентный электроположительный атом теряет две корпускулы, но не более и т. д. Таким образом, валентность атома зависит от легкости, с которой корпускулы могут отрываться или приставать к атому. На нее могут влиять обстоятельства, при которых происходит соединение атомов. Так, для корпускулы, оторвавшейся от атома, легче противостоять притяжению положительного заряда, если атом окружен хорошими проводниками, чем, если он изолирован в пространстве. Поэтому понятно, каким образом на

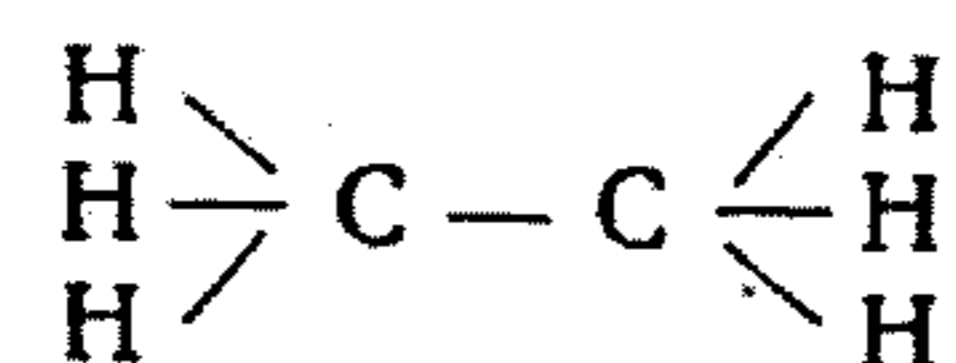
валентность атома в некоторой степени могут влиять физические условия, при которых происходит соединение.

Допуская, что притяжение между атомами в химическом соединении электрического происхождения, мы можем сказать, что способность элемента вступать в химическое соединение зависит от того, способен ли его атом получать электрический заряд. С изложенной точки зрения это предполагает, что или незаряженный атом неустойчив и должен потерять одну или более корпускул прежде, чем он достигнет устойчивости, или же он так устойчив, что может удержать одну или более добавочных корпускул, не вытесняя ни одной первоначальной корпускулы. Если степень устойчивости такова, что атом, хотя устойчивый в незаряженном состоянии, становится неустойчив, присоединяя добавочную корпускулу, то атом не способен получить ни положительного ни отрицательного заряда и потому не может войти в химическое соединение. Такой атом будет иметь свойства таких элементов, как аргон или гелий.

Взгляд, что силы, связывающие атомы в молекулы химических соединений, электрического происхождения, был впервые высказан Берцелиусом; это было также мнением Дэви и Фарадея. Гельмгольц также признавал, что химические силы электрического происхождения. Вообще же, химики, повидимому, мало пользовались этой идеей, находя представление о „единицах сродства“ более плодотворным. Но учение о единицах сродства в известном отношении почти тождественно с электрической теорией. Теория единиц, представленная графически, предполагает, что от каждого одновалентного атома выходит прямая линия (символ сродства); двувалентный атом находится на конце двух таких линий, трехвалентный — на конце трех и т. д. Если представить химическое соединение такой графической формулой, то каждый атом должен быть на конце соответственного числа линий, представляющих сродство. Но по электрической теории химических соединений одновалентный атом имеет одну единицу заряда, если мы примем за единицу заряд корпускулы. Таким образом, атом есть начало или конец одной фарадеевой трубки: начало, если заряд атома положителен, конец, если заряд отрицателен. Двувалентный атом имеет две единицы заряда и потому представляет начало или конец двух фарадеевых трубок. Итак, если мы определим „сродство“ химиков, как признак наличия единичной фарадеевой трубки, связывающей заряженные атомы в молекулу, то структурные формулы химиков могут без труда быть переведены на электрическую теорию. Но



здесь есть некоторое различие, которое заслуживает более близкого рассмотрения: символ, обозначающий сродство в химической теории, не предполагает направления. По этой теории не делается различия между концами линии сродства. По электрической же теории есть разница между концами, так как один конец соответствует положительному заряду, а другой — отрицательному. Один или два примера лучше всего объяснят результат этого различия. Возьмем газ этан, структурная формула которого пишется так:



По химической теории нет разницы между двумя атомами угля в этом соединении; но по электрической теории здесь есть различие. Ибо допустим, что все атомы водорода заряжены отрицательно; тогда три фарадеевы трубки, идущие от атомов водорода к каждому атому углерода, дают положительный заряд в три единицы на каждом атоме углерода. Но в дополнение к фарадеевым трубкам, идущим от атомов водорода, здесь имеется трубка, идущая от одного атома углерода к другому. Это обозначает добавочный положительный заряд на одном атоме угля и отрицательный заряд на другом. Таким образом, один из атомов углерода будет иметь заряд в четыре положительные единицы, а другой будет иметь заряд в три положительные и одну отрицательную единицы, т. е. в две положительные единицы, так что с этой точки зрения два атома углерода находятся не в одинаковом положении. Еще большее различие должно быть между атомами, когда мы имеем то, что называется двойной связью, т. е. когда атомы углерода связаны двумя единицами сродства, как в соединении



Здесь, если бы один атом углерода имел заряд в четыре положительные единицы, то другой имел бы заряд в две положительные и две отрицательные единицы.

Мы могли бы ожидать, что откроем такие различия при исследовании того, что известно под именем аддитивных свойств, т. е. свойств, которые могут быть вычислены, когда известен химический состав молекулы. Пусть, например, А, В, С будут атомы трех химических элементов; тогда, если  $p$  есть величина некоторой физической постоянной для молекулы  $A_2$ ,  $q$  — величина для  $B_2$  и  $r$  для

$C_2$ , и эта постоянная подчиняется аддитивному закону, — величина эта для молекулы вещества, химический состав которого выражается формулой  $A_x B_y C_z$ , будет

$$\frac{1}{2} px + \frac{1}{2} qy + \frac{1}{2} rz.$$

Существование таких отношений можно ожидать лишь, когда атомы, которые встречаются в различных соединениях, соответствующих разным величинам  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , те же самые. Если атом А встречается в различных состояниях в разных соединениях, то для этих соединений надо пользоваться различными величинами  $p$ .

Хорошо известный пример аддитивных свойств представляет преломляющая способность разных веществ по отношению к свету, и в этом случае химики находят нужным пользоваться различными величинами преломления через атом углерода, смотря по тому, имеет ли атом одну или две связи. Но они пользуются той же величиной для преломления атома углерода, когда он имеет одну связь с другим атомом или, как в соединении  $CH_4$ , он вовсе не связан с другим атомом углерода.

Можно, правда, представить себе, что в соединении один атом заряжен положительно, а другой отрицательно, когда атомы разного рода. Но этого трудно достигнуть, когда атомы одного рода, как в молекулах элементарных газов  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  и т. д. В этом отношении надо заметить, что электрическое состояние атома, зависящее от его способности выделять или присоединять корпускулы, может в широких размерах обуславливаться обстоятельствами, внешними для атома. Так, например, атом газа, окруженный быстро движущимися атомами или корпускулами, которые постоянно сталкиваются с ним, будет, благодаря этим столкновениям, терять корпускулы и таким образом приобретет положительный заряд. С другой стороны, можно ожидать, что при равенстве прочих условий атом, находящийся в газе, будет менее способен терять корпускулу, чем если он находится в твердом или жидком теле. Ибо, когда корпускула в газе покинула атом, то она не может противопоставить притяжению положительно заряженного атома ничего, кроме собственной скорости, так как другие атомы слишком удалены для того, чтобы оказывать какое-либо действие на нее. Когда же атом находится в жидком или твердом теле, то притяжения других атомов, окружающих этот атом, могут удержать корпускулу, покинувшую свой атом, от падения обратно в атом. Как пример такого действия,



можно взять ртуть в жидком или газообразном состоянии. В жидком состоянии ртуть — хороший проводник электричества. Один способ представления этой проводимости состоит в предположении, что корпускулы оставляют атомы ртути и странствуют по промежуткам между атомами. Если на эти заряженные корпускулы действует электрическая сила, то они приходят в движение и образуют электрический ток, при чем проводимость жидкой ртути указывает на присутствие большого числа корпускул. Когда же ртуть в газообразном состоянии, то ее электропроводность, как доказал Стрэтт, представляет чрезвычайно малую долю проводимости, свойственной тому же числу жидких молекул. Это указывает на то, что даже атомы электроположительного вещества, подобно ртути в газообразном состоянии, могут терять сравнительно мало корпускул. Теперь предположим, что у нас большое число атомов одного рода в газообразном состоянии, движущихся по всем направлениям и приходящих во взаимное столкновение. Те, которые движутся быстрее и потому сталкиваются сильнее, будут легче терять корпускулы, чем движущиеся медленнее. Первые, благодаря потере своих корпускул, становятся положительно заряжены, и, если атомы не слишком электроположительны, чтобы удерживать отрицательный заряд даже в газообразном состоянии, то выделенные корпускулы стремятся пристать к атомам, движущимся медленнее.

Таким образом, некоторые из атомов, будут заряжены положительно, другие отрицательно, и атомы с противоположными зарядами соединятся в двухатомные молекулы. Это не применимо к весьма электроположительным газам. Они не образуют молекул; но, так как в газе много свободных корпускул, то можно ожидать, что он обладает значительной электропроводностью.

## ГЛАВА VI.

### РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА. <sup>1)</sup>

В 1896 году Беккерель (Becquerel) открыл, что уран и его соли обладают способностью выделять лучи, которые, подобно лучам Рентгена и катодным лучам, действуют на фотографическую пластинку и делают газ, через который они проходят, проводником электричества.

В 1898 г. Шмидт (Schmidt) открыл, что торий обладает подобными же свойствами. Эта способность выделять лучи называется радиоактивностью, а вещества, обладающие этой способностью, называются радиоактивными.

Это свойство урана подало повод к тщательному исследованию большого числа минералов, содержащих это вещество, и г. и г-жа Кюри (Curie) нашли, что некоторые из них и особенно некоторые виды смоляной обманки более радиоактивны, чем равные объемы чистого урана, хотя только часть этих минералов состояла из урана. Это указывало на то, что эти минералы содержат вещество или вещества гораздо более радиоактивные, чем самый уран, и начато было систематическое исследование с целью изолирования этих веществ. После долгих исследований, которые г. и г-жа Кюри вели с удивительным искусством и настойчивостью в сотрудничестве гг. Бэмона (Bémont) и Дебиерна (Debiern), им удалось установить существование трех новых радиоактивных веществ в смоляной обманке: радий, связанный в минерале с барием и весьма похожий на него по своим химическим свойствам полоний, связанный с висмутом, и актиний, с торием. Им удалось изолировать первый из них и определить атомный вес, оказавшийся равным 225. Спектр его был открыт и исследован Демарсе (Demarçay). Полоний и актиний до сих пор еще не изолированы, и спектры их

<sup>1)</sup> Эта глава была написана в то время, когда учение о радиоактивных процессах только начинало развиваться, так что она имеет теперь только исторический интерес.



не исследованы. Активность полония оказалась преходящей: она исчезает через несколько месяцев после его получения.

Эти радиоактивные вещества встречаются не только в редких минералах. Недавно я нашел, что многие виды воды из глубоких колодцев содержат радиоактивный газ, а Эльстер и Гейтель (Elster a. Geitel) нашли, что подобный газ содержится в почве.

Эти радиоактивные вещества должны оказать величайшие услуги при исследовании вопросов, касающихся природы атома и изменений, происходящих в атоме от времени до времени. Ибо свойства этих веществ так резко выражены, что сравнительно легко открыть чрезвычайно малые количества их. Количество этих веществ, могущих быть открытыми, относится к соответствующему количеству других веществ, которые можно открыть обыкновенными способами химического анализа, как одна секунда к тысячам лет. Поэтому перемены, которые в нерадиоактивных веществах должны бы происходить в течение почти геологических эпох, пока они станут достаточно заметны, могут в радиоактивных веществах вызывать заметные действия в течение немногих часов.

#### ХАРАКТЕР ИЗЛУЧЕНИЯ.

Рёзерфорд нашел, что излучение урана состоит из трех различных типов, которые он называет лучами  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , а затем найдено то же самое для тория и радия.

Излучение  $\alpha$  весьма легко поглощается и не способно проникать более, чем на несколько миллиметров, в воздух при атмосферном давлении. Излучение  $\beta$  проникает гораздо сильнее, а излучение  $\gamma$  обладает наибольшей из всех способностью проникновения. Исследования над действием магнитных и электрических сил на эти три типа излучений показали, что они имеют совершенно различный характер. Беккерель показал, что лучи  $\beta$  отклоняются электрическими и магнитными силами, и направление отклонения показывает, что лучи несут заряд отрицательного электричества. Пользуясь методом, описанным в главе IV, он определил величину  $\frac{e}{m}$ , отношение заряда к массе носителей отрицательного электричества; он нашел, что оно составляет около  $10^7$  и что скорость для некоторых лучей больше двух третей скорости света. Таким образом, он доказал, что лучи  $\beta$  состоят из корпускул, движущихся с поразительной скоростью.

Лучи  $\alpha$  далеко не так легко отклоняются, как лучи  $\beta$ , но Рёзерфорд недавно показал, что они могут отклоняться в на-

правлении, показывающем, что они несут положительный заряд. Он находит, и его измерения были подтверждены Декудром (Des Coudres), что отношение  $\frac{e}{m}$  равно  $6 \times 10^3$ ,<sup>1)</sup> и скорость этих частиц составляет  $2 \times 10^9$  в секунду. Величина  $\frac{e}{m}$  показывает, что носители положительного заряда имеют массы, сравнимые с массами обыкновенных атомов: так, для водорода  $\frac{e}{m}$  равно  $10^4$ , а для гелия— $2,5 \times 10^3$ . Необыкновенная скорость, с которой выбрасываются эти частицы, предполагает громадное потребление энергии, к чему мы ниже возвратимся. Один из наиболее интересных выводов из этого факта состоит в том, что величина  $\frac{e}{m}$  показывает, что выделяемые атомы не атомы радия, так что радий должен быть соединением, содержащим более легкие элементы, или же атом радия распадается на такие элементы. Величина  $\frac{e}{m}$  для лучей  $\alpha$ , полученная Рёзерфордом и Декудром, указывает на существование газа, который тяжелее водорода, но легче гелия. Лучи  $\gamma$ , насколько нам известно, не отклоняются ни магнитными ни электрическими силами.

Радиоактивные вещества имеют большое сходство с веществом, выделяющим вторичные лучи под влиянием лучей Рентгена. Как известно, вторичные лучи содержат лучи типов  $\beta$  и  $\gamma$ , и часть лучей чрезвычайно легко поглощается и проникает в воздух при атмосферном давлении не далее одного миллиметра. Поэтому возможно, что более близкое исследование покажет, что лучи  $\alpha$ , т. е. частицы, заряженные положительно, здесь также присутствуют. Эта аналогия поднимает вопрос, не освобождается ли энергия, когда лучи Рентгена попадают на тело. Это, как мы увидим, бывает в радиоактивных веществах, когда энергия, выделяемая излучающими веществами, больше энергии рентгеновых лучей, падающих на них. Этот избыток энергии происходит от изменений, имеющих место в атомах тела, подверженного действию рентгеновых лучей. Этот вопрос заслуживает исследования, так как оно может указать способом действием внешних сил освобождать энергию, заключенную в атоме, что радиоактивные тела делают самопроизвольно.

<sup>1)</sup> Теперь доказано, что  $\alpha$ -частицы представляют собой атомы гелия, лишенные двух электронов. (Прим. ред.)



## ЭМАНАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ.

Рёзерфорд открыл, что торий выделяет нечто радиоактивное, увлекаемое воздушными течениями, как-будто это газ. Чтобы не предрешать вопроса о физическом состоянии вещества, выделяемого радием, Рёзерфорд назвал его „эманацией“. Эманация может проходить через воду или сильнейшую кислоту и нагреваться до температуры раскаленной платины, не теряя нисколько своей радиоактивности. Этой кособью она похожа на газы аргон и гелий, из коих последний почти всегда находится в соединении с торием. Радиоактивность эманации тория весьма непостоянна и падает до половины своей величины почти в одну минуту.

Супруги Кюри нашли, что радий также выделяет радиоактивную эманацию, которая гораздо устойчивее выделяемой торием, так как она теряет половину своей активности почти в четыре дня.

Повидимому, с полным основанием можно думать, что эти эманации представляют радиоактивное вещество в газообразном состоянии. Они могут увлекаться воздушными течениями с одного места на другое. Подобно газам они проникают через пористую пробку со скоростью, показывающей, что их плотность очень велика. Они диффундируют постепенно через воздух и другие газы. Коэффициент диффузии эманации радия через воздух был измерен Рёзерфордом и мисс Брукс (Brooks), которые пришли к заключению, что плотность эманации — около 80. Эманация радия превращена в жидкость Рёзерфордом и Содди, и я, благодаря любезности проф. Дьюара (Dewar), имел возможность обратить в жидкость радиоактивный газ, полученный из воды глубоких колодцев, очень похожий на эманацию и, вероятно, тождественный с нею. Одним словом, эманации выдерживают всякое испытание, которым можно доказать их газообразное состояние. Правда, они не могут быть открыты ни обыкновенными химическими методами ни спектральным анализом, но это лишь потому, что они получаются в крайне малых количествах даже для того, чтобы их можно было открыть спектральным анализом. Этот метод оказывается слишком грубым в сравнении с электрическими методами, которые мы можем применить к радиоактивным веществам. Я думаю, что не будет преувеличением сказать, что электрическим методом с достоверностью можно открыть количество радиоактивного вещества, меньшее одной стотысячной доли наименьшего количества, которое можно открыть спектральным анализом.

Всякая часть соли радия или тория даст эманацию все равно, находится ли эта часть на внутренней или внешней стороне соли, но эманация, идущая изнутри соли, не выделяется в воздух, но остается заключенной в соли и скопляется там. Когда такая радиоактивная соль разлагается в воде, то сначала развивается большее количество эманации, которая была скрыта в твердой соли. Эманацию можно извлечь из воды кипячением или пропусканием воздуха через нее. Скрытую эманацию можно также извлечь из солей в твердом виде, нагревая их до высокой температуры.

Индукцированная радиоактивность. <sup>1)</sup>

Рёзерфорд открыл, что вещества, подверженные действию эманации тория, становятся радиоактивными, а супруги Кюри почти одновременно открыли, что тем же свойством обладает эманация радия. Это явление называется индукцированной радиоактивностью. Количество ее не зависит от природы вещества, в котором она индуктируется. Так, бумага становится так же радиоактивна, как металл, в соприкосновении с эманациями тория или радия.

Индукцированная радиоактивность развивается именно на веществах, заряженных отрицательно. Так, если эманация содержится в замкнутом сосуде, в котором находится отрицательно заряженная проволока, то индукцированная радиоактивность сосредоточивается на этой проволоке и может быть обнаружена на отрицательно заряженных телах, когда она слишком слаба, чтобы быть замеченной на незаряженных поверхностях. Тот факт, что природа индукцированной радиоактивности не зависит от вещества, в котором она индуктируется, указывает на то, что она происходит от радиоактивной материи, которая выделяется из эманации на веществах, к которым она прикасается.

Дальнейшее подтверждение этого представляет опыт мисс Гэтс (Gates), состоявший в том, что индукцированная на тонкой проволоке радиоактивность выделялась путем накаливания проволоки и осаждалась на поверхности заряженных предметов. Радиоактивность, индукцированная эманацией тория, существенно отличается от индукцированной активности эманации радия. Активность эманации тория в одну минуту падает до половины своей величины, тогда как

<sup>1)</sup> Индукцированная радиоактивность представляет собой радиоактивные продукты распада эманации. (Прим. ред.).



индуцированная ею радиоактивность требует около одиннадцати часов, чтобы уменьшиться в той же пропорции. Эманация радия, которая гораздо постояннее эманации тория, требуя около четырех дней для уменьшения на половину, дает начало гораздо менее постоянной индуцированной радиоактивности: она падает до половины своей величины приблизительно в сорок минут вместо одиннадцати часов, как эманация тория. Эманация актиния сохраняет свою активность лишь несколько секунд, а зависящая от нее индуцированная радиоактивность почти так же постоянна, как активность радия.

#### Выделение активной составной части тория.

Резерфорд и Содди весьма интересным и важным исследованием показали, что радиоактивность тория вызывается переходом тория в форму, называемую ими ThX, которая может отделяться от остального тория химическим способом. После этого отделения оставшийся торий на некоторое время лишается большей части своей радиоактивности, которая теперь находится в ThX. Радиоактивность тория X медленно убывает, тогда как активность остального тория возрастает, пока не достигнет своей первоначальной величины. В это время радиоактивность ThX исчезает. Время, необходимое для падения радиоактивности ThX до половины первоначальной величины, по определению Резерфорда и Содди, равно времени, необходимому для тория, от которого ThX отделился, чтобы восстановить половину его первоначальной активности. Все эти факты поддерживают взгляд, что радиоактивная часть тория ThX постоянно порождается самым торием; так что, если бы активность ThX была постоянна, то радиоактивность тория должна бы была постоянно возрастать. Но активность ThX постоянно убывает. Это исключает неограниченное возрастание активности смеси. Она достигает постоянной величины, когда возрастание активности, благодаря возникновению нового ThX, уравновесится падением активности наличного количества. Здесь возникает вопрос о том, что делается с ThX и эманацией, когда они потеряют свою радиоактивность. Этот отмирающий ThX, как мы можем его назвать, постоянно собирается в торий. Но так как он потерял свою радиоактивность, то мы располагаем только обыкновенными методами химического анализа. А так как последние почти бесконечно менее чувствительны, чем средства, применяемые нами к радиоактивным веществам, то необхо-

димы почти геологические периоды, чтобы отмирающий ThX скопился в количестве, достаточном для его обнаружения химическим анализом. Возможно, что тщательное исследование минералов, в которых встречаются торий и радий, может дать важные указания. Замечательно, что гелий почти неизменно входит в состав этих минералов.

Вы, вероятно, заметили, что радиоактивность, обнаруженная Резерфордом и Содди, тесно связана с изменениями, происходящими в радиоактивном веществе. Так, в тории, который известен нам лучше всех, сначала происходит превращение его в торий X, затем превращение последнего в эманацию и вещество, образующее лучи  $\alpha$ . Радиоактивность эманации сопровождается дальнейшим превращением, к продуктам которого относится вещество, вызывающее индуцированную радиоактивность.

По этому воззрению, вещество в радиоактивном состоянии постоянно превращается из одного состояния в другое. Эти превращения могут сопровождаться освобождением энергии, достаточной для пополнения унесенной лучами, выделяемыми радиоактивным веществом. Как велико количество энергии, выделяемой радиоактивными веществами, с очевидностью показывают недавние опыты супругов Кюри с солями радия. Они нашли, что эти соли выделяют столько энергии, что поглощение ее самой солью достаточно для поддержания постоянной температуры соли выше температуры воздуха на весьма заметную величину — в одном из их опытов на  $1,5^{\circ}\text{C}$ . Из их измерений следует, что грамм радия выделяет в час энергии, достаточной для того, чтобы нагреть такое же количество воды от точки замерзания до точки кипения. Это развитие теплоты идет непрерывно и, видимо, не уменьшаясь. Если же только-что изложенные нами взгляды верны, то эта энергия возникает от превращения радия в другие формы материи, и ее развитие должно прекратиться, когда запас радия истощится; если только этот запас не пополняется постоянным превращением в радий других элементов.

Мы можем определить приблизительно вероятную долговечность образца радия, соединяя наши результаты, а именно, что грамм радия выделяет 100 калорий в час и что лучи  $\alpha$  по Резерфорду представляют частицы, массы которых сравнимы с массой атома водорода, выбрасываемой со скоростью около  $2 \times 10^9$  сантиметров в секунду. Ибо допустим, что теплота, измеренная супругами Кюри, происходит от бомбардировки соли радия этими частицами; чтобы получить высший предел долговечности радия, допустим далее, что вся масса радия превращается в частицы  $\alpha$  (на самом деле, как мы



знаем, кроме частиц  $\alpha$  возникает также эманация). Пусть будет  $x$  долговечность грамма радия в часах; так как грамм выделяет в час 100 калорий или  $4,2 \times 10^9$  эргов, то количество энергии, выделяемой радием в течение его жизни, равно  $x \times 4,2 \times 10^9$  эргов. Если  $N$  есть число частиц  $\alpha$ , выделенных в это время,  $m$  — масса одной из них в граммах,  $v$  — скорость, то энергия частиц  $\alpha$  равна  $\frac{1}{2} Nmv^2$ , но она равна также  $x \times 4,2 \times 10^9$  эргам, поэтому  $\frac{1}{2} Nmv^2 = x \times 4,2 \times 10^9$ . Но, если грамм радия обращается в частицы  $\alpha$ , то  $Nm = 1$ , а по опытам Резерфорда  $v = 2 \times 10^9$ . Поэтому  $x = \frac{1}{2} \cdot \frac{4 \times 10^{18}}{4,2 \times 10^9} = \frac{10^9}{2,1}$  часов или почти 50 000 лет.

По этому определению следует ожидать, что долговечность известного количества радия измеряется 50 000 лет. Этот результат показывает, что мы не можем ожидать, что в течение нескольких месяцев откроем заметные перемены. Грамм радия в течение всей своей жизни выделит около  $5 \times 10^{10}$  калорий. Этот результат показывает, что, если эта энергия происходит от превращений в состоянии радия, то энергия, развиваемая при этих превращениях, должна быть гораздо больше энергии, развиваемой при какой-либо известной химической реакции. По принятой нами теории различие между процессами в радии и обыкновенными химическими реакциями состоит в том, что в последних изменения молекулярные, а в радии — атомистические и проявляются в разложении элементов. Пример, данный на стр. 70 показывает, как велико количество энергии, заключенное в атоме, если считать его построенным из корпускул.

Я думаю, что нам удастся лучше осветить процессы, происходящие в радии, если мы рассмотрим модель атома, описанную на стр. 77 и представляющую случай, когда корпускулы, вращаясь с большой скоростью, устойчивы при известном расположении, которое становится неустойчиво, когда энергия падает ниже известной величины, и заменяется иным расположением. Волчок, вращающийся около вертикальной оси, представляет другую модель того же типа. Он устойчив в вертикальном положении, если кинетическая энергия, зависящая от его вращения, превосходит известную величину. Если эта энергия постепенно убывает и достигает критической величины, то волчок становится неустойчивым и опрокидывается, вызывая значительное количество кинетической энергии.

Проследим поведение атома этого типа, т. е. атома, который в одной конфигурации равномерного движения устойчив, когда кине-

тическая энергия корпускул превышает известную величину, но становится неустойчивым и переходит к отличной конфигурации, когда кинетическая энергия падает ниже этой величины. Предположим теперь, что атом сначала обладает запасом кинетической энергии много выше критической величины. Благодаря излучению быстро движущихся корпускул, кинетическая энергия будет убывать; но, пока движение остается равномерным, убывание будет чрезвычайно медленно и может длиться тысячи лет, пока энергия приблизится к критической величине. С приближением к этой величине движение будет легко нарушено, и, вероятно, произойдут значительные отклонения от расположения равномерного движения, сопровождаемые возрастающей потерей кинетической энергии через излучение. Теперь атом выделяет гораздо большее число лучей, и кинетическая энергия быстро приближается к критической величине. По достижении этой величины наступает переворот, первоначальное расположение нарушается, потенциальная энергия системы сильно уменьшается, сопровождаясь равным возрастанием кинетической энергии корпускул. Увеличение скорости корпускул может вызвать разрыв атома на две или более систем, соответствующих выделению лучей  $\alpha$  и эманации.

Мы предполагали, что энергия, излучаемая радием и другими радиоактивными веществами, происходит из внутреннего источника, т. е. вследствие изменений в составе атома. Так как изменения этого рода до сих пор не были известны, то желательно исследовать вопрос, из каких других источников может происходить эта энергия. Один источник, который представляется сам собою, лежит вне радия. Можно допустить, что радий получает свою энергию, поглощая известную форму излучения, которая проникает чрез все тела на поверхности земли, но поглощается до известной степени лишь радиоактивными телами. Это излучение должно быть очень пронизывающего характера, так как радий сохраняет свою активность, даже окруженный толстым слоем свинца или помещенный в глубоком погребе. Мы знакомы с лучами Рентгена и лучами самого радия, которые могут вызывать заметные действия после прохождения через несколько дюймов свинца, так что идея о существовании весьма пронизывающей радиации не кажется столь невероятной, как это было несколько лет тому назад. Интересно припомнить, что более ста лет тому назад Леса́ж (Le Sage) предполагал весьма пронизывающее излучение, чтобы объяснить тяготение. Леса́ж принимал, что вселенная наполнена чрезвычайно малыми частицами, которые движутся с очень большими скоростями. Он назвал их ультрамиро-



выми корпускулами и допускал, что они обладают способностью проникать через такие массы, как солнце или планеты, испытывая лишь небольшое поглощение. Однако, они поглощаются до известной степени и отдают небольшую долю своего движения телам, через которые они проходят. Если бы направление ультрамировых корпускул, проходящих через тело, было распределено равномерно, то движение, сообщенное ими телу, не стремилось бы двигать его в одном направлении более, чем в другом, так что тело А, будучи одиноко в мире и подвержено бомбардировке корпускул Лесажа, оставалось бы в покое. Если же по соседству от А находится другое тело В, то В задержит от А некоторые корпускулы, движущиеся в направлении ВА, так что А не получит столько движения в этом направлении, как оно получило бы, будучи одно в поле; но лишь в последнем случае оно получило бы в этом направлении достаточное количество движения, чтобы уравновесить его. Таким образом, в присутствии В количество движения в противоположном направлении получит перевес, так что А будет двигаться в направлении АВ, т. е. будет притягиваться к В. Максвелл обратил внимание на то, что передача движения корпускулами Лесажа телу, через которое они проходят, должна вызывать потерю кинетической энергии корпускулами; и если бы потеря движения была достаточна для объяснения тяготения, то кинетическая энергия, потерянная ультрамировыми корпускулами, была бы достаточна, чтобы, превращаясь в теплоту, довести тяготеющее тело до белого каления. То обстоятельство, что все тела не находятся в состоянии белого каления, послужило для Максвелла аргументом против теории Лесажа. Однако, нет необходимости предполагать, что энергия корпускул превращается в теплоту; мы можем представить себе, что она превращается в сильно пронизывающее излучение, которое может выделяться из тяготеющего тела. Простое вычисление может показать, что количество кинетической энергии, превращаемой в секунду в одном грамме тяготеющего тела, должно быть неизмеримо больше энергии, выделяемой в то же время одним граммом радия.

Мы видели в первой главе, что волны электрической и магнитной силы обладают количеством движения в направлении их распространения. Поэтому корпускулы Лесажа можно заменить сильно пронизывающими лучами Рентгена. Последние, будучи поглощены, сообщили бы движение телам, через которые они проходят, и соображения, подобные данным Лесажа, показали бы, что два тела взаимно притягиваются обратно пропорционально квадрату расстоя-

ния между ними. Если бы поглощение этих волн на единицу объема зависело только от плотности и было пропорционально ей, то притяжение между телами было бы прямо пропорционально произведению их масс. Следует заметить, что по этой теории всякие изменения в тяготении распространялись бы со скоростью света, тогда как астрономы, по их мнению, установили, что оно распространяется с гораздо большей скоростью.

Как в корпускулах Лесажа, так и в лучах Рентгена потеря движения должна сопровождаться потерей энергии; на каждую единицу потерянного движения пришлось бы  $v$  единиц потерянной энергии, если  $v$  есть скорость света. Если бы эта энергия превратилась в энергию лучей того же типа, как падающие лучи, то небольшое размышление покажет, что поглощение лучей не вызвало бы гравитационного притяжения. Чтобы вызвать такое притяжение, превращенные лучи должны бы были быть более пронизывающего типа, чем первоначальные лучи. Затем, как и в корпускулах Лесажа, поглощение энергии от этих лучей, если они служат причиной тяготения, должно быть огромно, — так велико, что энергия, выделяемая радием, была бы лишь чрезвычайно малой долей энергии, превращенной в радию. По этим соображениям, я думаю, что количество энергии, излучаемой радием, не может быть серьезным аргументом против допущения, что энергия происходит от внешнего излучения. Основание, заставляющее меня думать, что источник энергии находится в самом атоме радия, а не вне его, состоит в том, что радиоактивность веществ во всех случаях, когда мы могли ее локализовать, была преходящим свойством. Ни одно вещество не бывает радиоактивно долгое время. Но можно спросить, как согласовать это утверждение с тем обстоятельством, что торий и радий сохраняют свою активность без заметного уменьшения с течением времени. На это можно ответить, что, как это доказали для тория Резерфорд и Содди, лишь чрезвычайно малая часть массы радиоактивна в данное время, и эта часть теряет свою активность в несколько часов и должна быть заменена новым запасом из нерадиоактивного тория. Все радиоактивные вещества, описанные нами, ThX, эманации тория и радия, вещество, вызывающее индуцированную радиоактивность, активны по большей мере в течение нескольких дней и затем теряют это свойство. Но этого следовало ожидать по теории, принимающей, что источником радиоактивности служит превращение в атоме; но этого нельзя ожидать, если источником является внешнее излучение.



## ПРИЛОЖЕНИЯ



ПРИЛОЖЕНИЕ ПЕРВОЕ  
МАТЕРИЯ И ЭФИР

МАТЕРИЯ И ЭФИР.

УЖ. ДЖ. ТОМСОН.

Получив приглашение прочесть лекцию в память Адамсона, я долго колебался принять приглашение. Мне казалось, что я мало подготовлен к такой лекции, которая должна быть прочитана в память великого учителя метафизики. Мои сомнения, однако, исчезли, когда я вспомнил о широких симпатиях профессора Адамсона ко всем формам духовной деятельности и об обширности области самой метафизики. Действительно, в физике имеется такая область, проблемы которой очень напоминают проблемы, которыми занимается метафизика. Такою, например, является та ветвь физики, которая занимается не открытием новых или практическим использованием старых явлений, но старается привести во взаимную связь такие явления, которые в своем внешнем проявлении так различны между собою, как свет и электричество, звук и механические явления, теплота и химические действия. Для многих эта сторона физики наиболее привлекательна. Они находят в физическом мире с его бесконечным разнообразием явлений проблему неисчерпаемого и непреодолимого очарования. Их удручают те разнообразие и многообразие, которые мы наблюдаем вокруг себя, и это заставляет их искать такую точку зрения, с которой световые явления, тепловые явления, электрические и химические явления являются различными проявлениями немногих основных начал. Рассматривая вселенную, как машину, они интересуются не только тем, что она приносит, а тем, как она построена и как она действует; и если им удастся, хотя бы для собственного удовлетворения, решить малую часть этой проблемы, то они испытывают такое удовольствие, что для них вопрос о значении гипотезы кажется настолько же праздным, как вопрос о значении поэзии, о значении музыки или философии.

Новейшие исследования в области электричества сильно способствовали объединению различных ветвей физики, и я хочу в сегод-



нашней вечер направить ваше внимание на некоторые выводы, к которым привело применение к этим исследованиям принципа равенства действия и противодействия — третьего закона движения Ньютона.

Согласно этому закону в каждой замкнутой системе, т. е. системе, не подвергающейся влиянию других систем, полное количество движения постоянно, так что если какая-нибудь часть этой системы увеличивает свое количество движения, то одновременно другая часть системы должна на столько же уменьшить свое количество движения. Этот закон образует не только основу нашей обычной динамики, но стоит в тесной связи с нашей интерпретацией важного принципа сохранения энергии; без него этот принцип потерял бы много в своем значении. Согласно этому принципу, сумма кинетической и потенциальной энергии системы постоянна. Остановимся на минутку на том, как мы должны оценивать кинетическую энергию. Предметы в этой комнате кажутся нам находящимися в покое, и потому их кинетическая энергия равна нулю. Напротив, наблюдателю на Марсе покажется, что эти предметы не находятся в покое, а движутся со значительной скоростью, ибо они будут иметь ту скорость, с которой земля вращается вокруг своей оси, и ту скорость, с которой земля движется по своей орбите вокруг солнца. Таким образом оценка кинетической энергии со стороны жителя Марса будет сильно отличаться от нашей оценки. Спрашивается, согласуется ли принцип сохранения энергии с обеими оценками кинетической энергии, или же он зависит от координатной системы, которую мы пользуемся для измерения скорости тела. Легко доказать, что если действие равно противодействию, то принцип сохранения энергии сохраняет свое значение независимо от тех координатных осей которыми мы пользуемся для измерения скорости; если же, напротив, действие и противодействие не равны между собою и не направлены друг против друга, то принцип имеет силу только тогда, когда скорость измерена по отношению к одной определенной координатной системе.

Принцип равенства действия и противодействия есть поэтому одна из основ механики, и система, в которой этот принцип не имеет силы, не может быть представлена никакой механической моделью. Изучение электричества знакомит нас с такими случаями, когда действие, повидимому, не равно противодействию. Если, например, два наэлектризованных тела А и В быстро движутся, то по законам учения об электричестве мы можем вычислить те силы, с которыми они

действуют друг на друга, и мы находим, что сила, с которой А действует на В, не будет равна и противоположна той силе, с которой В действует на А, исключая тот случай, когда тела движутся с одинаковой скоростью в одном и том же направлении; таким образом, количество движения системы, составленной из А и В, не остается постоянным. Если бы мы из этого обстоятельства заключили, что наэлектризованные тела не подчиняются третьему закону движения и что невозможно поэтому дать механическое объяснение силам, действующим между такими телами, то мы должны были бы отказаться от намерения вывести электрические явления из свойств движущейся материи. К счастью, в этом нет необходимости. Мы можем по известному образцу вызвать к бытию новый мир, чтобы заполнить им прорехи старого. Мы можем предположить, что с А и В связана другая система, которая, несмотря на свою невидимость, обладает массой и потому способна накапливать количество движения, таким образом, если количество движения системы АВ изменяется, то количество движения, потерянное телом А и не приобретенное телом В, накапливается в невидимой системе, связанной с АВ, так что тела А и В вместе с невидимой системой образуют систему, подчиняющуюся обычным законам механики и с постоянным количеством движения. С аналогичными явлениями мы знакомы из наших обычных наблюдений. Когда, например, два шара А и В перемещаются внутри сосуда с водой, то шар А перемещает окружающую воду и вызывает волны, которые достигают шара В и влияют на его движение. Таким образом, перемещающиеся шары как-будто действуют друг на друга с определенными силами. Эти силы были подсчитаны Кирхгофом; во многих отношениях они напоминают силы, действующие между движущимися электрическими зарядами; если исключить тот случай, когда шары движутся с одинаковой скоростью в одном и том же направлении, то окажется, что силы не будут равны и противоположны, и потому количество движения обоих шаров не будет постоянным. Если же обратим наше внимание не только на шары, но и на воду, в которой они перемещаются, то найдем, что шары вместе с водою образуют систему, которая подчиняется обычным законам динамики и имеет постоянное количество движения, при чем количество движения, потерянное или приобретенное шарами, приобретает или теряется водою. Этот случай вполне аналогичен движущимся электрическим зарядам и потому, если количество движения системы не есть постоянная величина, то мы из этой аналогии не должны заключать, что третий закон Нью-



тона здесь не имеет силы, но должны придти к выводу, что соответственная система, вопреки нашим предположениям, не изолирована, но связана с другой системой, которая собирает количество движения, потерянное первой системой, и что движение совокупности обеих систем вполне согласуется с обычными законами динамики.

Таким образом, наэлектризованные тела должны быть связаны с каким-то невидимым универсальным телом, которое можно назвать „эфиром“; этот эфир должен обладать массой и должен приходить в движение, когда наэлектризованные тела перемещаются. Итак, мы окружены каким-то невидимым веществом, о существовании которого мы догадываемся только благодаря наэлектризованным телам. Можно ли это вещество привести в движение ненаэлектризованными телами — этот вопрос остается открытым.

Ограничимся на минуту случаем наэлектризованных тел. Когда последние движутся, то они должны привести в движение часть эфира, и это должно повлиять на их кажущуюся массу, подобно тому, как кажущаяся масса тела, перемещающегося в воде, больше, чем в случае перемещения в пустоте. Когда мы перемещаем тело в воде, то мы приводим в движение не только само тело, но и окружающую его воду; во многих случаях происходящее по этой причине увеличение кажущейся массы тела значительно больше, чем масса самого тела; так, например, воздушные пузыри в воде ведут себя так, как будто их масса во много сотен раз превышает массу заключенного в них воздуха. Связь между наэлектризованными телами и окружающим эфиром мы можем себе представить следующим образом. Мы можем предположить, что электрические силовые линии, выходящие из заряженного тела, при своем движении сквозь эфир захватывают определенную массу последнего и увлекают с собою. Пользуясь законами учения об электричестве, мы можем вычислить массу эфира, увлекаемого этими линиями в какой-нибудь части пространства, сквозь которую они проходят. Результаты этого подсчета можно представить в очень простой форме. Фарадей и Максвелл показали, что потенциальная энергия наэлектризованной системы находится не в самой системе, а в окружающем пространстве, и что каждая часть пространства имеет определенное количество этой энергии, для которого Максвелл дал очень простое выражение. Если подсчитаем массу эфира, увлекаемого электрическими силовыми линиями в какой-нибудь части пространства, окружающего наэлектризованное тело, то получается замечательный

результат: она как-раз пропорциональна потенциальной энергии в этом пространстве и определяется по следующему правилу: если бы эта масса двигалась со скоростью света, то кинетическая энергия, которую бы она обладала, равнялась бы электростатической энергии в той части пространства, для которой мы подсчитываем массу. Таким образом, общая масса эфира, увлекаемого электрической системой, пропорциональна электростатической потенциальной энергии системы. Так как эфир увлекается только при боковом движении силовых линий, но не при продольном их движении, то масса эфира, приводимого в движение наэлектризованным телом, несколько меньше, чем вычисленная по указанному правилу, за исключением того случая, когда все силовые линии перемещаются перпендикулярно к своей длине. Небольшая поправка на это скольжение силовых линий в эфире не влияет на общий характер явления, и я, ради простоты, буду в дальнейшем предполагать, что масса эфира, приведенного в движение наэлектризованной системой, пропорциональна потенциальной энергии этой системы. Таким образом, наэлектризованное тело связано с эфирным, астральным телом, которое оно увлекает при своем движении и благодаря которому его кажущаяся масса возрастает. Надо, однако, принять во внимание, что эфирная масса, которую увлекает с собой наэлектризованное тело, имеет совершенно другие свойства, чем обыкновенная материя. Она не может быть подвергнута химическому анализу и на нее, по видимому, не влияет сила тяжести. Возникает поэтому в высокой степени интересный вопрос, не можем ли мы открыть такой случай, в котором эфирная масса составляет заметную часть всей массы и сравнить свойства такого тела со свойствами тела, эфирная масса которого незначительна. Самый поверхностный подсчет показывает, что в обычных электрических системах, как, например, в заряженных шарах или лейденских банках, эфирная масса, которую они обладают благодаря своему электрическому заряду, исчезающе мала в сравнении со всей массой. Оставим поэтому без рассмотрения тела конечных размеров, а перейдем к атомам, из которых состоят тела, и сделаем предположение, которое очень вероятно, что эти атомы суть электрические системы и что силы взаимодействия между ними — электрического происхождения. Поэтому теплота, развивающаяся при соединении атомов различных элементов, должна равняться уменьшению электростатической потенциальной энергии соединяющихся атомов. Согласно сказанному, она будет поэтому мерою уменьшения связанной с атомами эфирной массы.



Согласно этому взгляду, уменьшение эфирной массы равно той массе, которая, в случае движения со скоростью света, обладает кинетической энергией, равной механическому эквиваленту теплоты, развивающейся при химическом соединении атомов.

В качестве примера может служить то химическое соединение, которое отличается наибольшим выделением тепла в сравнении с другими соединениями, а именно соединение водорода и кислорода. При соединении таких количеств водорода и кислорода, которые образуют 1 г воды, развивается 4000 калорий или  $16,8 \times 10^{10}$  эргов. Масса, которая при движении со скоростью света, т. е.  $3 \times 10^{10}$  см в секунду, обладает таким количеством кинетической энергии, должна быть равна  $3,7 \times 10^{-10}$  г; таково, следовательно, уменьшение эфирной массы, которое имеет место, когда соединяются водород и кислород, чтобы образовать 1 г воды. Так как это уменьшение представляет приблизительно  $\frac{1}{3\,000\,000\,000}$  часть всей массы, то его невозможно экспериментально определить, и мы приходим к заключению, что опыты для обнаружения этого изменения в каком-нибудь химическом соединении имеют слабую надежду на успех. Лучшие результаты обещают, быть может, радиоактивные вещества, ибо количество теплоты, отдаваемое радием при его превращениях, несравненно больше того, которое отдается такою же массой обычных химических элементов при их соединении. Количество энергии, которое отдает 1 г радия в продолжение своей жизни, по измерениям проф. Рёзерфорда, равно  $6,7 \times 10^{16}$  эргов. Если этот запас энергии происходит от электрической потенциальной энергии радия, то атомы в 1 г радия должны иметь по крайней мере такое же количество потенциальной энергии. Они должны быть связаны с эфирной массой от  $\frac{1}{8}$  до  $\frac{1}{7}$  мг, потому что именно такая масса, двигаясь со скоростью света, имеет кинетическую энергию в  $6,7 \times 10^6$  эргов. Отсюда мы заключаем, что в каждом грамме радия по крайней мере  $\frac{1}{8}$  мг, т. е.  $\frac{1}{8000}$  часть, находится в эфире. Подобные соображения побудили меня некоторое время тому назад сделать опыты над радием, чтобы посмотреть, не получу ли я таким образом доказательство того, что одна часть его массы не совсем обычного рода. По-моему, это можно было бы лучше всего установить, проследив, будет ли для радия соотношение между массой и весом такое же, как для обыкновенной материи. Если та часть массы радия, которая находится в эфире, не обладает весом, то 1 г радия должен весить меньше, чем 1 г другого вещества, которое не имеет такой большой части своей массы в эфире. Отношение между массой и весом

может быть легко измерено путем измерения времени колебания маятника. Я построил поэтому маятник, у которого чечевица была сделана из радия, заставил его колебаться в пустоте и определил время его колебания, чтобы сравнить с временем колебания маятника такой же длины, чечевица которого сделана из латуни или железа. К сожалению, так как нельзя достать большого количества радия, то радиевый маятник оказался очень легким и потому раньше перестал колебаться, чем это бывает с тяжелым маятником. Благодаря этому нельзя было сделать очень точных определений времени колебания; я мог однако показать, что с точностью до  $\frac{1}{3000}$  время колебания маятника из радия было таким же, как время колебания маятника такой же величины и формы, но с чечевицей из латуни или железа. Наименьшая разница, которую можно было ожидать, равна  $\frac{1}{8000}$ ; опыт поэтому показывает, что если отношение массы к весу у радия обнаруживает какую-нибудь неправильность, то она не на много может превысить то значение, которое определяется при вычислении количества теплоты, которое выделяется радием при его превращениях. С большими маятниками можно величину отношения массы к весу определить с большей точностью, чем до  $\frac{1}{8000}$ . Так, например Б. Бессель три четверти века тому назад показал, что это отношение у слоновой кости и у латуни одно и то же с точностью до  $\frac{1}{100\,000}$ ; с помощью аппаратов, специально для этого сконструированных, можно было бы достигнуть еще большей точности. Когда я прodelывал свои опыты с маятником из радия, еще не была открыта тесная связь, существующая между количествами урана и радия в радиоактивных элементах. Эта связь делает чрезвычайно вероятным предположение, что радий происходит от урана и что последний металл имеет большую электрическую потенциальную энергию, а потому и большую часть своей массы в эфире, чем такое же весовое количество радия. Подходящим материалом для опытов с маятником является поэтому не радий, а уран; кроме того, его можно иметь в достаточных количествах, что позволяет конструировать маятник подходящих размеров. По моим взглядам, с таким маятником возможно определить отношение массы к весу для урана с точностью до  $\frac{1}{250\,000}$ .<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Эти опыты были выполнены впоследствии Соудерсом, но результат их был таков: никакого отличия между обыкновенной массой и массой эфира установить не удалось. Таким образом, повидимому, и электромагнитная масса эфира подлeжит действию силы тяжести. (Прим. ред.)



Хотя нам и не удалось таким путем дать экспериментальное доказательство того, что часть массы существует в эфире, зато мы находимся в более благоприятном положении относительно другого явления, а именно влияния скорости тела на его кажущуюся массу. Мы видели, что масса эфира, связанного с какой-нибудь электрической системой, пропорциональна электрической потенциальной энергии этой системы. Возьмем простейшую электрическую систему, какую только можно найти, — электрический заряд, сконцентрированный на маленьком шарике. Когда шарик в покое, электрические силовые линии равномерно распределены по всем направлениям вокруг шарика. При таком расположении силовых линий электрическая потенциальная энергия меньше, чем при каком-нибудь другом распределении линий. Вообразим теперь, что шарик приведен в очень быстрое движение. В таком случае электрические силовые линии стремятся расположиться перпендикулярно к направлению движения. Они стремятся поэтому оставить переднюю часть шарика, приподняться над ним и собраться в его экваториальной части. Таким образом электрическая потенциальная энергия возрастает, и так как масса эфира, связанная с электрическими силовыми линиями, пропорциональна этой энергии, то масса эта больше тогда, когда шарик движется, чем тогда, когда он в покое. Разница очень мала, но, когда скорость тела приближается к скорости света, увеличение массы делается очень значительным.

Кауфману удалось обнаружить наличие этого влияния скорости для  $\beta$ -лучей, испускаемых радием. Это суть отрицательно заряженные частицы, выбрасываемые из радия с большой скоростью. Скорость тех, которые движутся наиболее быстро, только на несколько процентов меньше скорости света. На ряду с такими частицами другие движутся со значительно меньшей скоростью. Кауфман определил массу различных частиц и нашел, что масса тем больше, чем больше скорость и что масса частиц, движущихся наиболее быстро, в три раза больше массы тех частиц, которые движутся медленно. Эти опыты приводят к такому интересному результату, что вся масса этих частичек происходит от электрического заряда, который они несут. С точки зрения тех взглядов, которые мы изложили, это означает, что вся масса частичек происходит от эфира, увлекаемого силовыми линиями.

Согласно электромагнитной теории света световые волны являются волнами электрической силы, распространяющимися со скоростью 300 000 км в секунду. Если поэтому электрические силовые линии

захватывают эфир и увлекают с собою часть его, то световая волна должна сопровождаться движением определенной массы эфира в направлении распространения света. Масса эфира легко определяется по правилу, что она при движении со скоростью света должна будет обладать кинетической энергией, равной электрической потенциальной энергии. Так как электростатическая энергия равна половине энергии световой волны, то масса приведенного в движение эфира, приходящаяся на единицу объема, равна энергии света в этом объеме, деленной на квадрат скорости света. Таким образом, если тело испускает свет, то часть массы эфира, связанная с телом, будет излучением вынесена наружу. Эта масса вообще чрезвычайно мала. Применяя только-что указанное правило, мы можем подсчитать, что, например, масса, выбрасываемая в течение года каждым квадратным сантиметром поверхности тела, при температуре солнца, равна приблизительно 1 миллиграмму. Надо предположить, что когда часть эфира, связанная благодаря силовым линиям с телом, будет унесена прочь лучеиспусканием, то другая часть эфира, не связанная с телом, устремится и займет место первой части. Благодаря излучению, имеющему место у всех тел, окржающий эфир находится в движении, как-будто в телах имеются Источники и стоки.

Действительная масса эфира, увлекаемая световой волною, чрезвычайно мала, но ее скорость, совпадающая со скоростью света, так велика, что даже маленькая масса имеет значительное количество движения. Когда свет при прохождении через не совсем прозрачную среду поглощается, то количество его движения также поглощается, переходит в среду и стремится эту среду привести в движение в направлении распространения света. Таким образом, свет производит давление на среду. Это давление, так называемое световое давление, было открыто и измерено Лебедевым, Никольсом, Гуллем и Пойнтингом. Все явления, связанные с этим давлением, легко объясняются, если сделать предположение, что свет обладает количеством движения в направлении распространения. То, что свет обладает количеством движения, в предположении, что свет есть явление электрическое, было доказано довольно сложными рассуждениями.

По старой Ньютоновой теории истечения само собою понятно, что это количество движения должно существовать потому, что это есть количество движения тех частичек, из которых состоит свет.



Хотя нам и не удалось таким путем дать экспериментальное доказательство того, что часть массы существует в эфире, зато мы находимся в более благоприятном положении относительно другого явления, а именно влияния скорости тела на его кажущуюся массу. Мы видели, что масса эфира, связанного с какой-нибудь электрической системой, пропорциональна электрической потенциальной энергии этой системы. Возьмем простейшую электрическую систему, какую только можно найти, — электрический заряд, сконцентрированный на маленьком шарике. Когда шарик в покое, электрические силовые линии равномерно распределены по всем направлениям вокруг шарика. При таком расположении силовых линий электрическая потенциальная энергия меньше, чем при каком-нибудь другом распределении линий. Вообразим теперь, что шарик приведен в очень быстрое движение. В таком случае электрические силовые линии стремятся расположиться перпендикулярно к направлению движения. Они стремятся поэтому оставить переднюю часть шарика, приподняться над ним и собраться в его экваториальной части. Таким образом электрическая потенциальная энергия возрастает, и так как масса эфира, связанная с электрическими силовыми линиями, пропорциональна этой энергии, то масса эта больше тогда, когда шарик движется, чем тогда, когда он в покое. Разница очень мала, но, когда скорость тела приближается к скорости света, увеличение массы делается очень значительным.

Кауфману удалось обнаружить наличие этого влияния скорости для  $\beta$ -лучей, испускаемых радием. Это суть отрицательно заряженные частицы, выбрасываемые из радия с большой скоростью. Скорость тех, которые движутся наиболее быстро, только на несколько процентов меньше скорости света. На ряду с такими частицами другие движутся со значительно меньшей скоростью. Кауфман определил массу различных частиц и нашел, что масса тем больше, чем больше скорость и что масса частиц, движущихся наиболее быстро, в три раза больше массы тех частиц, которые движутся медленно. Эти опыты приводят к такому интересному результату, что вся масса этих частичек происходит от электрического заряда, который они несут. С точки зрения тех взглядов, которые мы изложили, это означает, что вся масса частичек происходит от эфира, увлекаемого силовыми линиями.

Согласно электромагнитной теории света световые волны являются волнами электрической силы, распространяющимися со скоростью 300 000 км в секунду. Если поэтому электрические силовые линии

захватывают эфир и увлекают с собою часть его, то световая волна должна сопровождаться движением определенной массы эфира в направлении распространения света. Масса эфира легко определяется по правилу, что она при движении со скоростью света должна будет обладать кинетической энергией, равной электрической потенциальной энергии. Так как электростатическая энергия равна половине энергии световой волны, то масса приведенного в движение эфира, приходящаяся на единицу объема, равна энергии света в этом объеме, деленной на квадрат скорости света. Таким образом, если тело испускает свет, то часть массы эфира, связанная с телом, будет излучением вынесена наружу. Эта масса вообще чрезвычайно мала. Применяя только-что указанное правило, мы можем подсчитать, что, например, масса, выбрасываемая в течение года каждым квадратным сантиметром поверхности тела, при температуре солнца, равна приблизительно 1 миллиграмму. Надо предположить, что когда часть эфира, связанная благодаря силовым линиям с телом, будет унесена прочь лучеиспусканием, то другая часть эфира, не связанная с телом, устремится и займет место первой части. Благодаря излучению, имеющему место у всех тел, окржающий эфир находится в движении, как-будто в телах имеются Источники и стоки.

Действительная масса эфира, увлекаемая световой волною, чрезвычайно мала, но ее скорость, совпадающая со скоростью света, так велика, что даже маленькая масса имеет значительное количество движения. Когда свет при прохождении через не совсем прозрачную среду поглощается, то количество его движения также поглощается, переходит в среду и стремится эту среду привести в движение в направлении распространения света. Таким образом, свет производит давление на среду. Это давление, так называемое световое давление, было открыто и измерено Лебедевым, Никольсом, Гуллем и Пойнтингом. Все явления, связанные с этим давлением, легко объясняются, если сделать предположение, что свет обладает количеством движения в направлении распространения. То, что свет обладает количеством движения, в предположении, что свет есть явление электрическое, было доказано довольно сложными рассуждениями.

По старой Ньютоновой теории истечения само собою понятно, что это количество движения должно существовать потому, что это есть количество движения тех частичек, из которых состоит свет.



Замечательно, что новейшие исследования показали, что многие из тех свойств, которые принадлежали бы свету, если стать на точку зрения теории истечения, будут принадлежать свету и тогда, когда мы его будем рассматривать как электрическое явление. Я хочу вкратце отметить одно следствие из теории истечения, потому что оно, по моему мнению, лучше согласуется с фактическими свойствами света, чем то воззрение, к которому мы приходим, принимая электромагнитную теорию света в ее обычной форме. По теории истечения, световой луч состоит из множества отдельных телец, при чем объем, занятый этими тельцами, представляет очень малую часть того объема, в котором они находятся. Фронт световой волны, согласно этому воззрению, состоит из множества светлых пятнышек, распределенных по черному фону. Фронт волны порист и обладает определенной структурой. Согласно электрической теории света, в ее обычной форме, молчаливо принимают, что электрическая сила равномерно распределена по всей волновой поверхности, так что нет свободных мест на этой поверхности, и что она не имеет структуры. Такой взгляд не является необходимой частью электрической теории, и, по моему мнению, у нас есть доказательства того, что фронт волны в действительности имеет больше сходства с множеством светлых точек на темном фоне, чем на равномерно освещенной поверхности. Вот одно из доказательств в пользу такого предположения. Когда на металлическую поверхность падает свет, особенно ультрафиолетовый, из этой поверхности вылетают отрицательно заряженные частицы. Если бы поверхность волны была непрерывной, то все молекулы металла, подвергнутого действию света, находились бы при одинаковых условиях, и если бы они даже обладали различными количествами кинетической энергии, подобно молекулам газа, этого различия было бы недостаточно, чтобы объяснить громадную несоразмерность между числом молекул, затронутых светом, и числом молекул, выделивших частицы. Однако эту несоразмерность легко понять, если примем, что фронт волны не непрерывен, но испещрен пятнами, так что только небольшая часть молекул находится под влиянием электрических сил, действующих в свете. Можно предположить, что свет состоит из маленьких поперечных импульсов и волн, которые распространяются вдоль отдельных электрических силовых линий, заполняющих эфир, и что уменьшение интенсивности света при удалении от источника объясняется не ослаблением отдельных импульсов, но увеличением расстояний между ними, подобно тому как в теории истечения предполагалось, что энергия отдель-

ных частиц не уменьшалась с распространением света, а уменьшение интенсивности света происходило потому, что частицы расходятся между собою на все большее расстояние.

Представление, что тела посредством электрических силовых линий связаны с невидимыми эфирными массами, имеет большое значение для наших взглядов на происхождение силы и на природу потенциальной энергии. Согласно методам обычной механики любая система обладает кинетической энергией, которая зависит только от скоростей различных частей, из которых состоит, и потенциальной энергией, которая зависит только от относительного положения частей. Потенциальная энергия может быть различных видов. Она может быть обусловлена различными причинами: силою тяжести, напряжением пружин, электрическими зарядами. Мы знаем правила, по которым можно подсчитать значение этой потенциальной энергии для любого положения системы. Если мы знаем значение потенциальной энергии, то, пользуясь уравнениями Лагранжа, можно определить состояние системы. Как средство для подсчета и исследования, применение потенциальной энергии доставляет величайшие выгоды и вряд ли может быть заменено чем-нибудь лучшим. Но с философской точки зрения понятие потенциальной энергии значительно менее удовлетворительно, да и покоится на совершенно другом основании, чем понятие кинетической энергии.

Когда мы какую-нибудь энергию называем кинетической, мы чувствуем, что достаточно много о ней знаем; когда же мы энергию обозначаем потенциальной, то чувствуем, что очень мало о ней знаем; и если нам даже возразят, что это „малое“ есть все, что нам надо знать, то такой ответ не может удовлетворить человеческий дух.

Рассмотрим такую искусственную аналогию из деловой жизни; сравним кинетическую энергию с наличными деньгами, а потенциальную энергию — с вкладом, находящимся в банке. Допустим дальше, что если кто-нибудь теряет из кармана фунт стерлингов, то последний каким-нибудь непонятным случаем присоединяется к вкладу в банке, местопребывание которого владельцу неизвестно, но откуда он может в любой момент получить обратно свой фунт стерлингов без потерь и прибыли. Хотя вполне достаточно для торговых целей нашего воображаемого коммерсанта знать все это, но вряд ли можно предположить, чтобы кто-нибудь, даже самый трезвый делец, руководствующийся только деловыми соображениями, удержался от размышлений над тем, где были его деньги, выпавшие



из кармана, и не делал попыток проникнуть в тайну их исчезновения и нового появления. Как раз в таком положении находится физик по отношению к различным формам потенциальной энергии. Он чувствует, что здесь дело идет не о простых представлениях, и он спрашивает себя, необходимо ли предполагать, что эти формы энергии различны. Не будут ли все формы энергии одного вида, именно кинетической? Не представляет ли переход кинетической энергии в разные виды потенциальной энергии лишь переход кинетической энергии от одной части системы, которая действует на наши чувства, на другую часть, которая не действует, и таким образом, то, что мы называем потенциальной энергией, есть в действительности кинетическая энергия частиц эфира, находящиеся в кинематической связи с материальной системой? Я хочу сделать это наглядным с помощью такого простого примера. Положим, я бросаю тело А в такую область, где на него не действуют никакие силы. Тогда А будет равномерно двигаться по прямой линии. Если же я крепко свяжу тело А с телом В и затем брошу, то оно не будет равномерно двигаться по прямой линии. Напротив, оно будет описывать различного вида кривые, окружности, трохойды и т. д., природа которых зависит от массы тела В и от скорости, которую имело В, когда А было брошено. Если бы связь между А и В была невидимой так, что можно было бы наблюдать движение только А, то мы приписывали бы отклонение пути тела А от прямой линии влиянию силы, а изменение его кинетической энергии мы бы свели к тому изменению потенциальной энергии, которое обуславливается перемещением тела с одного места на другое. К таким представлениям мы приходим потому, что рассматриваем А, как единственный член рассматриваемой системы, в то время как в действительности это есть только часть большей системы. Если рассмотрим всю систему, то увидим, что она ведет себя так, как если бы она была свободна от влияния внешних сил, и что ее кинетическая энергия остается постоянной. То, что с нашей ограниченной точки зрения рассматривалось как потенциальная энергия А, является с более широкой точки зрения кинетической энергией системы В. Уж много лет прошло, как я показал, что действия сил и существование потенциальной энергии могут быть объяснены, если сделать предположение, что первичная система связана со вторичной, кинетическая энергия которой образует потенциальную энергию первой, так что вся система обладает только кинетической энергией своих составных частей. Такая точка зрения лежит в основе системы механики Герца.

Рассмотрим две простые механические системы, в которых движение материи, связанной с системой, вызывает такое же действие, как и сила. Пусть А и В (рис. 20) — два тела, прикрепленные к цилиндрическим втулкам, которые могут скользить вверх и вниз вдоль вертикального стержня EF. Два шара С и D связаны с А и В стержнями, которые у А и В вращаются в шарнирах. Когда шары вращаются вокруг стержня, они стремятся удалиться, а чем больше шары удаляются от стержня, тем больше должны тела А и В приближаться друг к другу. Тела ведут себя так, как-будто между ними существует сила притяжения. Скорость А и В, а следовательно, и их кинетическая энергия меняется, а кинетическая энергия, потерянная А и В, вызывает увеличение кинетической энергии шаров. Если бы вращающаяся система CD сделалась невидимой, то мы могли бы объяснить поведение системы, сделав предположение, что между А и В действует притягательная сила с соответствующей потенциальной энергией. Это произошло бы потому, что мы А и В рассматривали бы, как полную систему, в то время, как в действительности они составляют часть большей системы; если же мы рассмотрим полную систему, то мы увидим, что она ведет себя так, как-будто на нее не действует никакая сила, и она не обладает другой энергией, кроме кинетической.

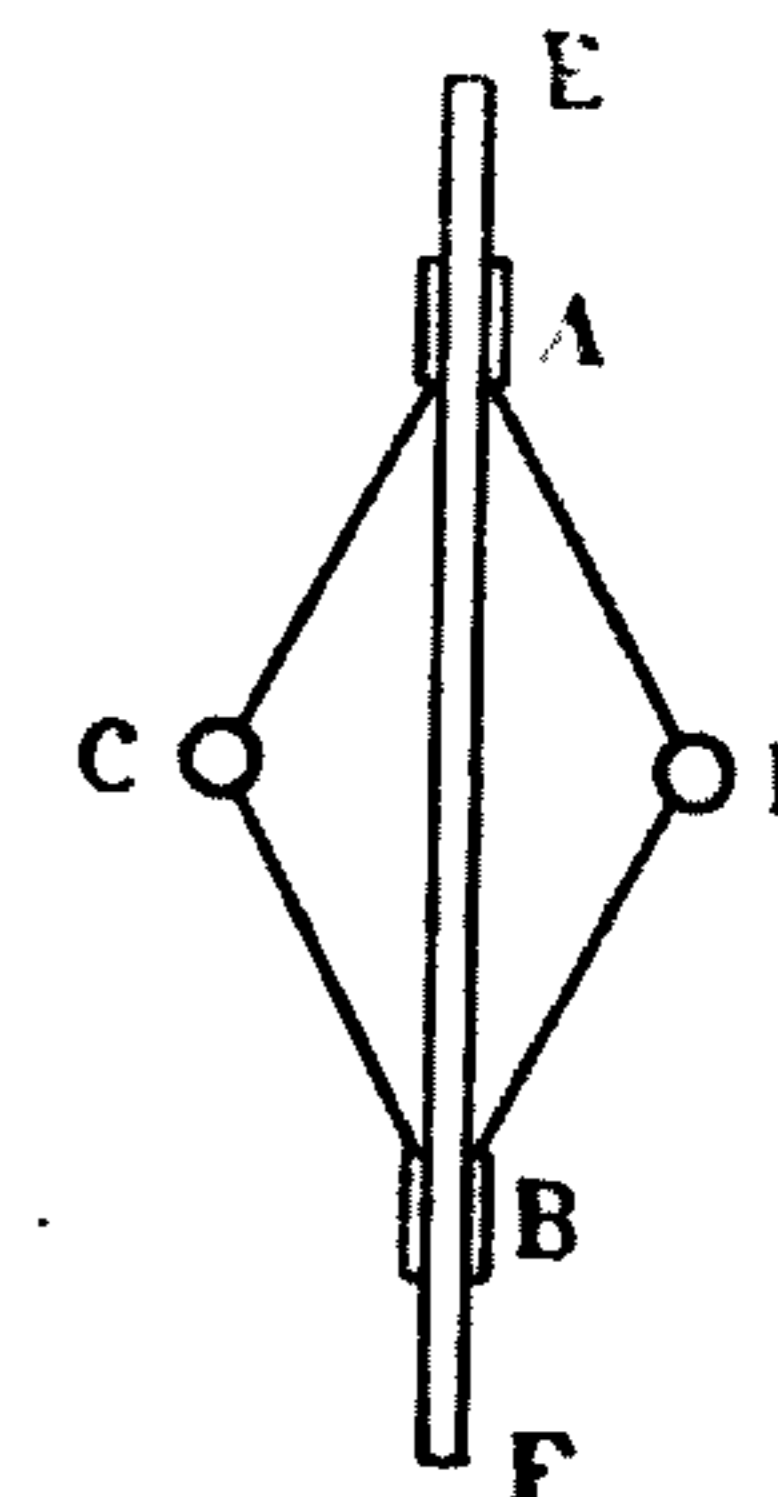


Рис. 20.

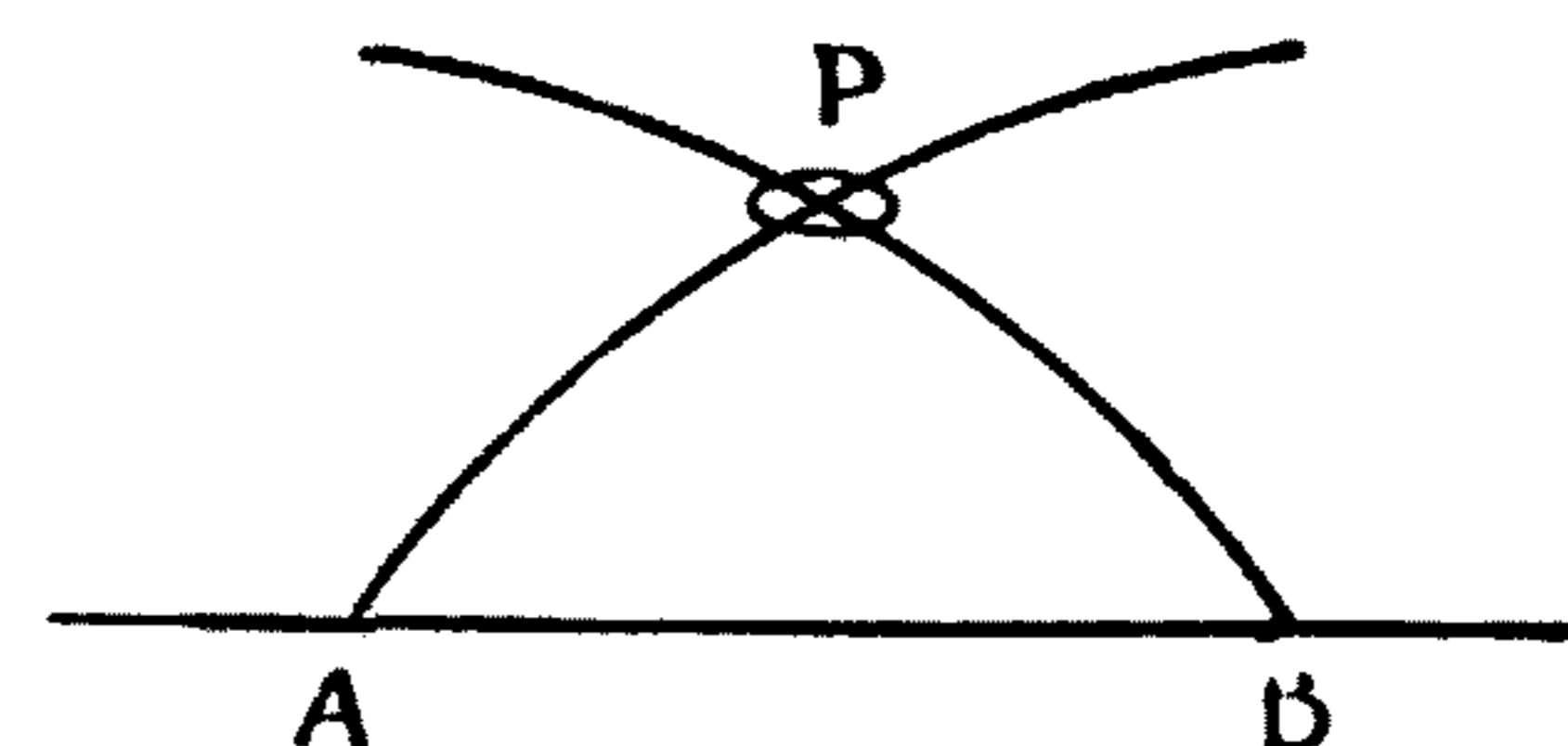


Рис. 21.

Интересно, быть может, отметить, что мы подобным же образом можем добиться того, чтобы два тела казались притягивающимися друг к другу с силою, обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Пусть А и В (рис. 21) будут эти два тела. Представим себе, что к ним прикреплены две параболические проволоки, не обладающие массой; эти проволоки проходят через кольцо Р, имеющее очень малую массу. Если вращать эту систему вокруг оси АВ, то стремление кольца удалиться от оси вращения заставит А и В приближаться друг к другу; легко доказать, что закон, по которому происходит это приближение, тот же самый, как если бы между обоими телами действовала сила, обратно пропорциональная квадрату расстояния.



Упомянутый выше результат, что потенциальная энергия наэлектризованной системы равна кинетической энергии массы связанного с системой эфира, если она перемещается со скоростью света, есть другой пример потенциальной энергии, которая в действительности является кинетической энергией невидимой системы, связанной с видимой. Как я старался изложить вам в сегодняшний вечер, изучение проблемы, выдвигаемой последними исследованиями, приводит нас к заключению, что обычные материальные системы должны быть связаны с невидимыми системами, которые обладают массами, если материальная система заряжена электричеством. Если мы примем, что всякая материя удовлетворяет этому условию, то приходим к заключению, что невидимая вселенная — эфир — играет существенную роль, как мастерская материальной вселенной, и что наблюдаемые нами явления природы представляют собою ткань, которая создана на ткацком станке этой невидимой вселенной.

## ПРИЛОЖЕНИЕ ВТОРОЕ

## П Р И Р О Д А С В Е Т А

## СТРУКТУРА СВЕТА. 1)

ДЖ. ДЖ. ТОМСОН.

## П р е д и с л о в и е.

Статья Томсона „Структура света“ представляет собой изложение популярной лекции, прочитанной им в Лондоне 7 мая 1925 года и вышедшей затем отдельной брошюрой в издании Кембриджского университета.

Статья эта содержит популярное изложение замечательной попытки Томсона дать синтез теории квант и классической электромагнитной теории Максвелла.

В настоящее время можно считать твердо установленным, что лучистая энергия испускается не сплошным и непрерывным потоком, но в виде отдельных „порций“ или квант, выпускаемых друг за другом и разделенных друг от друга перерывами. Мы имеем громадное количество фактов, подтверждающих это прерывистое испускание лучистой энергии, и в то же время классическая электромагнитная теория, казалось, была бессильна объяснить эти факты.

На этой почве была построена новая теория — теория квант, резко порывающая с классической физикой, великолепно изображающая эту вновь открытую область фактов, но, с другой стороны, и эта новая теория оказалась бессильной объяснить целый ряд явлений, с которыми классическая теория справлялась шутя.

Все это создавало благоприятную почву для подогревания философии Маха: в науку постепенно стало просачиваться вновь убеждение, что для каждой области имеют значение свои законы, которые дают „точное математическое описание“ для данной группы фактов

1) Перевод Е. Семеновской, ред. и прим. З. Цейтлина.



и что совершенно бесполезно ломать голову над установлением связи между специфически различными частями одной и той же науки.

Вот в эту пору почти повсеместно разлившегося пессимизма появилась в прошлом году работа Томсона, представляющая попытку разрешить противоречие между классической электродинамикой и теорией „квант“. Эта блестящая попытка почти не встретила отклика, вследствие того, что работы Томсона, на которых построена его новая работа и которые были опубликованы на протяжении сорока с лишним лет, теперь почти совсем забыты — они оттеснены формально-математическими теориями в духе Маха-Эйнштейна.

Это замалчивание вызвало со стороны Томсона желание, с одной стороны, дать в более популярной форме изложение своих мыслей, с другой — дать дальнейшее развитие своих идей и отвести ряд возражений: последнее и выполнено им в статье, носящей то же заглавие: „Структура света“ и напечатанной в декабрьской книжке „Философический Магазин“ за 1925 год. Не подлежит сомнению, что имевшему место до сих пор замалчиванию работ Томсона должен наступить конец, так как теория „квант“ сама вступила в полосу тяжелого кризиса. Для материалиста этот кризис дает лишнее подтверждение бесплодия метода „чистого описания“, характеризующего физику Маха-Эйнштейна.

Предлагаемая вниманию читателей статья Томсона, помимо ее глубокого философского значения, интересна еще как блестящий пример популярного изложения. Томсон мастерски излагает явление интерференции света, которое ему необходимо для доказательства преимуществ излагаемой им теории.

Очень интересно также изложение взглядов Ньютона на теорию света. Как и в теории тяготения, последователи Ньютона и в теории истечения пошли гораздо дальше самого Ньютона, выдавая постановку задачи за ее окончательное решение. Для Томсона эта экскурсия в область истории важна потому, что предлагаемая им теория представляет синтез волнообразной теории света с теорией „истечения“ квант, которая имеет много общего со взглядами Ньютона.

*А. Тимирязев.*

Мне кажется, что не будет противоречить намерениям учредителей лекций имени Физона, если я сделаю свет предметом этой первой лекции. Изучение света развилось в результате достижений проницательности, воображения и изобретений, не превзойденных ни в какой другой области умственной деятельности; к тому же оно лучше, чем какая-либо другая область физики иллюстрирует изменчивость теорий.

С гуманитарной точки зрения этот предмет имеет огромное значение, так как проблема света в действительности представляет собою вопрос о переносе энергии через пространство; мы обязаны своим существованием возможности такого переноса, мы находимся на иждивении у солнца и перестали бы существовать, если бы перенос энергии с него был прерван.

Способ, которым производится этот перенос, быть может, самая важная из всех физических проблем, — является первой целью всех наших исследований света.

В течение 250 лет или около этого, было приобретено достаточное количество знаний о свойствах света, на основании которых были возможными серьезные опыты построения теории. За исключением последних двадцати пяти лет, всегда существовала та или иная точка зрения, которая объясняла свойства света, поскольку они были известны, вполне удовлетворяя физиков того времени.

В течение одного периода, продолжавшийся больше столетия, в который практически господствовала ньютоновская или корпускулярная теория. Согласно точке зрения, которой придерживались непосредственные последователи Ньютона, энергия света переносится маленькими тельцами, называемыми корпускулами, которые выбрасываются светящимися телами и движутся в пространстве со скоростью 180 000 миль в секунду.

Нужно заметить, однако, что последователи Ньютона были гораздо более корпускулярны, чем сам Ньютон. Ньютон думал, что корпускулы представляют из себя только часть света, и принимал, что эфир, так же как и корпускулы, образует его составную часть. Так для того, чтобы объяснить тот факт, что свет отражается так же, как и преломляется, когда он переходит из одной среды в другую, Ньютон предположил, что корпускулы имеют „влечение“ к легкому отражению или преломлению, или, по современной терминологии, что корпускулы находятся в состоянии колебания и что в одной фазе они легко отражаются, в другой легко преломляются. Чтобы дать себе отчет об этих „влечениях“, он спрашивает: когда луч



света падает на поверхность какого-нибудь прозрачного тела, не могут ли колебания или вибрации возбудиться в точке падения и продолжать возрастать там и распространяться оттуда и не захватывают ли они лучей света и, захватив их, не удастся ли им приоровить лучи к легкому отражению или преломлению? Он предполагает, что корпускулы, соответствующие свету различных цветов, возбуждают в эфире колебания различного типа. Повидимому, он рассматривает корпускулу как бы окруженной эфирными волнами, возбужденными ее собственными колебаниями, красные корпускулы — длинными волнами, синие — короткими. Таким образом свет, по его мнению, не вполне корпускулярен и не вполне волнообразен, но представляет из себя неразделимую смесь этих обоях свойств. Мы увидим, что точка зрения, имеющая очень много сходства с этой, подсказывается открытиями, сделанными в течение последних двадцати пяти лет<sup>1</sup> в области электрических свойств света. Я хотел бы обратить ваше внимание на то, что, по корпускулярной теории, энергия света сконцентрирована в маленьких корпускулах, а не рассеяна по всему пространству, через которое проходит свет.

После смерти Ньютона, корпускулярная теория в ее наиболее корпускулярной форме становится все более и более господствующей, благодаря работам крупных математиков, как Лаплас и Пуассон. Но в конце XVIII столетия начались нападки на теорию корпускул, которые и привели в конце концов к ее падению. Нападение это вели англичанин Томас Юнг (Young) и француз Френель (Fresnel). Юнг был человеком почти таких же универсальных знаний, как Леонардо да-Винчи: он был великий физик, известный доктор и знаменитый египтолог: это он расшифровал камень Розетты. К сожалению, его сочинения о вопросах физики настолько сжаты, что его современники считали их очень трудными для понимания; он действительно сказал о себе, что он, как и Кассандра, не говорил ничего, кроме правды, но что очень немногие понимали его, и никто ему не верил. Юнгу мы обязаны двумя самыми основными принципами волнообразной теории — принципу интерференции и принципу поперечных колебаний. Он придерживался того взгляда, что свет состоит из лучей, распространяющихся в эфире. Когда вы наблюдаете систему волн движущихся, предположим, по пруду или по морю, вы видите гребни и долины волн, следующие друг за другом на одинаковом расстоянии, и пробка на поверхности будет подниматься и опускаться в зависимости от того, проходят ли через нее гребень или долина. Принцип интерференции

есть изложение того, что происходит, когда различные ряды волн проходят через среду. Предположим, что волна, отправляясь от точки  $O$  в пруде (рис. 22), достигает места  $P$  двумя путями, непосредственно вдоль по  $OP$  и отражаясь от стороны пруда по пути  $OQP$ . Характерным для волнового движения будет то, что, если мы проследим вдоль направления, по которому движется волна, то одинаковое положение вещей повторяется через одинаковые пространственные промежутки или интервалы; такой интервал называется длиной волны.

Для определенности предположим, что длина волны будет в один фут; если мы отметим вдоль  $OP$ , а также вдоль  $OQP$ , расстояния в фут друг от друга, начиная с  $O$ , состояние движения в каждой из этих отметок будет таким же, как и в  $Q$ .<sup>1)</sup> Если теперь одна

из отметок около  $P$  вдоль  $OP$  совпадает с отметкой вдоль  $OQP$ , прямая и отраженная волны будут обе иметь гребни и долины в  $P$ , и они будут сочетаться, производя гребни или долины вдвое выше или глубже, чем у каждой отдельной волны; но если отметка у  $P$ , вдоль  $OP$  будет составлять полпути между отметками вдоль  $OQP$ , и, если прямая волна имеет гребень у  $P$ , то отраженная будет иметь там долину; гребень и долина будут уничтожать друг друга, и вода около  $P$  не будет затронута волной. Это произойдет тогда, когда  $OQP$  длиннее  $OP$  на полфута или на полтора, или на два с половиной и т. д. Места, где  $OQP$  длиннее на полфута, расположатся по кривой  $\alpha$  (рис. 23), те, которые длиннее на полтора фута — по другой кривой  $\beta$  и т. д. Вода вдоль этих кривых будет неподвижной, без энергии, энергия не движется ни вдоль ни поперек них. Если мы начертим кривые  $a, b, c, d$ , где  $OQP$  больше чем  $OP$  на

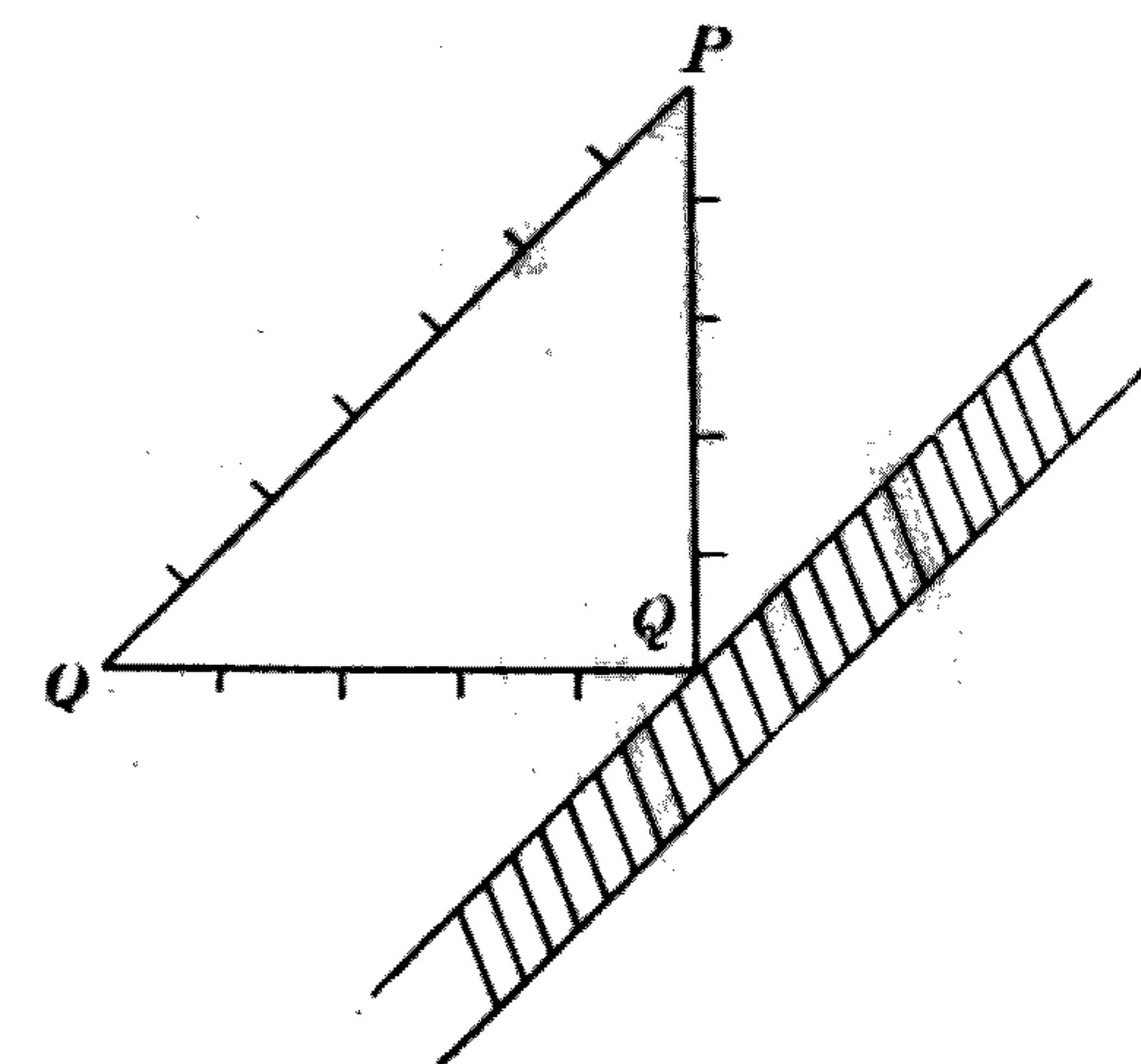


Рис. 22.

<sup>1)</sup> Здесь Томсон в целях популяризации допускает неточность, так как при отражении от более плотной среды теряется полволны.



1, 2, 3, 4 фута, то соответственно они придутся там, где гребни совпадают с гребнями, долины с долинами, так что вдоль этих кривых будет ненормальное количество энергии. Это явление называется интерференцией. Таким образом, мы видим, что благодаря интерференции, энергия от источника, вместо того, чтобы затоплять окружающее пространство, удерживается в каналах, разделенных друг от друга участками, по которым не течет энергии. Энергия, так сказать, канализуется. Если волны будут теми, которые производят свет, то участки (области), где нет энергии, будут темными, те, сквозь которые протекает энергия, яркими, ярче чем они были бы, если бы интерференции не было, так как интерференция не уничтожает энергии, а берет ее из одних областей и наполняет ею другие.

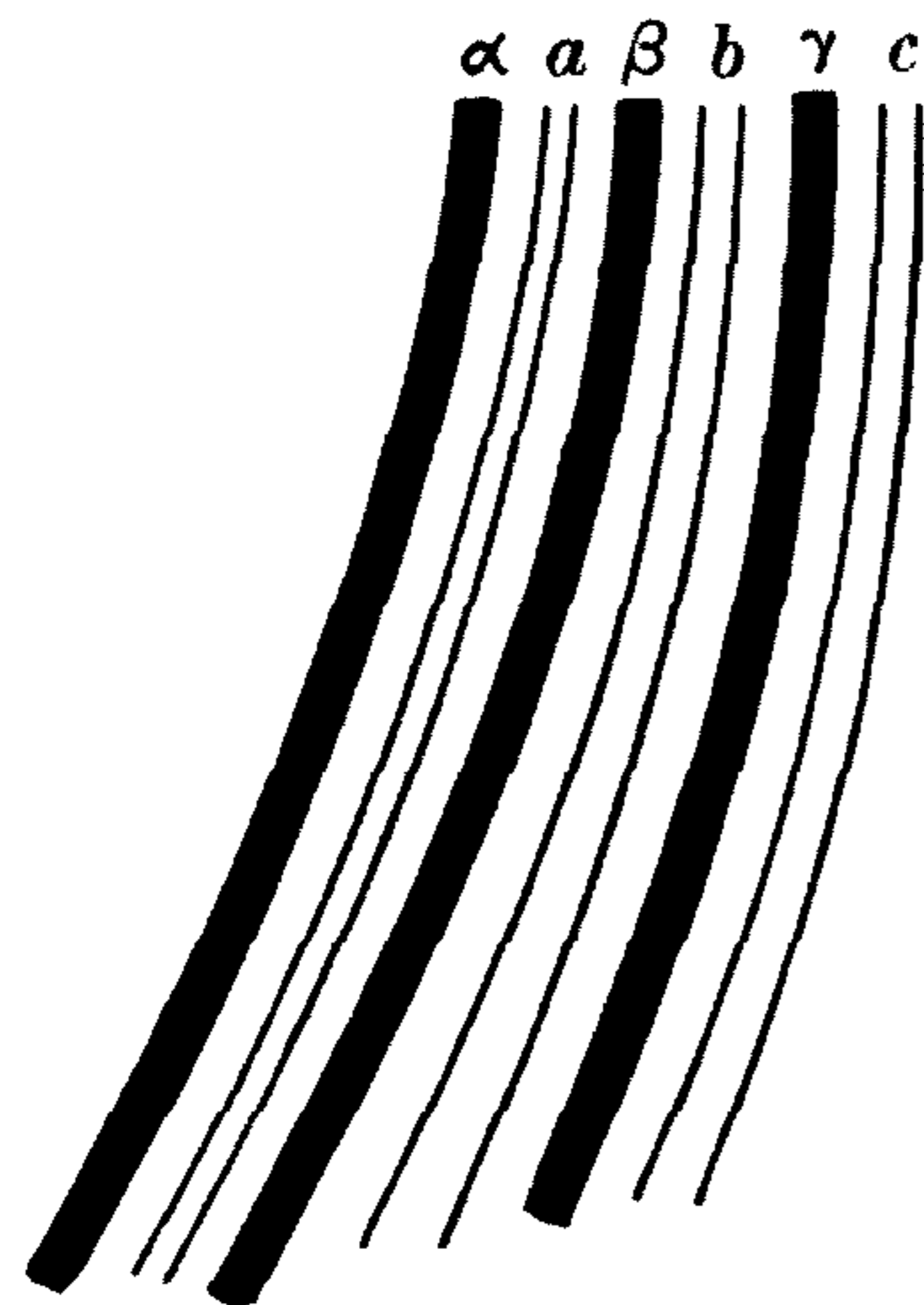


Рис. 23.

Хотя Юнг первый дал основную идею интерференции, но Френелю мы обязаны ее математическим обоснованием; он и другие крупнейшие математики разрабатывали те оптические эффекты, которые вытекают из волнообразной теории в областях интерференции, дифракции, поляризации и двойного преломления, где заключаются самые прекрасные, важные и, можно сказать, наиболее сложные оптические явления; результаты этих теорий, во многих случаях совершенно неожиданные, оказывались в полном соответствии с результатами самых глубоких и точных опытов.

Ни одна, однако, теория не пережила таких острых испытаний, как те, которым подверглась волнообразная теория света в конце прошлого столетия.

Но до этого времени каждый был убежден, что у нас имеется адекватная математическая теория света; под последней я разумею изложение, при котором колебания света изображаются математическими символами. Френель и его последователи снабдили нас уравнениями, при помощи которых мы можем вычислить значение этих символов в каждом вопросе оптики. Позднее внимание многих физиков было направлено на то, чтобы найти физическое толкование этого символа, найти, применяя выражение маркиза Сольсбери, существительное к глаголу „волноваться“.

Во всех видах волнообразной теории света, энергия предполагается рассеянной по всему пространству, через которое проходит свет, а не сконцентрированной в маленьких кусочках, как по теории Ньютона; вот это-то однородное распределение энергии и оказало наиболее серьезные затруднения на пути волнообразной теории.

Эти затруднения, можно сказать, начались вместе с открытием почти в конце последнего столетия X-лучей, которые по серьезным основаниям предполагаются очень мощной формой света. Эти лучи извлекают электроны из тел, на которые они падают. В настоящее время мы имеем очень точные способы для счета электронов и для измерения их скоростей. Этими способами было найдено, что когда X-лучи проходят через газ, то лишь чрезвычайно малая часть молекул газа теряет электроны: требуется длительная экспозиция под сильными лучами, чтобы освободить электрон в одной из миллиона миллионов молекул. Если энергия лучей распространяется непрерывно по всему пространству, по которому лучи движутся, ни одна молекула не может ее избежать, каждая молекула должна подвергнуться одинаковому влиянию, и все же затрагивается только одна из миллиона миллионов. Этот результат казался бы гораздо более вероятным, если бы энергия света, как это предполагается в корпускулярной теории, была сконцентрирована в далеко расположенных друг от друга центрах, образуя род вязаной сетки, с достаточно широкими петлями, чтобы позволить молекулам проскочить сквозь них. Очень скоро после начала работ по X-лучам, я пришел к убеждению, что энергия в них и, вероятно, также и в свете сконцентрирована в центрах. Я выразил это, сказав, что фронт световой волны должен представлять блестящие пятна на темном фоне, а не однородное освещение.

Дальнейшее и еще более убедительное доказательство было получено измерением скорости электронов, извлеченных из молекул. Если бы энергия была непрерывно распределена, надо было бы ожидать, что скорость будет больше в сильном свете, чем в слабом, но это не так. Скорость и энергия электронов совершенно одинаковы, когда молекулы находятся близко от источника света, как и тогда, когда они далеко от него; в более сильном свете имеется больше электронов, но скорость их одинакова. Энергия электронов зависит от характера света, она возрастает с уменьшением длины волны,<sup>1)</sup> и

<sup>1)</sup> Точное соотношение дается законом Эйнштейна:  $\frac{1}{2} mv^2 = h\nu - p$ , где  $p$  — работа вырывания электрона,  $h\nu$  — кванта энергии.



в действительности, произведение энергии на длину волны есть величина постоянная. Энергия также зависит, но только косвенно, от природы молекулы, из которой извлекается электрон. Тот факт, что энергия электрона независима от силы света, мы должны предвидеть по корпускулярной теории, если извержение было следствием одного только столкновения между корпускулой и молекулой, но это не будет тем, что мы можем ожидать согласно волнообразной теории.

Другой путь рассуждения, ведущий к подобным же следствиям, основывается на совершенно другом явлении. Вы знаете, что когда какое-нибудь тело, например, зачерненный шар, нагревать, то он становится светящимся и по мере нагревания цвет изменяется от красного к желтому и затем к белому. Покойный лорд Рэлей (Rayleigh) первый обратил внимание на тот факт, что это не совсем то, что мы должны были бы предвидеть согласно волнообразной теории. По этой теории, цвет света не будет изменяться от температуры, хотя интенсивность света будет больше у горячего тела, чем у холодного.

Этот вопрос изучался очень подробно Планком (Planck), который показал, что наблюдаемое распределение энергии в спектре горячего тела необходимо имело бы место, если бы переход энергии от света к поглощающему веществу совершался так, как-будто энергия была атомной, а не непрерывной.

Таким образом, в каком-нибудь определенном свете, например, желтой линии натрия, энергия этого света всегда появляется и исчезает определенными и равными порциями, а не непрерывно, совершенно так же, как масса куска натрия может увеличиваться или уменьшаться лишь на кратные некоторой конечной массы, т. е. массы одного атома натрия. Единица, на которую увеличивается или уменьшается энергия данного вида света, называется квантой этого света. Планк постулировал, что кванта света, делая  $\nu$  колебаний в секунду, пропорциональна  $\nu$  и равна  $h\nu$ , где  $h$  есть константа, всем известная в настоящее время константа Планка; отношение  $E = h\nu$ , где  $E$  есть энергия в кванте, известно как закон Планка.

Доказательства в пользу этого закона продолжают накапливаться с того времени, как он был выражен. Электрические явления, производимые светом, находятся с ним в согласии; например, энергия, связанная с электроном, когда он изгоняется действием света, равна энергии определенной законом Планка, — кванте этого света. Закон Планка оказался неоценимым путеводителем для исследования и признан, я думаю, повсеместно.

Но вы увидите, что тогда, как он согласуется вполне естественно с корпускулярной теорией света, если мы предположим, что энергия, которой обладает каждая корпускула определенного вида света, равна кванте энергии света, он совершенно чужд волнообразной теории, которая предполагает сплошное, а не атомное распределение энергии.

Положение таково, что все оптические явления указывают на волнообразную теорию, все электрические — на что-то в роде корпускулярной теории. Пререкания по этому поводу иногда такие же, как между тигром и акулой; каждый всемогущ в своей собственной стихии, но беспомощен в стихии другого. Прежде чем попытаться примирить эти взгляды, рассмотрим некоторые из затруднений, с которыми мы встречаемся при предположении, что в свете нет ничего, кроме квант. Кванты чрезвычайно изменяются по свойствам и по энергии; кванты X-лучей имеют энергию, в несколько тысяч раз большую, чем кванты, соответствующие видимому свету; некоторые кванты выходят из атомов одного элемента, другие из атомов другого; все эти сильно различающиеся кванты движутся в пространстве с совершенно одинаковой скоростью. Однако скорость кванты определяется той средой, через которую она проходит, а не так, как у электрона или  $\alpha$  — частицы, обстоятельствами извержения.

Кроме того, оптические явления показывают, что область возмущения, соответствующая единице света, должна быть очень значительной. Позвольте мне сослаться на один пример среди многих, потому что он имеет большой исторический интерес. В середине тени круглого диска, освещенного ярким, хотя и небольшим, источником света, в точке оси диска имеется яркое пятно, такое яркое, как если бы диска там не было.<sup>1)</sup> Это показывает, что возмущение, производимое единицей света, идущей из молекулы в светящемся источнике, должно существовать на площади, по меньшей мере такой же большой, как и диск; и так как яркое пятно наблюдалось при дисках в полтора дюйма в диаметре, и нет указания, что это есть какое-либо приближение к пределу, мы видим, что для объяснения яркого пятна согласно чисто корпускулярной теории потребовались бы кванты величиной с крокетный шар.

Мы видели, что свет производит электрические явления и что они имеют большое значение по отношению к тому взгляду, кото-

<sup>1)</sup> Это явление было впервые предсказано противником волновой теории Пуассоном (1821 г.) и подтверждено на опыте Араго, который доказал, что оно в точности согласуется с математическими следствиями волновой теории Френеля.



рый мы принимаем об их природе. Существование таких явлений показывает, что свет сопровождается электрическими силами, и знаменательно то, что по наиболее определенной теории света, которой мы обладаем — электромагнитной теории Максвелла — свет состоит из волн электрических сил. Чтобы пояснить эту теорию, я воспользуюсь тем широким распространением и известностью электрических волн, которое принесло развитие беспроволочной телеграфии.

Приборы, которые производят эти волны, как вы знаете, электрические по своему действию. В 1865 г. Максвелл разрешил проблему, состоящую в главных чертах в том, чтобы узнать, что происходит в пространстве, окружающем такой прибор, когда он находится в действии. Он нашел, применяя обобщение двух основных законов электрического и магнитного действий, а именно закон Фарадея об индукции токов и закон Ампера для магнитных сил, вызываемых токами, что из такого прибора электрические и магнитные силы устремляются в пространство. Он сумел вычислить ту скорость, с которой они распространяются, беря чисто электрические данные; производя вычисления, он нашел, что эта скорость равна скорости света. Он показал, что как электрические, так и магнитные силы находятся под прямым углом к направлению распространения электрических волн, так что эти волны, как и волны света по теории Юнга и Френеля, представляют из себя поперечные волны.

Изменения электрической силы во времени и пространстве, были такого же характера, как и колебания света по теории Френеля. Единственное различие только в масштабе, так как длины электрических волн, произведенных нашими электрическими машинами, во много миллионов раз больше волн видимого света. Длина электрической волны зависит от размеров прибора, и приборы, производящие электрические волны, во много миллионов раз больше атомов — приборов, производящих видимый свет.

Работа Максвелла была вполне теоретической: он показал, что она вытекает из принципов электромагнетизма, что эти волны должны существовать, но ему не удалось самому получить их. В 1887 г. Герц (Hertz) изобрел способы получения и улавливания электрических волн и показал, что они обладают характерными свойствами света, как, например, отражение, преломление, интерференция и поляризация.

Таким образом, если оказывается, что электрические волны распространяются точно со скоростью световых волн и имеют такие же отличительные признаки, трудно противостоят заключению Макс-

велла, что световые волны представляют собою электрические волны, но со много меньшей длиной волны. Это есть шаг огромного значения, так как у нас имеется прекрасно разработанная концепция строения электрической волны, и теория Максвелла распространяет эту концепцию на световые волны и дает нам существительное к глаголу „волноваться“.

Но теория Максвелла развивает непрерывное распределение энергии; она не объясняет квант. <sup>1)</sup> Я предложил путь, по которому, мне кажется, эта теория может расширяться настолько, чтобы включить получение квант так же, как и получение электрических волн.

Я думаю, что имеет очень большое значение то, что скорость квант одинакова со скоростью силовых электрических линий. Мы видели, что из законов электромагнетизма следует, что линии электрической силы должны двигаться в пространстве со скоростью света; мы не знаем ни о чем другом, для чего мы могли бы дать объяснение, почему оно движется именно с этой особой скоростью, и потому, когда мы встречаем что-либо движущееся со скоростью света, то имеется сильное предубеждение, что это есть распределение силовых электрических линий.

Если бы кванты оказались таким распределением, то исчезло бы очень серьезное затруднение для объяснения уже упомянутого факта, что все кванты движутся с одинаковой скоростью.

Позвольте мне сказать несколько слов о линиях электрической силы; это будут линии, которые всегда указывают на направление электрической силы; расположение их для положительного и отрицательного зарядов показано на рис. 24. Я предполагаю, что эти линии представляют из себя не только геометрические фикции, но

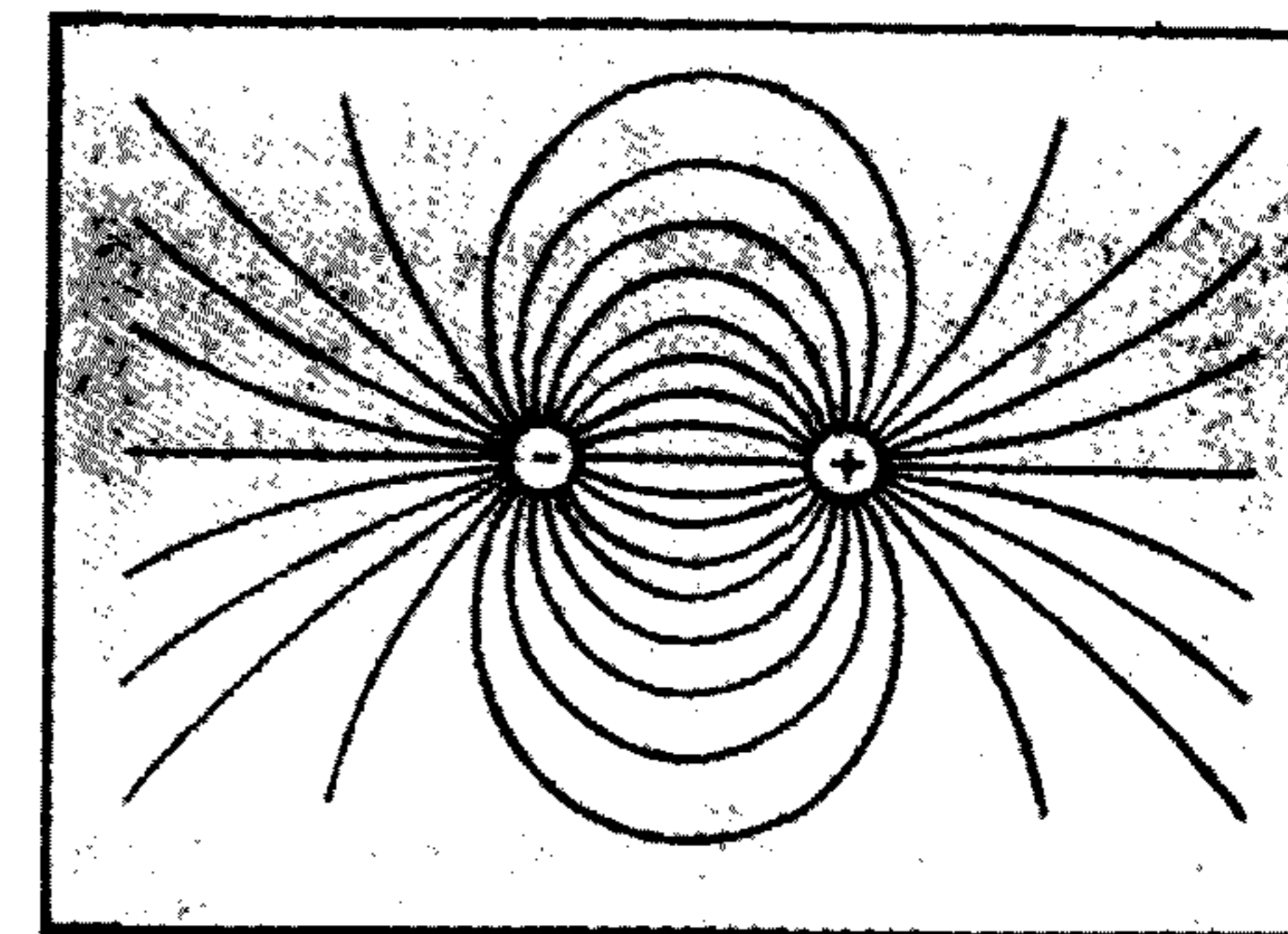


Рис. 24.

<sup>1)</sup> Утверждение Томсона не совсем точно. Сам Томсон в своей первоначальной теории „волоконистого эфира“ (см. нашу статью) утверждает прерывное, а не непрерывное строение поля на основании физического понимания силовых линий Фарадея-Максвелла. Эта прерывность синтезирована с непрерывностью.



что они, или вернее группы их, образующие силовые трубки, оканчивающиеся на электроне, суть физические реальности и что энергия в электрическом поле связывается этими трубками. Эти трубки образуют два класса: 1) имеющие концы, как те, которые связывают два заряда (рис. 24), и 2) те, которые образуют замкнутые кривые, как, например, линии электрической силы вокруг движущегося магнита. Те, у которых имеются концы, имеют один конец, связанный с электроном, а другой — с положительным зарядом, и когда они движутся, они должны тащить за собой эти массы. Скорость этих линий, когда они движутся, будет зависеть от движений тех масс, к которым они привязаны, и не будет иметь никакого отношения к скорости света. Другой вид силовых линий не прикреплен к положительным частицам или электронам; они могут двигаться свободно, неся с собой свою энергию; они движутся со скоростью света, каждый кусок каждой из этих линий движется под прямым углом к самому себе с этой скоростью, и мы можем рассматривать электрическую волну, как систему замкнутых силовых линий, движущихся повсюду под прямым углом к направлению этой линии.

Мысленная картина, которую я рисую о свете, испускаемом атомом или молекулой, такова, что она состоит из линий электрической силы, расположенных, как указано выше, двумя способами. Расположение в одной части, которую мы можем назвать корпускулярной и которая соответствует кванте, представляет из себя, как я объясню впоследствии, якорное кольцо, образованное замкнутыми линиями электрической силы; это кольцо движется вперед под прямым углом к своей плоскости со скоростью света, и это движение не изменяет ни его размера ни формы.

Якорное кольцо может колебаться, время колебания будет временем, которое требуется свету, чтобы обойти окружность кольца. Таким образом частота его колебаний обратно пропорциональна длине его окружности. В то время, как кольцо извергается из атома, оно находится в сильном колебании и порождает систему обыкновенных волн Максвелла.

Кольцо, состоящее из линий электрической силы, движется со скоростью света; волны Максвелла движутся с той же скоростью, так что, если кольцо движется в пространстве, оно сопровождается целой свитой электрических волн, но энергия этих волн будет много меньше, чем энергия кольца. Волны, идущие впереди кольца, как мы увидим, определяют его путь. Итак, лучеспускание светящейся молекулы или атома состоит из кольца или сердцевин, содержащей

почти всю энергию; оно окружено рядом волн максвелловского типа, длина которых равна окружности кольца. Рассмотрим сейчас с большими подробностями строение сердцевин и тот путь, которым она образуется.

Прежде всего о ее строении. Сердцевина предполагается в виде кольца, сделанного из круговых линий электрической силы, плоскости кругов параллельны друг другу и все их центры лежат на оси кольца.

Эти замкнутые силовые линии, как мы видели, должны двигаться вперед под прямым углом к самим себе со скоростью света. Они будут удовлетворять этим условиям, если кольцо движется вперед с этой скоростью перпендикулярно к плоскостям кругов. При движении этим путем, его форма и размер останутся неизменными, пока оно движется в пространстве, и его энергия будет такая же, как и при начале движения. Мы можем сравнить его с круглым вихревым кольцом или кольцом табачного дыма, которое также движется под прямым углом к своей плоскости, и как пуля переносит один и тот же материал с одного места на другое.

Но, однако, мы не должны проводить аналогию слишком далеко, так как скорость кольца дыма зависит от его размеров, тогда как скорость нашего кольца всегда равна скорости света, каковы бы ни были размеры кольца.

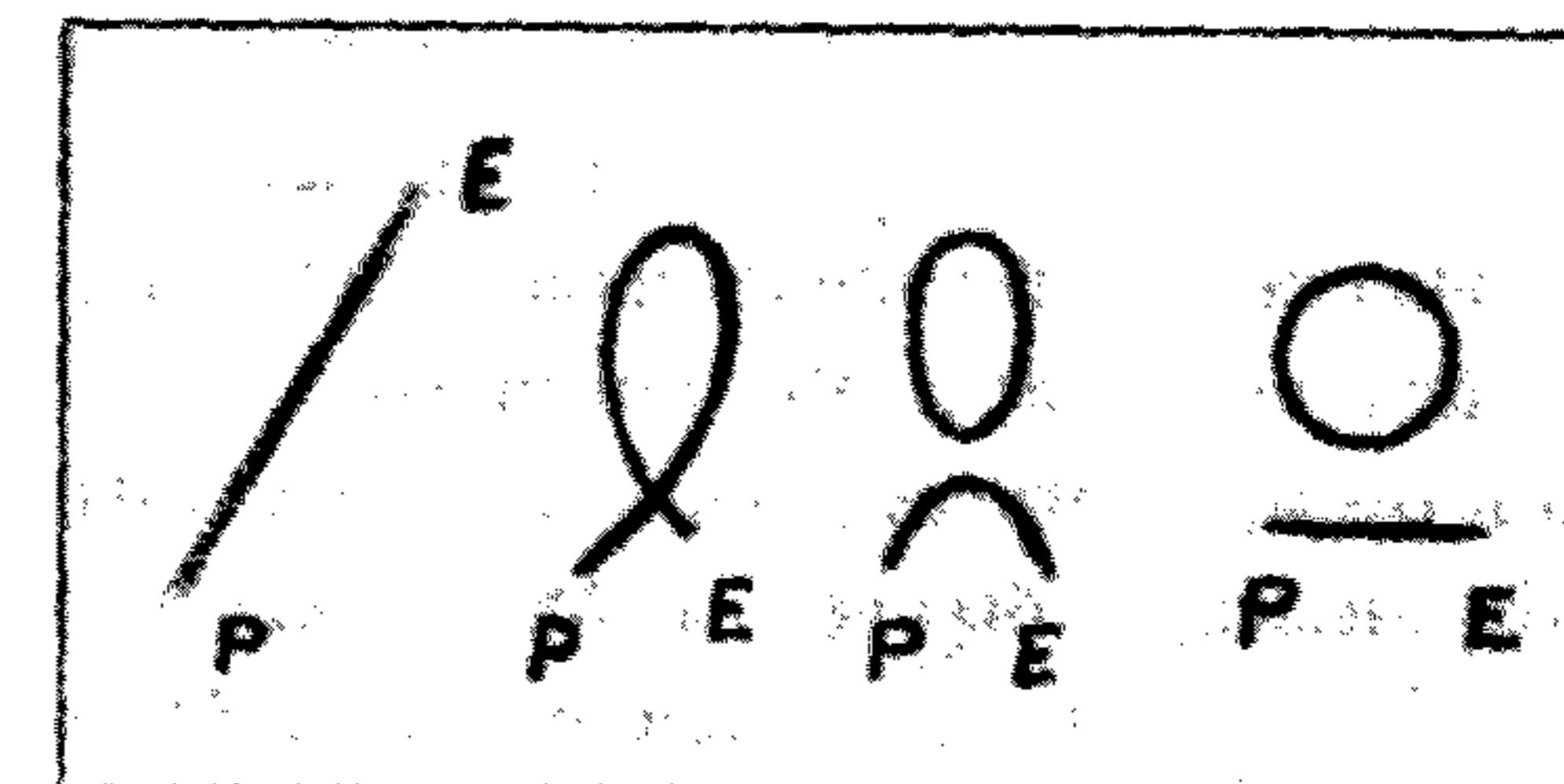


Рис. 25.

Теперь мы переходим к рассмотрению того способа, по которому кольцо может образоваться. Рассмотрим, что произойдет с трубкой, соединяющей электрон  $E$  с положительным зарядом  $P$ , если дернуть внезапно любой из концов. Трубка придет в сильное движение и может как веревочка для прыганья быть брошена в виде петли, так что часть трубки в петле, образующая замкнутую кривую, разорвется. Стадии, по которым это совершается, изображены на рис. 25. Кривая налево изображает первоначальное положение трубки, две следующие, — образование петли, — и кривая направо — конечную стадию, когда она пускается в пространство. Теперь она больше не связана с электроном или положительным зарядом и удаляется как



бестелесный дух, унося энергию, связанную с ней, когда она была в атоме. Согласно взгляду, который я излагаю, кольцо, отделенное таким путем, есть кванта света, энергия, которую оно несет, есть часть энергии, которая была первоначально в молекуле, упакованная в форме, удобной для перевозки. Если движение электрона происходит медленно, потенциальная энергия, потерянная при переходе из одного места в другое, проявилась бы как увеличение кинетической энергии. Но так как эта кинетическая энергия должна быть локализована в электроне, тогда как потенциальная энергия разлита в пространстве, окружающем его и другие наэлектризованные тела с ним по соседству, то требуется определенное время, чтобы энергия указанных областей дошла до электрона. Если электрон движется очень быстро из одного места в другое, где потенциальная энергия меньше, то может не хватить времени для того, чтобы избыток потенциальной энергии вошел в электрон; <sup>1)</sup> он должен избрать какой-нибудь другой путь, и таким путем будет для него излучение в пространство в виде замкнутого кольца электрической силы. Если по соседству имеются другие электроны, то часть, а в некоторых случаях, и весь избыток энергии может влиться в эти электроны и увеличить их кинетическую энергию. Отделение квант зависит от внезапного относительного движения электрона и положительного заряда и от внезапных изменений потенциальной энергии в светящейся молекуле. Мы могли бы, если бы движение не было очень быстрым, иметь смещения силовых трубок без образования петли; это вызвало бы волны Максвелла, распространяющиеся из светящейся молекулы; но там не было бы квант. Таким образом, если магнит движется взад и вперед, волны Максвелла образуются без квант; кроме того, если электрон описывает окружность вокруг положительного заряда, как центра, то не будет внезапной потери потенциальной энергии, а потому и квант, хотя там могут быть волны Максвелла. Мы рассмотрели испускание кванты; мы пойдем дальше и рассмотрим ее поглощение. Так как силовые линии в кванте образуют замкнутое кольцо, оно не будет проявлять сколько-нибудь заметной электрической силы в наружном пространстве. Чтобы получить энергию из кольца, кольцо должно быть сломано и силовая трубка снова стать частью натяжения между электронами и положительным зарядом. Для того, чтобы это случи-

<sup>1)</sup> То, о чем здесь говорит Томсон, не что иное, как проявление иерции силовых линий поля.

лось, должен произойти процесс обратный тому, который вел к образованию кольца; стадии его указаны на рисунке 26. Когда в этом процессе кольцо разрывается и его силовая трубка связывается на одном конце с электроном  $E$ , а на другом с положительным зарядом  $P$ , как на кривой в низу рис. 26, энергия, введенная кольцом в область между  $P$  и  $E$ , пригодна для проталкивания электрона дальше от  $P$ ;

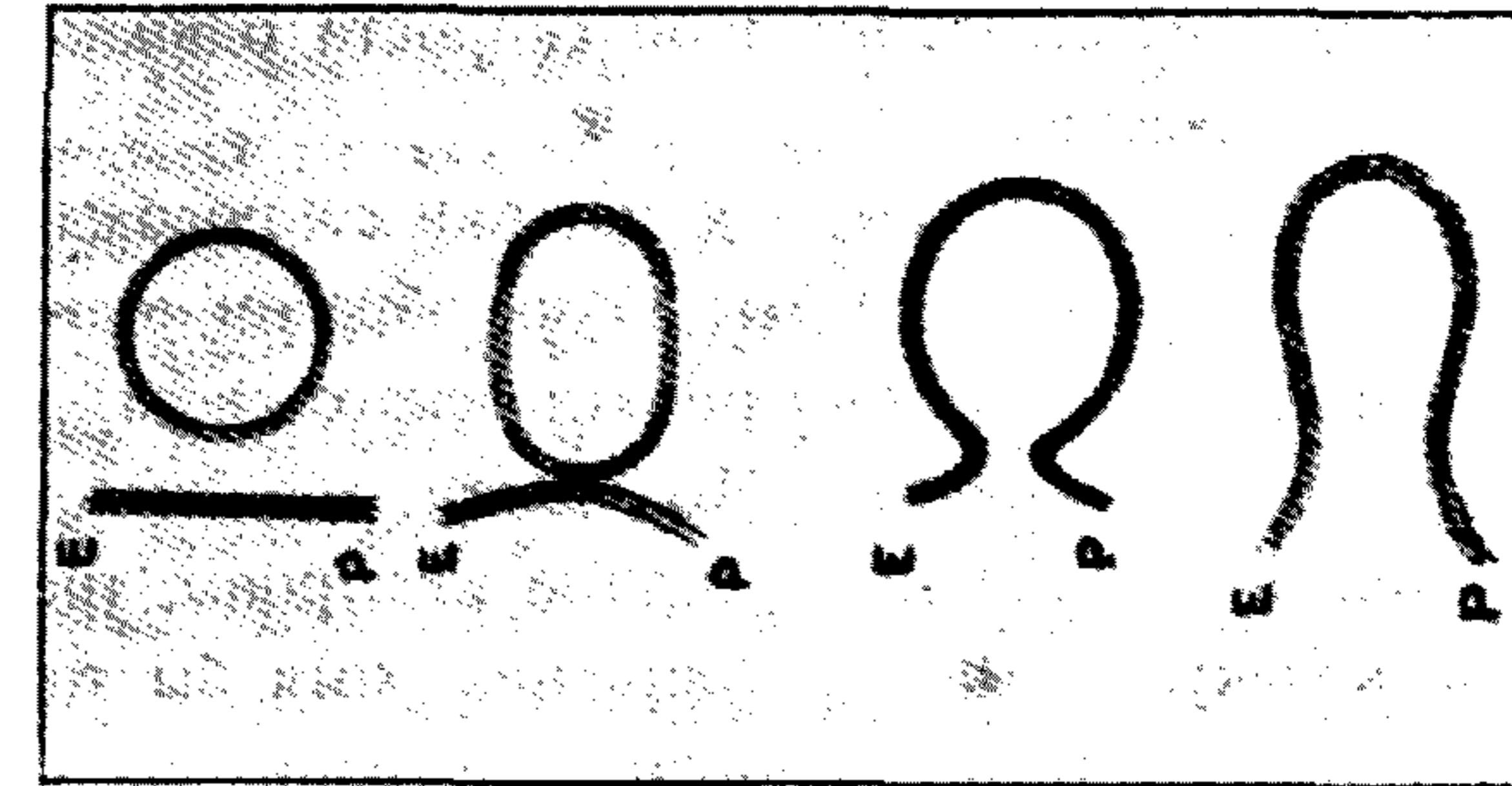


Рис. 26.

если эта энергия достаточно велика, чтобы протолкнуть электрон достаточно далеко от  $P$ , электрон освобождается, и кольцо будет разрушено. Кольцо также исчезнет, если энергия, хотя и недостаточная для того, чтобы удалить электрон на бесконечное расстояние от  $P$ , все же достаточно велика, чтобы привести его в положение устойчивого равновесия по отношению к  $P$ , так что оно может действовать как якорь для силовой трубки. Если, однако, энергия кольца недостаточна ни для того, чтобы отделить вполне электрон, ни чтобы привести его в новое положение равновесия, тогда, хотя абсорбция кольца заставит электрон двигаться прочь от  $P$ , силы, стремящиеся привести его назад, в прежнее положение, скоро остановят его; электрон начнет идти назад, движение станет обратным, и кольцо вновь образуется и отделится от молекулы. Таким образом, если кольцо должно быть поглощено, оно должно не только зацепить электрон, оно должно вырвать его.

Итак, абсорбция с этой точки зрения предполагает, что электрон или навсегда отделяется от молекулы, так что молекула становится положительно заряженным ионом, или же, что электрон передвигается в новое положение устойчивого равновесия в молекуле, т. е. что образуется устойчивое аллотропическое видоизменение молекулы. Таким образом, когда происходит поглощение без ионизации, должно существовать аллотропическое видоизменение молекулы. Энергия,



требуемая для изменения первоначальной молекулы в аллотропическое видоизменение, будет энергией в кванте поглощенного света.

Мы видим из вышеизложенного, что рождение электрона высокой скорости означает смерть кольца, т. е. разрушение кванты. Это находится в точном согласии с чрезвычайно интересным результатом, полученным Баркля (Barkla), что когда пучок рентгеновских лучей вполне поглощается газом без испускания характеристичных лучей, число полученных электронов высокой скорости одинаково для всех газов и при всех давлениях.

Перемещение энергии от света к материи сопровождается разрушением колец, образующих кванты; таким образом количество энергии, превращенной из пучка монохроматического света, должно быть целым кратным энергии кольца. Мы видели, что поглощение света до тех пор, пока не получатся свободные электроны, требует, чтобы поглощающая молекула была в состоянии хотя бы только на короткое время существовать в новом аллотропическом состоянии. Это имеет некоторые интересные применения; возьмем случай инфракрасных лучей, где энергия в кванте чересчур мала, чтобы породить свободный электрон; поэтому, когда она поглощается газом, должно быть постоянное или квази-постоянное аллотропическое видоизменение молекулы.

Пары воды имеют резкие полосы поглощения для инфракрасного света с длиной волны  $3 \mu$  и  $6 \mu$ , где  $\mu = 10^{-4}$  см. Это дает возможность предположить, что, кроме обыкновенной воды, должны существовать по меньшей мере еще два другие вида воды; один, соответствующий полосе поглощения у  $3 \mu$ , имеет энергию больше приблизительно на 10 калорий на граммэквивалент, чем у нормальной воды, или, применяя обычные выражения, скрытую теплоту в  $10^4/18$  или 550, что очень близко к скрытой теплоте испарения воды; модификация, соответствующая полосе у  $6 \mu$ , имеет скрытую теплоту в половину этой.

Углекислый газ имеет резкую линию поглощения у  $4,2 \mu$ , соответствующую аллотропическому состоянию со скрытой теплотой в 160, другую все еще резкую полосу у  $14,5 \mu$ , соответствующую скрытой теплоте 48, которая близка к теплоте испарения  $\text{CO}_2$  при комнатной температуре. Так как многие газы имеют полосы поглощения, они должны, согласно этому взгляду, быть способными существовать в аллотропическом состоянии. Продолжительность жизни такого состояния, хотя и может казаться долгой в сравнении со временем колебания света, но все-таки очень мала, если измерить ее в секундах.

### ДИФФРАКЦИЯ И ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ.

Теперь мы перейдем к рассмотрению того, насколько эта концепция света, как движущегося кольца, неизменного по величине и форме и окруженного системой максвелловских волн, возбуждаемых колебаниями кольца, с длиной волны, равной окружности кольца, насколько эта концепция способна объяснить диффракцию и интерференцию.

Прежде всего мы укажем на то, что направление движения свободной силовой трубки в любой точке будет под прямым углом как к электрической, так и к магнитной силам этой точки, так что направление движения таких трубок может изменяться внешними электрическими и магнитными силами. Так как кольцо, которое мы рассматриваем, представляет из себя такую трубку, оно может быть отклонено применением подходящих электрических и магнитных сил.

Рассмотрим с этой точки зрения проблему диффракции и возьмем случай плоской волны света, проходящей через узкую щель и падающей на экран позади щели. Изображение на экране будет не яркой полосой одинаковой интенсивности, но рядом светлых и темных линий, параллельных щели. Это явление вызывается тем обстоятельством, что, когда волны теснятся через узкую щель, электрические и магнитные силы в щели много больше, чем силы в волне, до того, как она достигает щели, и имеют иное направление; направление потока энергии, образующее прямой угол как с магнитными, так и с электрическими силами, изменяется, когда волна проходит щель: до того как волна достигает щели, энергия волны вся течет в одном и том же направлении, но, пройдя щель, она распространяется веерообразно и приводит к ряду светлых и темных полос, видимых на экране. Распределение энергии может быть вычислено из волнообразной теории, и результаты согласуются с опытом.

Таким образом, распределение энергии в этих волнах соответствует опыту. Но с нашей точки зрения энергия света находится не в этих волнах, но в тех кольцах, которые их сопровождают, и, чтобы объяснить диффракцию по этой теории, мы должны показать, что энергия колец распределяется тем же путем. Я думаю, что по следующим соображениям мы должны ожидать, что это будет именно так. Кольца замкнуты и потому порождают лишь незначительные электрические или магнитные силы в любом месте вне кольца, так что в таких местах эти силы и потому и направление потока энергии будет таким же, как если бы кольца совершенно



ле было. Мы принимаем, что путь энергии в кольце такой же, как и путь энергии в волне в его непосредственном соседстве.

Проследим теперь обратно от экрана путь той энергии волны, которая достигает светлых полос на экране; возьмем центральную полосу, самую светлую, и проследим назад через щель путь ее энергии; мы найдем, что, прежде чем достичь щели, эта энергия была распределена по некоторой площади  $S_1$ , фронта волны; сделаем то же самое для энергии во второй светлой полосе; мы найдем, что первоначально она была распределена по много меньшей площади. Так как, прежде чем достичь щели, энергия была равномерно распределена по фронту волны, площади эти будут пропорциональны энергии света в различных полосах. Но кванта может находиться в одном или в другом месте, так что вероятность ее нахождения в какой-либо части фронта волны пропорциональна площади этой части. Таким образом вероятность его нахождения внутри площади  $S_1$  относится к вероятности его нахождения внутри  $S_2$  как  $S_1 : S_2$ ; тогда, если кванта была внутри площади  $S_1$ , то, следуя по тому же пути, как и энергия волны в этой площади, она достигнет первого максимума; если в площади  $S_2$  — второго. Таким образом вероятность достижения первого максимума относится к вероятности достижения второго, как  $S_1 : S_2$ ; так что числа квант, которые доходят до этих мест в течение длительного промежутка, будут относиться, как  $S_1 : S_2$ ; и, таким образом, отношение энергии света в этих двух максимумах будет таким же, как данное волнообразной теорией, и поэтому распределение света на экране, если число квант, ударяющих его, достаточно велико, чтобы применить статистические методы, будет таким же, как данное волнообразной теорией. По теории квант это есть статистическое распределение, это не то распределение, которое существует в каждый данный момент, но среднее распределение, которое, однако, представляет из себя все, что наш глаз может различить на фотографической пластинке.

Согласно этому взгляду, волны Максвелла, которые идут впереди кванты, устанавливают для нее путь, как будто бы они были местными токами, отклоняющими кванту на новые пути.

#### ЗАКОН ПЛАНКА.

Если мы предположим, что электрические силовые кольца, которые образуют кванты, все одинаковы по форме, но различны по величине, мы легко можем показать, что энергия в кванте обратно

пропорциональна ее окружности. Так как окружность кванты равна длине световой волны, то энергия кванты обратно пропорциональна длине волны.

Таким образом волны очень малой длины, как X-лучи, имеют очень малые квантовые кольца, более длинные волны, которые составляют видимый свет, кольца большие. Так как длина волны повсюду пропорциональна частоте  $\nu$ ,  $E$  — энергия в кванте равна  $h\nu$ , помноженному на константу. Значение этой константы зависит от отношения наружного радиуса кольца к внутреннему. Величина, которая казалась бы разумной для этого отношения, делает значение этой константы как раз таким, какое требуется законом Планка.<sup>1)</sup> Так как окружность кванты равна длине волны, у кванты будет радиус в  $10^{-8}$  см при длине волны в  $2\pi \times 10^{-8}$ ; энергия в кванте, соответствующая этой длине волны, будет около 2000 вольт. Когда кванта с такой или с меньшей длиной волны проходит сквозь молекулу, для нее оказывается достаточным место внутри молекулы, и вся ее энергия идет на изгнание электрона. Для света видимой части спектра радиус кванты очень велик по сравнению с атомными размерами, так что при столкновении между квантой и молекулой только небольшая часть кванты будет внутри атома, и энергия в этой части может быть совершенно недостаточной, чтобы освободить электрон или произвести аллотропическое видоизменение молекулы, хотя бы энергия во всей кванте и была достаточна для этого. Поэтому мы можем ожидать, что поглощение лучей Рентгена с короткими волнами и поглощение видимого света с длинными волнами может показать различные свойства. Разница обнаруживается очень отчетливо опытами поглощения. Полосы поглощения видимого света часто замечательно яркие. Чрезвычайно малое изменение в длине волн составляет все различие между почти сплошной непрозрачностью и совершенной прозрачностью. У лучей Рентгена мы не получаем ярких полос такого рода. У них поглощение начинается тогда, когда энергия кванты превышает величину, требуемую для изгнания электрона. Но, однако, оно не прекращается внезапно, когда частота возрастает выше этого значения, но затухает постепенно, и поглощение изменяется обратно пропорционально кубу частоты. Явления резонанса плохо заметны в случае лучей Рентгена, между тем как они очень отчетливо выступают в случае

<sup>1)</sup> Точное вычисление в статье Томсона в октябрьской книжке „Philosophical Magazine“ (1924); в декабрьском № (1925 г.) Томсон опубликовал дополнительную работу о строении света; см. также нашу статью.



лучей видимого света. Это есть то, что мы могли бы ожидать, если бы поглощение молекулой зависело от энергии кванты, сконцентрированной в объеме, сравнимом с объемом молекулы. Исследования Лоренца (Logenz), Ламба (Lamb) и покойного Рэля показали, что, когда имеется резонанс между волнами, которые мы называем максвелловского типа, и молекулой, энергия, идущая в молекулу от волн, не такова, как протекающая через площадь фронта волны, равную площади поперечного сечения молекулы, но такая, как протекающая через площадь, равную  $\frac{\lambda^2}{\pi}$  где  $\lambda$  есть длина световой волны. Таким образом, если бы волны Максвелла резонировали с молекулой, энергия в площади  $\frac{\lambda^2}{\pi}$  фронта волны устремилась бы на молекулу и прошла бы сквозь нее. Но площадь кванты, согласно нашему взгляду, пропорциональна  $\lambda^2$ , что, как мы видели, и есть площадь, из которой резонанс дает возможность молекуле черпать энергию. Таким образом, если энергия в кванте идет, как мы предполагаем, по пути энергии в максвелловских волнах, энергия кванты сконцентрирована, чтобы вся влилась в молекулу.

Я уже превысил положенное время для лекции и не должен дольше злоупотреблять вашим терпением, но скажу только, что я старался изложить перед вами теорию, согласно которой свет имеет дуалистическое строение, одна часть которого имеет сходство с предпосылкой волнообразной теории, другая же — сходство с предпосылкой корпускулярной теории. Эти построения имеют своим общим основанием электрические силовые линии.

## РАЗВИТИЕ ВОЗЗРЕНИЙ НА ПРИРОДУ СВЕТА.

### З. ЦЕЙТЛИН.

#### 1. Древность и средние века.

Несмотря на то, что древние сравнительно много занимались вопросами оптики, Аристотель был единственным мыслителем древности, который пытался построить общую теорию световых процессов.

Некоторые исследователи (Ziaia, Wilde) утверждают даже, что Аристотель основоположник волновой теории света. Хотя историк Герлянд справедливо отмечает общую неправильность таких утверждений, все же они содержат в себе некоторую долю истины.

Аристотель, как всегда, исходил из непосредственно эмпирических соображений, которые он связывал с самыми абстрактно метафизическими. В случае звука непосредственно видно, что удар или вдвухание воздуха в трубку вызывает звук, так что Аристотелю нетрудно было дать правильную теорию звука. Но свет получается вследствие какого-то таинственного процесса горения и, кроме того, имеются тела прозрачные и темные. Это привело Аристотеля к мысли, что слова свет, видимость, прозрачность, тьма и непрозрачность соответствуют каким-то особым началам, которые находятся в телах. Аристотель полемизирует (в *Parva naturalia*, отрывках о „чувствах“, о „цветах“) с воззрением Эмпедокла и Платона, утверждающих, что свет исходит из глаз. Ибо глаз — аргументирует Аристотель — это начало водянистое, и, следовательно, не может испускать света.

Свет рассматривается Аристотелем, как активное начало (форма) тел, а тьма, как пассивное (материя). Всякая конкретность является сочетанием пассивного и активного начал; тьма — это потенция света, которая благодаря движению превращается в конкретную прозрачность, видимость. Герлянд справедливо указывает, что Аристотель отличал свет от его передачи. Огонь виден во тьме, потому что свет передается через тьму, сообщая ее прозрачность. Абсолютно прозрачным Аристотель считал „эфир“. Отсюда ясно, в чем зародыш волновой теории в учении Аристотеля. Считая, что свет (конкретный), это — энтелехия (целое осуществление) помощью движения, вызываемого формой, Аристотель рассматривал светящееся тело, как источник такой формы. И если прав Лейбниц, что единственной физической материей Аристотель в действительности считал протяженную материю, а единственной формой — движение в пространстве и времени, то учение Аристотеля в принципе совпадает с учением волновой теории. Тогда потенциальная материя (тьма) Аристотеля, это — современный эфир, свет (форма) — активное пространственное движение, исходящее от тела; это движение образует конкретный свет, — движущиеся в пространстве волны в самом общем смысле слова. Заметим здесь, что Аристотель отрицал абсолютную пустоту, так что в связи с явлением звука мысль Аристотеля легко могла склониться в сторону теории волн.

В середине века были выдающиеся оптики (Альхазен, Рожер, Бэкон, Вителло, Пекгам, Теодорих), но и они как и все почти ученые древности занимались геометрической оптикой,



связанной с нуждами астрономических наблюдений. Такое положение вещей легко объясняется тем, что с практической точки зрения основное как-будто значение имеет геометрическая, а не теоретическая оптика. С другой стороны, явление света, видимо, столь просто, а в действительности столь сложно, что много времени прошло, пока наконец появились факты, толкнувшие научную мысль за пределы простой геометрии световых лучей. Эти факты накопились к началу нового времени.

## 2. Новое время.

Факты эти таковы. Древние и средние века были хорошо знакомы с рефлексией, рефракцией и очень смутно с дисперсией (радуга, алмаз, цвета призматических стекол), но никакого понятия не имели об интерференции, диффракции, поляризации и двойном преломлении, т. е. о фундаментальных оптических явлениях, которые имеют основное значение для построения теории света.<sup>1)</sup> Явление дисперсии было впервые сознательно обнаружено в 1665 году Гримальди, который наблюдал преломление солнечных лучей, пропускаемая их через призму.

Тот же Гримальди открыл и описал диффракцию (1665 г.). Явление интерференции было фактически открыто, хотя научно не осознано тем же Гримальди при наблюдении диффракции. Гримальди (и Дешале) изучали также цвета заштрихованных пластинок. Гук в 1665 году открыл интерференционное явление, известное под названием цветов тонких пластинок.

Двойное преломление было открыто (1669) и описано Эразмом Бартолином в исландском шпате.

Исследуя двойное преломление, Гюйгенс фактически открыл поляризацию света (1680) — явление, которое вполне отчетливо было познано лишь в 1810 году Малюсом.

Наконец, Рэмер и Кассини (около 1676 г.) открыли скорость распространения света. Вышеперечисленные оптические факты толкали научную мысль по пути исследования сущности световых процессов. Первым крупным теоретиком нового времени в этой области необходимо считать Христиана Гюйгенса, выпустившего в 1690 году знаменитый „Трактат о свете“, в котором дока-

<sup>1)</sup> Объясняется это главным образом тем, что древность и средневековье были знакомы почти исключительно с непрозрачным и цветным стеклом.

зывалась волновая природа света. Некоторые историки физики (Погендорф, Геллер, Вильде) считают, что впервые такого рода мысль о природе света была высказана Гримальди. Это утверждение основано на одном месте из книги Гримальди о свете,<sup>1)</sup> где Гримальди сравнивает распространение света с распространением водяных волн.

Историк Герлянд оспаривает приоритет Гримальди. Если это верно, то первым, отчетливо формулировавшим идею о волновой природе света, был Р. Гук.<sup>2)</sup> В своей „Микрографии“ (1665) Гук говорит о том, что свет это — колебательное движение, исходящее из светящегося тела, как из центра, и распространяющееся через окружающую среду сферическими волнами.

В 1672 году Гук выступает в Королевском обществе с докладом<sup>3)</sup> о своей гипотезе света. Гук утверждает, что световые колебания происходят поперек направления распространения, т. е. выдвигает гипотезу первостепенного для теории света значения.

С наибольшей отчетливостью, однако, идея о волновой природе выступает у Гюйгенса. У него мы уже имеем дело не со случайной догадкой, а с вполне определенной теорией. Эту теорию Гюйгенс построил на основании явления двойного преломления в исландском шпате. Исследуя лучи, получающиеся в кристалле исландского шпата, Гюйгенс путем тщательных измерений обнаружил, что лучи эти резко отличаются по своим свойствам. Один из лучей, который Гюйгенс назвал обыкновенным, подчиняется

<sup>1)</sup> *Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride. Bononiae, 1655, стр. 18.*

<sup>2)</sup> Леонорд Эйлер Френель (см., например, мемуар Френеля о свете, изд. ГИЗ'а, 1928 г.) и многие другие исследователи утверждают, что одним из основателей волновой теории света был Декарт. Солидность этого утверждения видна из письма Ньютона к Ольденбургу (26 Дек. 1675 г.), представляющего ответ на инсинуацию Гука, будто бы Ньютон заимствовал волновую гипотезу из микрографии Гука. Ньютон пишет (См. III том „Истории Королевского общества Birch'a“, что „Гук только видоизменил гипотезу Декарта, превратив картезианское давление или поступательное движение медиума в вибрирующее, а вращательное движение частиц (globuli) в необходимость пульсаций“. Удивительно, однако, то, что Декарт считал световую передачу мгновенной (см. его „Du monde, où traité de la lumière“, стр. 313, изд. Кузена, IV том). К такому заключению Декарта привело отсутствие aberrаций света звезд, которая в то время не была еще установлена. Отметим еще Пардиза (1636—1673), прославившегося своей полемикой с Ньютоном. Пардиз, несомненно, был одним из первых ученых, защищавших теорию волн.

<sup>3)</sup> См. *Birch History of Royal Society. Vol III, стр. 9—12.*



обычным законам преломления: падающий и преломленный лучи находятся в одной плоскости, и показатель преломления луча, равный  $\frac{5}{3}$ , не зависит от расположения плоскости падения-преломления в кристалле. Необыкновенный луч в общем случае не остается в плоскости падения и, кроме того, его показатель преломления зависит от направления луча в кристалле. Гюйгенс дал точный закон распространения необыкновенного луча. Этот закон был им выведен при помощи волновой гипотезы света. Здесь перед нами важный пример значения гипотезы в науке. Поггендорф<sup>1)</sup> справедливо говорит, что „совершенно невозможно (ganz unmöglich) вывести закон Гюйгенса из ряда угловых измерений и простого их сравнения“, т. е. путем простой индукции, помощью которой получают часто закономерности. Действительно, для определения хода необыкновенного луча в кристалле шпата необходимо установить, что в то время, как волновые поверхности обыкновенного луча представляют сферы, волновые поверхности необыкновенного луча — эллипсоиды вращения, с осью вращения, параллельной главной оси кристалла, с отношением осей, равным 0,60:0,67. Если отбросить волновую гипотезу, невозможно, конечно, говорить о „волновых поверхностях“. Так называемые философы „чистого описания“ утверждают, что физика должна быть построена „без гипотез“, но мы видим, что Гюйгенс прибег к гипотезе не из какой-то врожденной любви к гипотезам, а из повелительной необходимости как-нибудь разобраться в ряде эмпирических данных. Не сумев построить гипотезы, Гюйгенс не сумел объяснить явления поляризации, которое он фактически наблюдал при помощи двух ромбоэдров исландского шпата. Это важнейшее световое явление так и осталось научно не осознанным, пока, наконец, почти через полтора столетия Малюс и гипотеза поперечности световых колебаний (Араго, Френель) не овладели им. Волновая теория света Гюйгенса столкнулась с авторитетом такого мыслителя, как Ньютон. Ньютона обычно причисляют к сторонникам корпускулярной теории света, согласно которой свет состоит из мельчайших частиц (корпускул), испускаемых светящимся телом и несущихся с большой скоростью. Дж. Дж. Томсон правильно, однако, указывает, что Ньютон не был столь „корпускулярен“, как это обычно изображают, что последователи Ньютона были более „корпускулярны“, нежели сам учитель. Мы покажем, что это действительно так, что, собственно говоря, Ньютон не пришел ни к какой определенной

<sup>1)</sup> Geschichte der Physik, s. 647.

точке зрения и, если уж говорить о теории света Ньютона, то эту теорию необходимо квалифицировать, как синтез волновой и корпускулярной гипотез строения света.

### 3. НЬЮТОНОВА ТЕОРИЯ СВЕТА.

Анализ сочинений Ньютона показывает, что сущность метода Ньютона заключалась в предварительном формальном исследовании явлений. Конечно, такое исследование не может совершенно обойтись без тех или иных гипотез, но Ньютон старался избегать расширенных, всеобъемлющих гипотез, для оправдания которых, согласно его же словам, необходимо всестороннее формальное знание явлений. Вот почему Ньютон отказался от всеобъемлющей гипотезы Декарта о природе тяготения, а, пользуясь законом падения тел Галилея и вытекающей из него гипотезы однородности материи, нашел относительно формальный закон тяготения. Этим был проложен научный путь к построению расширенной гипотезы о природе тяготения. Ньютону приписали, однако, неправильный взгляд, будто бы с установлением закона тяготения проблема тяготения решена, ибо тяготение будто бы, согласно Ньютону, существенное свойство тел. Ньютон в предисловии к изданию „Оптики“ 1717 года отвергает приписываемый ему взгляд на природу тяготения. Ньютон говорит: „Дабы показать, что я не считаю тяготения существенным свойством тел, я добавил один вопрос, касающийся его причины, выбрав для изложения форму вопроса, ибо я не удовлетворен в этом отношении отсутствием опытов“. <sup>1)</sup>

Вот почему „Оптика“ Ньютона начинается словами: „Мое намерение в этой книге — не объяснить свойства света гипотезами, но изложить и доказать их рассуждениями и опытами“; <sup>2)</sup> в конце же „Оптики“ добавлены заключительные вопросы, в которых Ньютон ставит на обсуждение две противоположных гипотезы о строении света, волновую и корпускулярную. Из этого факта очевидно, что Ньютона ни в коем случае нельзя причислить к безусловным представителям корпускулярной теории.

Еще в 1672 году Ньютон прочел в Королевском обществе доклад, <sup>3)</sup> в котором пытался примирить обе точки зрения. Когда Гук выступил 15 февраля 1672 года со своим сообщением о свете,

<sup>1)</sup> И. Ньютон. Оптика, пер. С. И. Вавилова. Гиз. 1927, стр. 9 — 10.

<sup>2)</sup> Там же стр. 13.

<sup>3)</sup> Напечатан в Phil. Transactions, № 80, p. 3075.



Ньютоном написан Гуку через Ольденбурга письмо, в котором выразил одобрение волновой гипотезе света и указал, что он „всегда был такого мнения“. Ньютоном обещал скоро прислать подробный доклад по этому вопросу. Доклад этот, „Теория света и цветов, отчасти содержащая гипотезу для объяснения свойств света и т. д.“ был, однако представлен лишь 9 декабря 1675 года.

В этом докладе мы находим оговорки, смысл которых заключается в том, что прежде, чем говорить о той или иной гипотезе света, необходимо всестороннее формальное знание явлений. В докладе имеется характерная фраза, с полной очевидностью доказывающая, что Ньютон склонялся к синтетической точке зрения: „Я полагаю, что свет является ни эфиром ни его колебательным движением, но чем-то совершенно другого рода, исходящим и распространяющимся из светящихся тел. Те, которые хотят, могут считать свет агрегатом перипатетических качеств. Другие могут предположить, что он представляет собою множество мельчайших и быстро несущихся корпускул различных форм, выскакивающих на больших расстояниях, но через незаметные промежутки времени одна за другой из светящихся тел и непрерывно несущихся вперед благодаря принципу движения, который сначала ускоряет их, до тех пор, пока сопротивление эфирной среды не уравновесит действия этого принципа подобно тому как уравновешивается сила тяжести при падении тела в воде. Бог, который непостижимым для нас образом дал животным силу для произвольных движений, мог без сомнения снабдить тела другими принципами движения, которые мы столь же мало понимаем. Но если кто-либо полагает, что этот принцип может быть только духовной природы, ему легко доказать, что принцип этот механического характера, но я думаю, что лучше не останавливаться на этом. Те же, кто не согласны с этой точкой зрения, могут предположить, что свет это — какая-то другая телесная эманация, или импульс, или движение другой среды или тонкого эфира (aetherial spirit), разлитого по всем телам в эфире или, наконец, все то, что они только могут придумать по этому поводу“.

Такой façon de parler очень част у Ньютона и привел к тому, что различные исследователи приходят к различным заключениям по поводу действительной точки зрения Ньютона на природу света. В то время как Поггендорф, например, полагает, что Ньютон был приверженцем волновой теории, Герлянд поддерживает общераспространенное мнение о Ньюtone, как стороннике

корпускул. Историк Розенберг считает даже, что Ньютон вообще отвергал построение гипотез и являлся, стало-быть, сторонником метода чистого описания. Но сам Розенберг на основании приводимых им данных не особенно настаивает на этом пункте и ограничивается весьма неопределенными pro и contra. Действительно, если утверждения Поггендорфа и Герлянда нуждаются еще в сильных доказательствах, то метод Ньютона, выявленный в основном его труде „Математические начала естественной философии“ с несомненностью доказывает, что утверждение Розенберга неверно. Как мы уже указали выше, метод этот обнаруживает, что Ньютон как в механике, так и в оптике был диалектиком. Из вопросов Ньютоновой „Оптики“ видно, что Ньютон считал аргументы в пользу волновой и корпускулярной теории одинаково сильными и что, стало-быть, верной теорией будет та, которая сумеет синтезировать обе точки зрения, — в этом именно смысл ссылки Ньютона на всемогущество бога. История развития физики блестяще оправдала гениальную проницательность Ньютона. Но это оправдание получилось в результате диалектического процесса. Антитезис воззрений Гюйгенса был заострен последователями Ньютона. Это отрицание господствовало свыше столетия, пока не было снято отрицанием отрицания — волновой теорией Юнга-Френеля. Но Юнг и Френель не дали еще подлинного синтеза, а только развили и углубили первоначальный тезис. Но это углубление, продолженное в трудах Максвелла-Герца, творцов электромагнитной теории света и привело наконец через теорию квант к подлинному синтезу — к корпускулярно-волновой теории света Дж. Дж. Томсона. Мы проследим подробнее этапы этого диалектического процесса развития оптических воззрений.

#### 4. ЛАПЛАС, ЮНГ, ФРЕНЕЛЬ.

Из крупных ученых XVIII века волновую теорию света поддерживал только Эйлер, который значительно усовершенствовал теорию Гюйгенса, введя понятие частоты колебаний и зависимости цвета лучей от этой частоты.

Обычно говорят, что причиной поражения теории волн был громадный авторитет Ньютона. Это, конечно, верно, но с материалистической точки зрения необходимо поставить вопрос об идеологической базе Ньютонова авторитета. История Ньютоновой физики показывает, что с этим авторитетом мало считались, когда



он входил в конфликт с желательной для господствующих классов идеологией. Дело доходило до прямой фальсификации воззрений Ньютона с целью придать этим воззрениям желательный характер. Поэтому господство корпускулярного тезиса поддерживалось не только естественным ходом научного развития, но и силами, чуждыми этому развитию, источник которых в работе идеалистической философии над приспособлением к системе научных теорий. Это хорошо видно из отношения к волновой теории знаменитого Лапласа. Дюгем говорит в „Физической теории“, что Лаплас из эмиссионной теории, „соединенной с аттракционистской космологией, согласной с принципами Босковича, которые великий голландский атомист (Гюйгенс) объявил абсурдом“, извлек оправдание построению Гюйгенса. Эта фраза Дюгема хорошо объясняет одну из причин господства теории корпускул. Дюгем противопоставляет в ней воззрение Лапласа-Босковича атомизму Гюйгенса.

Из истории философии мы знаем, что в то время, как атомизм Ньютона-Гюйгенса был материалистическим, Босковичи, следовательно, Лаплас были атомистами-идеалистами. Боскович именно один из первых выдвинул идею об атомах, как о непротяженных центрах сил, идею, которая послужила основанием Кантовской теории познания.

Что Лаплас сильно склонялся к идеалистической точке зрения, видно из его „Изложения системы мира“, в которой он защищает весьма упорно корпускулярную теорию света. Материалистический атомизм Ньютона-Гюйгенса непосредственно вытекает из признания абсолютности пространства; первым признаком идеализма является отрицание этой абсолютности, релятивизация пространства. Лаплас же говорит: „Вселенная, сузившаяся до размеров, занимаемых атомом, представляла бы наблюдателю ту же самую картину. Простота законов природы позволяет нам наблюдать и познавать только отношения“. Здесь, в сущности говоря, мы имеем прекрасную формулировку основ философии Канта.

Лаплас восстает против „философов древности“, которые, „становясь у источника всего, придумывали общие причины для того, чтобы все объяснить“. Лаплас противопоставляет метод Декарта методу Бэкона, усиленно рекомендуя индукцию последнего и подчеркивая полную бесплодность гипотез. После опубликования „Диалектики природы“ Энгельса не стоит доказывать, что борьба против гипотез и рекламирование пресловутой индукции не что иное, как идеалистическое торможение научного движения.

Нечего также говорить о том, что сам Лаплас в своих научных трудах совершенно пренебрегал собственной гносеологией и наперекор ей сделался автором одной из величайших „неиндуктивных“ гипотез — гипотезы Канта-Лапласа.

Корпускулярное упорство Лапласа удивляет даже Дюгема. „Трудно читать без улыбки, — пишет Дюгем, — те фразы, которые великий математик писал в тот самый момент, когда уже торжествовала оптика Френеля“.

Легко представить себе господствовавшее в официальной науке отношение к теории волн, если такой ум, как Лаплас, говорил об этой теории с „презрительной жалостью“ (*pitié méprisante*).

Вот почему, как это часто бывает, силы прогрессивного научного движения возникли не в официальной научной среде. Медик Юнг (1773 — 1824) и инженер путей сообщения Френель — вот кто были основоположниками волновой оптики в начале XIX столетия. Медик Томас Юнг был слишком учен, чтобы иметь хорошую практику; английская публика, как известно, с большим недоверием относится к слишком ученым врачам, так что один из известнейших докторов Редклиф утверждал даже, что он своей громадной популярностью обязан тому, что прописывал совершенно бессмысленные рецепты. Вот почему, несмотря на то, что Юнг, имея в виду расширение своей практики, тщательно скрывал свое авторство и издавал свои сочинения анонимно, у него оставалось очень много времени для различных посторонних его специальности занятий. Это свободное время Юнг использовывал удивительнейшим образом. Он занимался с одинаковым успехом как философией, математикой, астрономией, физикой, так и египетскими иероглифами, теорией зрения, музыкой, живописью, изучением нравов пауков, железными дорогами, мостовыми арками, трением в осях машин вплоть до искусства плясания на канате и верховой езды, которые он демонстрировал в цирке Франкони при громадном стечении публики.

Дж. Дж. Томсон справедливо сравнивает Юнга с Леонардо-да-Винчи. В историю наук Юнг вошел главным образом, как один из основоположников волновой теории света, как автор учения о цветоощущении Юнга-Гельмгольца и как человек, расшифровавший иероглифы так называемого камня Розетты, открытого в 1799 году инженером Брусаром около Розетты в Египте.

В теории света Юнг должен быть поставлен рядом с Френелем. В сочинении „Lectures on Naturale Philosophy“ (1807) Юнг с полной отчетливостью выдвигает основной принцип волновой тео-



рии — принцип интерференции и обосновывает его своим известным интерференционным опытом. Гипотеза поперечности колебаний была сформулирована Юнгом (в письме к Араго в 1817 г.) лишь после исследований Малюса (1808) над поляризацией через отражение.

Любопытный пример диалектического закона перехода количества в качество представляет тот путь, которым Юнг пришел к открытию интерференции. Юнг, как и Гук, обратил внимание на цвета мыльных пузырей. Ему пришло в голову, что цвета эти обусловлены тонкостью пленки, так что при уменьшении толщины жидкого слоя (количества) появляется удивительное качество окрашивания.

Юнг приложил принцип интерференции также к объяснению дифракционного спектра и изобрел прибор эриометр, в котором дифракционный спектр служил для измерения величины мельчайших тел, как кровяных шариков, волокон шерсти и т. д.

Учению Юнга не удалось, однако, одержать победы над эмиссионной теорией. — Он не владел в достаточной мере математическим анализом, и изложение его было очень темным и малодоступным. Эту победу над господствующей оптической теорией одержал Августин Френель. В высшей степени замечательна история его оптических работ. Френель, как инженер путей сообщения, 9 лет провел в самой дикой французской провинции — в Вандее и Дроне. В 1815 году он, как антибонапартист, был лишен службы и жил в Нионе (Дром) под надзором полиции. Эта именно эпоха и является началом научных работ Френеля. Сначала он занимался аберрацией, гидравликой, технико-химическими вопросами. В середине 1814 года он заинтересовался оптикой, прочтя в Монитере сообщение о докладе Био в Институте на тему о поляризации света. Обширность тогдашних оптических познаний Френеля видна из его письма (28 декабря 1814 г.) к другу, в котором Френель говорит: Я не знаю, что понимают под поляризацией света; попросите моего дядю Мериме прислать мне сочинения, в которых я мог бы изучить этот новый вопрос". Спустя 8 месяцев Френель сделался основоположником современной оптики, представив в академию знаменитый „Мемуар о световой дифракции"; этот мемуар, премированный в 1819 году, давал полное объяснение известному явлению, впервые предсказанному Пуассоном (на основании работы Френеля) и опытно подтвержденному Араго, именно: если узкий пучок света падает на небольшой диск, то вследствие

дифракции в середине тени диска получается столь яркое пятно, как будто диска совершенно не было.

Достойны быть отмеченными те экспериментальные средства, при помощи которых Френель производил свои исследования — куски проволоки с картоном заменяли ему микрометр, простая линза — гелиостат.

Этот случай как и случай Фарадея, Лебедева (знаменитый „лебедевский подвал") и др. доказывает, что великие научные открытия можно делать без роскошно оборудованных лабораторий, которые очень часто скрывают напыщенную и чванливую академическую пустоту. Араго, ознакомившись с работами неизвестного провинциального инженера, к счастью, оказался на высоте понимания интересов науки (что не очень часто случается с ее официальными представителями) и немедленно выхлопотал Френелю отпуск. В 1816 году Френель поставил в Академии знаменитый интерференционный опыт, на который, по словам Араго, многие мужи науки смотрели, как на бред болезненного мозга. К величайшему ошеломлению адептов формальной логики свет, соединившись со светом, породил тьму.

В работах по дифракции и интерференции света Френель не входил еще в подробности касательно структуры света и той среды, в которой свет распространяется. Последним вопросам посвящены две другие группы работ Френеля. После того, как Малюс сделал свое замечательное открытие поляризации через отражение, а Араго дополнил это открытие открытием хроматической поляризации, изученной подробно Био и Брюкстером, у Френеля оказалось достаточно экспериментальных данных для решения основного вопроса о характере световых колебаний. Сначала Френель подобно Юнгу полагал, что световые колебания продольны, но поляризационные явления привели его к несомненному убеждению в поперечности этих колебаний. В самом деле, только гипотеза поперечности колебаний может объяснить тот факт, что прямоугельно поляризованные лучи не интерферируют, — для интерференции лучей необходима (но не всегда достаточна) параллельная поляризация.

Последняя группа работ Френеля представляет то, что называют волновой теорией Френеля. Исходным пунктом этой теории является исследование явлений двойного лучепреломления. Мы указали выше, что это именно явление послужило также отправным пунктом для теории Гюйгенса.



Гюйгенс дал построение хода лучей в кристалле шпата на основе гипотезы волн. Волластон (1802) и Малюс (1810) экспериментально проверили построение Гюйгенса. Френель разработал подробную математическую теорию этого построения на основе волновой гипотезы. Так как в эпоху Френеля еще не существовало теории упругих сред, то френелевское обоснование волновой гипотезы довольно уязвимо, но выведенные им формулы многократно проверявшиеся, блестяще подтверждались опытом. Это доказывает, что гений Френеля давал ему возможность ощупью во тьме все же находить верную дорогу. Такое обстоятельство является довольно обычным в истории наук и имеет ту плохую сторону, что дает некоторые козыри в руки сторонников философски чистого описания. Эти сторонники обычно говорят, указывая на оптику Френеля: вот хороший пример того, как, исходя из совершенно ложных механических представлений (механические представления Френеля об эфире), можно получить хорошие математические инструменты чистого описания. Ответом на такого рода указание может служить только покорнейшая просьба основательно изучить сочинения Френеля и показать, почему именно и каким образом ложные его представления приводят к столь замечательным результатам. До тех пор, пока адепты чистого описания не выполнили этой работы, всякие споры с ними бесполезны.

##### 5. Послефренелевская оптика и электромагнитная теория света Максвелла.

Что бы ни говорили представители формального метода, но факт остается фактом, что оптика инженера Френеля, одержавшая столь блестящие победы на научном фронте, построена на базе механических представлений. 1) Для всякого здравомыслящего и беспристрастного человека очевидно, что это обстоятельство не случайно, что успех оптики Френеля обусловлен именно тем, что свет действительно представляет собою некий механический процесс, сложность которого такова, что до сих пор еще не удалось раскрыть все его детали. Но сущность световой механики мало-помалу выясняется чрезвычайно своеобразным и неожиданным путем. Сначала ученые пытались проникнуть в тайну световых процессов

1) См., например, френелевскую „Théorie mécanique de la double refraction“.

при помощи механической теории упругих сред. В этом направлении работал целый ряд выдающихся исследователей, как Навье (1824), Пуассон (1828), Коши (1830), Франц и Карл Нейманны (1832, 1863), Грин (1838), Мак-Куллох (1837), Ламэ, Буссинеск, Кирхгоф, Рэлей, В. Томсон, Фойгт и другие. Несмотря на то, что усилия этих выдающихся умов сказались во многих отношениях весьма плодотворными, основная проблема построения ясной и последовательной механической теории света не была решена. Можно было думать, что причина этого в несовершенстве теории упругих сред, из которой исходили исследователи. Но имеется одно фундаментальное данное, прямо указывающее, что дело здесь не в теории упругости, а в том, что выбранное направление ошибочно. Это данное — электромагнитная теория света Максвелла. Необыкновенные успехи этой теории показывают, что механика световых процессов не та механика, которую ученые пытались построить на основании теории упругости. Эта механика особого рода, та именно, которая предугадывается электромагнитными процессами.

Один из выдающихся современных ученых Густав Ми в своем курсе „Электричество и магнетизм“ говорит, что электромагнетизм есть „механика пустоты“, т. е. особой среды, совершенно не похожей на те упругие среды, которыми пытались объяснить световые процессы. Получился таким образом парадоксальный результат: ученые, исходя из ньютоновой механики материальной точки в связи с понятием „упругой связи“, стремились построить механику упругого эфира, который должен был объяснить световые явления; оказалось, что необходимо из явления электромагнетизма извлечь особую „механику пустоты“, которая одна только в состоянии дать удовлетворительный ответ на поставленные вопросы. Но что это за электромагнитная механика, которая лежит в основе световых процессов? В корне ли она отлична от механики упругости, и нет ли между этими видами механики каких-либо точек соприкосновения? На этот вопрос очень хорошо отвечает теория света Мак-Куллоха.

Эта теория является обычной теорией упругой среды, и ни о каком электромагнетизме в ней нет даже намека. Несмотря на это полученные Мак-Куллохом уравнения по существу совпадают с уравнениями электромагнитной теории света Максвелла. Этот факт с полной очевидностью доказывает, что электромагнитная механика и механика упругости заключают в себе нечто общее, и что,



следовательно, причина неудачи механики упругости в объяснении света заключается в неучете какого-то специфического фактора, лежащего в основе световых и, очевидно, электромагнитных процессов. Чем является этот фактор, можно узнать из сравнения теории Мак-Куллоха с другими родственными ей теориями. Это сравнение показывает, что существенная особенность теории Мак-Куллоха в наличии понятия вихревого движения — теория Мак-Куллоха это, по выражению Вангерина,<sup>1)</sup> — „вихревая теория эфира“.

Вихревая механика является действительным ключом к явлениям электромагнетизма и света. Что это так, хорошо видно из истории уравнений Максвелла, самый внешний вид которых (символ curl-rot) прямо указывает на вихревое движение. Мы не будем здесь излагать истории этих уравнений, ограничившись ссылкой на Энгельса (Электричество, стр. 297) который пишет: „Теория Максвелла, Ганкеля, Реньяра, примыкая к новейшим исследованиям о вихревом движении, видит в нем (электричестве) каждая по своему тоже вихревое движение. И таким образом вихри старого Декарта снова находят почетное место в новых областях знания“.

Подчеркнем здесь, что подобного рода утверждение мы не найдем ни в одном современном изложении теории Максвелла. Идеалистические катехизаторы науки выбиваются из сил, чтобы затушевать и скрыть то основное, что обусловило успех учения Максвелла и что дает возможность объединить классическую механику и электромагнетизм в единое учение о движении материи. Единство физической картины мира на материалистической основе — вот против чего ведется ожесточенная борьба.

### 6. Теория квант Планка.

Не останавливаясь на таких важных для оптической теории достижениях, как экспериментальное доказательство Физо уменьшения скорости света при его переходе в водяную среду (согласно классической эмиссионной теории, скорость должна увеличиваться), как открытие Герцем длинных электромагнитных волн и др., мы перейдем к знаменитой теории квант. После блестящего периода развития френелевского

<sup>1)</sup> См. Encyclopädie d. Mat. Wiss. B. V, 21. Статья A. Wangerin'a. Вывод электромагнитных уравнений Максвелла из уравнений теории Мак-Куллоха см. в статье E. Hellinger'a. T. IV<sub>30</sub> Энциклопедии, стр. 676 — 680.

антитезиса наступил кризис. Кризис этот был обусловлен тем, что волновая теория, превосходно объясняя подавляющее большинство оптических явлений, становилась втупик перед некоторыми твердо установленными экспериментальными фактами. Соответствующие примеры приведены в Томсоновой „Структуре света“. Не будем повторять их, а остановимся на рассмотрении того пути, который привел Планка к его гипотезе квант. После того как Меллони, желая показать различие световых и тепловых лучей, доказал их единство, физики занялись вопросами о зависимости теплового лучеиспускания от рода лучей (длины волны) и температуры. Кирхгоф нашел, что существует определенная зависимость между калорическим лучеиспусканием и калорическим поглощением. Эта зависимость указывается законом Кирхгофа: отношение калорического лучеиспускания к калорическому поглощению есть функция, зависящая только от длины волны и температуры, но не от вещества тел, а потому называемая мировой функцией. Из закона Кирхгофа непосредственно вытекает, что существуют тела, испускательная способность которых максимальна. В самом деле, если отношение испускания к поглощению есть определенная при данных длине волны и температуре величина, то эта величина будет максимальной в тех случаях, когда поглощательная способность максимальна, ибо калорическое испускание равно произведению калорического поглощения на мировую функцию. Тела, поглощательная способность которых максимальна, т. е. такие, которые поглощают все падающие на них лучи, называются абсолютно черными. Такими телами являются, например, толстый слой сажи или платиновая чернь; но не следует, вообще говоря, представлять себе абсолютно черное тело непременно темным — в известных условиях оно может быть столь же светлым, как добела накалившийся металл.<sup>1)</sup>

Планк занимался именно изучением калорического лучеиспускания абсолютно-черного тела с целью определения вышеуказанной мировой функции, обозначаемой обычно через  $E(\lambda T)$ .

Теоретическим абсолютно черным телом было для Планка полое пространство, окруженное со всех сторон зеркальными стенками, внутри которого находилось известное число осцилляторов Герца, т. е. механизмов (так называемых диполей, состоящих из положительного

<sup>1)</sup> Например, электрически накаляемый платиновый цилиндр, заключенный в цилиндр огнеупорного материала, — абсолютно черное тело Луммера и Прингсгейма.



и отрицательных электрических полюсов), которые, согласно Герцу, своими колебаниями вызывают световые волны в эфире; — лучи, выходящие из маленького отверстия в сосуде с внутренними зеркальными стенками, изолированными от внешнего лучеиспускания и поддерживаемыми при определенной температуре, образуют поток, тождественный с испусканием абсолютно черного тела при той же температуре.<sup>1)</sup>

Функция  $E(\lambda T)$ , которую стремился найти Планк, представляет собою энергию черного лучеиспускания, отнесенную к единице поверхности и времени, зависящую от длины волны и температуры.

Но черное лучеиспускание не есть лучеиспускание однородное, т. е. абсолютно черные тела испускают сложные лучи, которые можно известными способами разложить в непрерывный спектр, так что задача, которую решал Планк, это — задача о распределении энергии в спектре черного лучеиспускания. Каково распределение энергии по определенным участкам этого спектра в зависимости от температуры — вот задача, решение которой и дает ответ на вопрос о форме функции  $E(\lambda T)$ .

С первого взгляда казалось, что решение этой задачи не представляет каких-либо особых принципиальных трудностей, так как статистическая механика, блестящим образом приложенная в области кинетической теории газов, давным давно выработала метод решения подобного рода вопросов. Но тут именно и возникло затруднение. Так называемый закон распределения энергии статистической механики, многократно проверенный на опыте, приводит к выводу, что энергия в спектре должна возрастать в сторону более коротких волн, т. е. к ультра-фиолетовому концу, непосредственное же измерение показывает, что энергия сначала достигает максимума, а затем уменьшается.

Чтобы выйти из этого затруднения Планк и предложил гипотезу квант, согласно которой энергия лучей пропорциональна частоте, математически

$$E = h \cdot \nu$$

где  $\nu$  — частота,  $h$  — универсальная постоянная, так называемая постоянная Планка.

<sup>1)</sup> Идея построения такого абсолютно черного тела была высказана еще Кирхгофом; практически такое тело было впервые построено Христиансенем и Больцманом (1884 г.), подробным же его изучением впервые занялись Луммер и Вин (1895 г.).

Чтобы понять, каким образом гипотеза Планка разрешает указанное противоречие, необходимо объяснить, почему энергия в спектре увеличивается в сторону коротких волн. Прибегнем для этого к следующему сравнению: при измерении длины, скажем, человеческого роста, вероятность сделать ошибку в километр равна нулю, но ошибка в сантиметр встречается нередко; еще чаще будут ошибки в миллиметр и т. д. Это обстоятельство было формулировано Гауссом в его первом постулате для исчисления ошибок измерений: чем меньше ошибка, тем она чаще встречается. Точно так же, если тело испускает волны всевозможной длины, то чем меньше длина волны, тем больше вероятность ее образования, так что наибольшее число образовавшихся волн будут волнами малой длины. Но если, как это вытекает из закона Планка, для получения волны малой длины (большой частоты) необходимо больше энергии, то это обстоятельство может противодействовать вышеуказанному статистическому закону, в результате чего очень короткие волны будут встречаться уже реже.

Опыт действительно подтверждает это заключение: в инфракрасной части спектра статистический закон распределения приложим без гипотезы Планка, но по мере продвижения к ультрафиолетовому концу поправка Планка получает все большее значение и, наконец, пройдя через максимум, мы достигаем области, в которой энергия уменьшается вместо того, чтобы увеличиваться, т. е. области, в которой с полной отчетливостью выявляется значение гипотезы квант и нарушается обычный закон распределения.

Гипотеза квант, выдвинутая при изучении частного вопроса физики, получила в дальнейшем всеобъемлющее значение. Постепенно она начала захватывать все большие и большие области физики, проникла и распространилась в химии, достигнув в теории строения атома Бора максимального успеха. Но, продвигаясь абсолютно вперед, гипотеза эта воздвигала на своем пути горы противоречий, неясного и непонятного, ибо ученые, превосходно занимаясь „квантованием“, по выражению одного физика, сами не знали, что они собственно делают. Что представляет собой по существу квант энергии и как примирить квантовый характер энергии с тем непрерывным распределением, на котором базировалась классическая физика и, в частности, учение о свете, — на этот вопрос до самого последнего времени не было ответа. Его, по правде говоря, никто почти не пытался получить, так как теория квант была очень удобным предлогом для возрождения формализма и идеализма в науке.



Такое положение однако противоречит сущности научного познания, и в конце концов после временных формальных успехов приводит к научному застою, так что в последнее время наметилось в лице Дж. Дж. Томсона здоровое течение, которое пытается дать физическую интерпретацию теории квант и этим путем разрешить противоречие между новой теорией и вековыми достижениями человеческой мысли.

Диалектический материализм учит, что истина одновременно абсолютна и относительна. В каждый данный исторический период человеческая мысль восходит на определенную абсолютную ступень истины для того, чтобы в дальнейшем подняться на следующую ступень. С этой точки зрения несомненным является то, что как старая оптика — Френеля, так и новая теория Максвелла представляют собою определенные ступени истины. Развитие науки может водоизменить и дополнить ту истину, которую наша мысль обрела в этих теориях, но не может полностью отказаться от нее, объявив эту мысль ложью. Мы указали выше, в чем заключалось то существенное дополнение, которую принесла с собою электромагнитная теория света. Вихревое движение эфира, которое совершенно не учитывалось в старых теориях, выступило на первый план, как специфическая особенность электромагнитных процессов. Но последователи Максвелла вместо того, чтобы обратить внимание на эту физическую основу максвелловой теории восприняли, как это и следовало ожидать, лишь формальную сторону его учения. И понятно, что математическая форма, скрывающаяся в своей оболочке определенное физическое содержание, должна в конце концов привести к кризису, если не учитывается это содержание. Таким кризисом было появление теории квант, которая основана на понятии прерывности, в то время как формально трактуемое учение Максвелла базируется на непрерывности. Но если взять учение Декарта о вихрях в непрерывной среде, развитое в новое время Гельмгольцем, из которого исходил Максвелл, то легко видеть, что это именно учение дает искомый синтез прерывности и непрерывности. В самом деле вихри в непрерывной среде одновременно прерывны и непрерывны — прерывны, как центры, интенсивного движения, непрерывны, как образования в непрерывной среде. И действительно, руководясь представлениями вихревой теории, Дж. Дж. Томсон дал опыт синтеза волновой и квантовой концепций света.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Кроме томсоновской мы имеем еще ряд попыток, в большинстве случаев формального характера, перебросить мост между двумя теориями.

## 7. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА МАКСВЕЛЛА В ИСТОЛКОВАНИИ ДЖ. ДЖ. ТОМСОНА.

Чтобы понять, что такое световая кванта, необходимо уяснить себе, какое физическое содержание скрывается за оболочкой математических уравнений электромагнитной теории света Максвелла-Герца. Это физическое содержание дается тем основным представлением, которое послужило исходной точкой исследований. Максвелла, именно — представлением Фарадея о силовых линиях электромагнитного поля. Исходя из понятия фарадеевских силовых линий, Дж. Дж. Томсон уже много лет разрабатывает физическую картину электромагнитных колебаний.<sup>1)</sup> Несмотря на высокий ученый авторитет Томсона, его идеи по этому вопросу обычно замалчиваются, и во всех руководствах, ученых и популярных работах по физике неизменно повторяется о „таинственной“ природе электромагнитных волн, а силовые линии Фарадея истолковываются не как физические образования (как их толкует Томсон и толковали Фарадей и Максвелл), а как символическое изображение таинственных сил электромагнитного поля. Между тем физическое понимание силовых линий сразу же бросает яркий свет на основные вопросы электродинамики, теории квант и даже теории относительности.<sup>2)</sup>

Вот почему мы за исходный пункт нашего исследования берем томсоновское изображение электромагнитных процессов, образующих световые волны. Напомним еще раз сущность томсоновской теории.

Пусть у нас имеется шар, заряженный электричеством.

От этого шара во все стороны радиально исходят силовые линии. Согласно основному постулату Фарадея — Максвелла, каждая силовая линия имеет начало и конец. Началом и концом является то, что мы называем положительным и отрицательным зарядом электричества. Если исходить из атомистического пред-

См. дополнительный том „Физики“ Хвольсона, ч. II, гл. 10, § 4 и сл., а также 1) M. Born. Vorlesungen über Atommechanik, 2) M. Born. Problème d. Atomdynamik, 3) Основания новой квантовой механики, Гиз. 1927 г.

<sup>1)</sup> См. „Recent researches in Electricity and Magnetismus“ (1893) и „Electricity and Matter“ (1903).

<sup>2)</sup> А. К. Тимирязев справедливо отметил, что знаменитое сокращение электрона было задолго до теории относительности выведено Томсоном на основании физического понимания силовых линий.



ставления об электрическом заряде и представить себе, что на поверхности шара находится конечное число электронов, то такое же число силовых линий <sup>1)</sup> будет исходить из поверхности шара и оканчиваться на соответствующем количестве ионов (положительных электронов) окружающих тел. Согласно воззрению Фарадея—Максвелла—Томсона, фарадеевская силовая линия или трубка, это — реальное физическое образование, т. е. некоторое особое состояние эфира. Нет необходимости пока делать какие-либо предположения о природе этого состояния. Достаточно только указать на основные свойства силовой линии. Эти свойства напоминают свойства обычного материального упругого тела, т. е. силовая линия 1) состоит из особого рода материи — эфира, обладает свойством, присущим всякой вообще материи, — инерцией, 2) обладает упругим напряжением подобно растянутой пружине или резиновой нити. Необходимо, однако, подчеркнуть одну важнейшую существенную особенность. Если, скажем, два тела соединить резиновыми нитями, то при натяжении нити, в своем естественном, так сказать, состоянии, обязательно будут прямыми линиями. Силовые же линии Фарадея образуют обычно криволинейные пути.

Без сомнения, искривленность фарадеевских линий объясняется тем, что силовые линии, представляя собою движение (вихревое) эфира, взаимно отталкиваются (закон взаимоотталкивания был установлен Фарадеем и Максвеллом, — так называемое поперечное давление). Как доказывает Томсон, инерция силовых линий (трубок) обусловлена не только массой самой линии (трубки), но и массой увлекаемого при движении эфира.

Представим себе теперь, что наш заряженный шар движется прямолинейно и равномерно. Так как силовые линии проходят в эфирной среде, то при движении они будут взаимодействовать с эфиром. Это взаимодействие двоякого рода: 1) силовые линии расположатся уж не радиально, а главным образом поперечно; последний эффект заметен только при очень больших скоростях, приближающихся к скорости света, и объясняет знаменитое „сокращение электрона“ и увеличение массы со скоростью, 2) появятся силовые линии магнитного поля, которые располагаются кругами, центры которых находятся на линии движения; это явление хорошо обнаруживается при помощи общезвестного опыта с железными опилками вокруг тока, текущего по проводу.

<sup>1)</sup> Точнее, силовых трубок.

Пусть, однако, наш шар движется не равномерно, а ускоренно, будучи приведен в движение внезапно.

Так как силовые линии — материальные образования и подчинены, как сказано, закону инерции, то произойдет следующее явление: в то время как, ближайшая к шару часть силовых линий уже движется, более отдаленные будут по инерции продолжать оставаться в покое. И лишь постепенно движение передается вдоль всей силовой линии: получается волна. Обратное произойдет в случае внезапной остановки шара: отдельные части силовых линий будут останавливаться постепенно. Если, теперь, колебать шар взад и вперед, то вдоль силовых линий побегут волны, подобно тому, как они бегут вдоль длинной веревки или резиновой трубки при колебательном движении конца.

Так как при всяком движении электрической силовой линии образуются определенным образом расположенные магнитные силовые линии, то получаемое волновое движение будет электромагнитным.

Таким образом, при ускоренном движении заряженных тел получаются электромагнитные волны вдоль силовых линий, исходящих из этих тел.

Согласно Томсону, обычная материя состоит из положительно (ионов) и отрицательно (электронов, корпускул) заряженных частиц. Эти частицы связаны между собою электрическими силовыми линиями, проходящими по эфиру, наполняющему все мировое пространство, так что „тело“ природы имеет „волокнистое“ строение: волокна электрических силовых линий соединяют между собою все предметы природы.

Нетрудно уразуметь, что теория Томсона — это квантовая теория по существу.

Действительно, фарадеевская силовая линия (трубка), понимаемая не как математический символ, а физическое образование, занимает определенное место в пространстве и, следовательно, отделена от соседних. Теория электронов, как электрических атомов, вполне укрепляет это понимание силовой линии (трубки). Если, значит, энергия электромагнитного колебания покидает испускающий источник, то она, двигаясь вдоль силовой линии (трубки), всегда находится в определенном месте и если поглощается, то поглощается целиком.

Но теория Томсона не только теория квантовая, т. е. теория прерывности, но вместе с тем и теория эфира, т. е. непрерывности



ибо силовые линии существуют только как физические образования в эфире. Милликэн говорит поэтому (стр. 176): „Хотя это представление, которое мы можем назвать теорией волокнистого эфира, сходно с корпускулярной теорией (теорией истечения. З. Ц.) в том, что энергия, покинувшая испускающее тело, остается в определенном месте пространства и, если поглощается, то поглощается как целое, по существу оно есть эфирная теория“.

#### 8. Гипотеза Эйнштейна, дополняющая теорию излучения Томсона.

Квантовый характер теории излучения Томсона в связи с работами Планка по излучению черного тела, привел Эйнштейна (в 1905 г.) к мысли дополнить учение Томсона следующей гипотезой: данный источник световых волн может испускать или поглощать энергию квантами, каждая из которых равна  $h\nu$ , где  $\nu$  собственная частота колебаний источника, а  $h$ , вышеупомянутая универсальная постоянная Планка.

На основании этой гипотезы Эйнштейн вывел известную формулу, рисующую процесс выделения электронов под действием света:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - p;$$

здесь  $m$  — масса вылетающего электрона,  $v$  — скорость, с которой он вылетает из атома, следовательно,  $\frac{1}{2}mv^2$  — энергия вылетающего электрона,  $h\nu$  — кванта энергии, поглощенная при действии света,  $p$  — работа, необходимая для вырывания электрона из металла, на который падает свет.

Смысл формулы Эйнштейна таков: энергия вылетающего электрона представляет собою разность между квантой поглощенной энергии и работой, преодолевающей действие электрических сил, удерживающих электрон в его обычном положении, т. е. кванта поглощенной энергии распадается на две части: первая часть идет на сообщение электрону определенной скорости, вторая на преодоление сопротивления электрических сил.

Экспериментальная проверка формулы Эйнштейна дала блестящее ее подтверждение. Милликэн говорит: „Десять лет работы (в Райсмеровской лаборатории и в других местах) над выбрасыванием электронов при помощи света показали, что уравнение Эйнштейна, повидимому, с точностью описывает наблюдаемые

явления“. „Если это уравнение справедливо вообще, то его, несомненно, нужно рассматривать, как одно из самых основных уравнений физики и при том такое, которому суждено сыграть в будущем едва ли не менее значительную роль, чем та, какую уравнения Максвелла сыграли в прошлом, потому что оно должно управлять переходом всей электромагнитной энергии коротких волн в энергию тепловую“.

#### 9. Критика теории Томсона — Эйнштейна.

Теория Томсона — Эйнштейна представляет собою первое доказательство того, что теория квант непосредственно вытекает из электродинамики Максвелла. Действительно, теория эта, как и теория Максвелла является только развитием основного фарадеевского представления о силовых линиях электромагнитного поля и физической интерпретацией уравнений Максвелла-Герца.

Кроме того, теория эта — теория истинно диалектическая, так как объединяет прерывность с непрерывностью в наглядной, простой и отчетливой материалистической форме.

Этих двух обстоятельств вполне достаточно, чтобы теорию игнорировали.

Милликэн пишет: „Несмотря на то, что представленные доводы в пользу уравнения Эйнштейна, мы встречаемся здесь с необычным положением. В самом деле оказалось, что полукорпускулярная теория, из которой Эйнштейн получил свое уравнение, повидимому, совершенно неприемлема, и действительно, она оставлена почти всеми; впрочем, сэр Дж. Дж. Томсон и немногие другие, кажется, до сих пор держатся той или иной формы теории волокнистого эфира“. Всякий, несколько знакомый с историей физики, будет удивлен указываемым Милликэном обстоятельством.

Когда Фарадей подтвердил свои гениальные физические идеи гениальнейшими открытиями в области электромагнетизма, он этим не завоевал своим идеям минимального, даже, признания. Формалисты школы Ампера-Вебера, подобно современным формалистам из школы Маха-Авенариуса, с тайным, а иногда и с явным презрением смотрели на „грубые материальные“ силовые линии и трубки, порожденные плебейской фантазией переплетчика и лабораторного сторожа Фарадея. И даже тогда, когда Максвелл облек плебейски обнаженное тело фарадеевских представлений



в аристократические математические одежды, когда уравнения Максвелла победили на всех фронтах вплоть до предсказания за несколько десятков лет существования электромагнитных волн и давления света, даже тогда фарадеевское учение по мере возможности игнорируется: силовые линии, это — математические линии, а уравнения Максвелла написаны при помощи удара большого пальца (Пуанкаре) чуть ли не самим господом богом (Больцманн).

Перейдем, однако, к критическим возражениям против теории Томсона-Эйнштейна.

Первое возражение в том, „что никто никогда не был в состоянии показать, что такая теория может предсказать какое-либо из явлений интерференции“ (Милликэн).

Второе возражение заключается в некоем положительном доказательстве того, что эфир не имеет волокнистого строения. Это доказательство приводится у Милликэна: „Если статическое электрическое поле обладает волокнистым строением, как это постулируется любой формой теории волокнистого эфира, так как каждая единица положительного электричества есть начало, а каждая единица отрицательного электричества есть конец фарадеевской трубки“ (Дж. Дж. Томсон), то, следовательно, сила, действующая на единичный электрон между пластинками воздушного конденсатора, не может изменяться непрерывно с разностью потенциалов между пластинками. В опытах же с масляными каплями, мы на самом деле изучаем поведение в таком электрическом поле единичного, изолированного электрона, и мы находим в очень широких пределах точную пропорциональность между силой поля и силой, действующей на электрон; последняя сила изменяется скоростью передвижения в воздухе масляной капли, на которой он сидит. Если мы будем поддерживать поле постоянным и изменять заряд капли, то зернистое строение электричества доказывается прерывными изменениями скорости. Если же мы оставим заряд постоянным и будем изменять поле, то отсутствие прерывных изменений скорости опровергает представление о волокнистом строении поля, если только исключить предположение, что на электроде оканчивается громадное число таких волокон. Однако такая гипотеза лишает теорию волокнистого эфира всякого значения“.

Третье, наконец, возражение состоит в том, что „довольно трудно представить себе вселенную в виде бесконечной паутины, нити которой никогда не спутываются и не рвутся, как бы быстро ни летали электрические заряды, к которым они привязаны“ (Милликэн).

Чтобы покончить с первым из возражений, достаточно привести слова самого Милликэна:

„Никто еще не показал, что предположение Томсона можно примирить с явлениями интерференции, хотя, насколько я знаю, точно также до сих пор не была вполне доказана и их несовместимость“.

Природа, как известно, не боится трудностей математического анализа и то, что не удастся сегодня, удастся завтра или после завтра. Дж. Томсон в своих последних работах уже дал набросок теории интерференции и других явлений на основании квантовых представлений. Уайттекер и Кастерин математически углубили основные идеи Томсона. Более того: Планк, автор формальной теории квант, определенно ведь говорит („Природа света“), что „темное пятно“ этой теории в том, что она затрудняется объяснить явления интерференции без нарушения закона сохранения энергии. Так что в этом пункте теория квант Планка не имеет никакого преимущества перед теорией Томсона-Эйнштейна.

Сущность второго возражения Милликэна в следующем: легко подсчитать,<sup>1)</sup> что заряд милликэновского конденсатора равен около 1200 кулонов, т. е.  $3,6 \cdot 10^{12}$  электростатических единиц, в то время, как, по опытам Милликэна, заряд электрона равен  $4,7 \cdot 10^{-10}$  электростатическим единицам, т. е. заряд конденсатора почти в  $10^{22}$  раз больше заряда масляной капли, если предположить, что на ней один электрон. Сделаем теперь следующее поясняющее сравнение: масса земли  $5,9 \cdot 10^{24}$  килограмма, т. е. находится в том же приблизительно отношении к килограмму, в каком заряд конденсатора находится к заряду электрона. Нетрудно, прибавив к килограмму еще один килограмм, обнаружить прерывность, но обнаруживать прерывность „килограмма“ прибавлением его к массе в  $5,9 \cdot 10^{24}$  килограмма, — это пока находится за пределами наших технических средств. Но дело именно в том, что Милликэн, признавая возможным объяснить неудачу опыта предположением о большом числе волокон, оканчивающихся на электроде, утверждает, что такое предположение лишает „теорию волокнистого эфира всякого значения“.

<sup>1)</sup> Подсчет этот таков: емкость плоского конденсатора в 1 кв. м поверхности и 10 см промежутка, равна, приблизительно, 1 микрофараду. У Милликэна диаметр латунных пластинок 22 см (380 кв. см поверхности), расстояние — 1,6 см, отсюда легко найти емкость милликэновского конденсатора — приблизительно 0,24 микрофарада. Напряжение в опытах Милликэна 5000 вольт, отсюда заряд  $0,24 \times 5000 = 1200$  кулон.



Согласно Милликэну, „электрон“ не является тем, что обычно называют этим именем. Электрон Милликэна, это — электрон Стонея, т. е. определенный минимальный электрический заряд „без всякого указания на массу или инерцию, которая может быть с ним связана“. Но если электрон понимать в смысле Лоренца, т. е. разуметь под ним массу, равную, приблизительно,  $\frac{1}{1800}$  массы водородного атома с зарядом в  $4,77 \cdot 10^{-10}$  электростат. единиц (тот электрон, который обнаруживается опытом в атоме водорода), то на поверхности в 380 кв. см милликэновского конденсатора сосредоточено около  $10^{22}$  силовых линий, если даже предположить, что из каждого электрона исходит по одной линии, что фактически и принципиально (диалектически) неверно, так как реальный электрон не является „границей“ силовой нити, а определенным, хотя и чрезвычайно малым, телом.

По Милликэну, однако, заряд величиной в электрон реален, но волокна теории Томсона толкуются не как некоторые „тончайшие“ нити, соответствующие хотя бы „электрону“ в атоме водорода, т. е. заряду в  $4,7 \cdot 10^{-10}$  единиц ( $\frac{1}{1800}$  массы атома водорода), а по буквальному смыслу формулы: каждой единице положительного и отрицательного электричества соответствует одно волокно. И так как эти единицы формально произвольны, то, повидимому, волокна в толковании Милликэна, это — „толстейшие“ шнуры.

Ясно, что Милликэн должен считать свой опыт опровержением волокнистого строения эфира. Но сам Милликэн признает, что предположение о громадном числе волокон в эфире объясняет неудачу опыта.

Мы увидим в дальнейшем, что такого рода предположение и дает, именно, возможность получить синтез волнового и квантового представлений, так что то, что, согласно Милликэну, является недостатком теории, в действительности есть ее достоинство.

Последнее возражение Милликэна, не имеет большого значения. Нам не только „трудно себе представить“ волокнистый эфир, но даже простой многоугольник с достаточным числом сторон. Строение любого развитого „организма“ не менее „волокнисто“ нежели волокнистое строение эфира. Мы увидим, однако, в дальнейшем, что мировой эфир не столь запутанен волокнами, как это вытекает из учения Томсона, и, следовательно, последнее возражение отчасти отпадает само собой.

Опровергая возражения против теории Томсона, мы отнюдь

не хотим утверждать, что теория эта нас вполне удовлетворяет. Некоторые особенности теории всегда заставляли нас сомневаться в ее абсолютной истинности.

Первый аргумент против теории Томсона заключается в следующем: мы знаем, что луч света это — синоним прямолинейности. Отсюда вытекает, что силовые линии, вдоль которых распространяются, согласно Томсону, световые колебания, должны быть прямолинейными, а это уже действительно очень трудно допустить, принимая во внимание бесконечное разнообразие форм тел природы. В нашем опыте прямолинейные силовые линии получаются только в глубине между пластинами плоского конденсатора, всякая другая форма заряженных тел дает искривление силовой линии. С другой стороны, опыт показывает, что форма окружающих тел совершенно не влияет на прямолинейность лучей света. Правда, в последнее время, установлено искривление луча при прохождении около солнца, но это искривление объясняется громадной массой светила, а не его формой.

Решающее, однако, значение имели для нас два обстоятельства, а именно: 1) несоответствие учения Томсона той картине электромагнитного излучения, которую дает Г. Герц, 2) теория Бора.

#### 10. КАРТИНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО Г. ГЕРЦУ.

Изучая теорию вибратора Герца, мы были поражены одним обстоятельством, именно той картиной излучения, которую дает вибратор Герца, рассматриваемый с точки зрения формул теории Максвелла. Вот 4 рисунка из статьи Герца: „Силы электрических колебаний с точки зрения теории Максвелла“.

Рисунки показывают, что при колебании электричества в вибраторе от последнего отшнуровываются замкнутые электрические силовые линии, образующие в совокупности своеобразные кольцевые тела, окружающие вибратор и перпендикулярные к нему. Эти кольцевые тела связаны с вибратором при помощи колец магнитных силовых линий, проходящих внутри электрических тел.

Рис. 27 представляет начало нового колебания, момент, когда электрический ток, достигая наибольшей скорости, проходит через положение равновесия. Рис. 28, 29, 30 изображают положение силовых линий в момент времени  $\frac{1}{8} T$ ,  $\frac{1}{4} T$ , и  $\frac{3}{8} T$ . Мы видим, как силовые линии сближаются концами, раздуваются и отталкивают прежде об-



разовавшиеся; в момент  $T$  (рис. 27) они совершенно отрываются от вибратора.<sup>1)</sup>

Очень легко объяснить причину этого отшнуровывания замкнутых силовых линий. Мы знаем, действительно, что излучение происходит только при очень быстрых колебаниях, получаемых при помощи искрового, например, разряда. Какова, собственно говоря,

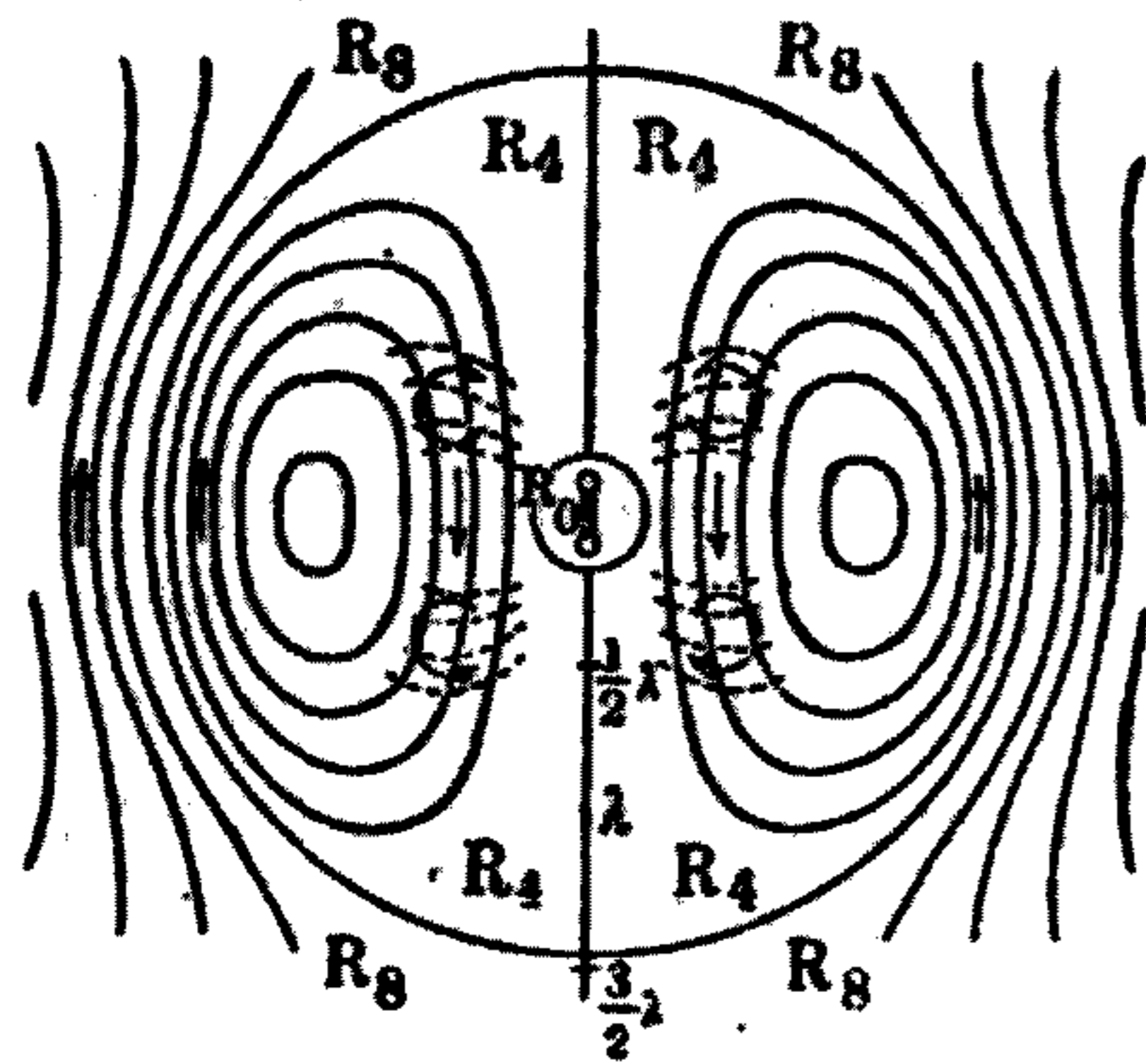


Рис. 27.

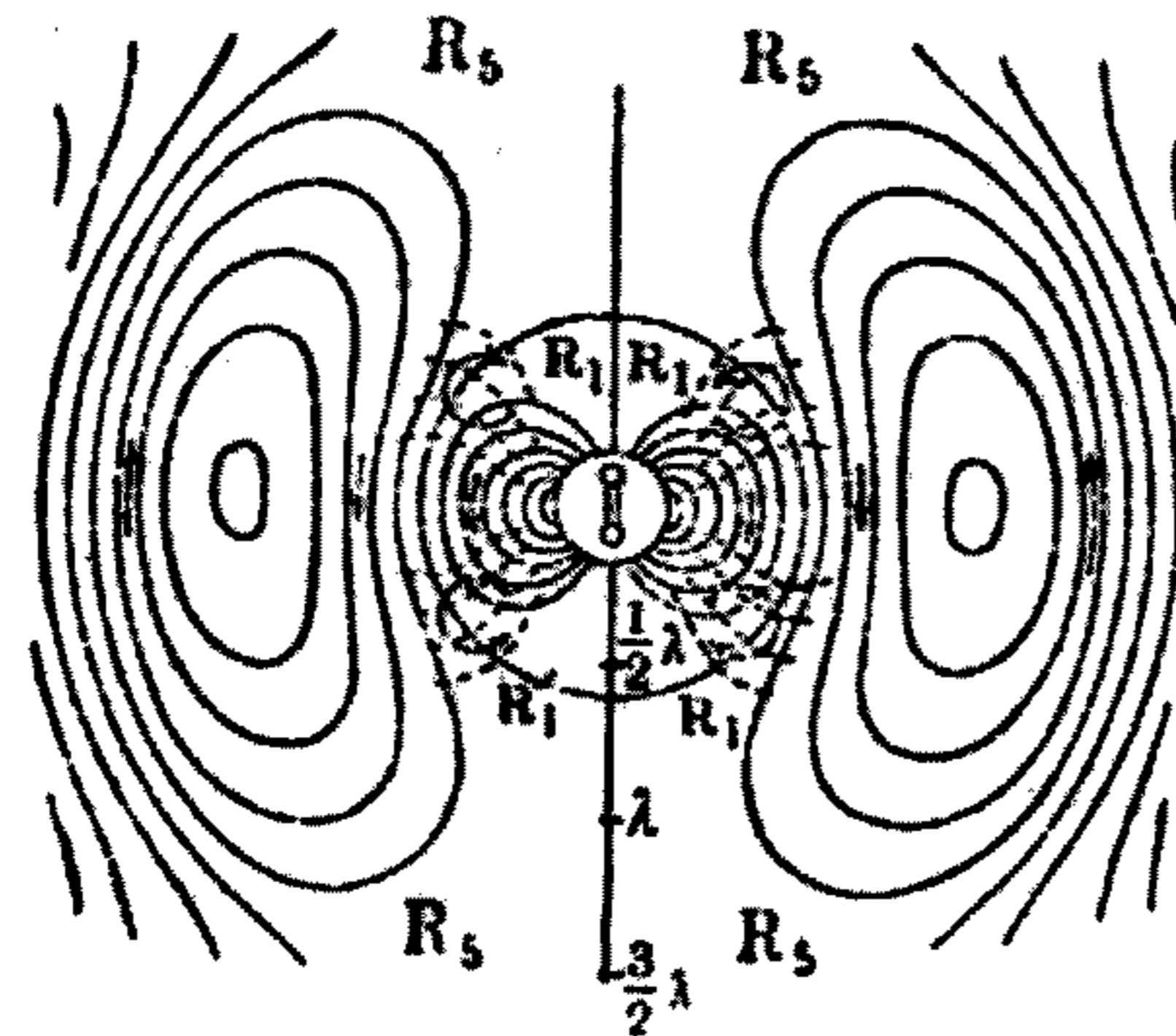


Рис. 28.

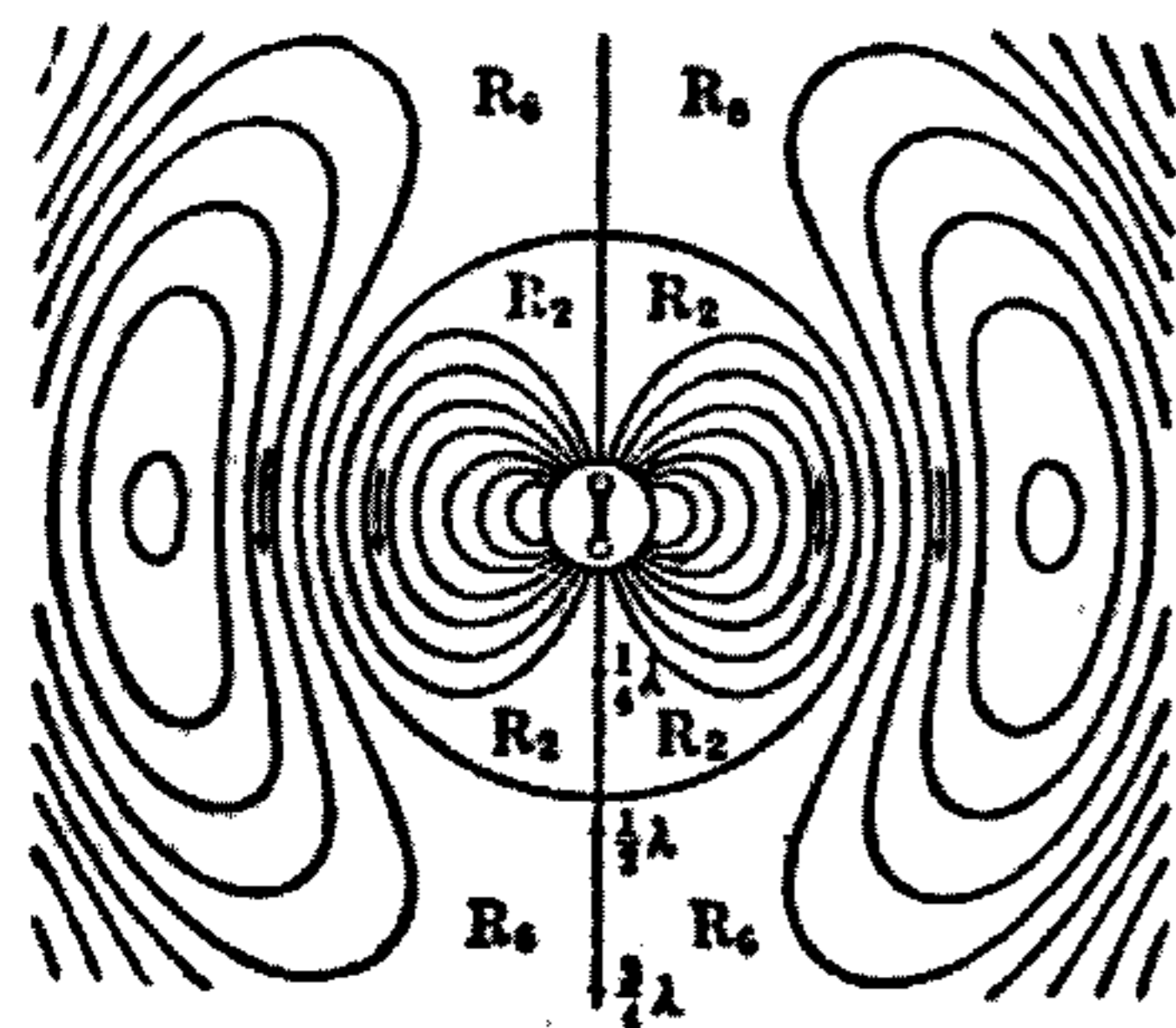


Рис. 29.

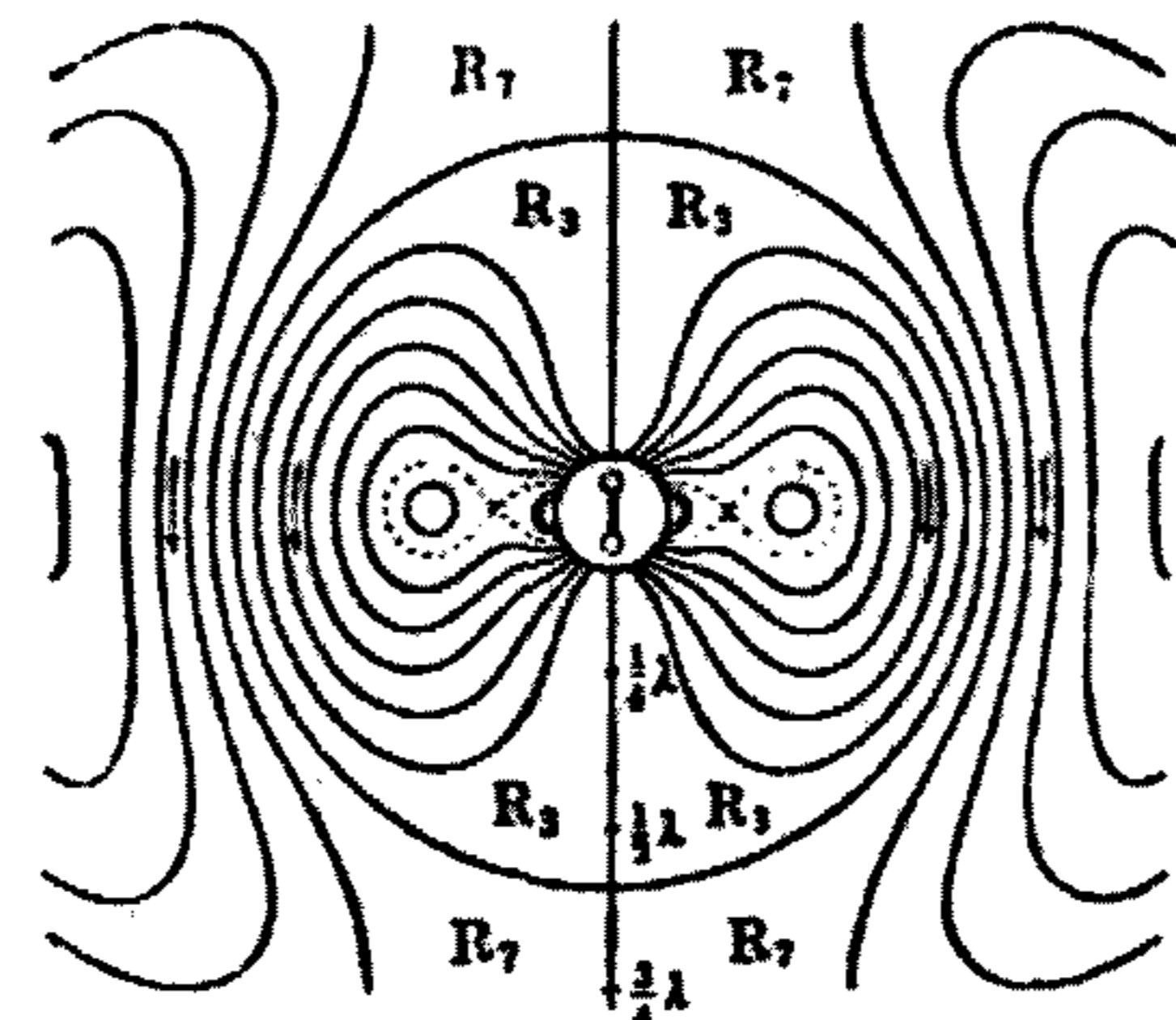


Рис. 30.

роль искры? Это легко пояснить следующим сравнением: пусть у нас укрепленная за один конец растянутая рукой пружина. Колебания пружины произойдут лишь в том случае, если быстро отпустить свободный конец пружины. Точно так же искровой промежуток служит как бы клапаном, мешающим прохождению тока. При достаточном напряжении образуется искровой разряд, равно-

<sup>1)</sup> Обращаем внимание на то, что кольца в вибраторе Герца, удаляясь от вибратора, непрерывно расширяются, имея также скорость в собственной плоскости в отличие от неизменных колец новейшей теории Томсона.

сильный внезапно отпусканию пружины. При таком разряде электроны очень быстро двигаются по проводу, переходят по инерции через положение равновесия, останавливаются, затем движутся в обратном направлении и т. д. Происходит ряд чрезвычайно быстрых колебаний. Но силовые линии, как сказано было выше, обладают инерцией. Поэтому при внезапном и быстром движении электрона он отрывается от силовой линии, подобно тому, как при быстром дергании бечевки, привязанной к тяжелому телу, веревка обрывается, а тело остается неподвижным. Согласно известным законам вихревого движения, установленным Гельмгольцем, вихревая нить не может иметь начала и конца в жидкой среде, — она обязательно образует замкнутую линию. Отсюда ясно, что концы разорванной силовой линии соединяются и образуют замкнутое целое.

Мы думаем, что не найдется ни одного читателя, которому при виде этой картины не пришла бы в голову мысль о световых квантах. Вибратор Герца действительно излучает световые кванты большой длины волн. Истинными авторами квантовой теории излучения были Максвелл и Герц, и недавно физики Кастерин и Уайтеккер показали, что квантовые кольца даже неизменных размеров непосредственно вытекают из у-ий Максвелла-Герца.

Мы видим таким образом, что теория излучения Максвелла-Герца дополняет теорию электромагнитных колебаний Томсона новым возможным видом световых (электромагнитных) квант. Для получения световых (электромагнитных) лучей нет необходимости, чтобы через весь эфир были протянуты силовые волокна. Если у нас имеется, например, тонкий металлический стержень, в котором колеблется электричество, то от стержня отшнуровываются кванты электромагнитной энергии, которые несутся в пространстве со скоростью света. И без сомнения, в природе существуют как „волны“ Томсоновского тона, так и „волны“ типа Герца.

## 11. ТЕОРИЯ БОРА.

Теория эта появилась в 1913 году и носит на себе печать столь очевидной истины, что Милликэн прав, говоря: „Я не знаю ни одного соперника теории Бора, который бы показался хотя бы вдаль“.

В основе теории Бора лежат следующие две гипотезы:



1) Движение электронов вокруг ядра может происходить по определенным „устойчивым“ орбитам, при чем, если  $m$  — масса электрона,  $v$  — его скорость,  $r$  — радиус орбиты, то

$$mvr = \frac{k}{2\pi} h,$$

где  $k$  — целое число, равное порядковому номеру орбиты,  $h$  — постоянная Планка.

2) Во время обращения электрона по таким орбитам электромагнитное излучение отсутствует, оно возникает только при переходе электрона от одной орбиты на другую, при чем выделяется одна кванта лучистой энергии  $h\nu$ , где  $\nu$  — число колебаний испускаемых „волн“.

Первая часть последней гипотезы — противоречие теории Томсона и, как говорят, классической электродинамике, согласно которой, электромагнитное излучение имеет место при всяком ускоренном, в том числе и круговом движении электрона. В самом ли деле, однако, мы находимся здесь перед нарушением основного положения электродинамики Максвелла? Ничего подобного! Чтобы понять это, рассмотрим следующую схему (рис. 31).

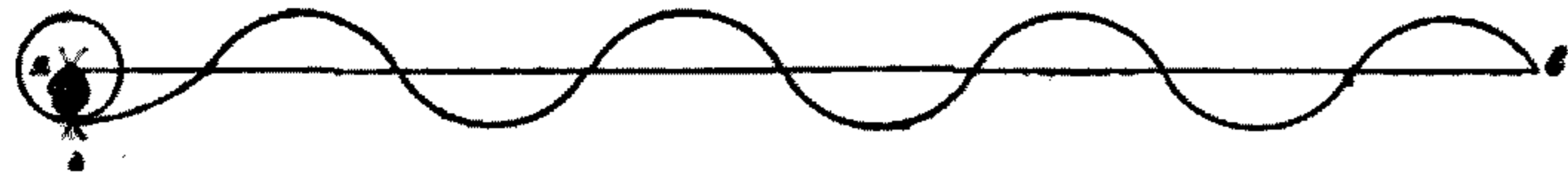


Рис. 31.

Здесь „я“ ядро, вокруг которого обращается электрон, линии „я — э“ связывают электрон с ядром, линия „э — в“ обозначают связь с „внешним“ миром; множественность линий „я — э“ указывает на то, что силовое поле сосредоточено, главным образом, внутри атома. Пусть теперь ядро вращается по круговой орбите. При этом возникают двоякого рода „волны“. Первого рода „волна“ заключается в том, что ничтожные по длине силовые линии „я — э“ просто перемещаются в пространстве вокруг ядра, подобно спице колеса вокруг втулки; второго рода „волны“ это — волны в обычном смысле слова, которые бегут вдоль силовых линий „э — в“ и, отразившись от их концов, образуют „стоячие волны“. Собственно говоря, мы в конце концов имеем две „группы“ стоячих волн: левая состоит из вращающихся силовых линий, правая из волн обычного смысла слова, т. е. из колеблющихся частей силовых линий, не с одним „узлом“ (ядро) и „пучностью“ (электрон), а со мно-

гими. Если вместо силовых линий мы имеем дело с длинной каучуковой трубкой, укрепленной в точках „я“ и „в“, то превращение очень близкой к точке „я“ точки „э“ получается та же самая картина.

Суть дела таким образом в том, что, по теории Томсона, центр тяжести образования волн перенесен на те силовые линии, которые связывают электрон с внешним миром. Теория Бора доказывает, что это не так, что при вращении электрона вокруг ядра получается „внутренняя волна“, что внешние волны чрезвычайно слабы и не поддаются учету опыта, хотя без сомнения существуют. Такая точка зрения не только физически вполне допустима, но хорошо гармонирует с электрической нейтральностью тел.

Более того, она допустима и строго теоретически, ибо независимо от какой-либо модели механизма излучения, утверждение, что всякое ускоренное движение электрона связано с излучением получено на основании частного (именно герцевского) решения уравнений Максвелла. Но эти уравнения имеют и другие решения, как то показали Кастерин и Уайтеккер. Вот почему вопрос о том, сопровождается ли ускоренное движение электрона излучением и каким именно, можно решить лишь на основании конкретного рассмотрения механизма излучения, а не на основании анализа формул.

Теория атома Бора показывает, что наружное излучение имеет место тогда, когда ускоренное движение электрона происходит вполне определенным образом (вibrator Герца, образование кольца), но излучение отсутствует (или почти отсутствует), в случае движения электрона вокруг ядра. Подробное объяснение этого обстоятельства мы даем в статье: „Вихревая теория электромагнитного движения“ (стр. 235).

Квантовые кольца, излучаемые vibratorом Герца, состоят из огромного числа чрезвычайно густо расположенных силовых линий; при своем движении эти кольца непрерывно расширяются и, стало-быть, энергия их рассеивается. Квантовые кольца такого рода Дж. Дж. Томсон называет волнами „максвелловского типа“. Но нетрудно представить себе, что особого строения vibratorы выбрасывают кольца, движущиеся перпендикулярно к своей плоскости и не имеющие скорости в самой плоскости. Такого рода кванты сохраняют свою энергию сосредоточенной в определенном объеме. Несомненно, однако, что „волны максвелловского типа“ и



собственно световые кванты по существу однородны. Впервые на такого рода связь между световыми квантами и кольцами вибратора Герца обратил внимание Ленард.

О Ленарде мы узнали из речи Д. А. Гольдгаммера „Теория квант и лучистая энергия“, произнесенной в 1914 году на I Всероссийском съезде преподавателей физики, химии и космографии в С.-Петербурге (см. 15-й том „Физического Обозрения“).

В разделе: „Откуда берутся кванты энергии“ Д. А. Гольдгаммер пишет: „Еще Н. Hertz около четверти века тому назад показал, что излучение электромагнитных волн идет очень своеобразно, хотя на эту своеобразность очень долго не обращали внимания, да и сейчас, повидимому, ею интересуются мало. Обратил внимание на эту своеобразность и поставил в связь с теорией квант совсем недавно Ph. Lenard“.

Приведя рисунки, аналогичные рисункам Герца, выполненные Наск'ом для очень вытянутого эллипсоида вращения, Гольдгаммер говорит: „Что же дают нам эти чертежи, выполненные согласно теории электрических колебаний F. Наск'ом? Да ведь они показывают, что излучение электромагнитной энергии со стержня идет не непрерывно, а скачками, что эта потеря энергии наступает лишь тогда, когда оторвется хотя бы одна силовая линия, которой при том соответствует конечное количество энергии. Может возникнуть, однако, вопрос, почему — конечное? Ведь в классическом учении об электричестве силовая линия есть линия, и соответствующая ей энергия бесконечно мала. Да, это верно, но не верна классическая теория, <sup>1)</sup> ибо электричество само не делимо до бесконечности, <sup>2)</sup> а складывается из электрических квант: отрицательное из электронов, а положительное из ионных же зарядов, той же величины, что и у электронов, но зарядов положительных. И потеря энергии при излучении сводится к тому, что по крайней мере один свободный электрон соеди-

<sup>1)</sup> Это место представляет собой недоразумение, ибо основатель классической теории Фарадей и его ученик Максвелл всегда разумели под силовой линией нечто физическое, т. е. конечное, а не математическую фикцию. Здесь верно лишь то, что толкователи классической теории старались и стараются до сих пор физическое учение Фарадея — Максвелла превратить в чисто математическое. Весь смысл нашей статьи в том, чтобы показать это искажение.

<sup>2)</sup> Гольдгаммер обнаруживает в этой фразе непонимание диалектики познания. Но это не лишает его рассуждения общей (временной) правильности.

няется с положительным атомом и нейтрализуется — это и соответствует отрыванию одной или группы силовых линий, связывавших электрон с атомом. И электрон нейтрализует свой заряд, очевидно, целиком, а не частями, а заряд его, хотя и мал, но конечен. Итак, процесс электромагнитного излучения идет не непрерывно, а ведь это и является одним из подтверждений теории квант“.

Гольдгаммер вычисляет значение квант излучения для случая колебания в металлическом шаре <sup>1)</sup> и получает величину  $H\nu$ , где  $H$  зависит от формы излучающего проводника и начального заряда. Гольдгаммер заключает: „Таким образом форма и строение молекулярных (атомных) вибраторов, вероятно, обуславливает собою и величину  $H$ , а одинаковость этого строения у всех тел объяснит и универсальность  $H$ . Потеря энергии квантами при электромагнитном излучении оказывается, как мы видим, простым следствием электронной структуры электричества. При этом и вся электрическая энергия заряженного тела всегда

<sup>1)</sup> Вот это вычисление: „Если  $Q_0$  начальный заряд одной из половинок шара, то начальная энергия шара (электрическая) есть

$$E_0 = A \frac{Q_0^2}{R},$$

где  $R$  — радиус шара, а  $A$  — постоянное количество. Если теперь  $e$  — есть заряд электрона, то так как  $Q_0$  представляет собою всегда некоторое целое число электронов ( $p$ ), то

$$Q_0 = pe, E_0 = Ae^2 \frac{p^2}{R};$$

а так как  $\frac{1}{R}$  пропорционально числу колебаний  $\nu$  электромагнитной волны, излучаемой шаром, то можно написать

$$E_0 = Be^2 p^2 \nu,$$

где  $B$  — новое постоянное. Если теперь вследствие излучения энергия  $E_0$  стала  $E$ , это значит, что  $p$  уменьшилось на целое число  $n$  электронов, соединившихся с атомами и потерявших, говоря обычным языком, свои заряды. Тогда

$$E = Be^2 (p - n)^2 \nu$$

и потеря энергии есть

$$E_0 - E = Be^2 \nu (2p - n)n.$$

Пока  $n$  невелико сравнительно с  $p$ , мы можем написать:

$$E_0 - E = 2Be^2 pn \nu = nH\nu,$$

и мы видим: энергия при излучении теряется квантами, и величина кванты  $H\nu$  пропорциональна  $\nu$ , совсем как мы это нашли у черного излучения“.



пропорциональна  $p^2$ , где  $p$  есть целое число ( $p$  — число электронов или что то же элементарных силовых трубок. З. Ц.), т. е. энергия может быть или  $a$ , или  $4a$ , или  $9a$ , или  $16a$  и т. д. Она складывается из целого числа своего рода квант<sup>1</sup>.

## 12. Новая теория Дж. Дж. Томсона.

В октябре 1924 г. в журнале „Philosophical Magazine“ появилась работа Томсона: „A Suggestion as to the structure of Light“<sup>1</sup>) в которой автор согласует теорию „волокнистого эфира“ с выводами теории Бора.

Томсон прежде всего отмечает, что, с одной стороны, оптические свойства света с большим совершенством подтверждают гипотезу волновой природы света; с другой стороны, электрические свойства как-будто показывают, что энергия сконцентрирована повсюду в дискретных центрах и что фронт волны, вместо того, чтобы быть однообразно освещенным, представляет собой ряд широких пятен на темной основе. Иначе говоря, электрические свойства света указывают на корпускулярное, согласно Ньютону, строение света, в то время, как оптические — на непрерывно волновое.

Томсон указывает далее, что он давно уже предложил теорию, базирующуюся на понятии электрических силовых трубок, которая, по его мнению, пригодна для примирения (синтеза) оптики и электричества.

Мы видели выше, что это действительно так, что теория волокнистого эфира Томсона представляет собою синтез волновой и квантовой теорий излучения. Новая теория Томсона посвящена согласованию его старых воззрений с теорией Бора. Томсон рисует прежде всего картину образования электромагнитного кольца, не упоминая почему-то о том, что картина эта по существу соответствует картине, данной Г. Герцем в его теории вибратора. Картина Томсона такова. Пусть у нас имеется силовая линия  $PE$  (рис. 25 статьи Томсона), соединяющая ядро  $P$  с электроном  $E$ ; пусть вследствие полученного толчка электрон занял положение около  $P$ ; новое положение электрона вызывает следующие процессы: а) конец силовой трубки с электроном притягивается противоположной точкой, вследствие чего образуется кольцевая петля,

<sup>1</sup>) В декабрьском № за 1925 г. появилось дополнение к этой работе („Structure of Light“).

б) кольцевая петля отталкивается от нее, образуя электромагнитное кольцо, движущееся со скоростью света.

Пусть теперь, наоборот, подобного рода кольца движутся по направлению к силовой трубке (рис. 26). Здесь возможны 3 случая: 1) энергия кольца достаточна для разрыва трубки; в этом случае выделяется электрон, согласно вышеуказанному закону Эйнштейна; кванта энергии кольца идет на сообщение, во-первых, оторванному электрону некоторой кинетической энергии ( $\frac{1}{2}mv^2$ ), а, во-вторых, на работу разрыва силовой трубки ( $p$ ); 2) второй случай тот, когда энергия кольца недостаточна для разрыва силовой трубки, но достаточна для приведения электрона в другое положение, т. е. на другую возможную орбиту. В этом случае происходит следующее: пусть у нас имеется один электрон во втором, считая снаружи, слое электронов, окружающих атомное ядро; первый слой электронов будет находиться в состоянии равновесия до тех пор, пока энергия разрушившегося кольца (см. схему процесса разрушения кольца на рис. 26) не перебросит электрона со второго слоя на первый; разрушение кольца и переброска электрона на новую орбиту означает поглощение (абсорбцию) энергии; при таком поглощении нарушается равновесие второго слоя, и через некоторое время электрон падает на свою старую орбиту, при чем происходит характеристическое излучение согласно схеме, указанной на рис. 1) 25). Если энергия кольца недостаточна для приведения электрона на новую орбиту, то, хотя поглощение кольца отбрасывает электрон от ядра ( $P$ ), но действующие силы скоро останавливают электрон, движение делается обратным, кольцо восстанавливается и вырывается из молекулы, о которую оно ударило. В этом случае нет поглощения. Таким образом смерть кольца рождает или большой скорости электрон, или характеристическое излучение.

Томсон подчеркивает, что теория кольца находится в согласии с результатами, полученными Баркла, а именно: если лучи Рентгена полностью поглощаются газом без эмиссии характеристических лучей, то число электронов большой скорости не зависит ни от рода газа ни от его физического состояния.

Теория излучения Томсона, как видим, по существу построена на том же основании, что и теория вибратора Герца. Томсон

<sup>1</sup>) Вообще говоря, при характеристическом излучении электрон падает не на старую орбиту, а на другую устойчивую, так что остаток энергии образует аллотропическое видоизменение атома.



дает, однако, иное объяснение происхождению электромагнитных волн. Согласно Томсону, волны порождаются не колебаниями электронов, как в вибраторе Герца, а колебаниями кольца. В тот короткий промежуток времени, пока кольцо находится еще внутри атома и не выброшено еще наружу, внутриатомное электрическое поле быстро меняется. Это изменение поля вызывает колебания кольца. Передвигающееся кольцо, по Томсону, также окружено системой электромагнитных волн, тождественных с теми, которые излучаются внутри атома.

Энергия этих волн мала сравнительно с энергией кольца, так как совокупная потеря энергии в атоме приблизительно равна разнице между потенциальной энергией электрона в положении  $E$  и  $E_1$ .

На основании этого воззрения Томсон дает объяснение явлений интерференции, дифракции, поглощения и резонанса. Мы не будем на этом останавливаться. Обратим только внимание читателей на замечательное томсоновское вычисление постоянной Планка.

Вычисление это очень просто. Из теории электричества известно, что энергия силовой трубки равна:

$$E = 2\pi \times f^2 \times (\text{объем трубки}),$$

где  $f$  — так называемое диэлектрическое смещение или, по Томсону, „поляризация“. Смысл понятия „поляризация“, введенного Томсоном<sup>1)</sup> таков: „Пусть  $A$  и  $B$  две соседних точки диэлектрика, пусть плоскость, площадь которой равна единице, расположена перпендикулярно к линии, соединяющей точки  $A$  и  $B$ ; тогда поляризация по направлению  $AB$  равна разности между числами фарадеевских силовых трубок, проходящих через единицу площади от  $A$  к  $B$  и от  $B$  к  $A$ “. В нашем случае поляризация выражает просто число силовых трубок, проходящих через единицу площади поперечного сечения силовой трубки, соединяющей ядро с электроном.

Обозначим эту площадь через  $\omega$ ; тогда  $f \times \omega = p \times e$ , где  $p$  число равное или меньшее единицы в зависимости от того, все ли силовые линии сосредоточены в поперечном сечении,  $e$  — заряд. Действительно, согласно основному положению теории силовых трубок, каждая единица положительного электричества связана трубкой с каждой единицей отрицательного электричества. Следовательно, общее число таких единичных трубок будет равно  $e$ ,

<sup>1)</sup> См. статью „Фарадеевы силовые трубки и уравнения Максвелла“.

т. е. числу единичных зарядов. Если  $\omega$  означает поперечное сечение кольца, то, обозначив через  $r$  — радиус кольца, а через  $e$  — радиус сечения, получим:

$$E = 2\pi \times f^2 \times (\text{объем кольца}) = 2\pi \left(\frac{pe}{\omega}\right)^2 \cdot 2\pi r \cdot \omega = \\ = 4\pi^2 p^2 e^2 \frac{r}{\omega} = 8\pi^2 p^2 e^2 \frac{r^2}{b^2} \cdot \frac{1}{2\pi r}.$$

Если кольца подобны, то  $\frac{r}{b}$  = постоянной; частота волн та же, что и частота колебаний кольца; в геометрически подобных кольцах длина волны пропорциональна длине кольца ( $2\pi r$ ), следовательно, из указанного уравнения энергии вытекает, что энергия обратно пропорциональна длине волны. Это и есть закон Планка:  $E = h\nu$ , ибо  $\nu$  частота колебаний, как известно, обратно пропорциональна длине волны.

Томсон предполагает далее, что период колебания кольца равен времени, которое употребляет свет для прохождения окружности кольца, т. е.  $T = \frac{2\pi r}{c}$ , где  $c$  — скорость света.

$$\text{Частота } \left(\frac{1}{T}\right) \nu = \frac{c}{2\pi r}$$

Следовательно:

$$E = 8\pi^2 p^2 e^2 \frac{r^2}{e^2} \cdot \frac{\nu}{c}$$

$$e \text{ — заряд электрона равен } 4,8 \cdot 10^{-10}$$

$$c \text{ — скорость света равна } 3 \cdot 10^{10}$$

$$E = 6,2 \cdot 10^{-20} \frac{p^2 r^2}{b^2} \nu.$$

Если положить  $\frac{p^2 r^2}{b^2} = \pi$ , то  $E = h\nu$ , где  $h$  будет с очень большой степенью приближения равняться постоянной Планка, т. е.  $6,55 \cdot 10^{-27}$

Самое замечательное в этом выводе то, что  $\frac{p^2 r^2}{b^2}$  оказалось равным числу  $\pi$ . Если считать, что все силовые линии кольца проходят через поперечное сечение, обозначенное нами через  $\omega$ , иначе говоря, если считать, что имеем дело с действительным кольцом строго геометрической фигуры, то  $p$  необходимо положить равным единице. Тогда  $\frac{r^2}{b^2} = \pi$ , и мы получим следующее замечательное предложение:

Силовое кольцо, играющее основную роль в лучистых процессах, таково, что отношение площади



кольца к площади его поперечного сечения в точности равно числу  $\pi$ .

Всякий человек, хоть несколько склонный к философскому мышлению, не может не поразиться таким результатом. Число  $\pi$  играет основную роль в геометрии и постольку, поскольку геометрия связана с физикой, и в физике. Случайно ли это число характеризует природу реальных силовых колец? Если не случайно, то вывод отсюда может быть один: вышеназванная теория квантового излучения в основном, несомненно, истина. Здесь перед нами поразительный образец диалектического развития науки. Вообразим, что какой-нибудь мощный ум разработал бы теорию излучения на основе теории вихрей (из следующих статей мы увидим, что электромагнитные силовые кольца, по видимому, не что иное, как вихревые образования в эфире). Положив отношение  $\frac{r^2}{b^2}$  равным  $\pi$  и пользуясь опытной величиной  $e$ , он получил бы теоретически постоянную Планка. <sup>1)</sup> Факт этот доказывает тесную связь геометрии с физикой, точнее Евклидову природу нашего пространства, ибо теория вихрей есть физика Евклидова пространства.

В заключение своей статьи Томсон пишет: „С изложенной нами точки зрения появление кольца обусловлено деформацией электрических силовых трубок при быстром изменении потенциальной энергии. Возможно, однако, вообразить электрические волны без кольца; так, если электрон движется с постоянной скоростью по окружности, в центре которой имеется положительный заряд, появляются электрические волны, частота которых равна частоте обращения электрона, но волны эти не сопровождаются кольцом“.

Отрывок этот замечателен в том отношении, что Томсон силой фактов самой науки пришел к диалектической точке зрения. Он отвергает абсолютные формулировки. Законы электродинамики не нарушаются, но приложение их необходимо рассматривать во всей конкретности. Мы видели выше, как объясняется факт незначительного внешнего излучения при движении реального электрона по орбите. <sup>2)</sup> Метафизики поспешили объявить о полном отсутствии всякого излучения, о нарушении законов электродинамики. Том-

<sup>1)</sup> Вильям Томсон очень близко подходил к вопросу, изучая колебания вихревого кольца (см. статью В. Томсона, „О вихревых атомах“).

<sup>2)</sup> Более подробное объяснение см. в нашей статье „Вихревая теория электромагнитного движения“. В этой же статье мы даем особую схему волнового движения в эфире.

сон, не соглашаясь с этим утверждением, остался на старой точке зрения, дополнив ее, однако, новыми соображениями применительно к конкретной обстановке.

Мы видим, таким образом, что теория Томсона является синтезом корпускулярной и волновой точек зрения. Свет корпускулярен постольку, поскольку в нем имеется квантовое ядро, но он представляет также систему волн постольку, поскольку ядро окружено системой электромагнитных колец обычного герцевского, типа, т. е. таких, которые при своем движении непрерывно расширяются, в то время как квантовое кольцо, двигаясь перпендикулярно своей плоскости, сохраняет свои размеры. Томсон утверждает, что квантовые ядра свойственны главным образом лучам очень большой частоты, например, рентгеновым. Самое замечательное, однако, это — связь квантовых колец с вихревой теорией материи. Нельзя не поразиться, действительно, сходством электромагнитного силового кольца с кольцами, фигурирующими в теории вихрей. Если принять во внимание то обстоятельство, что электромагнитная теория света Максвелла непосредственно связана с представлениями о вихрях, то указанное сходство приобретает силу прямого доказательства вихревой природы света и электромагнитных явлений вообще. О вихревой теории материи — в нижеследующих статьях Н. Е. Жуковского и В. Томсона.



ПРИЛОЖЕНИЕ ТРЕТЬЕ  
ВИХРЕВАЯ ТЕОРИЯ МАТЕРИИ

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ВИХРЕЙ. 1)

Н. Е. ЖУКОВСКИЙ.

В своих работах по механике Гельмгольц является одним из видных представителей той школы ученых, которые, по выражению Пуансо, поставили себе задачу: „*considérer les choses en elles-mêmes*“.

Механика развивалась как глубокомысленными трудами аналитиков, так и остроумными исследованиями геометров. При этом часто бывало, что сложные аналитические формулы освещались и представлялись в ясной наглядной форме, благодаря удачным геометрическим представлениям. Такие интерпретации охватывали задачу во всей ее полноте и раскрывали многие свойства ее, не замеченные при аналитическом исследовании. Так было с решением задачи о движении твердого тела около его центра тяжести; решение сперва было получено Эйлером аналитическим путем, но оставалось затерянным среди массы формул и только благодаря простым и наглядным интерпретациям Пуансо предстало перед глазами ученых со всей ясностью.

Какая роль выпала на долю Пуансо при разъяснении вопроса о движении твердого тела, такая же принадлежит и Гельмгольцу в разъяснении вопроса о движении жидкости.

Почти все работы Гельмгольца по механике посвящены гидромеханике, которую он не перестает заниматься и до настоящего времени. При этом можно сказать, что современная гидродинамика своим развитием обязана главным образом Гельмгольцу. А между тем наиболее замечательная работа германского ученого в этой области: „*Ueber Integrale der hydrodynamischen Gleichungen,*

1) Из лекции, читанной Н. Е. Жуковским в 1891 г. в пользу Гельмгольцевского фонда. Более обстоятельное изложение теории вихрей в книге Жуковского „Основы воздухоплавания“.

welche den Wirbelbewegungen entsprechen“ появилась в 1858 году, спустя 43 года после того, как формулы, заключающие в себе принцип сохранения вихрей, были найдены Коши. Но Коши рассматривал полученный им результат только с аналитической стороны и не предвидел той массы вопросов, которые могут быть решены при надлежащем геометрическом освещении выводов.

Я постараюсь теперь с возможною простотою выяснить вам установленное Гельмгольцем понятие о вихре.

Вообразим цилиндрический сосуд конечной высоты (рис. 32) с весьма большим основанием, наполненный капельной или газо-

образной жидкостью, и предположим, что эта жидкость движется так: центральный цилиндрический столбик ее, некоторой толщины, вращается, как твердое тело, около своей оси, а вся остальная масса жидкости крутится около этого столбика по кругам со скоростями, обратно пропорциональными расстоянию от оси столбика, при чем эти скорости, убывая по мере приближения к центральному столбику, переходят на его поверхности в скорость столбика.

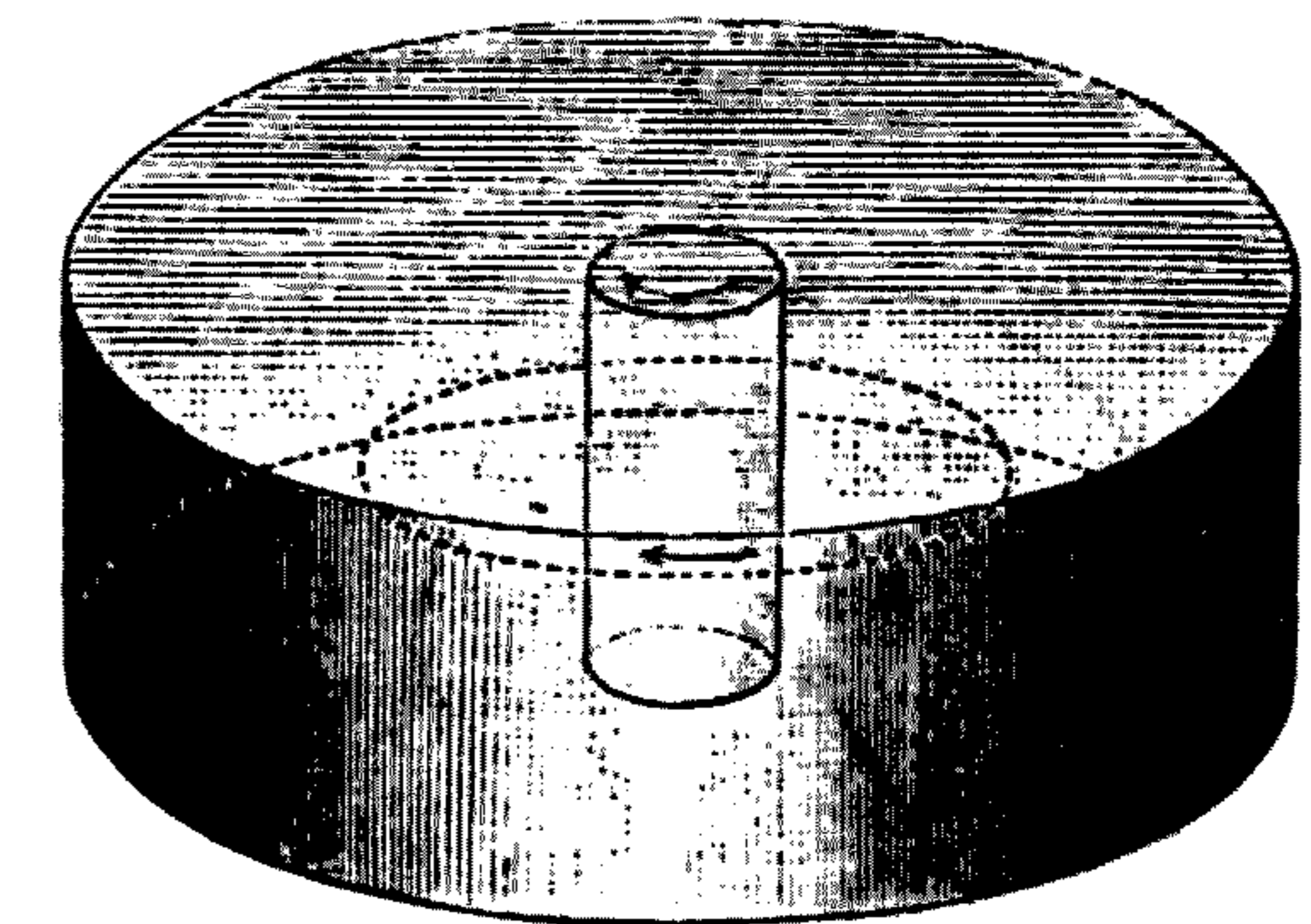


Рис. 32.

Такое движение жидкости и называется вихрем, а характеризующий его цилиндрический столбик — вихревым шнурком. Так называет Гельмгольц произведение из площади нормального (перпендикулярного) сечения столбика на его угловую скорость. Можно еще сказать, что напряжение вихря равно половине произведения скорости жидкости при поверхности вихревого шнура на периметр нормального сечения шнура. Удвоенную величину этого произведения называют циркуляцией скорости по нормальному сечению шнура. Вообще циркуляция скорости по какому-нибудь замкнутому контуру внутри движущейся жидкости есть произведение из длины контура на среднюю из всех составляющих скоростей точек контура по направлению контура.

Так как в движении жидкости, изображенном на рис. 32, скорости обратно пропорциональны радиусу, то циркуляция скорости по всем горизонтальным кругам, имеющим центр на оси столбика



и охватывающим его, равны между собою и, следовательно, равны удвоенному напряжению вихря, а циркуляция скорости его по контурам, состоящим из отрезков двух кругов между отрезками двух радиусов и лежащим вне шнура, равна нулю. Кроме этого, легко доказать, что циркуляция скорости по всяким замкнутым контурам, охватывающим шнур, равна удвоенному напряжению вихря, а циркуляция скорости по всяким замкнутым контурам, его не охватывающим, равна нулю.

Это замечание позволяет нам разыскивать вихревой шнур по данной движущейся жидкости. Для этого надо провести замкнутый контур и определить для него циркуляцию. Если она не равна нулю, то сквозь контур проходит вихревой шнур. После этого

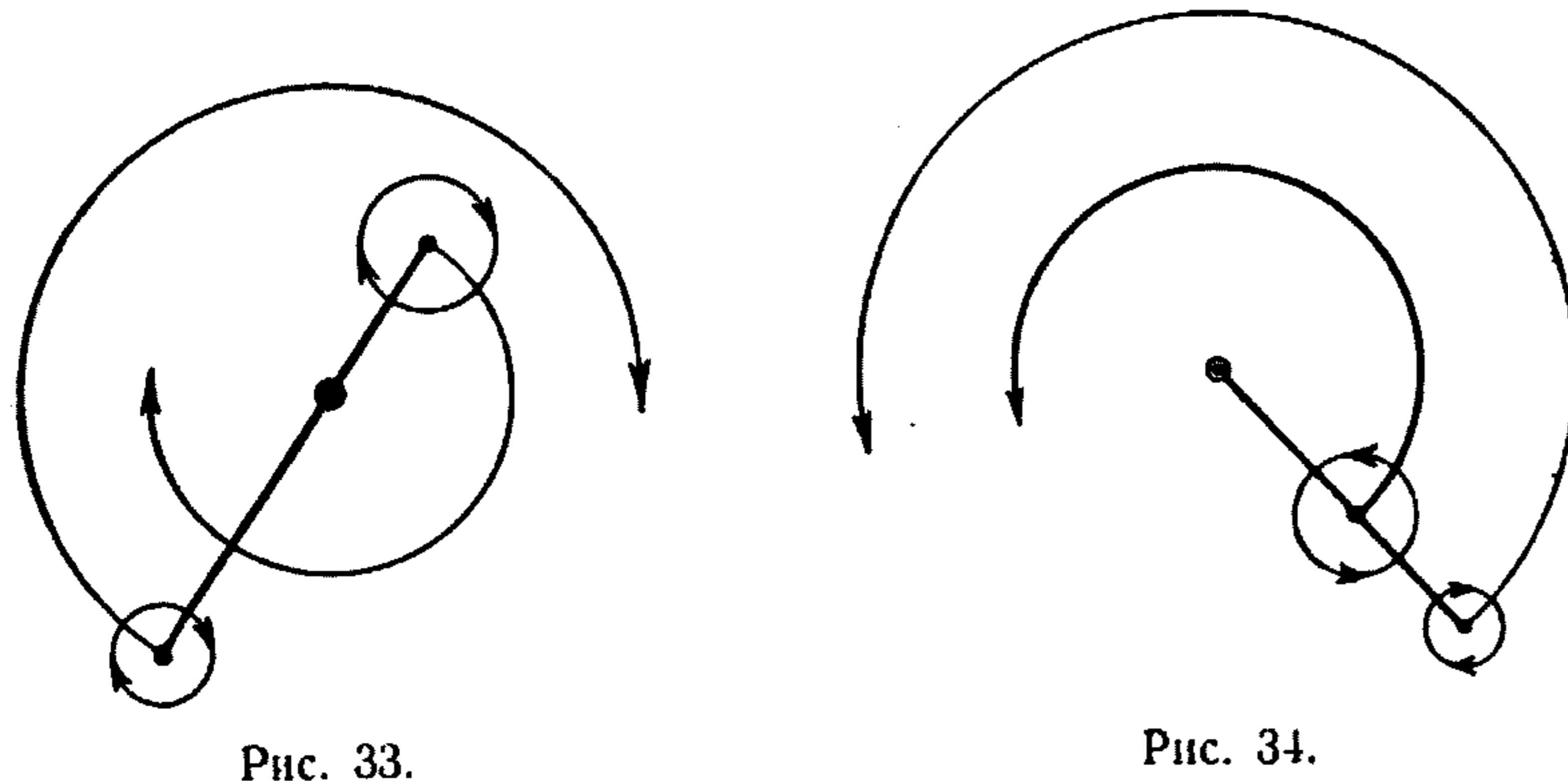


Рис. 33.

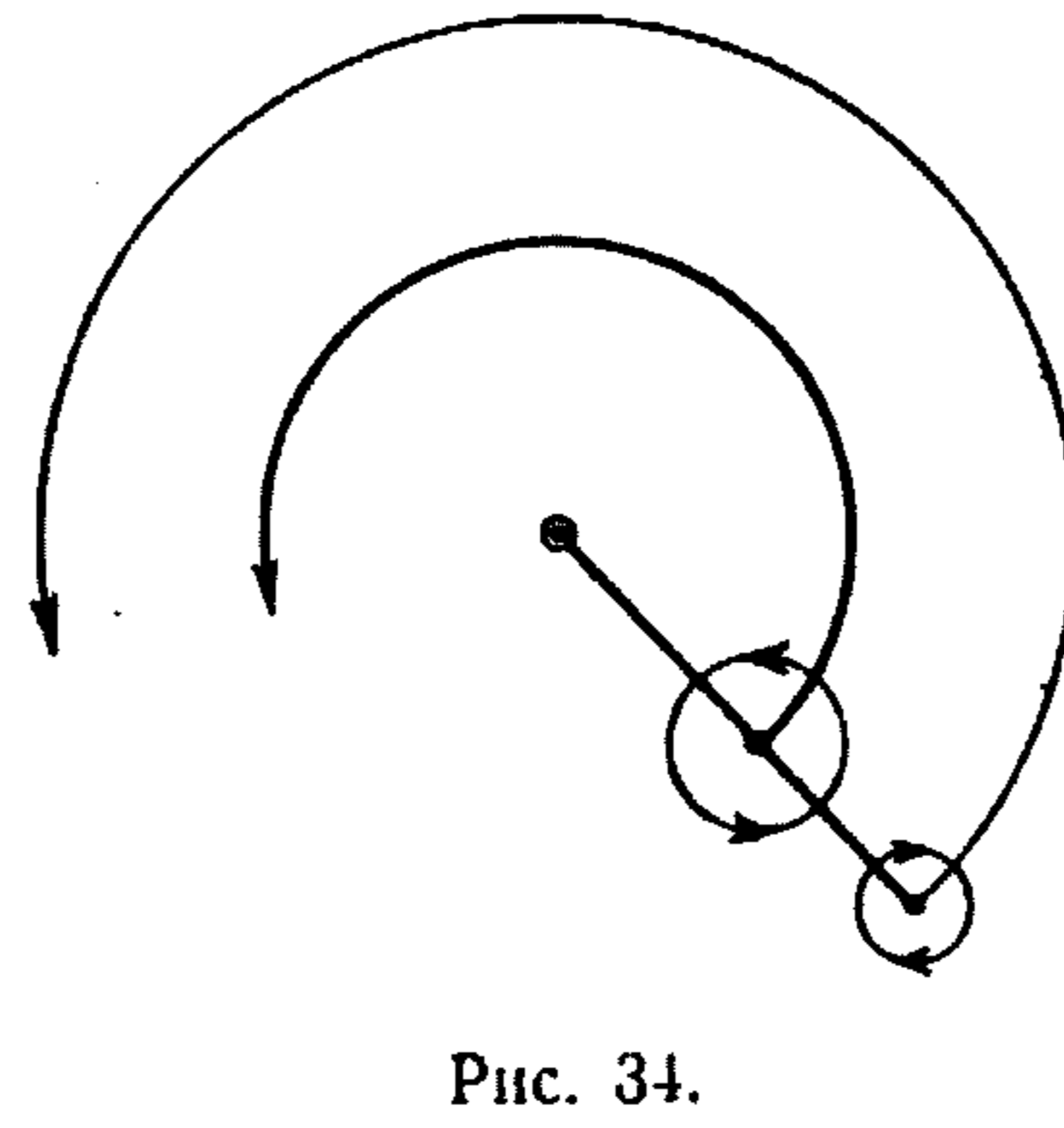


Рис. 34.

надо уменьшать контур до тех пор, пока циркуляция не изменится. Уменьшая его таким образом, мы можем подойти к поверхности шнура.

Если в рассмотренном нами весьма широком сосуде имеется только один вихрь, обусловленный прямым вихревым шнуром, то шнур будет оставаться неподвижным. Но если бы в этом сосуде образовались два такие вихря, крутящиеся около параллельных вихревых шнуров, то шнуры стали бы двигаться. На рис. 33 изображены в плане два вихревых шнура с различными напряжениями, вращающиеся в одну сторону. Так как вихрь, соответствующий левому вихревому шнуру, вращает всю жидкую массу около оси шнура по часовой стрелке, то сообщает правому шнуру скорость, направленную перпендикулярно радиусу вниз, а вихрь правого шнура по той же причине сообщает левому шнуру скорость, направленную вверх. Вследствие этого происходит то, что оба шнура вра-

щаются по часовой стрелке около некоторой точки; эта точка получится, если в центрах двух шнуров мысленно сосредоточим массы, пропорциональные напряжению соответственных вихрей, и отыщем центр тяжести этих двух масс.

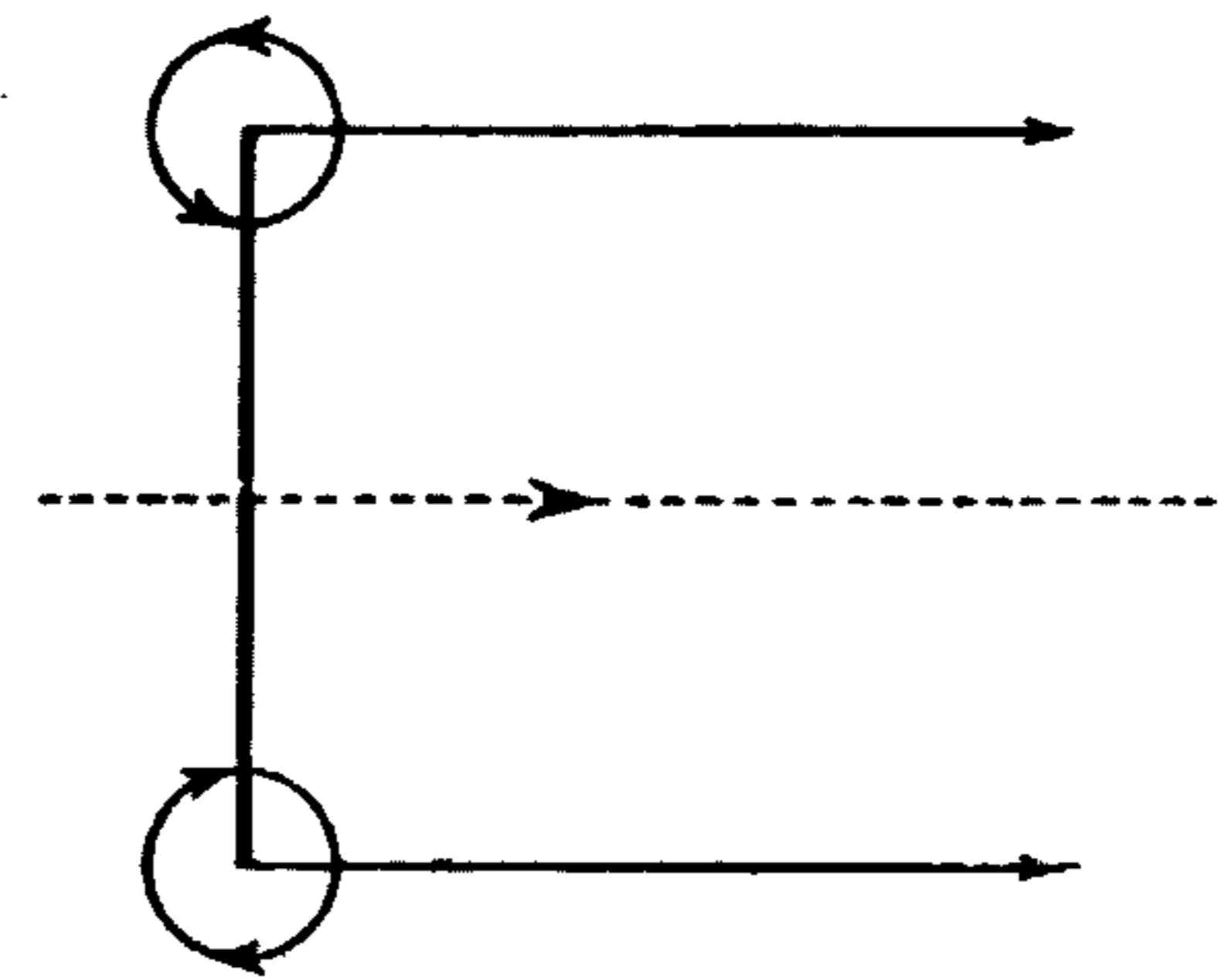


Рис. 35.

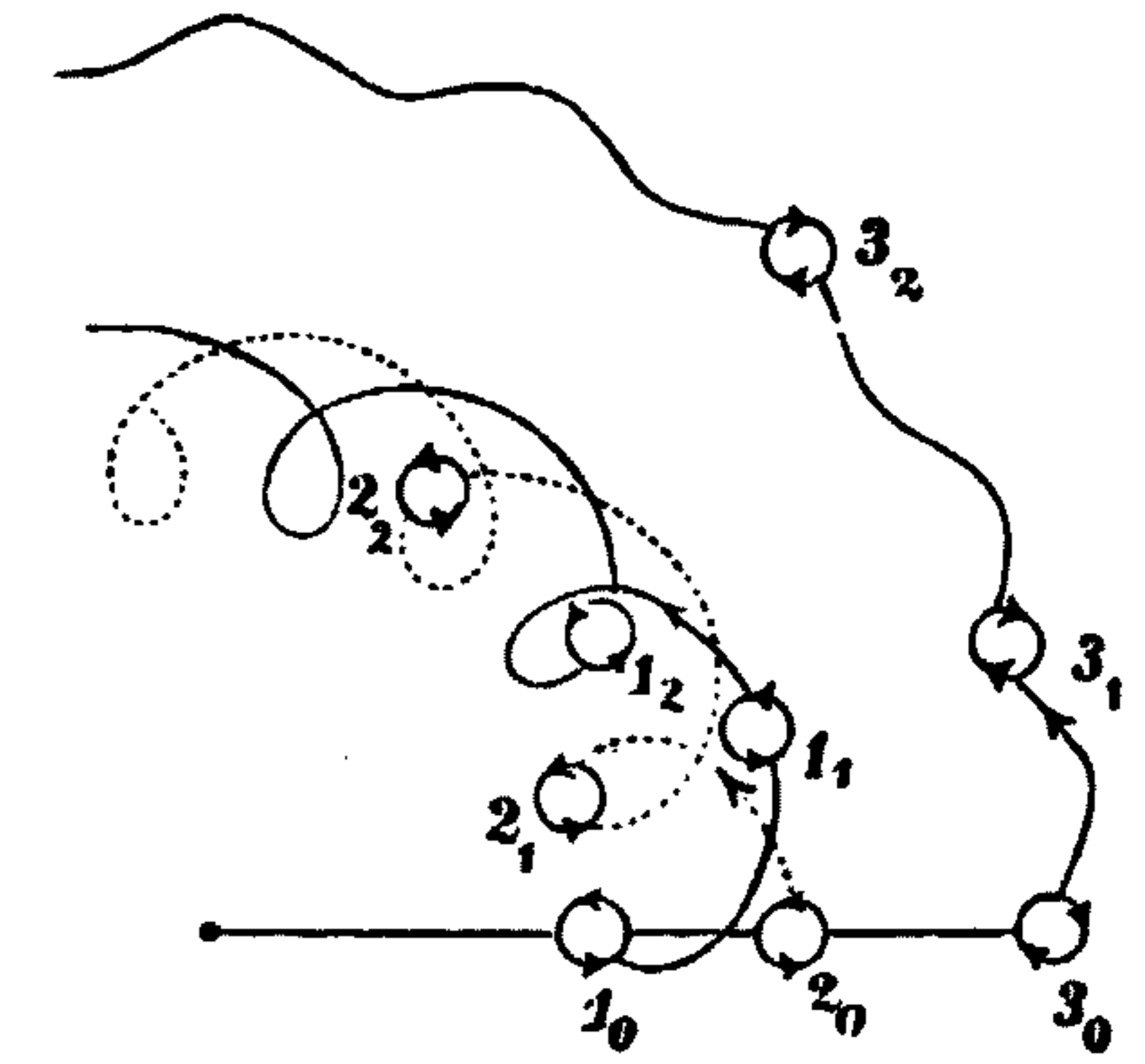


Рис. 36.

Если бы вихри крутились в различные стороны, то вихревые шнуры (рис. 34) стали бы вращаться около центра, лежащего со стороны шнура большего напряжения, и вращение совершалось бы в сторону движения вихря большего напряжения. Если бы при этом оба напряжения были равны, то этот центр удалился бы в бесконечную даль, и оба шнура бежали бы вперед (рис. 35) по направлению перпендикулярному прямой, соединяющей центры.

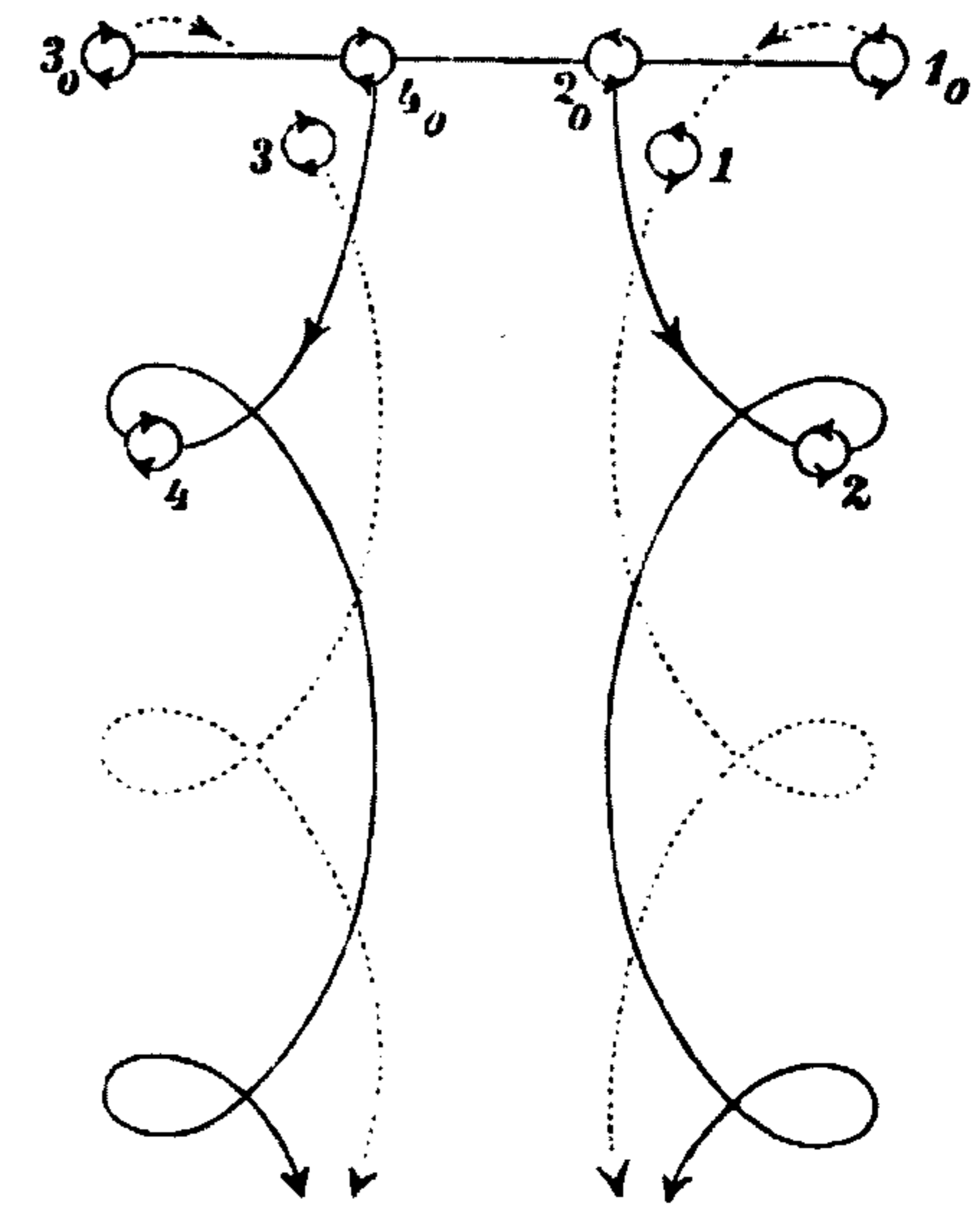


Рис. 37.

На рис. 36 представлены траектории (пути) трех вихревых шнуров, из которых (1) и (2) вращаются против часовой стрелки, а (3) по часовой стрелке. На рис. 37 представлено движение четырех прямых параллельных вихревых шнуров, равных по напряжению. При этом шнуры (3) и (4) вращаются по часовой стрелке, а шнуры (1) и (2) — против нее.



Установленное нами понятие о прямом вихревом шнуре, заключенном в весьма широком цилиндрическом сосуде, распространяется на вихревые шнуры, зародившиеся в какой угодно массе жидкости. При этом вихревые шнуры могут разыскиваться с помощью составления циркуляций по замкнутым контурам, как это было пояснено для случая прямолинейного шнура. Если рассматривается идеальная жидкость без трения, находящаяся под действием сил, удовлетворяющих закону сохранения энергии, то для нее имеет место следующая замечательная теорема: циркуляция скорости, определенная для всякого замкнутого контура в жидкости, не изменяется с передвижением частичек жидкости, образующих контур. Из этой теоремы следует, что частицы жидкости, образующие вихревой шнур, все время движения будут образовывать вихревой шнур с тем же напряжением вихря, и никакого нового вихревого шнура в жидкости не может образоваться. Действительно, разыскивая вихревой шнур с помощью составления циркуляций по замкнутым контурам, мы будем находить по всем контурам, которые сначала не охватывали шнура, циркуляцию, равную нулю, а для всех контуров, охватывающих шнур, — прежнюю циркуляцию; из этого заключим, что внутри последних проходит вихревой шнур прежнего напряжения.

Из упомянутой теоремы следует также, что вихревой шнур все время движения либо будет лежать своими концами на границах жидкости (на стенках сосуда или на свободной поверхности), либо будет оставаться замкнутым. В самом деле, для того, чтобы сойти со стенок сосуда, основание вихря должно было бы уменьшиться в размерах до нуля; а так как циркуляция скорости по контуру основания должна оставаться неизменной, то схождение потребовало бы, чтобы скорость крутящейся жидкости при подошве шнура возросла до бесконечности.

Гидродинамическое давление жидкости уменьшается при возрастании скорости; поэтому, при уменьшении основания вихря на стенке сосуда, будет быстро уменьшаться давление в этом месте, и остальная масса жидкости будет надавливать на частицы конца вихревого шнура и препятствовать их схождению со стенки. Вихревой шнур, так сказать, присасывается своими концами к стенкам сосуда. Если конец шнура лежит на свободной поверхности, то подобное присасывание можно заметить по воронке, образующейся на свободной поверхности при подошве шнура.

Если концы вихревого шнура не лежат на границах жидкости, то они должны быть между собою сомкнуты, и таким образом по-

лучается замкнутый вихревой шнур, — такой, в котором, так сказать, оба конца присасываются друг к другу.

Самый простой вид замкнутого вихревого шнура представляет нам вихревое кольцо, представленное на рис. 38. Все частицы жидкости, лежащие вне кольца, движутся при этом по замкнутым кривым, проходящим сквозь кольцо, так что циркуляция скорости по всем этим кривым одинакова и равна циркуляции скорости на контуре перпендикулярного сечения кольца; переходя же во внутрь кольца, мы будем получать для траекторий его частичек различные циркуляции. Скорости точек жидкости самые большие на поверхности кольца; они уменьшаются по мере удаления от этой поверхности внутрь кольца и равны нулю на некоторой осевой линии; они уменьшаются также и по мере удаления от кольца в окружающую его массу жидкости. Для точек жидкости, значительно удаленных от кольца, скорости обратно пропорциональны кубам расстояния от кольца.

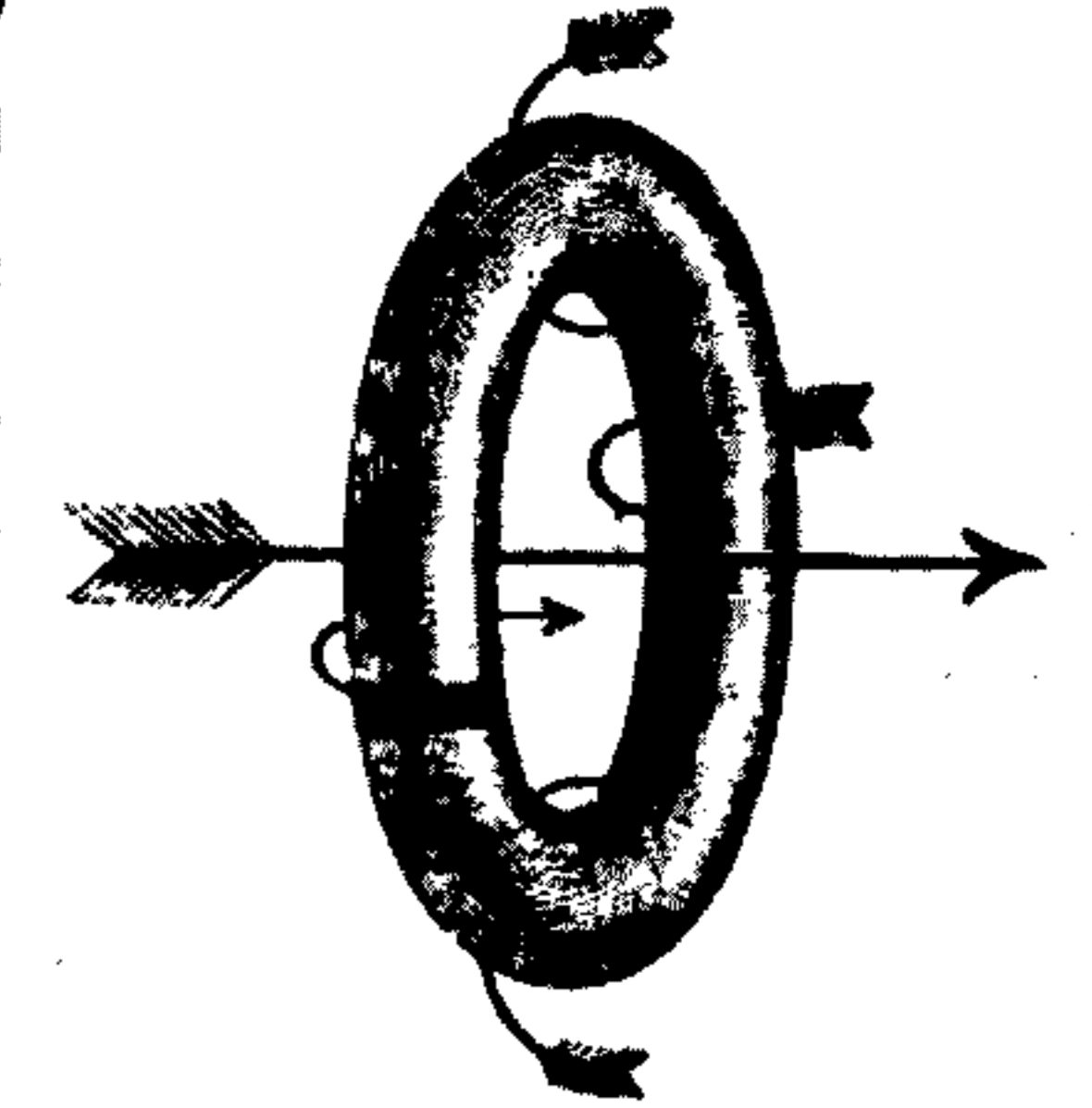


Рис. 38.

Мы видели, что зародившиеся в жидкой массе два прямые параллельные шнура, около которых жидкость крутится с равными напряжениями вихря в противоположные стороны, будут бежать по направлению, перпендикулярному к проведенной через них плоскости. По той же причине вихревое кольцо не будет оставаться неподвижным, а будет бежать по направлению, перпендикулярному к плоскости кольца, в ту сторону, в которую жидкость вытекает из кольца. Мы видим на рис. 38, что частицы жидкой массы, движущиеся по верхним замкнутым траекториям, будут надавливать на нижний край кольца и двигать его вправо; точно также частицы жидкой массы, движущиеся по нижним замкнутым траекториям, будут надавливать на верхний край кольца и тоже двигать его вправо. Все кольцо будет передвигаться равномерно в правую сторону, перенося за собою крутящуюся около него жидкость. Это движение будет тем быстрее, чем более напряжение вихря и чем менее размер кольца. <sup>1)</sup>

Мы сказали, что внутри идеальной жидкой массы зародившиеся вихревые шнуры должны всегда сохраняться, и новых шнуров обра-

<sup>1)</sup> Как доказал Love в работе «Wave Motions with Discontinuities at Wave Fronts» (1903), вихревые кольца при известных условиях движутся со скоростью света. (Прим. ред.)



зоваться не может; а между тем в природе мы часто видим зарождение и погасание вихрей. Это происходит от того, что наши вода и воздух обладают некоторою степенью вязкости, вследствие которой вышеприведенные теоретические результаты несколько видоизменяются. С одной стороны, вихри могут зарождаться (преимущественно в тех местах, в которых происходит скольжение друг по другу двух слоев жидкости с различными скоростями); с другой стороны, зарождавшиеся вихри не сохраняются, а постепенно потухают.

Гельмгольц в своем вышеупомянутом сочинении указывает на простой способ образования вихревых полукольцев при поверхности воды. Проведя полупогруженной ложечкой в сосуде воды, или

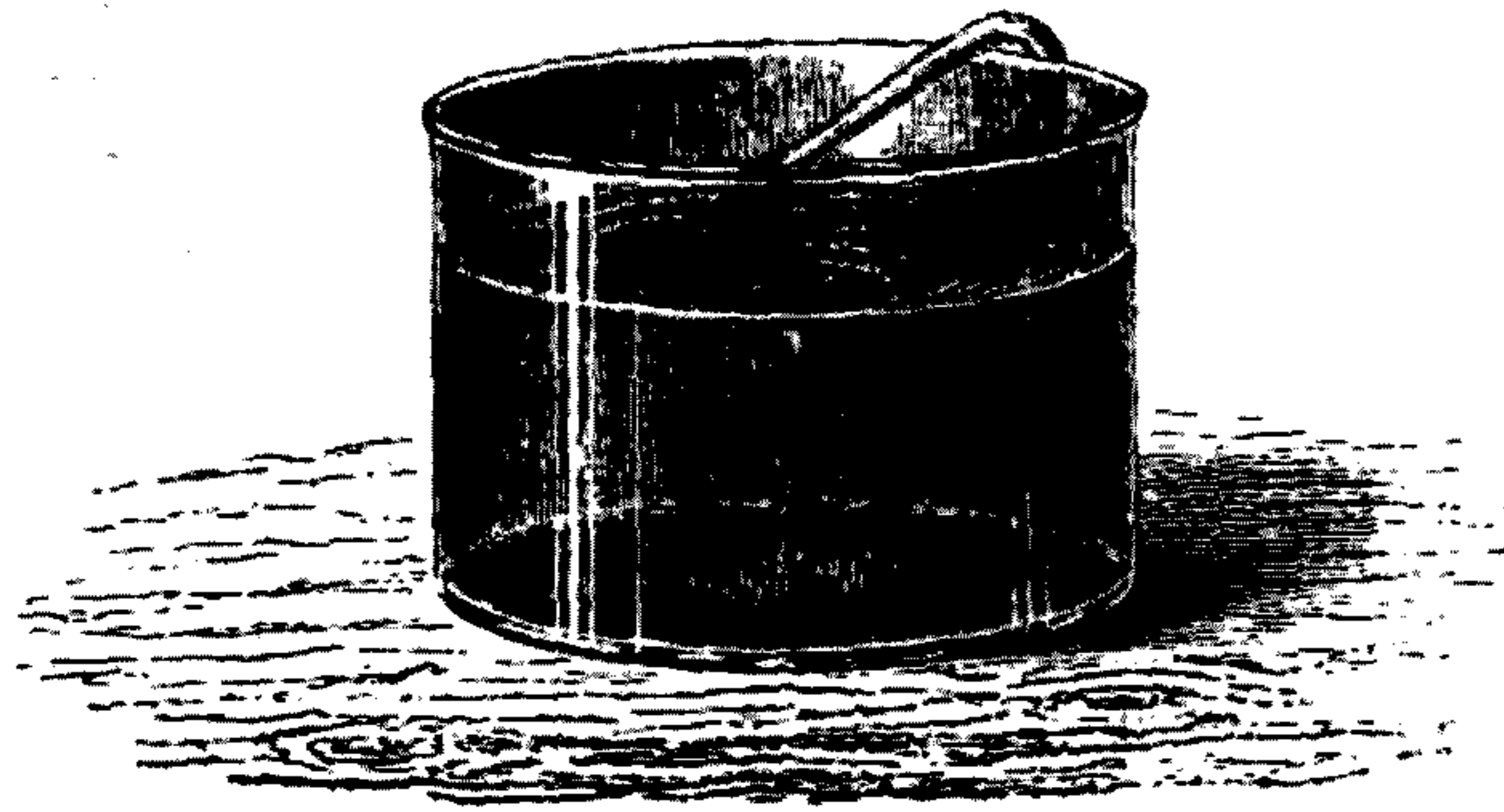


Рис. 39.

веслом с лодки по воде, мы замечаем образование двух воронок, которые бегут вперед и вращаются в противоположные стороны. Это воронки суть концы полукруглого вихревого шнура, образовавшиеся от того, что ложка или весло, унося за собою жидкую массу, заставляет ее скользить по жидкости, прилегающей с боков. Эта масса трением захватывает прилегающую жидкость и увлекает ее в вихревое движение.

Образование прямых вихрей Гельмгольц демонстрировал одним прекрасным опытом, описанным в его речи о вихревых бурях. Мы здесь повторим этот опыт. В дне цилиндрического сосуда (рис. 39) сделано небольшое отверстие, замкнутое пробкой. Сосуд наполнен водою. Посредством струй воздуха, направляемых трубкою на один край свободной поверхности воды, приводим жидкость в медленное вращательное движение. Жидкость начинает истекать из отверстия, подходя от краев сосуда к его оси. Так как циркуляции скорости по окружностям, проведенным из точки на оси цилиндра через

одни и те же частицы жидкости, не должны изменяться со временем, то с уменьшением радиусов этих окружностей будет возрастать скорость частиц жидкости. Вращение жидкости по мере приближения к оси будет становиться все быстрее и быстрее, и мы заметим резко образовавшийся вихрь, над которым появится воронка, все более и более углубляющаяся.

Я покажу еще образование вихря посредством быстро вращающегося диска. На рис. 40 представлен прибор проф. Ф. Н. Шведова. Через дно стеклянного цилиндрического сосуда проведена в сальнике вертикальная ось, оканчивающаяся небольшим диском.

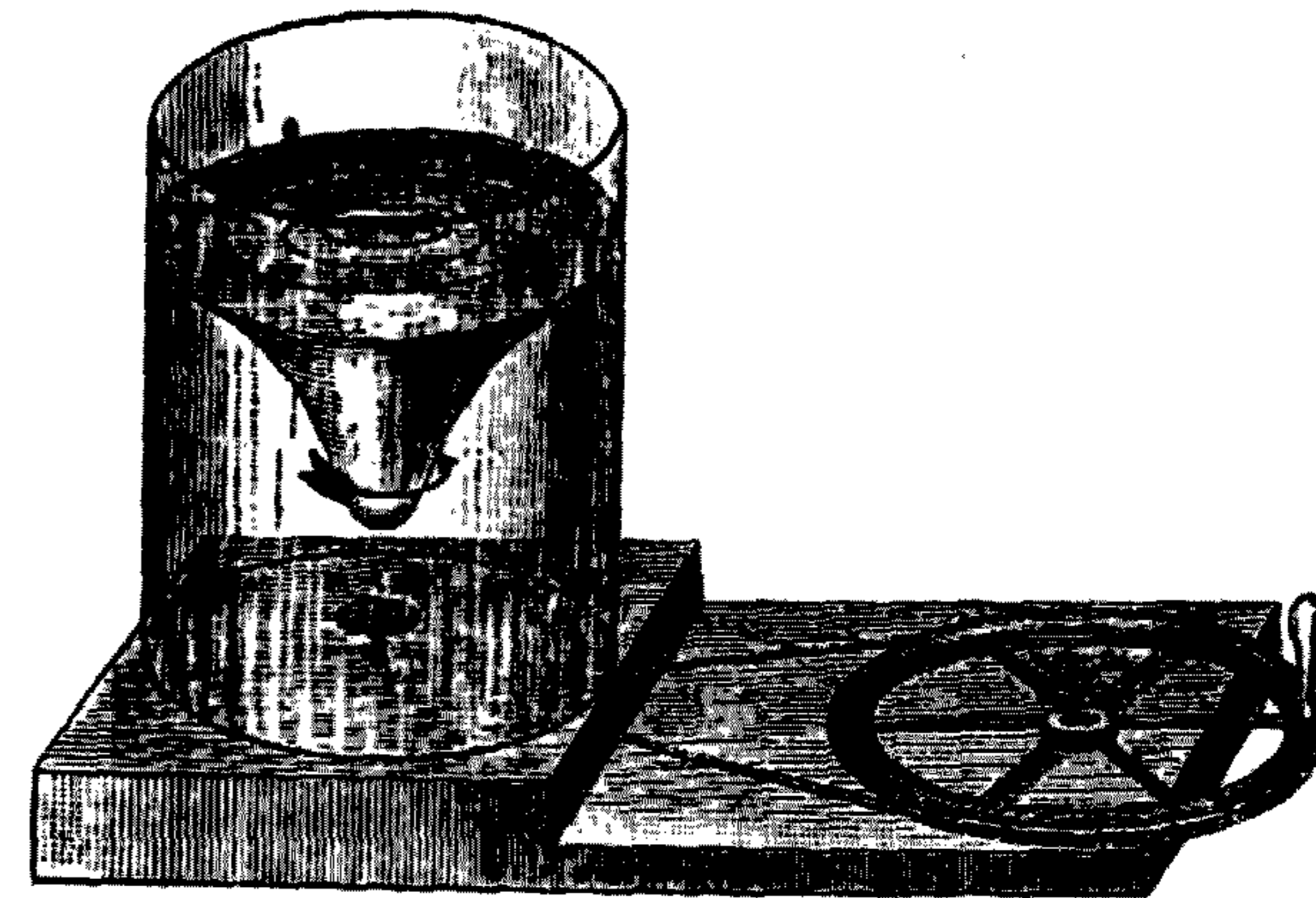


Рис. 40.

Эта ось посредством бесконечного ремня может быть приведена в быстрое вращение. В сосуд наливаются вода и масло, которое всплывает поверх воды. Вращая диск, мы заметим, что вода постепенно приходит во вращение и образует над диском вихревой шнур, который замечается по воронке на поверхности раздела воды и масла. Эта воронка заполняется маслом, которое в виде нисходящего смерча спускается к диску. В тот момент, когда масло приходит в соприкосновение с диском, вся его масса разбрасывается по воде.

Еще более интересен способ образования прямых вихрей, предложенный Вейером. Воздух, находящийся над поверхностью воды, приводят во вращение с помощью особой быстро вращающейся крылатки, помещенной на некоторой высоте над водою (рис. 41). Воздушный вихрь захватывает по своей оси воду и поднимает ее в виде восходящего смерча до самой крылатки.



Вихревые кольца в воздухе демонстрируются с помощью имеющегося здесь прибора Тэта. Он состоит из ящика (рис. 42), задняя сторона которого затянута кожей, а в передней сделано отверстие с острыми краями. Форму отверстия можно по желанию (пользуясь

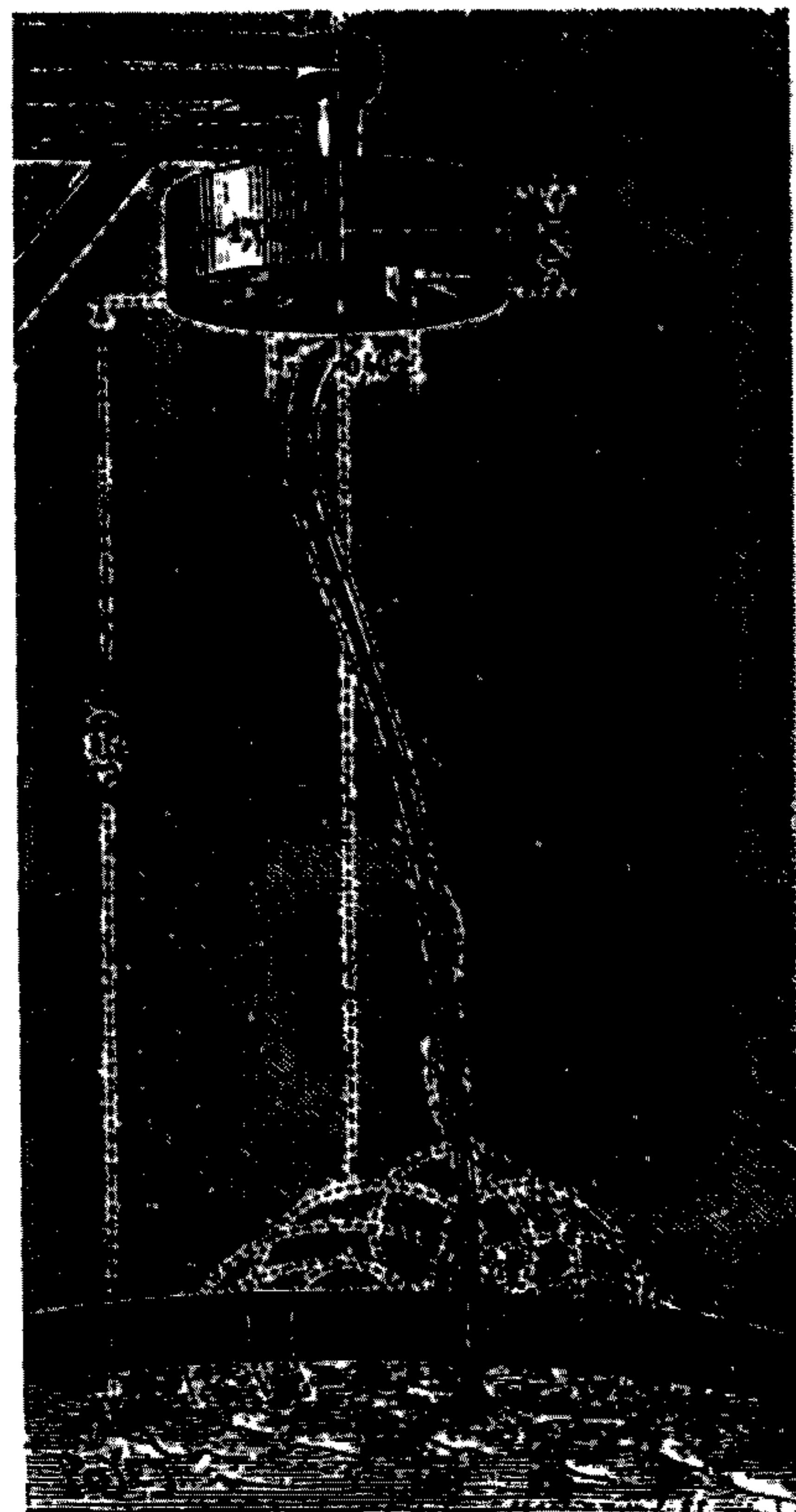


Рис. 41.

вставными пластинками) делать круглую, эллиптическую, четырехугольную и т. д. В ящик ставят два сосуда: в один наливают соляной кислоты, а в другой нашатырного спирта. Вследствие этого в нем образуется густой туман от подвешенных частичек хлористого аммония (нашатыря). Ударяя рукою или деревянным молотком по натянутой коже, мы быстро выталкиваем из ящика массу воздуха вместе с нашатырным туманом. Эта масса, скользя посреди окружающего неподвижного воздуха, увлекает его в вихревое движение, а сама закручивается в вихревое кольцо, которое будет хорошо заметно по наполняющему его туману. При этом понятно, что воздух около кольца будет вращаться так, что наблюдатель, глядящий на отверстие прибора, видит массу воздуха, выбегающую к нему из середины кольца. Из этого следует, что образовавшееся кольцо должно двигаться от отверстия прибора. Мы показали на рисунках, каково будет взаимодействие нескольких прямолинейных вихрей. Следя за кольцами, выбегающими из прибора Тэта, вы можете усмотреть случаи взаимодействия друг на друга вихревых колец. Вы видите, что кольца, подбегающие друг к другу боком, взаимно отталкиваются и проходят одно сквозь другое. Этот интересный случай подробно исследован теоретически Гельмгольцем. Он показал, что заднее кольцо должно уменьшаться в размерах и увеличивать свою

скорость, а переднее кольцо должно увеличиваться в размерах и уменьшать свою скорость. Это будет продолжаться до тех пор, пока заднее кольцо не пройдет сквозь переднее. После того переднее кольцо делается задним, и явление повторяется. К сожалению, такую игру двух колец приходится наблюдать редко, только при особенно удачном их образовании.

То обстоятельство, что кольцо несет быстро крутящийся около него воздух, мы можем сейчас же обнаружить, направляя его на зажженную свечу. Вы видите, что свеча, стоящая на большом расстоянии от прибора, потухает всякий раз, как пламя ее задевается кольцом. Я помню, что во времена моей юности я задумался над

обстоятельство, что кольцо несет быстро крутящийся около него воздух, мы можем сейчас же обнаружить, направляя его на зажженную свечу. Вы видите, что свеча, стоящая на большом расстоянии от прибора, потухает всякий раз, как пламя ее задевается кольцом. Я помню, что во времена моей юности я задумался над

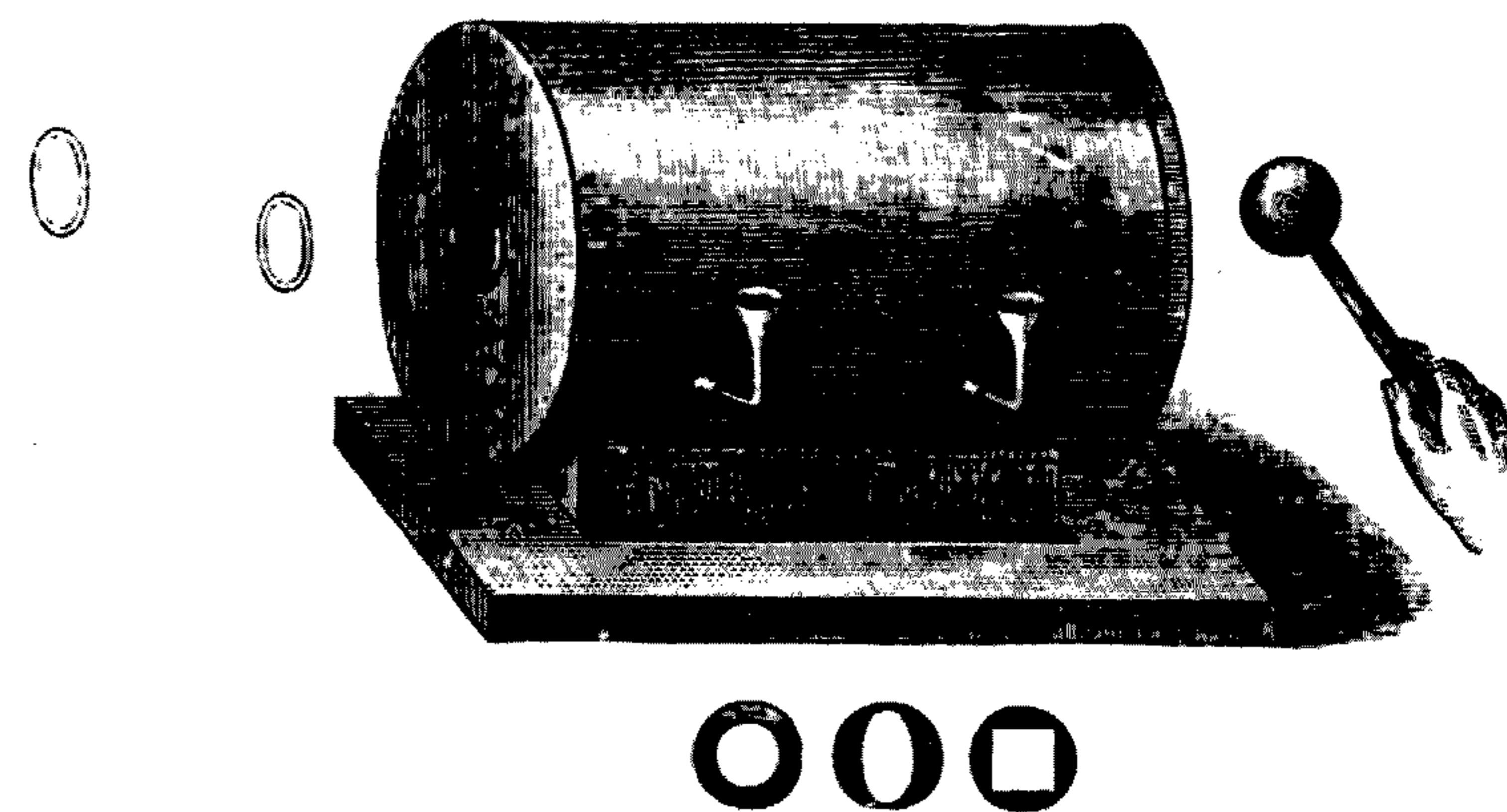


Рис. 42.

объяснением причины, вследствие которой, стреляя пистолем из пистолета, можно тушить свечу на большом расстоянии. Теперь для меня ясно, отчего это происходит: из дула пистолета выбегает вихревое кольцо, которое может перемещаться довольно далеко, не меняясь.

До сих пор кольца выпускались нами из круглого отверстия. Попробуем теперь образовать их из отверстия эллиптического и квадратного. Мы видим, что при этом кольца не сохраняют формы отверстия, но колеблются, стремясь перейти в круглое кольцо, которое является таким образом единственной устойчивой формой замкнутого вихревого шнура.

Рассмотрим теперь влияние на вихревые кольца посторонних предметов. Подводя к движущемуся кольцу твердые тела с боку, мы видим, что они отталкивают кольцо. Но если кольцо бежит на параллельную его плоскости неподвижную плоскость, то оно,



подходя к ней, все более и более увеличивается в размерах, так сказать, растекается по плоскости. Если мы дадим кольцу набежать на нож, плоскость которого проходит через ось кольца, то последнее разрежется ножом на два полукольца, концы которых будут скользить по поверхности ножа; но, пройдя эту поверхность, концы опять сомкнутся, и кольцо восстановится.

Неизменяемость и неразрушимость вихревых колец в идеальной жидкости навела В. Томсона на остроумную гипотезу вихревых атомов. Предположив, что все пространство вселенной наполнено такой жидкостью, он принимает, что в этой жидкости существует бесчисленное множество бесконечно-малых замкнутых вихрей, которые представляют вечные и неизменные атомы вещества. Взаимодействуя друг на друга, эти замкнутые вихри соединяются в группы и образуют молекулы и т. д.

Кроме дымных колец в воздухе, можно еще наблюдать воздушные кольца в воде. Это интересное явление, кажущееся на первый взгляд парадоксальным, весьма просто объясняется тем, что вследствие центробежной силы значительно понижается давление на оси вихревого кольца. Если при образовании вихревого кольца мы введем на воду несколько пузырьков воздуха, то они сейчас же заберутся в то место жидкости, где давление самое малое, т. е. на ось кольца, и будут там удерживаться все время, пока кольцо движется вдоль имеющейся массы воды, несмотря на то, что воздух в 800 раз легче воды.

Я покажу здесь прибор для образования воздушных колец в воде, который представляет видоизменение прибора проф. Осборна Рейнольдса. Здесь имеется (рис. 43) большая стеклянная ванна, наполненная водою; в нее погружена изогнутая под прямым углом широкая стеклянная трубка. На верхний конец трубки, выходящей из воды, надевают рукав от резинового шарика, посредством которого можно вгонять в трубку воздух и выталкивать из нее воду. Быстро сдавливая шарик, выталкиваем из горизонтального колена трубки столбик воды и делаем это так, чтобы воздух достиг почти до нижнего конца трубки, но не вышел из нее в большом количестве. Колонна воды, выбежав в спокойную окружающую жидкость, закручивается в вихревое кольцо. При этом, так как вместе с водою будет вытолкнуто несколько пузырьков воздуха, то они, разбившись на мелкие пузырьки, расположатся по оси кольца. Вследствие этих пузырьков вихревое кольцо будет хорошо заметно: оно будет образовано как бы из блестящих зерен бисера. Пробегая

вдоль всей ванны, кольца ударяются в противоположную стенку ее и здесь, расширяясь, пропадают.

Мы можем с помощью нашего прибора отчетливо демонстрировать отражение колец от свободной поверхности воды. Для этого стоит только повернуть трубку, чтобы она направилась своим нижним концом немного вверх. Кольцо, подбежав к свободной поверхности жидкости, от нее отражается, при чем угол падения равен углу отражения.

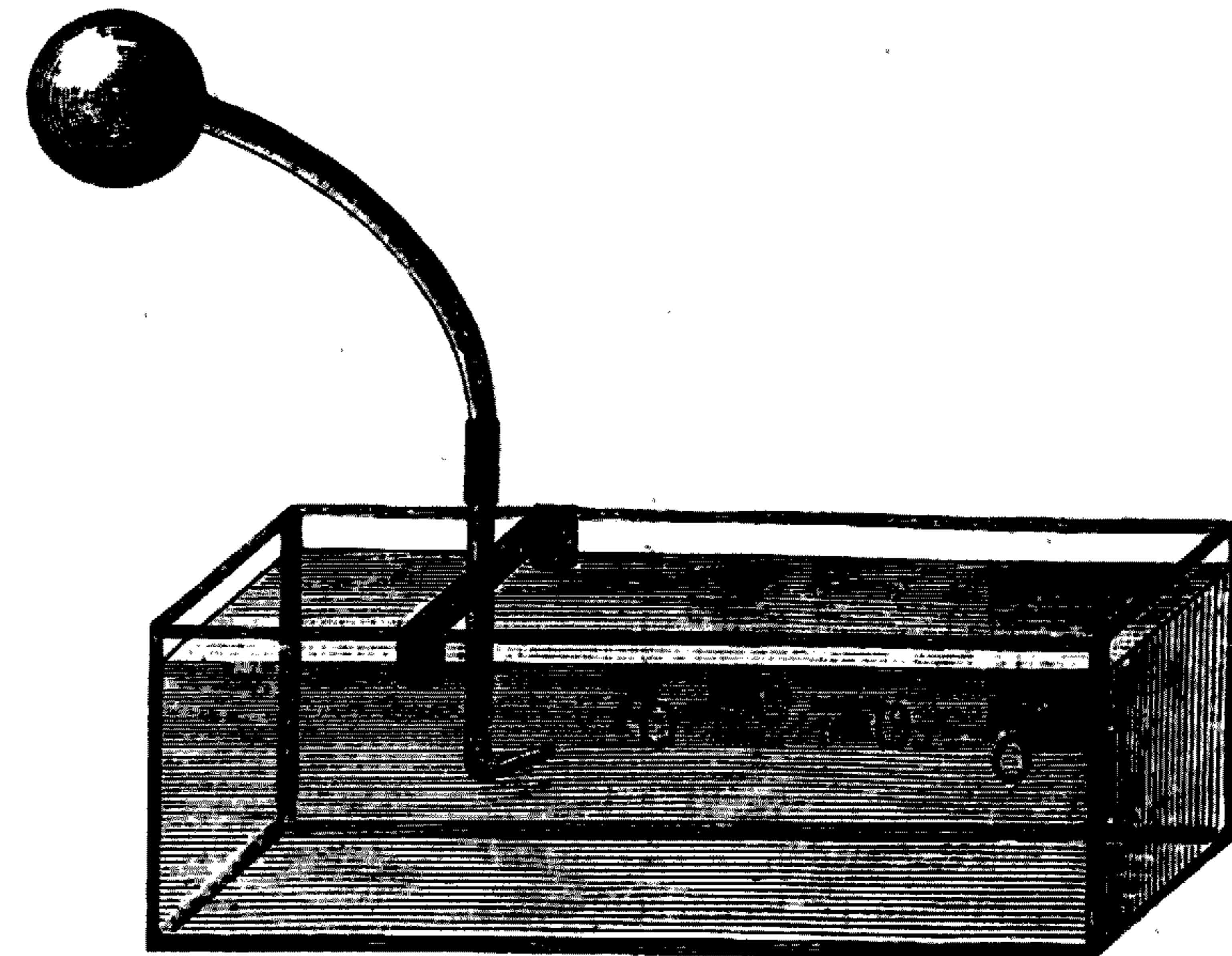


Рис. 43.

Так как действительные жидкости обладают вязкостью и трутся о стенки тех сосудов, в которых они движутся, то они при своем движении постоянно заполняются вихревыми шнурами. Гельмгольц показал, что жидкую массу во всяком воображаемом движении можно рассматривать, как непрерывно заполненную вихревыми шнурами, и дал средства исследовать движения этих шнуров.

Мы упомянули, что можно образовать вихревой шнур, проводя ложечкой по воде. Предположим, что разрез ложечки представляет стороны некоторого угла (рис. 44). Вместо того, чтобы двигать ложечку, можно держать ее неподвижно и заставить воду на нее набегать. Вникнем подробнее в причину, вследствие которой при этом образуются вихревые шнуры. Струи жидкости, обегая кон-



тур начерченного угла, будут сходиться с его углов с некоторою скоростью; жидкость же, лежащая за углом, будет оставаться почти неподвижной. Вследствие этого образуются поверхности раздела, по которым будет отделяться бегущая жидкость от неподвижной. На этих поверхностях в жидкости, обладающей некоторою степенью вязкости, зародятся вихревые шнуры, сечения которых отмечены на

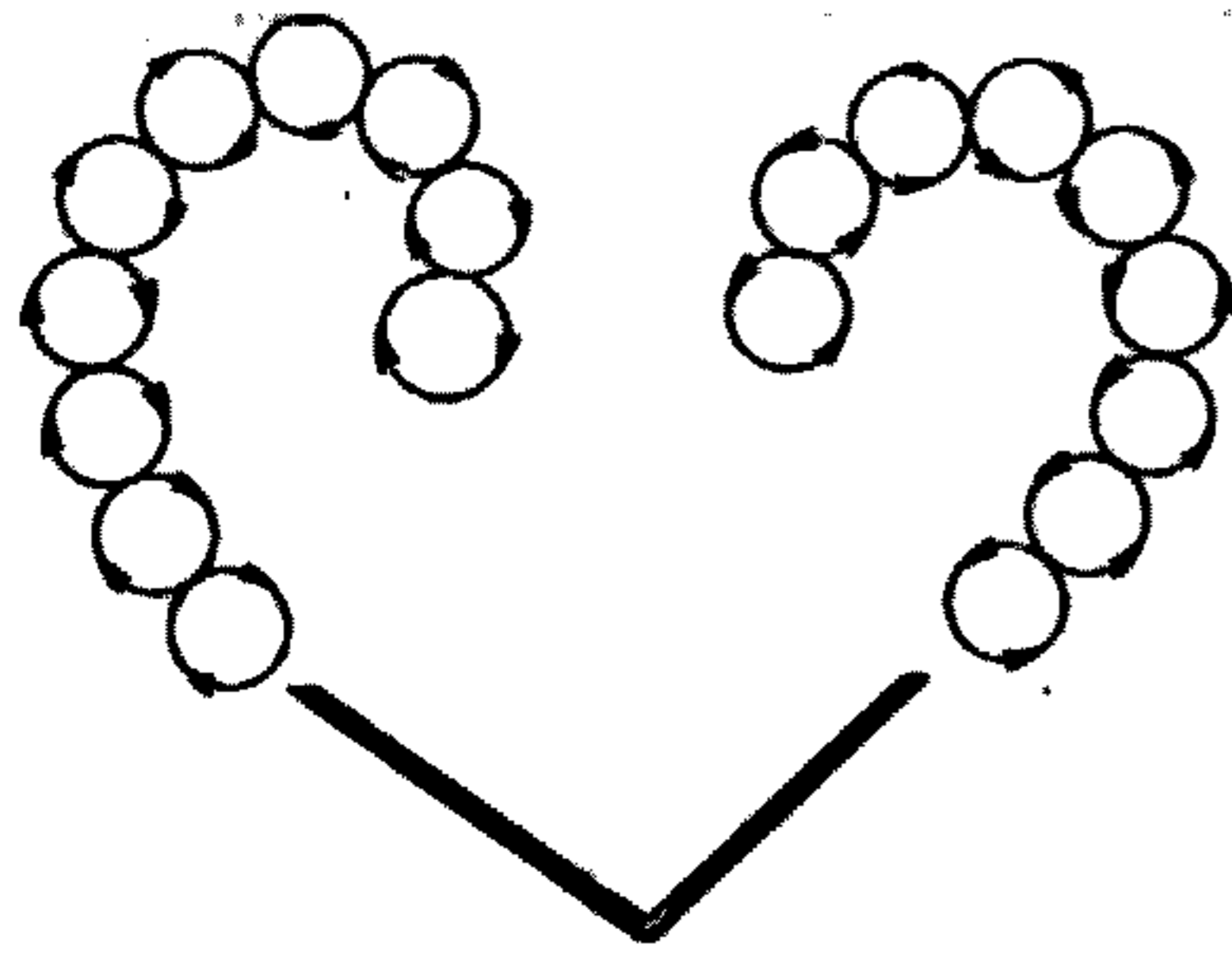


Рис. 44.

рисунке кружками. Эти шнуры закручиваются в те два вихря, которые мы замечаем за ложечкой в виде двух воронок.

Эти рассуждения показывают, как важно для гидродинамики исследовать движения жидкости, сопровождающиеся образованием поверхностей раздела. Сначала не представлялось возможным приступить к этой трудной задаче.

Гельмгольцу первому пришла мысль, могущая послужить для разрешения подобных вопросов. Он пояснил свою идею, определил форму струи, вбегающей в пространство, заключенное между двумя стенками, из сосуда, окружающего эти стенки. Статья Гельмгольца об этом предмете заключает в себе всего десяток страниц. Он, так сказать, только наметил путь исследования, по которому пошли Кирхгоф, лорд Рейли, Фохт и многие другие ученые, окончательно разработавшие решение вопроса.

## 2. О ВИХРЕВЫХ АТОМАХ. <sup>1)</sup>

ВИЛЬЯМ ТОМСОН КЕЛЬВИН.

Отметив замечательное открытие Гельмгольца<sup>2)</sup> о законе вихревого движения в совершенной жидкости, т. е. в жидкости,

<sup>1)</sup> Сообщено автором после прочтения в „Королевском обществе“ Эдинбурга. Напечатано в „Philosophical Magazine“ 1867 г., V. 34. Перевод Н. М. Лихтейма, примечания З. Цейтлина. Точный перевод заглавия статьи („On vortex atoms“) будет: „Об атомах, как вихревых шнурах“. Vortex — вихревой шнур, состоящий из вихревых нитей.

<sup>2)</sup> Это открытие изложено Гельмгольцем в работе „Об интегралах уравнений гидродинамики, соответствующих вихревым движениям“ (Crelle-Borchardt, Journal für die reine und angewandte Mathematik, Bd. LV, S. 25—55, 1858. Русский перевод С. А. Чаплыгина, Москва 1902 г.: „Два исследования по гидродинамике“).

совершенно лишенной вязкости (или жидкого трения), автор настоящей статьи указал, что это открытие неизбежно внушает мысль, что кольца Гельмгольца единственно истинные атомы. Единственным предположением, повидимому, оправдывающим чудовищное допущение бесконечно твердых (strong) и бесконечно неупругих (rigid) частей материи, существование которых утверждается, как вероятная гипотеза, некоторыми из величайших современных химиков в их беглых вступительных замечаниях, является, требуемое Лукрецием и принятое Ньютоном, повидимому, необходимое объяснение неизменных отличительных качеств разных родов материи. Но Гельмгольц доказал абсолютно неизменное качество движения части совершенной жидкости, в которой однажды вызвано особого рода движение, которое он называет вихревым — (Wirbelbewegung). Таким образом всякая часть совершенной жидкости, имеющая вихревое движение, обладает особенностью атомов Лукреция — вечным специфическим качеством. Создать или разрушить вихревое движение в совершенной жидкости может только акт творческой силы. <sup>1)</sup> Атом Лукреция не объясняет никаких свойств материи, не приписывая их самому атому. Так, например, „столкновение атомов“, как оно

<sup>1)</sup> Первое доказательство закона сохранения вихревого движения было дано Коши („Mémoire sur la théorie des Ondes“. Mém. de l'Acad. Royal des Sciences, I, 1827), другое Стоксом (Camb. Trans., 8, 1845), который вместе с тем критически обозрел историю проблемы Лагранжа о движении с так называемым „потенциалом скоростей“ (не вихревом). Доказательство Стокса было развито Томсоном („On vortex motion, Trans. of the Royal Soc. Edin. Vol. 25, 1869). Имеется также доказательство Кирхгофа, изложенное в его „Механике“. Необходимо отметить, что все эти доказательства относятся к так называемой „совершенной (идеальной) жидкости“. Идеальная жидкость гидродинамики это, согласно определению Томсона („On vortex motion“), — „масса, непрерывно заполняющая пространство, смежные части которой везде давят друг на друга в точности по направлению перпендикуляра к поверхности, разделяющей эти части“. Последнее условие означает абсолютное отсутствие трения. Обратим внимание читателя на то, что евклидово пространство, рассматриваемое как физическое тело, является однородной, непрерывной, т. е. абсолютно несжимаемой „жидкостью“, но в этой „жидкости“ мы наблюдаем процессы „трения“, которыми и объясняется нарушение закона Гельмгольца в реальных телах природы. Это доказывает, что теория Гельмгольца еще далека от приблизительного даже охвата действительности. Подробно об этом — в прилагаемом к статье Томсона очерке развития вихревой теории материи.

Основы вихревой теории вместе с историческими указаниями хорошо изложены у Ламба (Hydrodynamik), в руководстве Винкельмана (статья Ф. Ауэрбаха) и книге Пуанкаре „Théorie des tourbillons“.



хорошо названо, выдвигалось новейшими последователями Лукреция для объяснения упругости газов. Всякое другое свойство материи равным образом требовало допущения специфических сил, свойственных атому. Одинаково легко (и также невероятно, если не более того) допустить какие-либо специфические силы в части материи, обладающей вихревым движением, как и в твердой неделимой материи. Поэтому атом Лукреция прежде всего не имеет никакого преимущества перед атомом Гельмгольца. Но великолепный опыт с кольцами дыма, на котором автор недавно имел удовольствие присутствовать в аудитории профессора Тэта, сохранил одно из допущений, требуемых для объяснения свойств материи на основании гипотезы, что все тела состоят из вихревых атомов в совершенно однородной жидкости. Два кольца дыма несколько раз отскакивали косвенно друг от друга, сильно потрясываемые действием толчка. Результат был весьма подобен наблюдаемому в двух больших резиновых кольцах, ударяющих друг друга в воздухе. Упругость каждого кольца дыма, казалось, недалеко от того совершенства, какого можно ожидать в твердом резиновом кольце такой же формы, и из которого мы заключаем о вязкости резины. Конечно, кинетическая упругость формы есть совершенная упругость вихревых колец в совершенной жидкости. По крайней мере это такое же хорошее начало, как и „столкновение атомов“ для объяснения упругости газов. Вероятно, прекрасные исследования Д. Бернулли, Герапата, Джоуля, Кренига, Клаузиуса и Максвелла о разных термодинамических свойствах газов могут иметь все те же положительные допущения, которые авторы принуждены были сделать о взаимных силах между двумя атомами и о кинетической энергии, приобретенной индивидуальными атомами или молекулами; но объяснение посредством вихревых колец не предполагает другого свойства в материи, движение которой образует кольца, кроме инерции и несжимаемого наполнения пространства. Полное математическое исследование взаимодействия между двумя вихревыми кольцами данных величин и скоростей, проходящими друг возле друга по каким-либо двум линиям в таком направлении, что они никогда не могут приблизиться друг к другу более, чем на кратную величину диаметра каждого, — вполне разрешимая математическая задача; и новизна наблюдаемых обстоятельств представляет трудности удивительного свойства. Ее решение станет основанием предложенной новой кинетической теории газов. Возможность основать теорию упругих твердых и жидких тел на динамике более сплоченных вихревых атомов

может быть предположена с большим основанием. В связи с этим предположением можно заметить, что самое заглавие записки Ранкина „О молекулярных вихрях“, сообщенной Королевскому обществу Эдинбурга в 1849 и 1850 гг., было знаменательным шагом в физической теории.

Королевскому обществу были представлены диаграммы и проводочные модели для иллюстрации связанных и сплетенных вихревых атомов, разнообразие которых бесконечно больше, чем достаточно для объяснения разновидностей и видоизменений известных простых тел и их взаимного сродства. Надо заметить, что два кольцевые атома, соединенные вместе или в одно целое, связанное каким-либо образом своими встречными концами, составляет систему, которая хотя может быть изменена в форме, никогда не может уклониться от своей особенной кратной непрерывности, так как невозможно для материи на какой-либо линии вихревого движения пройти через линию какой-либо другой материи в таком же движении или какую-либо другую часть ее собственной линии. В самом деле, замкнутая линия вихревого ядра буквально неделима каким-либо действием, происходящим из вихревого движения.<sup>1)</sup>

Автор обращал внимание на весьма важное свойство вихревого атома в отношении к знаменитому ныне спектральному анализу, практически установленному открытиями и работами Кирхгофа и Бунзена. Динамическая теория этого предмета, которую профессор Стокс объяснил автору настоящей записки до сентября 1852 г., и которую он излагал на своих лекциях в Глазговском университете, начиная с этого времени, требовала, чтобы последний состав простых тел имел один или более периодов колебаний, какие имеет струнный инструмент из одной или более струн или упругое твердое тело,

<sup>1)</sup> Эти абсолютные утверждения Томсона являются метафизическими абстракциями, рисуемыми на самом деле лишь основную „тенденцию“ вихревых движений. Н а d a t a г d доказал, например, что ударные волны могут вызвать вихревое движение и в идеальной жидкости (см. C. R. 136. 299. 1903 г.). I. R. S c h ü t z (Wied. Ann. 56. 144. 1895), основываясь на том, что в воде вязкость не играет почти роли, а вихревое движение уклоняется от гидродинамической теории, пришел к заключению, что законы Гельмгольца имеют силу только при совершенном термодинамическом равновесии. Сам Гельмгольц в работе „О прерывном движении жидкости“ указывает, что „различного рода, странные, прерывного характера неправильности, с которыми, вероятно, приходилось бороться каждому предпринимавшему наблюдения над движениями жидкости, не могли быть объяснены даже и трением, действующим во всяком случае непрерывно и равномерно.



состоящее из одного или более камертонов, твердо соединенных. Допускать такое свойство в атоме Лукреция значит в то же время придавать ему ту самую гибкость и упругость, для объяснения которых, как они проявляются в сложных телах, атомическое строение и было первоначально допущено. Таким образом, если бы гипотеза атомов и пустоты, признанная Лукрецием и его последователями

обходимой для объяснения гибкости и сжимаемости осозаемых твердых и жидких тел, была действительно необходима, то молекула, например, натрия должна бы быть не атомом, а группой атомов с пустым пространством между ними. <sup>1)</sup> Такая молекула не могла бы быть крепкой и прочной, и таким образом она потеряла бы то преимущество, которое и обусловило ее популярность среди философов. Но, как показывают опыты, произведенные перед обществом, вихревой атом имеет совершенно определенные основные виды колебаний, зависящие только от движения, существование которого образует его. Открытие этих основных свойств представляет крайне интересную проблему чистой математики. Даже для простого кольца Гельмгольца аналитические затруднения громадны, но, конечно, далеки от непреодолимости при настоящем состоянии математической науки. Автор этого сообщения до сих пор не пытался разработать вопроса, кроме случая бесконечно длинного, прямого, цилиндрического вихря. Для этого случая он исследовал решения, соответствующие всякой возможной форме бесконечно-малого колебания, и намеревался включить их в математическую записку, которую он надеялся скоро сообщить Королевскому обществу. <sup>2)</sup> Один весьма простой результат, который он мог бы уже теперь установить, — следующий. Пусть дан такой вихрь, имеющий сечение, отличное от точной круговой фигуры на бесконечно-малое гармоническое отклонение порядка  $i$ . <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Современная теория строения атома доказала, что это именно так. Подтверждает ли это значение вихревой теории? Да, если ее рассматривать, как точное изображение, действительности, „истину в конечной инстанции. Нет, если вихревую теорию рассматривать как „физическую геометрию“, т. е. науку, рисующую основные линии явлений природы, „детали“ механизма природы: механизм может быть очень сложен, детали же всегда просты. Об этом ниже.

<sup>2)</sup> Математическая теория колебания цилиндрического вихря была опубликована Томсоном лишь в 1880 г. („Vibrations of a cylindrical Vortex“. Proc. of R. S. Ed. 1880 г. См. V том соч. Томсона).

<sup>3)</sup> Для понимания нижеследующего необходимо сделать несколько пояснительных замечаний. Вообразим окружность радиуса  $R_0$ . Пусть эта окружность деформирована так, что точка с полярными координатами  $R_0$  и  $\alpha_0$  пе-

Эта форма будет двигаться волнообразно вокруг оси цилиндра в том же направлении, как вращение вихря, с угловой скоростью равной  $\frac{i-1}{i}$  угловой скорости вращения. Отсюда, так как число гребней в целой окружности равно  $i$ , то для гармонического отклонения порядка  $i$  число  $i-1$  периодов колебания соответствует одному периоду обращения вихря. Для случая  $i=1$  здесь нет колебаний, и решение выражает только бесконечно-мало смещенный вихрь с его неизменной круговой формой. Случай  $i=2$  соответствует эллиптической деформации кругового сечения, и потому для него период колебания представляет просто период обращения. Эти результаты, конечно, приложимы к кольцу Гельмгольца, когда диаметр, приблизительно кругового сечения мал сравнительно с диаметром кольца, как это было в кольцах дыма, показанных Обществу. Низшие основные виды двух родов поперечных колебаний кольца, <sup>1)</sup> подобные ко-

решла в течение времени  $dt$  в точку с полярными координатами  $R = R_0 + dR$  и  $\alpha = \alpha_0 + d\alpha$ . Разложим  $R$  в ряд Фурье:  $R = R_0 + \sum A_i \cos i\alpha + \sum B_i \sin i\alpha$ . Уклонение кривой, соответствующее значению  $i$ , называется гармоническим отклонением порядка  $i$ . Анализ вихревого колебания дает для  $A_i$  и  $B_i$  следующие значения:  $A_i = C_0 \sin(1-i)t + C_1$ ;  $B_i = C_0 \cos(1-i)t + C_1$ , где  $C$  — постоянные, а угловая скорость вихря считается равной единице. В целях упрощения предположим, что все коэффициенты ряда Фурье, за исключением  $A_i$  и  $B_i$  равны нулю. Тогда  $R = R_0 + A_i \cos i\alpha + B_i \sin i\alpha = R_0 + C_0 \sin[(1-i)t + i\alpha] = R_0 + C \sin[(i-1)t - i\alpha]$ , если положить  $C_1 = 0$ . Общеизвестно, что подобного рода уравнение означает волнообразное движение со скоростью (угловой):  $\frac{i-1}{i}$ . При  $i=1$ ,  $R = R_0 + A_1 \cos \alpha + B_1 \sin \alpha$  — ур-е окружности с центром  $(A_1, B_1)$ , который неподвижен, так как  $\frac{i-1}{i} = 0$ . При  $i=2$  получаем  $R = R_0 + A_2 \cos 2\alpha + B_2 \sin 2\alpha$  — ур-е эллипса, который вращается с угловой скоростью  $\frac{i-1}{i} = \frac{1}{2}$  угловой скорости вихря.

Так как в эллипсе 2 гребня, то период колебания какой-либо точки равен периоду обращения вихря; точно так же для случая  $i$ ,  $i-1$  периодов колебания равны одному периоду обращения. Подробности у Томсона и в книге Пуанкаре: „Théorie des tourbillons“ (1893 г.); см. также Lamb § 157.

<sup>1)</sup> Из анализа Томсона (см. т. V, стр. 163) вытекает, что в цилиндрическом вихревом шнуре имеют место колебания не только по окружности вихря, но и вдоль его. Кроме того, если в ряде Фурье имеется более двух коэффициентов не равных нулю, то кривая более сложна и складывается из ряда форм, каждая из которых имеет свою скорость. Томсон указывает, что действительные колебания (в дымовых кольцах, например) гораздо быстрее эллиптических.



лебаниям, наблюдавшимся в опытах, должны быть гораздо быстрее эллиптического колебания сечения. Вероятно, колебания, вызывающие воспламенение паров натрия, аналогичны тем, которые представляли кольца дыма. Поэтому, вероятно, что период каждого вихревого вращения атомов паров натрия гораздо меньше  $\frac{1}{525}$  миллионной от миллионной секунды, так как это приблизительно период колебания желтого света натрия. Далее, поскольку этот свет состоит из двух рядов колебаний, одновременных с немного различными периодами, равными приблизительно времени, сейчас установленному, и, насколько можно заметить, с почти равными напряжениями, — атом натрия должен иметь два основных вида колебания с соответственными периодами, вызываемыми теми же силами, которые испытывают атомы в воспламененных парах. Это последнее условие делает вероятным, что соответственные два основных вида приблизительно подобны (а не только разные порядки разных родов, случайно почти совпадающих в их периодах колебания). В приблизительно круглом и однородном диске упругого твердого тела основные виды поперечных колебаний с узловыми делениями на квадраты удовлетворяют оба условия. В приблизительно круглом и однородном кольце упругого твердого тела эти условия выполняются для крутильных (*flexural*) колебаний в его плоскости, а также для поперечных колебаний, перпендикулярных к плоскости. Но круглое вихревое кольцо, имеющее одну часть немного толще другой, не осталось бы в таком виде, но испытывало бы продольные колебания вокруг собственной окружности и не могло бы иметь двух основных видов колебаний, подобных по характеру и приблизительно равных периодов. Вероятно, <sup>1)</sup> то же утверждение может быть практически распространено на всякий атом, состоящий из одного вихревого кольца, как бы оно ни было свернуто и иллюстрировано кольцами моделей, показанных Обществу, состоявших из одной только проволоки и соединенных разными способами. Поэтому кажется вероятным, что атом натрия не может состоять из одной вихревой линии; но он может, очень вероятно, состоять из двух приблизительно равных вихревых колец, проходящих одно через другое подобно двум звеньям цепи. Но достоверно, что пар, состоящий из таких атомов, с соответственными объемами и угловыми скоростями

<sup>1)</sup> [Записка апреля 26, 1867. — Автор имел основание для уверенности, что особенность натрия может быть осуществлена известной конфигурацией одной линии вихревого ядра; эта конфигурация будет описана в математической записке, которую он намерен сообщить Обществу].

в обоих кольцах каждого атома, действовал бы точно так, как воспламенный пар натрия, т. е. удовлетворял бы „характерному спектру“ натрия.

Возможное действие перемены температуры на основные виды колебаний не может быть выяснено без математического исследования, до сих пор не выполненного, и потому мы не можем сказать, что динамическое объяснение, подсказываемое ныне, математически доказано настолько, чтобы включить весьма приблизительно тождество периодов колеблющихся частиц воспламененного

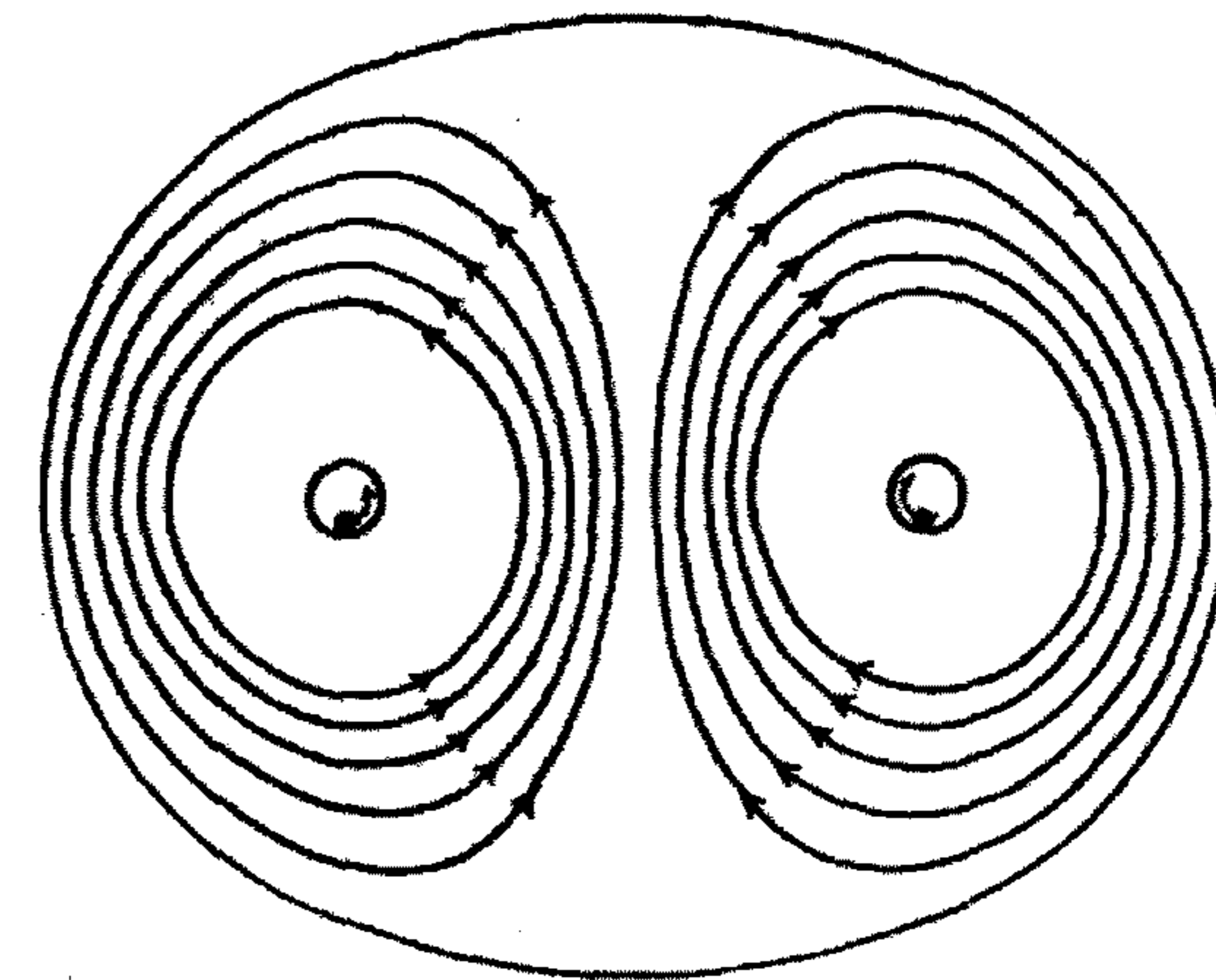


Рис. 45.

пара с периодами соответствующих им основных видов при низшей температуре, при которой пар обнаруживает свою замечательную способность поглощения света натрия.

Весьма замечательное открытие, сделанное Гельмгольцем относительно простого вихревого кольца, состоит в том, что оно всегда движется относительно отдаленных частей жидкости в направлении, перпендикулярном к его плоскости, в сторону, в которую вращательное движение влечет внутренние части кольца. Определение скорости движения, даже приблизительно, для колец, которых радиус сечения мал сравнительно с радиусом оси круга, представило математические трудности, до сих пор не превзойденные. <sup>1)</sup> В коль-

<sup>1)</sup> (См. однако примечание к переводу проф. Тэта записки Гельмгольца (*Phil. Mag.* 1867, vol. XXXIII. Suppl.), где дан результат математического исследования, которое недавно удалось выполнить автору настоящего сообщения). См. т. V, стр. 67, соч. Томсона.



цах дыма, действительно наблюдавшихся, она кажется всегда несколько меньше скорости жидкости вдоль прямой оси через центр кольца; ибо наблюдатель, стоящий в стороне от линии движения кольца, в тот момент, когда плоскость кольца проходит через положение глаза, видит выпуклое <sup>1)</sup> очертание атмосферы дыма впереди кольца. Это выпуклое очертание указывает выступающую поверхность между количеством дыма, увлекаемым вперед, с кольцом в его движении и окружающим воздухом, пропускающим его. Не так легко различить соответственное выпуклое очертание позади кольца, так как неопределенный след дыма обыкновенно остается позади. В совершенной жидкости выступающая поверхность части, увлекаемой вперед, необходимо была бы совершенно симметрична на передней и задней стороне средней плоскости кольца. Движение окружающей жидкости должно быть точно то же, как оно было бы, если бы пространство внутри этой поверхности было занято гладким твердым телом. Но в действительности воздух внутри его находится в состоянии быстрого движения, обращаясь вокруг круглой оси кольца с возрастающей скоростью по окружностям все ближе и ближе к самому кольцу. Условия действительного движения могут быть представлены таким образом: пусть твердый столбик резины с круглым сечением и диаметром малым сравнительно с его длиной будет согнут в кружок, и два его конца скреплены так, что он, представленный самому себе, может удержать круглую форму. Отверстие кольца закроем бесконечно тонкой пластинкой и сообщим этой пластинке импульсивное давление с так распределенным напряжением, чтобы вызвать определенное движение жидкости нижеуказанного характера, и вслед затем пусть пластинка вся расплавится. Это

<sup>1)</sup> Диаграмма точно представляет выпуклое очертание, указанное выше, и линии движения внутренней жидкости, увлекаемой вихрем, в случае двойного вихря, состоящего из двух бесконечно длинных, параллельных, прямых вихрей с одинаковым вращением в противоположных направлениях. Кривые начерчены м-ром Д. М. Фарленом по вычислениям, сделанным им с помощью уравнения системы кривых:  $\frac{y^2}{a} = \frac{2x}{a} \cdot \frac{N+1}{N-1} - \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right)$ , где  $\log_e N = \frac{x+b}{a}$ . Доказательство будет дано в математической записке, которую автор намерен скоро сообщить Королевскому Обществу Эдинбурга.

Вопрос о линиях тока разрабатывался целым рядом лиц. Для случая, приводимого Томсоном, см. Riecke (Gött. Nachr, 1888) и Hicks (Quart. Journ. Math., 17, 1881, стр. 194). Очень ясно задача рассмотрена у Пуанкаре (глава III), который пользуется замечательными электрическими аналогиями. См. также трактат Lamb'a.

движение должно происходить согласно одному из законов Гельмгольца — вдоль тех кривых, которые были бы силовыми линиями, если бы вместо резинового кружка было помещено кольцо электромагнита: <sup>1)</sup> скорости в различных точках должны быть пропорциональны напряжениям магнитных сил в соответственных точках магнитного поля. Движение, как давно известно, будет удовлетворять этому определению и продолжаться в таком виде, если первоначальные скорости в каждой точке пластинки перпендикулярно ее собственной плоскости пропорциональны напряжениям магнитной силы в соответственных точках магнитного поля. Пусть теперь кольцо передвинется перпендикулярно своей плоскости в направлении движения жидкости через середину кольца со скоростью очень малой в сравнении со скоростью жидкости в центре кольца. Большая приблизительно шарообразная часть жидкости будет увлечена вперед с кольцом. Пусть скорость кольца увеличится; объем жидкости, увлекаемой вперед, уменьшится во всех диаметрах, но больше всего по направлению „вперед — назад“ и, таким образом, его форма станет заметно сплюсненной. При возрастании поступательной скорости кольца, эта сплюсненность увеличится, пока вместо вполне выпуклой она станет вогнутой спереди и сзади вокруг обоих концов оси. Если скорость кольца будет увеличиваться до тех пор, пока она станет равна скорости жидкости через центр кольца, то осевое сечение очертания части жидкости, увлекаемой вперед, станет лемнискатой.

<sup>1)</sup> (Т. е. круглый проводник с постоянным электрическим током.) Основные аналогии следующие: Если у нас имеется вихрь силы  $J$  (сила вихря или, точнее, циркуляция, это — произведение двойной угловой скорости на площадь поперечного сечения.  $2\omega \cdot s$ ), то этот вихрь вызывает в точке на расстоянии  $r$  от элемента вихря  $dl$  скорость  $dU$ , которая перпендикулярна к плоскости, образуемой  $r$  и  $dl$  и равна:  $\frac{J \sin \alpha \cdot dl}{4\pi r^2}$ , где  $\alpha$  — угол между  $r$  и  $de$ . Эта формула дает известный закон Био-Савара, при чем  $U$  соответствует магнитному полю, а  $J$  электрическому току.

В электродинамической системе Максвелла мы находим опять-таки поразительную аналогию. Если через  $J$  обозначить силу тока, а через  $H$  магнитное поле, то одно из ур-ий Максвелла гласит (если считать ток смещения равным нулю):  $4\pi J_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}$ ,  $4\pi J_y = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}$ ,  $4\pi J_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}$  и, кроме того,  $\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$ , если в поле нет магнитных масс („источников и стоков“). Если в этих ур-иях заменить  $J$  и  $H$  через вектор угловой скорости (деленный на  $2\pi$ ) и скорость частиц жидкости, то мы получим знаменитые ур-ия Гельмгольца для вихревого движения.



Если кольцо будет увлекаться все время вперед, то часть жидкости, увлекаемая с резиновым кольцом, сама станет кольцеобразной, и относительно кольца движение жидкости будет происходить в обратном направлении через центр. Во всех случаях фигура части жидкости, увлекаемой вперед, и линии движения будут симметричны как относительно оси, так и обеих сторон экваториальной плоскости. Конечно, всякая форма описанного движения может быть произведена или описанным порядком, или первоначально путем сообщения скорости кольцу, а затем приведением жидкости в движение с помощью мгновенной пластинки или одновременным применением обоих первоначальных действий. Все количество требуемого импульса или, как мы можем назвать это, действительный момент движения или просто момент движения представляет сумму интегральных величин импульсов, сообщенных кольцу и пластинке, требуемых для произведения того или другого из двух составляющих целого движения. Теперь, очевидно, что, так как диаметр кольца очень мал в сравнении с диаметром круглой оси, то импульс, сообщенный кольцу, должен быть очень мал в сравнении с импульсом, сообщенным пластинке, если скорость кольца не на много больше скорости центральных частей пластинки. Отсюда, если только скорость, сообщенная кольцу, не так велика, чтобы довести объем жидкости, увлекаемой им вперед, до величины несравнимо большей объема самого твердого кольца, то моменты различных форм движения, рассмотренных нами, превзойдут на незаметные количества момент неподвижного кольца. Величина этого момента легко определяется соответственным применением формул Грина. Таким образом действительный момент в части жидкости, увлекаемой вперед (одинаковый с моментом твердого тела такой же плотности, движущегося с тою же скоростью) вместе с эквивалентом инерции жидкости, допускающей это движение, приблизительно одинаков во всех этих случаях и равен интегралу Грина, выражающему весь первоначальный импульс, сообщенный пластинке. Равенство действительного момента для различных скоростей кольца легко проверить без анализа для скоростей не столь больших, чтобы вызвать заметные отклонения от сферической формы в части жидкости, увлекаемой вперед. Таким образом, во всяком случае длина оси части жидкости, увлекаемой вперед, определяется нахождением точки на оси кольца, в которой скорость равна скорости кольца. На больших расстояниях от плоскости кольца эта скорость изменяется подобно магнитной силе бесконечно малого магнита в точке его оси — обратно пропорционально кубу расстояния от центра. Поэтому куб

радиуса приблизительно шарообразной части, увлекаемой вперед, находится в простом обратном отношении к скорости кольца, и потому момент ее постоянен для различных скоростей кольца. К нему надо прибавить, как доказал Пуассон, количество, равное половине его собственной величины, как эквивалент инерции внешней жидкости; и сумма составит весь действительный момент движения. Отсюда мы видим, что не только целый действительный момент независим от скорости кольца, но его величина та же, как магнитный момент в соответственном кольце электромагнита. Конечно, тот же результат получается с помощью интеграла Грина указанного выше. <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Метод „пластинки“ описанный Томсоном, является приложением общего метода так называемых „импульсивных сил“. Томсон ввел понятие „импульса“ в особом смысле (см. On vortex motion, § 6), именно для обозначения системы импульсивных сил, которые, действуя в данный момент (мгновенно), могли бы довести данную систему от состояния покоя до тех скоростей, которыми эта система в данный момент обладает. Общие выражения для импульсивных сил можно найти у W. Thomson'a („On vortex motion“), J. J. Thomson'a („On the motion of vortex Ring's“); см. также у Lamb'a §§ 119 и 152. Согласно Томсону, слагающая по оси  $x$  — ов импульса —  $X = \iint (Nx - \varphi \cos \alpha) ds$ , где  $N$  — нормальная слагающая скорости,  $\varphi$  — потенциал скорости,  $\alpha$  — угол наклона нормали площадки  $ds$  к оси  $x$  — ов. Томсон доказывает, что слагающая магнитного момента по отношению к оси  $x$ , т. е.  $\iiint mx dv$ , где  $m$  — магнитная плотность элемента объема  $dv$  равна —  $\frac{1}{4\pi} \iint (Nx - \varphi \cos \alpha) ds$ , где  $N$  — нормальная слагающая магнитной силы,  $\varphi$  — магнитный потенциал,  $\alpha$  и  $ds$  имеют то же значение, что и раньше. Укажем еще на две замечательные аналогии. Для энергии системы вихрей мы имеем:  $T = \frac{1}{4\pi} \sum J' J'' \iint \frac{\cos \alpha}{r} dl' dl'' = \frac{1}{2} \iint \int (u^2 + v^2 + w^2) dx dy dz$ , где  $J = 2\omega \cdot s$  (удвоенное произведение угловой скорости на поперечное сечение),  $dl'$  и  $dl''$  элементы длины вихревых нитей,  $\alpha$  — угол между ними;  $u, v, w$  слагающие скоростей. Если в этих формулах считать  $J$  силой тока, а  $u, v, w$  — слагающими магнитного поля, то мы получим выражения для энергии системы линейных проводников. Вывод формул см. Lamb'a (§ 153) и в „Механике“ Кирхгофа (20-ая лекция). Далее, если через  $A_x, A_y, A_z$  обозначить слагающие так называемого „электрокинетического потенциала“  $A = \iiint \int \frac{m \cdot u}{r} dv$ , где  $m$  — плотность электричества в объеме  $dv$ , и скорость движения (иначе  $\frac{mu}{c} = i$  плотности тока в элементе  $dv$ ), то слагающие магнитного поля будут:  $H_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}$ ,  $H_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}$ ,  $H_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}$ . Чтобы получить выражения для вихрей, достаточно вместо плотностей тока поставить угловые скорости (деленные на  $2\pi$ ), а вместо силы поля  $H$  скорость частиц ( $u, v, w$ ).



Синтетический метод, только-что объясненный, не ограничивается случаем простого круглого кольца, подробно описанного выше, но равно применим к нескольким кольцам какой-либо формы, отделенным друг от друга или сцепленным друг через друга каким-либо способом, или к простому шнуру, связанному в виде „многократной непрерывности“ и соединенному непрерывно, так что он не имеет конца. Во всяком возможном случае движение жидкости в каждой точке ядра вихря или жидкости, наполняющей все пространство вокруг него, в совершенстве определяется формулами Гельмгольца, когда дана форма ядра. Изложенное синтетическое исследование доказывает, что действительный момент движения всей жидкости совпадает по величине и направлению с магнитным моментом соответствующего электромагнита. Поэтому продолжая рассматривать ради простоты только бесконечно тонкую линию ядра, проектируем ее на каждую из трех плоскостей под прямыми углами друг к другу. Площади плоской цепи, полученные таким образом [рассчитывая их, согласно правилу Де-Моргана<sup>1)</sup> при взаимном пересечении (autotomic), как это вообще бывает], суть составляющие момента, перпендикулярные к этим трем плоскостям.<sup>2)</sup> Проверка этого результата будет хорошим упражнением в „многократной непрерывности“. Автор еще недостаточно знаком с замечательными исследованиями Римана этой ветви аналитической геометрии, чтобы знать, все ли виды „многократной непрерывности“, указанные нами, включены в его классификацию и номенклатуру или нет.

Часть синтетического исследования, в которой тонкое твердое проволочное кольцо предполагается движущимся в каком-либо направлении через жидкость со свободным вихревым движением, пред-

<sup>1)</sup> Правило де-Моргана указывает, что следует считать площадью много-связной кривой, которую де-Морган называет autotomic. См. „Extension of the word area“. *Cambr. and Dublin Math. Journ.* May 1850 г., а также „Elements of Natural Phil.“. Томсона и Тэта, р. I, 1873, где приведено это правило.

<sup>2)</sup> Под моментом здесь, как и выше, разумеются импульсивные силы, эквивалентные действительному моменту движения. Теория показывает (см. Lamb, § 152), что слагающие импульсивной силы по координатам имеют значения  $J \iint eds$ ,  $J \iint mds$ ,  $J \iint nds$ , где  $J$  — сила (циркуляция) одного бесконечно тонкого вихревого шнура,  $l$ ,  $m$ ,  $n$  — направляющие косинусы нормали к элементу  $ds$  поверхности вихря. Но произведение площадки на косинус нормали равно соответствующей проекции площадки, следовательно, слагающие импульсы (моменты) пропорциональны проекциям вихревой поверхности на координатные плоскости.

варительно вызванным в нем, требует, чтобы диаметр проволоки в каждой точке был бесконечно мал в сравнении с радиусом кривизны ее оси и с ближайшим расстоянием всякой другой части окружности от этой точки проволоки. Но, когда найден действительный момент целого движения жидкости для вихря с бесконечно тонким ядром, мы можем предположить некоторое число таких вихрей, по возможности близко друг к другу, вызванными одновременно; и весь действительный момент по величине и направлению будет равнодействующим моментом различных составляющих вихрей, считаемых каждый отдельно. Отсюда мы имеем замечательное предложение, что действительный момент всякого возможного движения в бесконечной несжимаемой жидкости совпадает по направлению и величине с магнитным моментом соответствующего электромагнита в теории Гельмгольца. Автор надеется дать математические формулы, выражающие и доказывающие это утверждение в более подробной записке, которую он предполагает скоро представить Королевскому Обществу.<sup>1)</sup>

Всякому, наблюдающему явления колец дыма или исследующему теорию, скоро представляется вопрос, — какие условия определяют размеры кольца в каждом случае. Исследование Гельмгольца доказывает, что угловая скорость ядра вихря изменяется прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально его плоскости сечения. Поэтому сила электрического тока в электромагните, соответствующем бесконечно тонкому ядру вихря, остается постоянной, как бы сильно ни изменялась его длина в течение превращений, испытываемых им от движения жидкости. Отсюда очевидно, что, чем больше диаметр кольца для того же объема и силы вихревых движений в обыкновенном кольце Гельмгольца, тем больше вся кинетическая энергия жидкости, и тем больше момент. Таким образом мы видим, что размеры кольца Гельмгольца определены, когда даны объем и сила вихревого движения и, кроме того, или кинетическая энергия или момент движения всей жидкости. Поэтому, если после некоторого числа столкновений или воздействий кольцо Гельмгольца удаляется на большое расстояние от других и становится свободным или почти свободным от колебаний, то его диаметр должен увеличиться или уменьшиться, смотря по тому, получило оно или отдало энергию другим. Полная теория увеличения вихревых

<sup>1)</sup> См. „On vortex motion“.



атомов при повышении температуры может быть разработана по этому принципу. <sup>1)</sup>

План проф. Тэта для демонстрации колец дыма следующий: большой прямоугольный ящик, открытый с одной стороны, имеет круглое отверстие в 6 или 8 дюймов в диаметре, вырезанное на противоположной стороне. Простой грубый ящик для упаковки в 2 куб. фута или около того вполне соответствует этой цели. Открытая сторона ящика закрыта толстым холстом или куском сукна или пластинкой резины, растянутой на ней. Удар по гибкой стороне вызывает круглое вихревое кольцо, вырывающееся из отверстия на другой стороне. Вызванные таким образом вихревые кольца видимы, если ящик наполнен дымом. Один из наиболее подходящих способов для этого представляют две реторты, вставленные горлышками в отверстия, сделанные для этой цели в одной из сторон ящика. Небольшое количество соляной кислоты вводится в одну из этих реторт, а крепкий жидкий аммоний в другую. Поднося спиртовую лампу от времени до времени к одной или другой из этих реторт, легко получить густое облако аммониевой соли внутри ящика. Любопытный и занимательный опыт может быть сделан с двумя устроенными указанным образом ящиками, помещенными или плотно друг возле друга или обращенными один к другому так, чтобы выбрасывать кольца дыма, идущие навстречу с противоположных сторон, или в различных относительных положениях так, чтобы дать кольца дыма идущие по путям, наклоненным друг к другу под некоторым углом, и проходящие друг возле друга на разных расстояниях. Интересная вариация опыта может быть сделана с чистым воздухом без дыма в одном из ящиков. Невидимые вихревые кольца, выбрасываемые из него, делают свое присутствие поразительно заметным, когда они подходят близко к одному из колец дыма, выходящих из другого ящика.

<sup>1)</sup> Закон Гельмгольца говорит лишь о сохранении циркуляции (интеграл произведения удвоенной угловой скорости на элемент площади поперечного сечения), следовательно, вихри могут изменять свое поперечное сечение, угловую скорость, длину. В 1905 г. В. Томсон пришел к заключению, что вихри подлежат закону рассеяния (см. Proc. Royal. Soc. Edin., 25 книга, стр. 556), т. е. некоторое количество элементарных колец Гельмгольца, находящихся в конечном объеме, разлетаются в бесконечное пространство, причем полная энергия системы равномерно распределяется повсюду в виде бесконечно малых скоростей. Такое рассеяние вихрей мы имеем в процессе электромагнитного излучения в случае волн максвелловского типа, как это хорошо видно из теории вибратора Герца.

## ВИХРЕВАЯ ТЕОРИЯ МАТЕРИИ, ЕЕ РАЗВИТИЕ И ЗНАЧЕНИЕ.

### 3. ЦЕЙТЛИН.

#### 1.

Предпосылки вихревой теории материи мы находим в учениях древнегреческих философов — Анаксимандра, Гераклита, Парменида, Зенона и Аристотеля. Но основоположником этой теории необходимо считать Маркса физики — Ренэ Декарта, который впервые вполне отчетливо и глубоко формулировал смысл и значение учения о вихревой природе материи. Принципы вихревой физики изложены Декартом в трактате „О мире“ (Du Monde), <sup>1)</sup> „Принципах философии“, „Возражениях и ответах“ (Objections et Reponses), переписке философа; но так как философия Декарта, по справедливому замечанию А. Рея, это — его физика, то все основные труды Декарта являются фундаментом этой физики. К несчастью, сам философ, и само собою разумеется, его последователи так запутали „картезианскую философию“, т. е. физику, что она понимается обычно совершенно ложно.

Это ложное понимание принципов физики Декарта можно обозначить как псевдокартезианизм или абсолютный рационализм. Сущность псевдокартезианизма в том, что он не принимает во внимание философских оснований картезианской физики, т. е. метода Декарта. Отсюда и произошла знаменитая борьба между относительно формальной физикой Ньютона и крайним рационализмом псевдокартезианцев, при чем относительный формализм Ньютона превратился у его последователей в абсолютный, который и противопоставлялся абсолютному рационализму. Эта историческая борьба тянется до сих пор и очень плодотворна по своим результатам, так как она постепенно выявляет истинный метод науки. Этапы борьбы заключаются в постоянной смене эпох абсолютного рационализма и абсолютного формализма, согласно общеизвестному закону диалектического движения. Период от появления идей Декарта до 1740 года был периодом господства псевдокартезианизма.

Философы и физики стремились объяснить все физические явления при помощи однородной непрерывной материи (простран-

<sup>1)</sup> Этот трактат представляет собою отрывки большого сочинения „Космос“, которое Декарт предназначал к первоначальному опубликованию, но которое он скрыл, услышав о судьбе Галилея.



ства как физического тела), находящейся в непрерывном движении, подчиненном закону сохранения.

Везде физика излагалась по картезианскому учебнику Rohault. Замечательно то, что в течение 30 лет после появления „Начал“ Ньютона эти „Начала“ не сумели вытеснить книги Рого. Ревностный приверженец Ньютона Самуил Кларк выпустил в течение 13 лет (1697—1710) три издания<sup>1)</sup> этого учебника, при чем издатель только в примечаниях решился изложить принципы Ньютона, не упоминая, однако, в первых двух изданиях его имени.

Проф. Playfair замечает, что физика Ньютона проникла в английские университеты под покровом картезианизма. Что касается континента, то картезианцами были Лейбниц, Гюйгенс, Вариньон, Бернулли, Эйлер, Кассини, Маральди, Меран и др. Араго справедливо замечает: „Смотря на такое собрание первоклассных ученых, Маклорэн, думаю, должен был бы воздержаться и не называть гипотезу Декарта рапсодией“. В самом деле, ньютоновьями в ту эпоху были Галлей, Котс, Уистон, Грегори, слепой математик Саундерсон и некоторые другие величины, несоизмеримые с указанным блестящим созвездием. Картезианцы стремились уравновесить „Начала“ Ньютона выводом закона тяготения на основании гипотезы вихрей, т. е. построить физическую модель явления тяготения, хотя субъективно они мыслили метафизически, полагая свои модели точной копией действительности. Известно, что сам Ньютон дает в „Началах“ основы движения жидкостей в связи с вихревой теорией и выводит заключение, что эта теория неспособна объяснить явления мира планет. Но еще до появления „Начал“ Клод Пэрро (Perault) в „Опыте физики“ (1680 г.) вносит видоизменения в теорию вихрей с целью согласования ее с законами Кеплера. Яков Бернулли разрабатывает тот же вопрос.<sup>2)</sup> Пьер Вариньон<sup>3)</sup> в „Новом предположении относительно тяжести“ критикует некоторые стороны вихревой гипотезы Декарта, пытаясь улучшить их. Проф. Розенбергер отмечает<sup>4)</sup> весьма характерное отношение академиче-

<sup>1)</sup> Латинских; английский перевод появился в 1735 году: Rohault Jacques. System of Natural Philosophy illustrated with D-r Samuel Clarkes notes taken from Sir Isaac Newton. Латинский экземпляр имеется в библиотеке Московского университета.

<sup>2)</sup> Jacobi Bernoulli. Dissertatio de gravitatio Aetheris. Amsterdam. 1683.

<sup>3)</sup> Pierre Varignon. Nouvelle conjecture sur la pesanteur. 1690.

<sup>4)</sup> См. трактат Розенбергера о Ньюtone.

ских кругов того времени к теории Ньютона. В „Истории Королевской Академии“ (1700 г., стр. 78—100) имеется отчет о работе Вариньона. Из него явствует, что как Вариньон, так и другие члены академии вполне оценивали математическую сторону учения Ньютона, но старались придать теории рационалистический смысл. Лейбниц в „Acta Eruditiorum“ от 1689 г. (стр. 82) поместил знаменитую работу „Опыт о причине небесных движений“ (Tentamen de Motuum Coelestium causis). Эта работа посвящена критике Ньютона и является началом ссоры между ними. Лейбниц обвинил Ньютона в возрождении „скрытых качеств“ перипатетиков. Лейбниц выражает также свое удивление тому, что столь знаменитый математик, как Декарт, никогда не пытался вывести законы Кеплера из своей теории вихрей. Лейбниц сам делает такую попытку, вводя понятие „гармонической циркуляции“. Эта попытка не имела успеха, при чем Ньютон в анонимной заметке „Ex epistola cujusdam ad Amicum“<sup>1)</sup> отверг циркуляции Лейбница.

Славный Гюйгенс, отец ньютоновой физики, еще в 1661 г. произвел опыт, возбуждавший громадное внимание ученого мира. Цилиндрический сосуд вращается вокруг оси. На дне между двумя натянутыми диаметрально нитями находится шарик какого-либо материала. При вращении шарик удаляется к стенкам и остается все время там. При внезапной остановке, когда возникает вихрь жидкости, — шарик перемещается к центру. Для обхода затруднения для случая земли (движение к центру, а не перпендикулярно оси) Гюйгенс выставил дополнительные гипотезы. В 1690 году вышел знаменитый трактат Гюйгенса о свете (Traité de la lumière), построенный на гипотезе эфира, в котором имеется приложение: „Рассуждение о причине тяжести“. Главная часть была прочитана еще в 1669 году перед Парижской академией. В этой работе Гюйгенс развивает вихревую теорию тяжести, и кроме того, на основании различия длин секундного маятника, в различных местах земли пытается определить ее форму.

Весь ученый мир Франции с Академией наук во главе долго и упорно стоял на рационалистической точке зрения.

Парижская академия стремилась доказать, что картезианская гипотеза может также быть математически обработана, как и теория

<sup>1)</sup> Здесь именно Ньютон обвинил Лейбница в плагиате исчисления бесконечно малых.



Ньютона. Большинство годовых премий было посвящено этому вопросу.

В 1728 году была предложена тема о физическом объяснении тяжести. Премию получил ученый Бильфингер (профессор-академик в Петербурге). Он изобразил тяжесть как результирующую центростремительных сил двух вихрей, имеющих общий центр в земле и пересекающихся перпендикулярно. Тема 1730 г. состояла в объяснении эллиптической формы планетных путей и изменения положения больших осей.

Премию получил Иоанн Бернулли.<sup>1)</sup> Он дал картезианскую трактовку вопроса и сделал попытку опровергнуть возражения Ньютона против теории вихрей.

Темы 1732 и 1734 гг. касались взаимного наклона планетных орбит. Премию получили Иоанн Бернулли и его сын Даниэль,<sup>2)</sup> которые рассматривали тяжесть как явление, обусловленное потоком материальных частиц к центру вихря.

В 1733 г. аббат Мольер (Privat de Molière) написал картезианские „лекции по физике“, в которых рассматривал „малые вихри“. Его ученик Де-Льонуа (La Corgne de Launoy) выпустил „Начала системы малых вихрей или конспект физики аббата Мольера“. <sup>3)</sup>

Эти „малые вихри“ необходимо считать прямыми предшественниками „малых вихрей“ Ранкина, Гельмгольца и Томсона. Яков Кассини написал в 1735—36 гг. две работы для доказательства достаточности картезианской гипотезы для объяснения планетных движений. В 1740 году была предложена тема о приливе и отливе. Премию получили Д. Бернулли, Маклорэн, Эйлер и Кавальери.<sup>4)</sup> Био<sup>5)</sup> дает следующую характеристику представленных работ:

„Маклорэн — чистый ньютоновец, Бернулли — ньютоновец, который просит извинения в том, что он покинул лагерь Декарта; Эйлер — картезианец по смыслу и ньютоновец по вычислению; иезуит (Кавальери) чистый картезианец“.

<sup>1)</sup> De causis physicis ellipticorum figurarum. Paris 1730.

<sup>2)</sup> De Inclinatione motua orbitalium planetarum, 1734 (Pièces de Prix de l'Académie de Paris, vol. V.

<sup>3)</sup> Principes du système de petits tourbillons ou abrégé de la physique de l'abbé Molière.

<sup>4)</sup> Не смешивать этого Cavallieri с учеником Галилея Bonaventura Cavalieri (1598 — 1647).

<sup>5)</sup> См. Précis de l'histoire de l'astronomie planétaire par I. B. Biot, стр. 22, а также Rosenberger, Newton, 2 B, IV. T.

Здесь уже обнаруживается перелом в сторону физики Ньютона. Еще в 1695 г. Лейбниц выпустил работу „Опыт динамики“, <sup>1)</sup> в которой дано знаменитое различие „живой“ и „мертвой“ силы. <sup>2)</sup> Убедившись в том, что картезианизм приводит к спинозизму и что „без понятия силы нельзя избежать атеизма“, Лейбниц перешел на сторону Ньютона, хотя ни разу не упомянул в своей работе имени творца „Начал“.

В 1714 г. в Acta Eruditorum появился благожелательный реферат о 2-м издании „Начал“. Во Французской академии старые академики Меран, Реомюр, Кассини и др. с Фонтенелем во главе „с истинно римской твердостью“ отстаивали учение Декарта. Старый 95-летний Фонтенель даже в 1752 г. выпустил „Теорию картезианского вихря“. Более молодые академики Мопертюи и Клеро начинали уже свыкаться с идеями Ньютона.

Клеро в 1743 году в знаменитом сочинении о „Фигуре земли“ <sup>3)</sup> допустил в частицах притягательную силу, хотя в угоду картезианцам пытался развить различные гипотезы тяготения. Мопертюи в 1732 году представил мемуар на ту же тему. <sup>4)</sup> В нем он делает следующее характерное заявление: „Я никоим образом не исследую, согласуется ли притяжение со здоровой философией или же противоречит ей. Я здесь рассматриваю его только как математик (géometre), т. е. как свойство, проявления которого (какова бы ни была их действительная сущность) можно исчислить, ибо мы полагаем это свойство равномерно присутствующим во всех частицах материи и действующее пропорционально ее количеству“.

В „Истории Королевской Академии“ (1732 г., стр. 112) появился отчет об этой работе Мопертюи. В ней указывается: <sup>5)</sup> „Необходим был гений и великий авторитет Ньютона, чтобы снова ввести в физику притяжение, откуда оно было изгнано Де-

<sup>1)</sup> „Specimen dynamicum“. Acta Eruditorum. 1695.

<sup>2)</sup> Точная дата этого понятия силы относится к 1686 году, когда в Актах появилось „Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii“, в котором Лейбниц утверждает, что „сила“ пропорциональна не скорости, а ее квадрату. Отсюда возник длительный спор, конец которому положил Д'Аламбер, разъяснив, что „сила“ Декарта это — временный интеграл силы (в ньютоновском смысле), а „сила“ Лейбница — интеграл пути. Решение д'Аламбера конечно, чисто формальное, что отмечено Энгельсом в „Диалектике природы“.

<sup>3)</sup> Clairaut, Figure de la terre tirée des lois de l'hydrostatique, Paris. 1743.

<sup>4)</sup> Mémoires de l'Académie Royale 1732, p. 343.

<sup>5)</sup> См. Rosenberger, Newton, 2 B, IV T. Der endliche Sieg der Newton'sche Physik.



картом и его последователями или лучше всеми философами и при всеобщем одобрении. Оно возвращается, однако, несколько переодетым, ибо, если угодно, это совсем не притяжение в собственном смысле слова, а скорее название, которое дано неизвестной причине; эта причина сравнивается и рассматривается, чтобы по крайней мере знать ее способ проявления, при чем ожидают, что однажды и сама ее природа сделается доступной познанию. С этой точки зрения и с такой мудрой предусмотрительностью вводят Ньютон и его ученики это притяжение<sup>4</sup>.

Из этого отрывка ясно, что ученый мир уразумел, наконец, действительный смысл теории Ньютона; не верно лишь то, что будто бы ученики Ньютона обнаружили здравый смысл учителя — наоборот, они старались запутать посторонними соображениями ясную доктрину Ньютона. Позднейшие мыслители также не обнаружили благоразумия академических кругов 1732 года и еще до сих пор спорят об истинном смысле учения Ньютона. Победа этого учения ясно обозначилась к 1740 году, когда в „Phil. Transact“ (Vol. n° 457 p. 409) появилась статья P. Sigorgn'a „Физико-математическое доказательство невозможности и недостаточности вихрей“.

„С тех пор,— говорит Розенбергер,— картезианизм был как будто вырван с корнем из почвы естественных наук; он сделался, как раньше слово схоластика, общим понятием всего плохого, существенным обозначением всего естественно-научно бесплодного, устрашающим примером фантастического философствования, пугалом, которым страшат больших и малых ребят науки“.

Все это продолжалось до тех пор, пока движение самой науки не возродило картезианизм в еще большем блеске, чем раньше.

## 2.

Возрождение картезианской физики необходимо отнести к 1858 году, когда в журнале Стелля появился мемуар Гельмгольца: „Об интегралах уравнений гидродинамики, соответствующих вихревым движениям“.

Но и до этого момента рациональное течение в физике давало значительные результаты: вспомним только о работах Юнга (1773—1829), Френеля (1788—1827), Навье (1785—1836), Коши (1789—1857), Пуассона (1781—1870), Гамильтона (1805—1865), Стокса (1819—1903), Мак-Куллоха (1809—1847) по теории света на основе гипотезы эфира, об идеях Фарадея

по теории электричества, которые Максвелл впоследствии облек лишь в математическую форму. Но эфир этих ученых не был картезианским эфиром — чистым протяжением (из движения частей которого и необходимо вывести все явления): этот эфир был упругим, твердым телом, с весьма странными свойствами, которые являются именно главными аргументами против существования эфира.

Картезианский эфир еще не проник в область оптики и электромагнетизма, скрыто существуя в виде „идеальной жидкости гидродинамики“. Законы движения этой жидкости, т. е. „пространства-материи“ Декарта были впервые сформулированы Эйлером<sup>1)</sup> в так называемых уравнениях Эйлера:

$$\begin{aligned} X - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}; \\ Y - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}; \\ Z - \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} &= \dots, \end{aligned}$$

где  $X, Y, Z$  — составляющие (прямоугольные) внешней силы (или результирующей всех таких сил),  $p$  — давление в идеальной жидкости,  $\mu$  — плотность,  $u, v, w$  — слагающие скорости частиц. Уравнения Эйлера изображают, что происходит в известной точке  $(x, y, z)$  пространства с течением времени, т. е. определяют скорости, как функции  $x, y, z, t$ . Но Эйлер также поставил вопрос иначе:<sup>2)</sup> что происходит с течением времени с известной частицей, координаты которой в момент  $t=0, x_0, y_0, z_0$ .

Лагранж в знаменитой „Аналитической механике“<sup>3)</sup> ответил на этот вопрос в изящной форме уравнений Лагранжа:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} - X\right) \frac{\partial x}{\partial x_0} + \left(\frac{\partial v}{\partial t} - Y\right) \frac{\partial y}{\partial x_0} + \left(\frac{\partial w}{\partial t} - Z\right) \frac{\partial z}{\partial x_0} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x_0} = 0$$

и т. д., где  $x, y, z, p$  — функции  $x_0, y_0, z_0$ , т. е. начального положения частицы.

До Гельмгольца исследовалось движение жидкости, в котором слагающие скорости имеют потенциал, иначе являются производными некоторой функции  $\varphi$ :

$$u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad w = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

<sup>1)</sup> L. Euler. Principes générales du mouvement des fluides. Hist. de l'Ac. de Berlin, 1775.

<sup>2)</sup> De princ. motu fluidorum. N. Comm. Ac. Petrop. 14 (1), 358, 1759 г.

<sup>3)</sup> Первое издание 1788 г.



Это движение Лагранж<sup>1)</sup> назвал движением с потенциалом скоростей, указав, что этот потенциал существует в случае действия сил, имеющих потенциал (например, силы тяжести). Так как сила трения зависит от скорости, иначе говоря, не имеет потенциала,<sup>2)</sup> а идеальная жидкость определяется как жидкость без трения, то движение этой жидкости рассматривалось как движение с потенциалом скоростей, при чем под действующей силой подразумевалась сила тяжести. Согласно указанию Гельмгольца, в основном мемуаре (стр. 6 русского перевода) Эйлер впервые обратил внимание<sup>3)</sup> на движение жидкости, при которых не имеет места потенциал скоростей, например, вращение жидкости около оси, при одинаковой угловой скорости всех частиц. „К силам, способным вызвать такого рода движения, принадлежат силы магнитные, действующие на жидкость, по которой пробегает электрический ток, и в особенности трение частиц жидкости между собой и о твердые тела“.

Очевидно, значит, что слагающие скоростей  $u, v, w$  должны в таких случаях быть связанными каким-либо образом с угловыми скоростями частиц.

Действительно, еще в 1875 году Стокс показал,<sup>4)</sup> что слагающие угловых скоростей частиц  $f, g, h$  выражаются следующими функциями от скоростей  $u, v, w$ :

$$f = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right), \quad g = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right), \quad h = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right).$$

Если вращения нет, то  $f = g = h = 0$  и

$$\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0,$$

а это именно и есть условие существования потенциала скоростей.<sup>5)</sup>

Кроме того, тому же Стоксу принадлежит следующее общее математическое соотношение между интегралом вектора вдоль неко-

<sup>1)</sup> Mémoire sur la Théorie du mouvement des fluides; Nouv. Mem. de l'Ac. de Berlin, 1771.

<sup>2)</sup> Напомним, что потенциал в обычном смысле это — функция, зависящая только от положения, но не от скоростей и ускорений.

<sup>3)</sup> Hist. de l'Ac. des Sciences de Berlin, 1755 г., стр. 292.

<sup>4)</sup> On the theories of the internal friction of fluids in motion, Camb. Phil. Trans. 1845 г.

<sup>5)</sup> Продифференцировав уравнения  $u = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$  и т. д. получим, условий существования потенциала.

торой линии  $C$  и интегралом по поверхности  $S$ , для которой эта линия является контуром. Пусть  $u, v, w$  — слагающие некоторого вектора  $A$ ; тогда по теореме Стокса:

$$\begin{aligned} \int_C A dl \cdot \cos(\widehat{A dl}) &= \int_C (u dx + v dy + w dz) = \\ &= \iint_S \left[ l \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + m \left( \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + n \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] dS = \\ &= 2 \iint_S (lf + mg + nh) dS = 2 \iint_S B \cos(\widehat{BN}) dS. \end{aligned} \quad 1)$$

Если  $A$  — вектор скорости, то интеграл  $\int_C A dl \cos(\widehat{A dl})$  или сокращено  $\int_C (A dl)$  называется циркуляцией (понятие, введенное В. Томсоном) скорости вдоль линии.

Вектор  $B(f, g, h)$  есть вектор угловой скорости или, по Гельмгольцу, — вихрь; соответствующий интеграл называется потоком вихря. Таким образом теорема Стокса гласит: циркуляция скорости вдоль линии равна потоку вихря сквозь поверхность, для которой линия служит контуром.

Гельмгольц доказал следующие основные теоремы:

1) ни одна жидкая частица не может притти во вращательное движение, если только она не обладала им уже с самого начала,

2) жидкие частицы, расположенные для какого-либо момента времени на вихревой линии, всегда будут при своем перемещении принадлежать одной и той же вихревой линии,

3) произведение поперечного сечения на скорость вращения для бесконечно тонкой вихревой трубки (нити) на всем ее протяжении постоянно и сохраняет свою величину при передвижении нити. Поэтому вихревые нити должны внутри жидкости замыкаться в себе; они могут оканчиваться не иначе, как на ее границах.

В математической форме теоремы Гельмгольца выражаются уравнением:

<sup>1)</sup>  $l, m, n$  — это направляющие косинусы нормали  $N$  к элементу поверхности  $dS$ ; вектор  $(f, g, h)$  определяется равенствами  $2f = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}$  и т. д. Если вихревой вектор обозначить через  $B$ , то  $f = B \cos \alpha$ ,  $g = B \cos \beta$ ,  $h = B \cos \gamma$ , где  $\alpha, \beta, \gamma$  — углы с осями координат. Таким образом  $lf + mg + nh = B(l \cos \alpha + m \cos \beta + n \cos \gamma) = B \cos(\widehat{BN})$ .



$$J \text{ (циркуляция)} = \int_c (Adl) = \int_c (udx + vdy + wdz) = \\ = 2 \iint_s B \cos (B \cdot N) ds = \text{const. } ^1)$$

Подчеркнем здесь, что доказательство теоремы Гельмгольца основано на предположении, что действующие силы имеют потенциал. Между тем, помимо сил трения, вся электродинамика обнаруживает силы, не имеющие обычного потенциала. Вот почему в области электродинамики мы имеем дело с постоянным возникновением и уничтожением электромагнитных вихрей. Сам процесс получения электрического поля посредством „трения“ весьма характерен.

Адамар, Шютц, Бьеркнесс, Зильберштейн вообще показали, что не при всяких условиях выполняется теорема Гельмгольца о сохранении вихрей. Особенно интересны явления удара, т. е. относительной прерывности, на которые указывают Адамар и сам Гельмгольц (работа: „О прерывном движении жидкостей“); нам кажется, что именно в таких „относительно прерывных“ действиях и лежит ключ к пониманию многих явлений природы, что хорошо подтверждается теорией квант. <sup>2)</sup> Как бы там ни было, но с точки зрения диалектики очевидно, что вихревая теория, как и всякие другие, подлежит закону развития. Пройдет известный период времени, и научная мысль даст новое усовершенствование учения, которое будет иметь тот же (если не больший) коэффициент, что и теперешняя теория в отношении к теории эпохи Декарта. <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> В этой форме закон Гельмгольца формулирован Томсоном. Гельмгольц дал вывод, основанный на известной теореме Грина:  $\iint_s B \cos (B \cdot N) ds = \iiint_v \left( \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial z} \right) dV$ , выражающий интеграл по поверхности  $S$  через интеграл по объему  $V$ , который ограничивает эту поверхность. Из уравнений для  $f, g, h$ , мы получаем:  $\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial z} = 0$ , следов.  $\iint_s \cos B (B \cdot N) ds = 0$ . Применив это уравнение к отрезку бесконечно тонкой вихревой трубки (нити) с сечениями  $S_1$  и  $S_2$ , мы получим  $B_1 S_1 = B_2 S_2 = \text{const.}$  Полагая  $\text{const} = 0$ , получим:  $B_1 S_1 = B_2 S_2$ .

<sup>2)</sup> См. между прочим сочинение: I. Franck und P. Jordan. „Anregung von Quantensprünge durch Stösse“ (I. Springer 1926 г.).

<sup>3)</sup> Теорию циклических (моно- и полициклических) движений в непрерывной среде разрабатывал Гельмгольц, попытку построить картезианскую механику на рациональной основе сделал Г. Герц. Как указывает Гельмгольц в предисловии к „Механике“ Герца, эта механика, которая при своем появлении оказала незначительное влияние на научную мысль, будет иметь еще большее значение. Попытку построить механику „прерывностей“ сделал Р. Арпель (см. статью А. Voss'a в Mat. энциклопедии, т. IV). В последнее

3.

Вихревую теорию материи разрабатывает целый ряд крупнейших ученых, из которых на первое место необходимо поставить Вильяма Томсона-Кельвина и Дж. Дж. Томсона. Вслед за статьей о вихревых атомах В. Томсон опубликовал большую работу о „Вихревом движении“. <sup>1)</sup> „Математическая задача этой работы иллюстрировать гипотезу о том, что пространство непрерывно заполнено несжимаемой без трения жидкостью, на которую не действуют никакие внешние силы и что материальные явления всякого рода зависят исключительно от движения в этой жидкости“ (стр. 13, IV т. соч. Томсона). Здесь, между прочим, Томсоном введено понятие циркуляции и дано новое доказательство теоремы Гельмгольца. В 1875 г. появилась работа „Статика вихря“ (Vortex statics), <sup>2)</sup> в которой дан анализ устойчивости вихревого шнура. Большое значение имеет статья „Колебания цилиндрического вихря“. <sup>3)</sup> Некоторые результаты этой работы мы пояснили в примечаниях к статье Томсона о вихревых атомах. Анализ задачи о максимуме и минимуме энергии вихревого движения дан Томсоном в статье того же названия. <sup>4)</sup> Особенно важен мемуар „Распространение плоского движения в волнующейся невязкой жидкости,“ <sup>5)</sup> в котором Томсон

время М. Вогп выпустил „Vorlesungen über Atommechanik“, представляющее собою механику прерывности применительно к теории квант. См. также „Основания новой квантовой механики“. Сборник. Гиз. 1927 г.

<sup>1)</sup> Trans. R. S. Edin. 25, 1869. Соч. т. IV.

<sup>2)</sup> Proc. R. S. Edin. 1875—76; Phil. Mag. Aug. 1880 г. Соч. т. IV, 115.

<sup>3)</sup> Proc. R. S. E. March. 1880 г.; Phil. Mag. X 1880 г. Соч. т. IV, 152.

<sup>4)</sup> Nature, Oct. 1880 г. Соч. т. IV, 172.

<sup>5)</sup> Phil. Mag. V. 24. Соч. IV. Под „слоистым движением“ (laminar motion) здесь разумеется движение согласно уравнения  $m:u = 2\mu v$ ,  $v = 0$ ,  $w = 0$  и, следовательно,  $f = 0$ ,  $g = 0$ ,  $h = -\mu$ ; „бурлящая невязкая жидкость“ это — вихревая губка (vortex sponge\*). Как видно из этих уравнений, „слоистое движение“ заключается в том, что жидкость разделяется на слои, при чем скорость каждого слоя зависит от его расстояния от оси  $x$ -ов ( $u = 2\mu y$ ); кроме движения вдоль этой оси, частицы имеют вращение  $h = -\mu$ , т. е. вокруг мгновенных осей параллельных  $z$  (вихри). Томсон доказывает, что, если мы имеем вихревую губку, заключенную между двумя плоскостями, параллельными плоскости  $xy$  и в некотором месте возникает слоистое движение, обозначаемое им через  $f(y, 00)$  для момента  $t = 0$ , то уравнение распространения слоистого движения будет:  $\frac{d^2 f}{dt^2} = \frac{2}{g} R^2 \frac{d^2 f}{dy^2}$ , где  $R$  — „средняя скорость бурлящей жидкости“ (особо определяемая величина). Это уравнение, как известно, изображает распространение электромагнитных волн



доказывает, что распространение плоской волны в вихревой трубке совершается согласно тому же уравнению, что и световые колебания в эфире, рассматриваемом как упругое твердое тело. Другие работы Томсона, <sup>1)</sup> которых мы перечислять не будем, касаются форм вихревых шнуров, их взаимодействия, электромагнитных аналогий; им же разрабатывалась теория гироскопов, даны модели: гироскопического компаса, силы упругости, колебаний и волн в цепи гироскопов; Томсон возродил известную теорию тяготения Лессажана на основании свойства упругости вихревого атома. Дж. Дж. Томсон опубликовал фундаментальный трактат по теории вихрей: „On the motion of vortex rings“ (London, 1883). В примечаниях к статье В. Томсона-Кельвина мы привели некоторые результаты этой работы. Общая задача работы Дж. Дж. Томсона — исследовать, насколько вихревые гипотезы пригодны для построения абсолютной кинетической теории материи. С этой целью Томсон подверг анализу различные формы вихрей, их взаимодействие и колебательные движения. В частности Томсон доказал устойчивость вихревого кольца в отношении сохранения форм оси, исследовал взаимодействие материального шара и кольца. В связи с теорией вихрей Дж. Дж. Томсон предпринял в 1888 г. попытку построить динамическую механику. Эта попытка изложена в работе „О некоторых приложениях динамических принципов к физическим явлениям“. <sup>2)</sup> Здесь мы встречаем обобщенный закон инерции, который Г. Герц положил в основу своей картезианской „механики“. <sup>3)</sup>

и вообще колебания в упругом твердом теле. Здесь обнаруживается замечательная аналогия с распространением плоско поляризованной электромагнитной волны. Мы уже указывали, что вектор  $\mathbf{d}$  аналогичен электрическому току, вектор  $\mathbf{h}$  — магнитной силовой линии; следовательно, можно было бы а priori утверждать аналогию между волновыми процессами в вихревой среде и процессами в электромагнитном поле. Теория подтверждает это заключение. Обратим еще внимание на открытый Томсоном так называемый „skin effect“ (поверхностный эффект, эффект Кельвина): при переменных токах большой частоты токи эти образуют „слоистое движение“, т. е. располагаются главным образом на поверхности проводника, — сила тока уменьшается по направлению к центру. Это явление известно всем электротехникам, и для таких случаев проводники изготавливаются полыми.

<sup>1)</sup> См. т. IV. Соч. Томсона.

<sup>2)</sup> „On some applications of dynamical principles to physical phenomena. London, 1888. См. также Phil. Trans. 176. 1885 г., стр. 307.

<sup>3)</sup> I. I. Thomson вводит этот закон для рассмотрения брахистохронического движения в  $n$  — мерной форме, которую Г. Герц наглядно изобразил как  $n$  — мерное пространство. Еще Jacobi в 1841 г. рассматривал динамиче-

Цель Томсона, как и Г. Герца, — свести понятие потенциальной энергии к понятию кинетической и всякую „силу“ рассматривать как ускорение, т. е. приращение количества движения в единицу времени.

Томсон вводит понятие киностенических координат (Томсон и Тэт называют их „ignored“, Гельмгольц и Герц — „verborgene“), с целью обозначения тех движений, которые дают в итоге так называемую „потенциальную энергию“: массы и движения, образующие механизм „потенциальных“ сил, Гельмгольц-Герц назвали „скрытыми массами“ и „скрытыми движениями“; согласно вихревой гипотезе, такими массами и движениями являются массы и движения вихрей и окружающей „идеальной жидкости“ (пространства).

Ограниченность места не позволяет нам дать обзор работ других выдающихся ученых по теории вихрей. Полный обзор читатель найдет у Winkelmann'a, Lamb'a и в статье A. Love'a. <sup>1)</sup> В частности, Винкельман дает ценные сведения, касающиеся опытного получения и наблюдения вихрей. Оказывается, что не только теория солидно обоснована, но что выводы теории касательно основных свойств вихрей подтверждаются в существенном на опыте. Но мы хотим обратить внимание читателя на другое, еще более замечательное обстоятельство, на то именно, что важнейшая и обширнейшая область науки о природе — область электромагнетизма и оптики прямо толкает к вихревой теории материи. Этот замечательный факт очень рельефно обнаруживается в простом обзоре развития теории Максвелла. Эту теорию изображают обычно, как „непонятную“, как скрижали завета, свалившиеся с неба. Но если обратиться к календарным датам, то получается иная картина. В 1855 году Максвелл опубликовал известный меморандум о „Фарадеевых силовых линиях“, в котором ему еще не удалось построить желательную модель электродинамических сил. В 1856 г. В. Томсон пришел к заключению, что магнитные силы имеют вихревой характер. <sup>2)</sup> В 1858 г. Гельмгольц опубликовал знаменитый трактат о вихревом движении, а в 1861-1862 г.г. по-

ские проблемы, как брахистохронические; Liouville (Sur les equations de la dynamique. C. R. 1892) показал, что каждая динамическая проблема может быть сведена к проблеме геодезической линии. См. A. Voss. Enc. d. Mat. Wiss. т. IV. Ср. с общей теорией относительности, в которой основную роль играет „геодезическая линия“.

<sup>1)</sup> Hydrodynamik. Enc. d. Mat. Wiss. IV, стр. 112, 2, Pr. R. S. 8, 1856, стр. 150.

<sup>2)</sup> Pr. R. S. 8. 1856, стр. 150.



явилась, наконец, известная модель электромагнитного поля Максвелла, <sup>1)</sup> в которой ток рассматривается как поступательное движение, а магнетизм, как вихревое. В 1864 году появилась „Динамическая теории электромагнитного поля“, в которой Максвелл подробнее развивает взгляды, изложенные в предыдущих мемуарах. Наконец, в 1871 году появился знаменитый трактат „Электричество и магнетизм“. Одна из самых замечательных глав (21 глава II тома), связанная с электромагнитной теорией света, посвящена выяснению действия магнитов на свет. Максвелл ссылается на работу Томсона (1856), Ранкина (1849-1850) и, наконец, Гельмгольца (1858). Математическое исследование вопроса (§ 22. Гипотеза молекулярных вихрей) базируется на работе Гельмгольца. Заметим здесь, что та теория Максвелла, которой мы пользуемся ныне, построена по методу Ньютона. <sup>2)</sup> Убедившись, что проблема рационального истолкования электромагнитных явлений слишком сложна, Максвелл, подобно Ньютону, перешел к относительно формальной трактовке вопроса на основе механики Лагранжа. Но всякий, исследующий развитие учения Максвелла, ясно видит, что „физические модели“ послужили именно путеводной нитью, которая вывела ученого из лабиринта природы.

Необходимо отметить, что модели Максвелла не носят чисто кинетического, т. е. рационального характера — эфир Максвелла напоминает еще обычное тело. Лишь В. Томсон впервые в 1880 году предложил адиабатическую модель эфира, так называемую „вихревую губку“, <sup>3)</sup> т. е. „идеальную жидкость“, в которой равномерно распределены вихревые и невихревые области. В 1883, 1885 и 1889 годах появились работы Томсона по этому же вопросу. <sup>4)</sup> В 1885 году Фицджеральд <sup>5)</sup> обсуждал проблему устойчивости этого „гиростатического эфира“.

В этом же году Гикс <sup>6)</sup> рассматривал распространение волн в гиростатическом эфире. Теория такого распределения дана Томсоном в 1887 году, о чем уже было упомянуто выше. Другие

<sup>1)</sup> Phil. Mag. XXI, 1861; XXIII, 1862; Scient. Papers, I, стр. 451.

<sup>2)</sup> См. нашу работу „Наука и гипотеза“.

<sup>3)</sup> Brit. Assoc. Rep. 1880, p. 473.

<sup>4)</sup> „On oscillations and waves in an adynamie gyrostatic system“. P. R. S. E. 12. 1883; Steps towards a kinetik theory of matter. Brit. Ass. Rep. 1885. On a gyrostatic adynamie constitution for ether. (1889). Соч. т. III, стр. 366.

<sup>5)</sup> Proc. R. S. Dublin. 1885 г.

<sup>6)</sup> Brit. Assoc. Rep. 1885 г.

модели подобного же рода были даны Гиксом в 1888 и 1895 годах, Фицджеральдом в 1899 году. <sup>1)</sup> Все эти модели, как и другие, подвергаются суровой критике, при чем критики из всех сил стараются доказать, что теория эфира не соответствует „действительности“ и что, следовательно, эфир это — „математическая фикция“. <sup>2)</sup> Но нет худа без добра. Критика представлений об эфире показала, во-первых, что эфир не является физическим телом в обычном смысле слова и что, следовательно, не теория упругости должна объяснить свойства эфира, а, наоборот, теория упругости должна быть построена на основании понятия эфира, что и выполняется вихревой теорией; во-вторых, выяснила действительное значение физической теории и физических моделей.

#### 4.

Развитие физики, в частности учение об электромагнетизме и свете, все больше и больше выясняет тот факт, что картезианское понимание эфира, как физического пространства, является правильным. <sup>3)</sup> Еще Ньютон в известных „Вопросах“ оптики указал, что хотя волновая теория света в обычном смысле слова объясняет многое, но свет все же не является обычным волновым движением, что это скорее синтетическое явление волнового и корпускулярного одновременно характера. Теория квант подтвердила это гениальное предвидение Ньютона, показав необходимость какого-то особенного, не вполне ясного еще сейчас, представления об явлениях света и сущности „световых волн“. Вихревая теория материи прямо намекает на то, чем является синтез волнообразной и атомной теории света. В самом деле, если электрическая и магнитные силовые линии — это вихревые образования, а свет — электромагнитное колебание, распространяющееся со скоростью света, то известная вихревая система, обладающая, как мы видели, свойством упругого колебания и несущаяся в пространстве со скоростью света, дополняет именно обычное представление о свете до того синтетического представления, к которому пришла наука. Свет имеет атомное строение постольку,

<sup>1)</sup> См. Whittaker: „A History of the theories of Aether and Electricity“. 1910 г. стр. 310.—336.

<sup>2)</sup> См. Н. Witte: „Ueber den gegenwärtigen Stand der Frage nach einer mechanischen Erklärung der electrischen Erscheinungen“. В этой книге читатель найдет подробные сведения о многочисленных других теориях эфира.

<sup>3)</sup> Здесь под „эфиром“ необходимо разуметь теоретическую абстракцию в марксистском смысле понятия.



поскольку вихри образуют „атомы“ в непрерывной среде, но свет это — непрерывное явление постольку, поскольку вихревой атом может существовать только в определенной материальной субстанции и является тем или иным вихревым образованием. В замечательной книге Дж. Дж. Томсона „Электричество и материя“ наглядно показана непрерывная система электромагнитных (световых) колебаний: при ускоренном движении электрического заряда вихревые нити, образующие его электрическое поле, дают „электромагнитные волны“. Но если эту картину дополнить представлением об „изолированной“ вихревой системе, несущейся в пространстве со скоростью света и обладающей известным колебательным движением, то мы и получим „атом света“. <sup>1)</sup>

А. Эйнштейн в статье „О развитии воззрений на сущность и строение лучейспускания“ <sup>2)</sup> говорит: „Поскольку мне известно, еще не удалось создать математическую теорию изучения, которая одновременно удовлетворяла бы и волновому строению изучения и атомному“. Замечание правильное, и, быть может, еще много времени пройдет, пока такая теория будет создана, и мы получим, наконец, некоторое рациональное представление о явлениях света. <sup>3)</sup> Но путь к такому представлению, несомненно, идет через вихревую теорию материи. Эта теория является компасом, указывающим путь. Она указала путь Максвеллу, укажет путь будущим строителям рационального учения об электромагнитных волнах. В этом именно основное значение вихревой теории, а не в том, что она должна будто бы быть точной копией реальности. Если сравнить содержание статьи В. Томсона о вихревых атомах с теми заключениями о строении атома, к которым пришло современное знание, то может показаться, что вихревая теория потеряла всякое значение, что она „устарела“. Но такое заключение совершенно не верно. Оно основывается на ложном, метафизическом понимании значения физической теории. Что необходимо сказать о человеке, который на основании того, что геометрический круг не соответствует реальному, стал бы отрицать значение геометрии. Между тем рацио-

<sup>1)</sup> Эти строки были написаны в октябре 1924 г. („Под знам. марксизма“, № 10-11, 1924), т. е. до появления новой теории Томсона о структуре света. Мы нарочно оставляем их неизменными, дабы показать, насколько основательна вихревая теория материи.

<sup>2)</sup> Phys. Ls. 10, s. 817, 1909 г.

<sup>3)</sup> Крупный шаг в этом направлении сделан уже Дж. Дж. Томсоном в его последних работах о свете.

нальная физика и является геометрией физического мира, подобно тому, как геометрия это — элементарная физика. Такое понимание значения геометрии и физики (рациональной) было выдвинуто Декартом. В этом сущность Декартовской теории „врожденных идей“, учения, которое, по справедливому замечанию Плеханова (предисловие к Л. Фейербаху), не было понято современниками философа (псевдокартезианцами), в частности Локком, не понято и до сих пор. Декарт поставил тот же вопрос, что и Кант: как возможно синтетическое познание a priori, в частности математика? Декарт ответил на этот вопрос своим сочинением „Космос“, о котором мы упоминали в начале статьи. Ответ следующий: наш мир — продукт длительной эволюции. Следовательно, человек и его орган познания — мозг — образовались в течение громадного промежутка времени, выделившись из мировой материальной среды, согласно законам движения этой среды. Отсюда Декарт заключал, что мозг, порожденный мировой материей, должен адекватно соответствовать этой материи. В этом именно основание „рационализма“ Декарта, в этом именно значение его аксиомы „простых, ясных и отчетливых идей“. Декарт полагал, что наши основные понятия пространства, движения, времени („простые, ясные и отчетливые идеи“) не случайны, а являются продуктом „фундаментального опыта эволюции“. Иначе говоря, основные формы, в которые облекается наше познание, имеют корни в самой природе, из которой выделился наш мозговой аппарат. Но Декарт, как и Кант (начавший, как известно, с „Всеобщей истории и теории неба“), запутали свои учения под давлением теологических сил, в результате чего глубоко материалистические теории познания превратились в идеалистические, а „натуралистическое“ учение о „врожденных идеях“ в платоновско-мистическое.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Декарт, сознавая, что он запутывает свое учение, неоднократно просил не смешивать его теории „врожденных идей“ с теорией платоников (dialecticiens).

Что Декартовская теория мышления совпадает с марксистской об этом см. „Диалектику природы“ Энгельса, стр. 135, „О прообразах математического бесконечного в действительном мире“, а также П. Лафарг „Экономический детерминизм К. Маркса“ (глава „Происхождение идей“). Подробности в работе З. Цейтлина „Наука и гипотеза“ (Гиз. 1926 г.).

Подчеркнем здесь вкратце, что биологическая теория происхождения основных понятий нисколько не противоречит учению о влиянии общественного развития на развитие философии и науки. Развитие производительных сил является стимулирующей причиной развития понятий, но



Отсюда ясно картезианское понимание значения геометрии и рациональной физики: они дают нам основные формы материальных процессов; геометрия и рациональная физика это, так сказать, науки о „деталях“ „вселенской машины“. Сама „машина“ бесконечно сложна, но, как бы она ни была сложна, она состоит из простых деталей в самых разнообразных комбинациях, бесконечной даже сложности. В этом именно значение физических моделей, в частности вихревой теории. Нет необходимости, чтобы они были точными копиями действительности, и принципиально важно то, что они показывают возможность рационального объяснения явлений. Реальная материя обнаруживает силы тяготения, упругости, электромагнитные и т. д.; если эти силы находят свое рациональное объяснение в физической модели, то этим сделано очень многое, хотя действительное явление может быть гораздо сложнее. Пуанкаре в своей характеристике „Физики принципов“ (см. „Ценность науки“) приводит пример машины, передаточный механизм которой скрыт, но в которой видны точки приложения двигательной силы и сопротивления. Этот передаточный механизм может состоять из громадного количества „сцепленных деталей“, но каково бы ни было их количество, „физическая модель“ механизма дает основные детали сцепления и в этом смысле вполне эквивалентна данному механизму. Так что правильно построенная физическая модель в известной мере соответствует реальности.

Заметим здесь, что основное условие рациональной модели в том, чтобы она не базировалась на том именно, что требуется объяснить. Вот почему модели Максвелла, Больцманна или Бьеркнесса,<sup>1)</sup> например, не являются вполне рациональными; таковой является вихревая теория материи, — вот почему она и вызвала такой научный энтузиазм и внимание.

В заключение укажем, что относительно формальное изучение явлений дает возможность построения модели, что в свою очередь толкает вперед формальное познание явлений.

последнее развитие, как это указал Энгельс, имеет свою имманентную логику, которая коренится именно в биологических факторах.

<sup>1)</sup> См. замечательную книгу: V. Bjerkness. Die Kraftfelder 1909. Несмотря на то, что модели Бьеркнесса не рациональны, они заслуживают большего внимания на том основании, что, помимо первичных вихревых явлений, существуют вторичные в конкретной материи (по Ленару: первый и второй эфир). Впрочем, это замечание относится к собственной модели Бьеркнесса — теории „пульсаций“; в конце книги (глава II, § 75) Бьеркнесс переходит к рассмотрению „источников“ и „стоков“ и к вихревым движениям.

Так, формальный закон тяготения Ньютона привел Римана к построению рациональной теории притяжения на основании гидродинамических понятий „источников“ и „стоков“. Эта теория Римана была использована Гербером, который с помощью учения Гельмгольца-Неймана о кинетическом потенциале, дополнил закон Ньютона и получил известную формулу движения перигелия Меркурия.<sup>1)</sup>

Точно также формальные законы электромагнетизма указывают на известный механизм сил, а вихревая теория помогает решать некоторые вопросы электрической теории материи (см. предисловие Пуанкаре к его „Теории вихрей“).

Таким образом, истинно научный метод заключается в сочетании рационального и формального моментов, при чем как тот, так и другой являются только относительными.

<sup>1)</sup> См. нашу работу „Закон движения Энгельса“. Изд. Тимирязевского Инст. 1927 г.



ПРИЛОЖЕНИЕ ЧЕТВЕРТОЕ  
УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА-ГЕРЦА

ФАРАДЕЕВЫ СИЛОВЫЕ ТРУБКИ И УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА.

ДЖ. ДЖ. ТОМСОН.<sup>1)</sup>

Глава I.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СМЕЩЕНИЕ И ФАРАДЕЕВЫ СИЛОВЫЕ ТРУБКИ.

1. Влияние, которое оказывали всегда обозначения и идеи теории электрической жидкости, со времени их введения, на науку об электричестве и магнетизме, представляет поразительную иллюстрацию благодетельного влияния, оказанного этой науке конкретным представлением символов, которые в математической теории электричества определяют состояние электрического поля. Действительно, услуги, которые старая теория жидкости оказала электричеству, доставив язык, которым научные факты могут быть выражены ясно и кратко, едва ли могут быть переоценены. Описательная теория этого рода не только служит средством для ясного изложения хорошо известных результатов, но часто оказывает важные услуги, указывая на возможность существования новых явлений.

Описательная гипотеза смещения в диэлектрике, которую Максвелл иллюстрировал свою математическую теорию, признается, повидимому, многими читателями не столь простой, не столь легкой для понимания, как старая теория жидкости; действительно, это, кажется, было одной из главных причин, почему его взгляды не встретили сначала общего признания, которое они получили впоследствии. Так как многие студенты находят концепцию „смещения“ затруднительной, то я решаюсь дать другой способ представления процессов, встречающихся в электрическом поле, который я

<sup>1)</sup> Перевод начала первой главы из книги I. I. Thomson'a. Recent Researches on Electricity and Magnetism. Oxford. 1893. Новейшие исследования в области электричества и магнетизма.

часто находил полезным и который с математической точки зрения равносителен теории Максвелла.

2. Этот способ основывается на концепции, введенной Фарадеем, о трубках электрической силы или, скорее, электростатической индукции. Как известно, Фарадей пользовался этими трубками, как способом выражения явлений электрического поля. Так, их стремлением к сокращению и боковым отталкиваниям, которые подобные трубки оказывают друг на друга, он объяснял механические силы между электрическими телами, между тем как влияние среды на эти трубки указывалось, по его мнению, существованием специфической индуктивной проницаемости диэлектриков. Хотя выражения, которыми Фарадей пользовался, говоря о силовых линиях, оставляют впечатление, что он обыкновенно рассматривал их как цепи поляризованных частиц в диэлектрике, но, повидимому, имеются указания, что он при случае рассматривал их с другой точки зрения, т. е. как нечто, существующее независимо от молекул диэлектрика, хотя бы последние были поляризованы трубками при прохождении через диэлектрик. Так, напр., в § 1616 „Экспериментальных исследований“ он, повидимому, рассматривает эти трубки, как простирающиеся через пустоту. Мы примем этот последний взгляд на трубки электростатической индукции, мы будем считать, что они пребывают в эфире, при чем поляризация частиц, сопровождающая их прохождение через диэлектрик, — вторичное явление. Ради краткости мы будем называть такие трубки фарадеевыми трубками.

В дополнение к трубкам, простирающимся от положительного к отрицательному электричеству, предположим, что в эфире имеется множество трубок такого рода, которые лишь образуют отдельные замкнутые кривые вместо того, чтобы иметь свободные концы; мы будем называть такие трубки „замкнутыми“ трубками. Различие между обоими видами трубок подобно различию между вихревой нитью с концами на свободной поверхности жидкости и нитью, образующей замкнутое вихревое кольцо внутри ее. Эти замкнутые трубки, по предположению, присутствующие в эфире независимо от того, существуют ли электрические силы или нет, сообщают эфиру волокнистую структуру.<sup>1)</sup>

В своей теории электрических и магнитных явлений Фарадей пользовался наравне с трубками электростатической индукции и

<sup>1)</sup> Замкнутые трубки в настоящее время использованы I. I. Thomson'ом для объяснения теории квант. (Прим. ред.)



трубками магнитной; однако, если держаться концепции трубок электростатической индукции, то мы найдем, что явления магнитного поля можно объяснить, как зависящие от движения электрических трубок.

#### ФАРАДЕЕВЫ ТРУБКИ.

3. Как это объяснено в § 82 „Электричества и магнетизма“, Максвелла, эти трубки начинаются от мест, заряженных положительным электричеством, и кончаются в местах, заряженных отрицательным, при чем количество положительного электричества в начале трубки равно количеству отрицательного на конце. Если допустить, что все трубки одинаковой силы, то количество свободного положительного электричества какой-либо поверхности пропорционально числу трубок, оставляющих поверхность. В математической теории электричества нет указаний на то, что есть предел, до которого поле электрической силы может быть подразделяемо на трубки постоянно уменьшающейся силы, но дело обстоит иначе, если считать эти силовые трубки не только формой математического выражения, но и реальными физическими количествами, имеющими определенные размеры и формы.<sup>1)</sup> Принимая этот взгляд, мы естественно считаем эти трубки совершенно одинаковой силы, и мы увидим основания для допущения, что эта сила такова, что, когда трубки оканчиваются на проводнике, то на конце трубки имеется заряд отрицательного электричества, равный тому, который мы в теории электролиза ассоциируем с атомом одновалентного элемента в роде хлора.

Эта сила единичных трубок допускается потому, что явления электролиза показывают, что действительно имеется естественная единица, и что не существует дробных частей этой единицы, по крайней мере в электричестве, прошедшем через электролит. Мы будем допускать в этой главе, что во всех электрических процессах, а не только в электролизе не существует дробных частей этой единицы.

Фарадеевы трубки либо образуют замкнутые цепи, либо начинаются и оканчиваются на атомах, а все незамкнутые трубки простираются в эфире вдоль прямых или кривых линий от одного

<sup>1)</sup> Эта мысль была высказана Томсоном еще в ту пору, когда не был установлен заряд электрона и, следовательно, атомистическая структура электричества во всей ее полноте. Однако, и теперь мы не можем установить, сколько трубок связано с элементарным зарядом. Во всяком случае это должно быть какое-то определенное число. (Прим. ред.)

атома к другому. Когда длина связывающей два атома трубки сравнима с расстоянием между атомами в молекуле, то атомы считаются в химическом соединении; когда же трубка, связывающая атомы, гораздо длиннее этого расстояния, атомы считаются „химически свободными“.

Свойство фарадеевых трубок образовывать всегда замкнутые цепи, т. е. иметь окончания на атомах, может быть иллюстрировано подобным же свойством трубок, образуемых вихревым движением в жидкости, лишенной трения; эти трубки или образуют замкнутые цепи, или имеют свои окончания на границе жидкости, в которой имеет место вихревое движение.

Можно предположить, что фарадеевы трубки простираются через пространство, а не только ограничены местами, где имеет место конечной величины электродвижущая сила, так что отсутствие этого напряжения зависит не от отсутствия фарадеевых трубок, но от недостатка правильного расположения наличных трубок: так что электродвижущая сила в данном месте представляет меру не всего числа трубок в этом месте, но лишь избытка числа их в направлении электродвижущей силы над числом обращенных в противоположную сторону.

4. В этой главе мы постараемся показать, что различные явления электромагнитного поля могут быть объяснены как зависящие от движения фарадеевых трубок или от изменений в их положении или форме. Таким образом, с нашей точки зрения, этот взгляд на электрические явления может считаться образующим род молекулярной теории электричества, при чем фарадеевы трубки занимают место молекул в кинетической теории газов. Цель этого метода объяснить явления электрического поля, как зависящие от движения этих трубок, точно так, как цель кинетической теории газов объяснить свойства газа, как зависящие от движения молекул. Точно также эти трубки похожи на молекулы газа и в другом смысле, когда мы рассматриваем их как неспособные к разрушению или возникновению.

5. Прежде всего можно спросить, почему мы считаем нашими, так сказать, молекулами трубки электростатической индукции, а не трубки магнитной индукции? Ответ на этот вопрос тот, что очевидность, представляемая явлениями, которые сопровождают прохождение электричества через жидкости и газы, показывает, что молекулярное строение имеет чрезвычайно тесную связь с трубками электростатической индукции, гораздо более тесную, чем мы имеем основание допускать для трубок магнитной индукции. Выбор трубок



электростатической индукции в качестве наших молекул является поэтому единственным, который дает нам наибольшую возможность объяснить те электрические явления, в которых играют роль материя так же, как эфир.

6. Рассмотрим с этой точки зрения происхождение энергии в электростатическом и электромагнитном полях. Мы предполагаем, что в связи с фарадеевыми трубками находится распределение скорости эфира как в самих трубках, так и в пространстве, окружающем их. Таким образом, мы можем иметь вращение в эфире внутри и вокруг трубок даже тогда, когда сами трубки не имеют поступательной скорости, при чем кинетическая энергия, зависящая от этого движения, составляет потенциальную энергию электростатического поля: 1) когда же сами трубки находятся в движении, то мы прибавляем к нему другое распределение скорости, энергия которого составляет энергию магнитного поля.

Энергия, о которой мы говорили, находится в эфире, но, когда трубка падает на атом, то она может видоизменить внутреннее движение атома и таким образом воздействовать на его энергию. Итак, в придачу к кинетической энергии эфира, происходящей от электрического поля, в атомах может также находиться некоторая энергия, возникающая от той же причины и зависящая от изменения внутреннего движения в атомах, вызванного присутствием фарадеевых трубок. Если изменение энергии атома, вызванное присутствием фарадеевой трубки, различно для атомов разных веществ, если оно не одинаково, напр., для атома водорода и для атома хлора, то энергия известного числа молекул хлористоводородной кислоты будет зависеть от того, начинаются ли фарадеевы трубки от водорода и оканчиваются на хлоре или наоборот. Если, таким образом, энергия в молекулах зависит от расположения трубок в молекуле, то будет иметь место стремление, чтобы все трубки начинались на водороде и оканчивались на хлоре или наоборот, сообразно тому, первое или второе из этих расположений делает различие между кинетической и потенциальной энергией максимальным. Другими словами, на языке обыкновенной теории электричества, все атомы водорода обнаружат стремление зарядиться электричеством одного знака, а все атомы хлора заряжаются равным количеством электричества противоположного знака.

1) Замечательная попытка свести потенциальную энергию к кинетической. (Прим. ред.)

Результат различного действия на энергию атома, вызванного присутствием фарадеевой трубки, будет тот же, как если бы атомы разных веществ притягивали электричество с разной степенью напряжения; как показано Гельмгольцем, этого достаточно для объяснения электричества, вызываемого соприкосновением и трением. Таким образом, как мы увидим во II главе, это объясняет некоторые из действий, наблюдаемых при прохождении электричества от газа к металлу или наоборот.

7. Фарадеевы трубки при достижении проводника суживаются до молекулярных размеров. Мы рассмотрим процессы, которыми это достигается, в конце этой главы, а пока приступим к обсуждению действий, вызываемых этими трубками при движении через диэлектрик.

8. Чтобы иметь возможность определить состояние электрического поля в каком-либо месте диэлектрика, мы введем величину, которую мы назовем „поляризацией“ диэлектрика и которая, будучи математически тождественной с максвелловым „смещением“, однако, физически имеет иное объяснение. „Поляризация“ определяется следующим образом: пусть  $A$  и  $B$  будут две соседние точки в диэлектрике, проведем между этими точками плоскость и выделим на ней площадку, равную единице, перпендикулярно к линии, соединяющей их; тогда поляризация в направлении  $AB$  представляет излишек числа фарадеевых трубок, проходящих через единицу площади со стороны  $A$  в сторону  $B$ , над проходящими через ту же плоскость от  $B$  к  $A$ . В диэлектрике, отличном от воздуха, вообразим единицу площади, расположенной в узкой щели, вырезанной в диэлектрике, так что стороны щели перпендикулярны к  $AB$ . Очевидно, поляризация представляет величину вектора и может быть разложена на составляющие тем же способом, как сила или скорость; обозначим составляющие, параллельные осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , буквами  $f$ ,  $g$ ,  $h$ ; последние математически тождественны с величинами, которые Максвелл обозначает теми же буквами, но их физическая интерпретация иная.

9. Исследуем теперь степень изменения составляющих поляризации в диэлектрике. Так как фарадеевы трубки в такой среде не могут ни возникать ни разрушаться, то изменение числа трубок, проходящих через некоторую неподвижную площадь, должно зависеть от движения или деформации трубок. Предположим во-первых, что трубки в одном месте движутся все с одинаковой скоростью. Пусть  $u$ ,  $v$ ,  $w$  будут составляющие скоростей этих трубок в известной точке, тогда изменение  $f$ , числа трубок, проходящих в точке







ными к  $y$ , будут по истечении времени  $\delta t$  закручены к оси  $x$  на угол  $\delta t \frac{du}{dy}$ ; подобным образом трубки, параллельные  $z$ , будут закручены на угол  $\delta t \frac{du}{dz}$  к оси  $x$  во время  $\delta t$ ; отсюда  $\delta_3 f$ , изменение  $f$ , зависящее от этой причины, будет дано уравнением

$$\delta_3 f = \delta t \left\{ g \frac{du}{dy} + h \frac{du}{dz} \right\}$$

Поэтому, если  $\delta f$  есть полное изменение  $f$  во время  $\delta t$ , так как

$$\delta f = \delta_1 f + \delta_2 f + \delta_3 f,$$

то мы имеем

$$\delta f = \left[ - \left( u \frac{df}{dx} + v \frac{df}{dy} + w \frac{df}{dz} \right) - f \left( \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) + \left( g \frac{du}{dy} + h \frac{du}{dz} \right) \right] \delta t,$$

которое можно написать в виде:

$$\frac{df}{dt} = \frac{d}{dy} (ug - vf) - \frac{d}{dz} (wf - uh) - u \left( \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} \right) \dots (1)$$

жить  $= \frac{B_0 B}{O_1 B_0} = \frac{\partial u}{\partial y} \delta t$ . Вследствие поворота вектора  $f, g, h$ , слагающая по

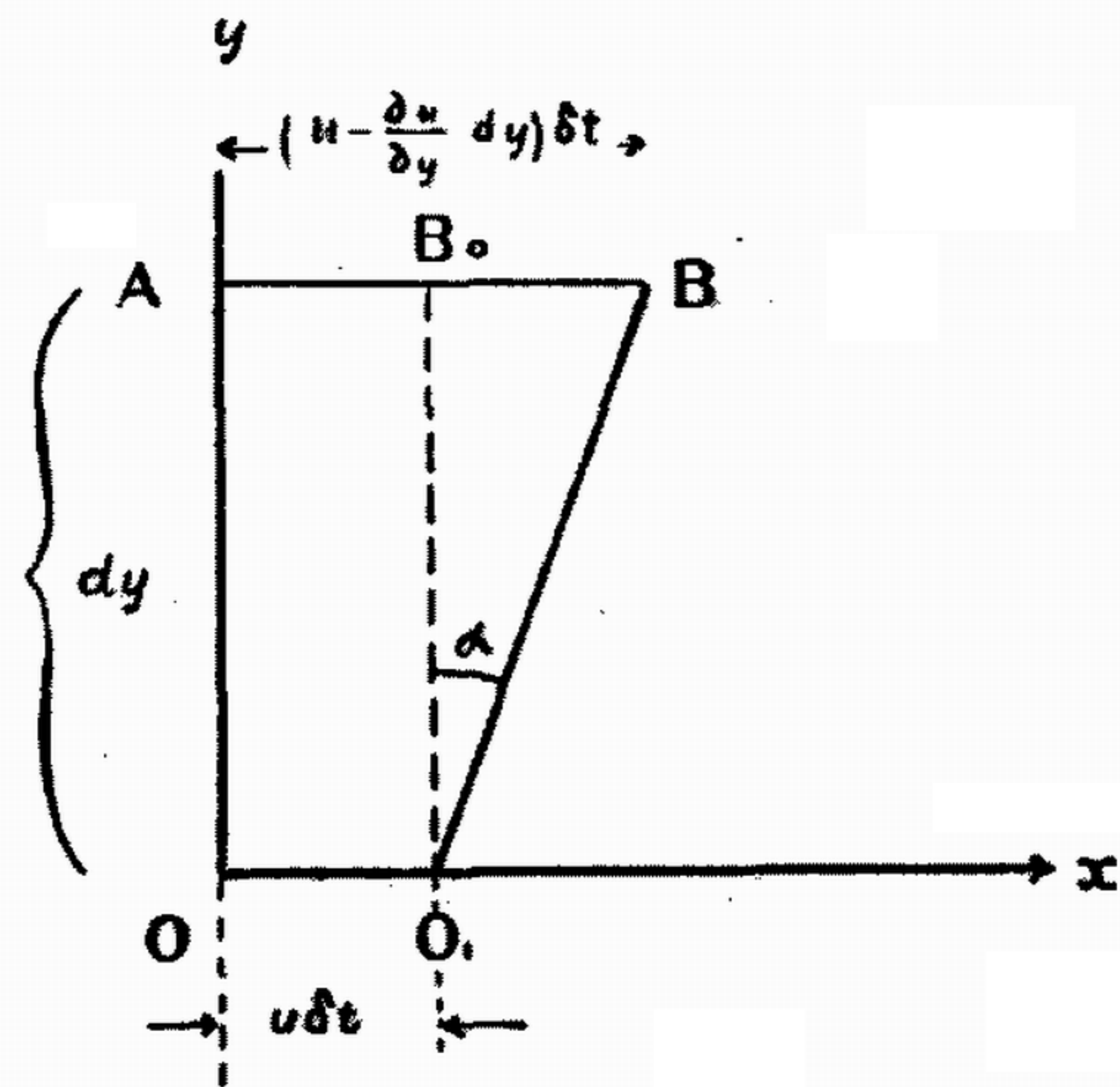


Рис. 47.

оси  $x$  увеличится на  $g \frac{du}{dy} \delta t$ . Аналогично находим для оси  $z$ :  $h \frac{du}{dz} \delta t$ .

Итак,  $\delta_3 f = \delta t \left\{ g \frac{du}{dy} + h \frac{du}{dz} \right\}$ . (Прим. ред.)

Если  $\rho$  есть плотность свободного электричества, то в виду того, что, по определению § 8, поверхностный интеграл нормальной поляризации, взятый по некоторой замкнутой поверхности, должен быть равен количеству электричества внутри этой поверхности, следовательно,

$$\rho = \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz}, \quad 1)$$

поэтому уравнение (1) можно написать

$$\frac{df}{dt} + u\rho = \frac{d}{dy} (ug - vf) - \frac{d}{dz} (wf - uh)$$

Подобным образом

$$\frac{dg}{dt} + v\rho = \frac{d}{dx} (vh - wg) - \frac{d}{dx} (ug - vf),$$

$$\frac{dh}{dt} + w\rho = \frac{d}{dx} (wf - uh) - \frac{d}{dy} (vh - wg)$$

..... (2)

Если  $p, q, r$  суть составляющие плотности тока, соответственно параллельные  $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  — составляющие магнитной силы в тех же направлениях, то мы знаем

$$\left. \begin{aligned} 4\pi p &= \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz}, \\ 4\pi q &= \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx}, \\ 4\pi r &= \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} \end{aligned} \right\} 2)$$

(3)

Поэтому, рассматривая ток, как состоящий из конвекционного тока, составляющие которого соответственно  $u\rho, v\rho, w\rho$  и тока поляризации, составляющие которого  $\frac{df}{dt}, \frac{dg}{dt}, \frac{dh}{dt}$ , мы увидим, сравнивая уравнения (2) и (3), что можно считать движущиеся фарадеевы

1) Из условия  $\int_0 (f \cos ux + g \cos uy + h \cos uz) ds = e$  (для замкнутой поверхности  $s$ ), вытекает после преобразования поверхностного интеграла в объемный для элемента  $dx dy dz$  и замены  $\rho dx dy dz = e$  ( $\rho$  плотность заряда) —  $\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial g}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial z} = \rho$ . (Положительное направление нормали  $n$  внутрь замкнутой поверхности.)

2) Первая группа уравнений Максвелла. Таким образом, если мы сделаем допущение, что напряжение магнитного поля выражается (4), то уравнение (2) дает максвелловские уравнения, которые мы получили, рассматривая движение фарадеевских трубок. (Прим. ред.)



трубки дающими начало магнитной силе, составляющие которой  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  даны уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 4\pi(vh - wg), \\ \beta &= 4\pi(wf - uh), \\ \gamma &= 4\pi(ug - vf) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Таким образом фарадеева трубка в движении производит магнитную силу, перпендикулярную к ней <sup>1)</sup> самой и направлению ее движения, величина которой пропорциональна составляющей скорости, перпендикулярной направлению трубки. Магнитная сила и вращение от направления движения к направлению трубки в некоторой точке относятся подобно передвижению и вращению в правом винте.

10. Движение этих трубок предполагает кинетическую энергию, которая представляет энергию магнитного поля. Но, если  $\mu$  есть магнитная проницаемость, то мы знаем, что энергия на единицу объема будет

$$\frac{\mu}{8\pi} (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2),$$

или, подставляя величины  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  из уравнений (4),

$$2\pi\mu[(hv - gw)^2 + (fw - hu)^2 + (gu - fv)^2].$$

Количество движения на единицу объема диэлектрика, параллельное  $x$ , есть частная производная <sup>2)</sup> этого выражения по  $x$ , откуда, если  $U$ ,  $V$ ,  $W$  суть составляющие количества движения, соответственно параллельные  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , мы имеем

$$U = 4\pi\mu \{ g(gu - fv) - h(fw - hu) \} = gc - hb,$$

если  $a$ ,  $b$ ,  $c$  суть составляющие магнитной индукции, параллельные  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Подобным образом

$$\left. \begin{aligned} V &= ha - fc \\ W &= fb - ga \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

<sup>1)</sup> Формулы (4) показывают, что  $av + \beta v + \gamma w = 0$ , а также  $af + \beta g + \gamma h = 0$ , т. е. что направление вектора  $(\alpha, \beta, \gamma)$  образует прямой угол с векторами скорости  $v$  ( $u, v, w$ ) и электростатической индукции  $D$  ( $f, g, h$ ). Пользуясь векторными обозначениями можно сказать, что  $M = 4\pi [vD] = = 4\pi |v| |D| \sin(v, D)$ . (Прим. ред.)

<sup>2)</sup> Так, например, количество движения  $m$  движущейся материальной точки равняется частной производной от кинетической энергии  $\frac{mv^2}{2}$  по  $u$ . (Прим. ред.)

Таким образом, количество движения на единицу объема диэлектрика, зависящее от движения трубок, перпендикулярно поляризации и магнитной индукции, при чем величина количества движения равна произведению поляризации и слагающей магнитной индукции, перпендикулярной к направлению трубки. Интересно отметить, что составляющие количества движения в поле, данные уравнениями (5), пропорциональны количествам энергии, переносимым в единицу времени через единицу площади плоскостей, перпендикулярных к осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , по теории Пойнтинга о переносе энергии в электромагнитном поле (Philos. Trans 1884, ч. II, стр. 343); поэтому направление, в котором, по теории Пойнтинга, энергия должна двигаться, одинаково с направлением количества движения, определенного предыдущим исследованием.

11. Электродвижущие силы, параллельные  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , зависящие от движения трубок, суть частные производные кинетической энергии соответственно по  $f$ ,  $g$ ,  $h$ ; <sup>1)</sup> отсюда мы получаем следующие выражения для  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  составляющих электродвижущей силы

$$\left. \begin{aligned} X &= wb - vc \\ Y &= uc - wa \\ Z &= va - ub \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Таким образом, направление электродвижущей силы, зависящее от движения трубок, перпендикулярно как магнитной индукции, так и направлению движения трубок.

Из уравнений (6) мы получим

$$\frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dx} = v \frac{da}{dy} + w \frac{da}{dz} - u \left( \frac{db}{dy} + \frac{dc}{dz} \right) + a \left( \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} \right) - b \frac{du}{dy} - c \frac{du}{dz}.$$

Но так как уравнение

$$\frac{da}{dx} + \frac{db}{dy} + \frac{dc}{dz} = 0$$

<sup>1)</sup> Это можно выяснить себе на следующем примере. Если материальная точка движется под действием упругой силы  $F = -a^2x$ , то энергия, вызванная смещением  $x$ , будет  $-\frac{a^2x^2}{2}$ , отсюда сила  $F = -a^2x$  будет частной производной от энергии по смещению  $x$ . Точно также в рассматриваемом случае электродвижущая сила получается как частная производная от магнитной энергии по  $f$ ,  $g$ ,  $h$ . (Прим. ред.)



остается в силе, как мы сейчас покажем; по принятой нами теории магнитной силы, так же, как и по обыкновенной теории имеем

$$\frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz} = u \frac{da}{dx} + v \frac{da}{dy} + w \frac{da}{dz} +$$

$$+ a \left( \frac{dv}{dy} - \frac{dw}{dz} \right) - b \frac{du}{dy} - c \frac{du}{dz}.$$

Правая часть этого уравнения по рассуждению, данному в § 9, равна  $-\frac{da}{dt}$ , степени уменьшения числа линий магнитной индукции, проходящих через единицу площади перпендикулярной оси  $x$ : отсюда мы имеем

$$\left. \begin{aligned} \frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz} &= -\frac{da}{dt} \\ \frac{dX}{dz} - \frac{dZ}{dx} &= -\frac{db}{dt} \\ \frac{dY}{dx} - \frac{dX}{dy} &= -\frac{dc}{dt} \end{aligned} \right\} \text{ 1) } \quad (7)$$

Но по теореме Стокса

$$\int (Xdx + Ydy + Zdz),$$

взятый вдоль замкнутого контура, равен

$$\iint \left\{ l \left( \frac{dZ}{dy} - \frac{dY}{dz} \right) + m \left( \frac{dX}{dz} - \frac{dZ}{dx} \right) + n \left( \frac{dY}{dx} - \frac{dX}{dy} \right) \right\} ds,$$

где  $l, m, n$  суть косинусы направления нормали к поверхности  $s$ , которая вполне ограничена замкнутым контуром. Подставляя предыдущие величины вместо  $dZ/dy - dY/dz$  и пр., мы видим, что линейный интеграл электродвижущей силы вдоль замкнутой цепи равен степени уменьшения числа линий магнитной индукции, проходящих через цепь. Поэтому предыдущая теория происхождения магнитной силы ведет к правилу Фарадея относительно индукции токов путем изменения магнитного поля.

12. Когда электродвижущая сила вполне зависит от движения трубок в изотропной среде, диэлектрическая постоянная которой есть  $K$ , мы имеем

$$f = \frac{K}{4\pi} X = \frac{K}{4\pi} (wb - vc),$$

а так как

$$b = 4\pi\mu(fw - hu), \quad c = 4\pi\mu(gu - fv),$$

1) Т. е. вторая группа уравнений Максвелла.

то

$$f = \mu K \{ f(u^2 + v^2 + w^2) - u(fu + gv + hw) \};$$

точно также

$$g = \mu K \{ g(u^2 + v^2 + w^2) - v(fu + gv + hw) \},$$

$$h = \mu K \{ h(u^2 + v^2 + w^2) - w(fu + gv + hw) \},$$

откуда

$$fu + gv + hw = 0, \quad 1)$$

и потому

$$u^2 + v^2 + w^2 = \frac{1}{\mu K}. \quad 2)$$

Поэтому, когда электродвижущая сила вполне зависит от движения трубок, то трубки движутся перпендикулярно к самим себе со скоростью  $1/\sqrt{\mu K}$ , т. е. со скоростью света, проходящего через диэлектрик. В этом случае количество движения параллельно направлению движения, и электродвижущая сила имеет направление электрической поляризации. В этом случае поляризация, направление движения и магнитная сила взаимно перпендикулярны.

Подводя итоги, мы видим, что, когда фарадеева трубка находится в движении, то она сопровождается 1) магнитной силой, перпендикулярной к трубке и к направлению, в котором она движется, 2) количеством движения, перпендикулярным к трубке и к магнитной индукции, 3) электродвижущей силой, перпендикулярной к направлению движения и к магнитной индукции; эта сила стремится всегда поставить трубку перпендикулярно к направлению, в котором трубка движется. Таким образом, в изотропной среде, в которой нет свободного электричества и, следовательно, электродвижущих сил, кроме тех, которые возникают от движения трубок, трубки становятся перпендикулярно к направлению движения.

13. До сих пор мы рассматривали случай, когда трубки в каком-либо месте диэлектрика движутся с одинаковой скоростью. Но мы без труда можем распространить эти результаты на случай, когда у нас разные ряды трубок, движущиеся с разными скоростями.

Предположим, что мы имеем трубки  $f_1, g_1, h_1$ , движущиеся со скоростью, составляющие которой  $u_1, v_1, w_1$ , тогда как трубки  $f_2, g_2, h_2$  движутся со скоростями  $u_2, v_2, w_2$ , и т. д. Тогда сте-

1) Результат этот получается, если мы сложим написанные уравнения, помножив их соответственно на  $u, v$  и  $w$ . (Прим. ред.)

2)  $\frac{1}{\mu K} = c^2$ , где  $c$  — скорость света. (Прим. ред.)



пень возрастания числа трубок, проходящих через единицу площади перпендикулярна к оси  $x$ , по тем же основаниям, как прежде, будет

$$\frac{d}{dy} \Sigma(ug - fv) - \frac{d}{dz} \Sigma(wf - uh) - \Sigma(u\varphi).$$

Отсюда мы видим, как прежде, что трубки можно считать производящими магнитную силу, составляющие которой  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  даны уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 4\pi \Sigma(vh - wg) \\ \beta &= 4\pi \Sigma(wf - uh) \\ \gamma &= 4\pi \Sigma(ug - vf). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Кинетическая энергия на единицу объема  $T$ , зависящая от движения этих трубок, дана уравнением

$$T = \frac{\mu}{8\pi} (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2),$$

или

$$T = 2\pi\mu \{ [\Sigma(vh - wg)]^2 + [\Sigma(wf - uh)]^2 + [\Sigma(ug - vf)]^2 \}.$$

Таким образом,  $dT/du$ , количество движения на единицу объема, параллельное  $x$ , зависящее от трубки со значком 1, равно

$$\begin{aligned} 4\pi\mu \{ g_1 \Sigma(ug - vf) - h_1 \Sigma(wf - uh) \} = \\ = g_1 c - h_1 b, \end{aligned}$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — составляющие магнитной индукции.

Таким образом,  $U$ ,  $V$ ,  $W$  составляющие количества движения на единицу объема, параллельные соответственно осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , даны уравнениями

$$\left. \begin{aligned} U &= c\Sigma g - b\Sigma h \\ V &= a\Sigma h - c\Sigma f \\ W &= b\Sigma f - a\Sigma g. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Итак, когда мы имеем известное число трубок, движущихся в электрическом поле, равнодействующее, количество движения в некоторой точке перпендикулярно как к равнодействующей магнитной индукции, так и к равнодействующей поляризации и равно произведению этих двух величин на синус угла между ними.

Электродвижущие силы  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , параллельные соответственно осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , равны средним величинам  $dT/df$ ,  $dT/dg$ ,  $dT/dh$ , отсюда мы имеем

$$\left. \begin{aligned} X &= b\bar{w} - cv, \\ Y &= c\bar{u} - a\bar{w}, \\ Z &= a\bar{v} - b\bar{u}, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где черта, проведенная над данным количеством, показывает, что надо взять среднюю величину его.

Таким образом, когда система фарадеевых трубок находится в движении, то электродвижущая сила перпендикулярна к равнодействующей магнитной индукции и к средней скорости трубок и равна по величине произведению этих двух количеств на синус угла между ними.

Из предыдущих уравнений мы видим, что здесь возможна равнодействующая магнитная сила, зависящая от движения положительных трубок в одном направлении и отрицательных в противоположном без всякого равнодействующего количества движения или электродвижущей силы; ибо, если здесь столько же положительных, как отрицательных трубок проходит через каждую единицу площади, так что нет равнодействующей поляризации, то и не будет, на основании уравнений (9), равнодействующего количества движения, ибо, если число трубок, движущихся в одном направлении, таково же, как число движущихся в противоположном, то уравнения (10) показывают, что здесь не будет равнодействующей электродвижущей силы, зависящей от движения трубок. Итак мы видим, что, когда магнитное поле постоянно, то движение фарадеевых трубок в поле будет своего рода сдвигами положительных и отрицательных трубок: положительные трубки движутся в одном направлении, а отрицательные в том же количестве в противоположном. Когда же поле не постоянно, это не имеет места, и тогда развиваются электродвижущие силы, зависящие от индукции.

#### МЕХАНИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ПОЛЕ.

14. Количество движения, параллельное  $x$  на единицу объема среды, зависящее от движения фарадеевых трубок, равно по уравнению (9)

$$c\Sigma g - b\Sigma h;$$

так что количество движения, параллельное  $x$ , которое входит в часть среды, ограниченную замкнутой поверхностью  $s$ , в единицу времени, равно

$$\iint \{ c\Sigma g(lu + mv + nw) - b\Sigma h(lu + mv + nw) \} ds,$$



где  $ds$  — элемент поверхности, а  $l, m, n$  — направляющие косинусы нормали, обращенные во внутрь.

Если поверхность  $s$  так мала, что внешнее магнитное поле на всем ее протяжении можно считать постоянным, то это выражение можно написать так

$$c \iint \Sigma g(lu + mv + nw) - b \iint \Sigma h(lu + mv + nw) ds.$$

Но

$$\iint \Sigma g(lu + mv + nw) ds \quad \text{и} \quad \iint \Sigma h(lu + mv + nw) ds.$$

представляют число фарадеевых трубок, параллельных соответственно  $y$  и  $z$ , входящих в элемент в единицу времени, т. е. они представляют объемные интегралы слагающих  $q$  и  $r$  тока, параллельного соответственно  $y$  и  $z$ : если среда, окруженная поверхностью  $s$  — диэлектрик, то это поляризационный ток; если она проводник, то это ток проводимости. Таким образом, количество движения, параллельное  $x$ , сообщаемое в единицу времени единице объема среды, другими словами, сила, параллельная  $x$ , действующая на единицу объема среды, равна

$$cq - br;$$

точно так же силы, параллельные  $y$  и  $z$ , соответственно равны

$$\left. \begin{array}{l} ar - cp \\ bp - aq \end{array} \right\} \quad (11)$$

Когда среда есть проводник, то это — обыкновенные выражения для слагающих силы на единицу объема проводника, когда он несет ток в магнитное поле.

Когда мы рассматриваем, как в данном выше выражении силу, действующую на проводник, несущий ток, как зависящую от сообщения проводнику количества движения фарадеевых трубок, входящих в проводник, то происхождение силы между двумя токами будет очень похоже на силу притяжения между двумя телами по теории тяготения Лесажа. Так, напр., если мы имеем два параллельных тока  $A$  и  $B$ , идущие в том же направлении, то, когда  $A$  находится слева от  $B$ , большее число трубок войдут в  $A$  слева, чем справа, потому что некоторые из тех, которые вошли бы справа в отсутствие  $B$ , будут поглощены  $B$ , так что в единицу времени количество движения, имеющее направление слева направо, входящее

в  $A$ , превзойдет количество движения, имеющее противоположное направление, так что  $A$  стремится двигаться вправо, т. е. к  $B$ , а  $B$  по той же причине будет двигаться к  $A$ .

15. Таким образом мы видели, что гипотеза фарадеевых трубок в движении объясняет свойства электромагнитного поля и ведет к обычным уравнениям его. Эта гипотеза имеет преимущество, показывая весьма ясно, почему поляризационные токи и токи проводимости вызывают подобные механические и магнитные действия. Ибо механические действия и магнитные силы в некоторой точке поля зависят от движения фарадеевых трубок в этой точке, и всякое изменение поляризации предполагает движение этих трубок точно так, как при обычном токе проводимости. □

## ВИХРЕВАЯ ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДВИЖЕНИЯ. 1)

### 3. Цейтлин.

#### Вывод уравнений Максвелла-Герца.

##### 1.

История развития учения об электромагнетизме и свете приводит к бесспорному убеждению, что сущностью электромагнитных процессов является вихревое движение. Недавние исследования Дж. Дж. Томсона, Кастерина и Уайттекера<sup>2)</sup> о квантовом электромагнитном кольце, уж не оставляют места для какого бы то ни было сомнения на этот счет. Большой знаток теорий электромагнетизма Уайттекер подчеркивает в своей последней работе, что электромагнитное квантовое кольцо, повидимому, является вихревым образованием.

Задача настоящей статьи показать весьма простым способом, что уравнения Максвелла-Герца действительно вытекают из основного уравнения вихревой теории — уравнения Стокса-Гельмгольца:

$$2\omega = 4\pi w = \text{curl} \cdot v,$$

1) Для понимания нижеизложенного необходимо знание основ теории вихрей. Рекомендуем для этой цели превосходную книгу А. А. Эйхенвальда: „Теоретическая физика“, ч. I, теория поля. Более подробное изложение в III томе „Теоретической механики“ П. Аппеля. Практические иллюстрации в „Основах воздухоплавания“ Н. Е. Жуковского.

2) См. статьи: Кастерина—Phil. Magaz. Декабрь 1926 г. E. T. Whittaker Proc. Royal. Ed. 46 (1926), стр. 116; там же J. M. Whittaker, стр. 306.



где  $v(x, y, z, t)$  — скорость данной точки среды,<sup>1)</sup>  $\omega(x, y, z, t)$  — соответствующая угловая скорость; величина  $\omega$  называется вихрем, при чем коэффициент  $4\pi$  вводится для приведения в соответствие формул механического движения с принятыми в электродинамике обозначениями.

Чтобы понять сущность нашего вывода уравнений электромагнитного движения, необходимо прежде всего принять во внимание следующее:

Теория Максвелла-Герца является теорией „средних значений“ — Mittelwertheorie, как говорят немцы.

В самом деле, величины  $E$  и  $H$  электрического и магнитных полей имеют в теории Максвелла-Герца смысл „плотностей“, т. е. выражают число силовых линий на единицу площади в данной точке;  $\frac{E^2}{8\pi}$  (или  $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$ ) и  $\frac{H^2}{8\pi}$  ( $\frac{\mu H^2}{8\pi}$ ) будут плотностями энергии в данной точке среды.

Этот характер теории Максвелла-Герца обусловлен тем, что теория эта является теорией сплошной среды, теорией поля, а во всякой такой теории мы оперируем не с „прерывными“ величинами, относящимися к „изолированным“ физическим индивидуумам (отдельными материальными частицами, атомами, электронами, массами планет и т. д.), а с величинами непрерывными.<sup>2)</sup> Физико-математическое же исследование таких величин возможно лишь в форме средних значений.

Для наглядного уяснения этого пункта возьмем уравнение движения „изолированного“ тела и сплошной среды:

$$\left. \begin{aligned} X &= M \frac{d^2x}{dt^2} \\ \rho X &= \rho \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{\partial p}{\partial x} \end{aligned} \right\} \text{аналогично для } Y \text{ и } Z.$$

<sup>1)</sup> Здесь мы имеем в виду вихревую слагающую скорости (скорость без потенциала скоростей); невихревую слагающую мы в дальнейшем обозначаем через  $V_t$  (с).

<sup>2)</sup> Во избежание недоразумений заметим здесь, что эта непрерывность в конечном итоге исследования оказывается синтезированной с прерывностью. Вихревые трубки в эфире одновременно непрерывны (по отношению к среде) и прерывны (между собою). Вот почему Томсон имеет возможность начинать исследование с прерывных фарадеевых трубок, чтобы в конечном итоге прийти к уравнениям непрерывности Максвелла. Вот почему нет никакого противоречия между нашим утверждением и утверждением Томсона: „С нашей точки зрения этот взгляд на электрические явления может считаться образующим род молекулярной теории электричества, при чем фарадеевы трубки занимают место молекул в кинетической теории газов“.

Первое уравнение изображает движение массы  $M$  под действием силы  $X(Y, Z)$ , т. е. сила  $X(Y, Z)$  отнесена ко всей массе  $M$ .

Второе уравнение — основное уравнение гидродинамики; в нем сила  $X$  отнесена к единице массы, и, стало-быть,  $\rho X$  означает силу, действующую на единицу объема; этот же смысл имеет величина  $\rho \frac{d^2x}{dt^2}$ ;  $\frac{\partial p}{\partial x}$  это — изменение (градиент) давления  $p$ , т. е. силы, отнесенной к единице площади. Вот почему в теории сплошных сред скорость „в данной точке“  $v$  и вихрь  $\omega$  имеют смысл „плотностей“, и плотность энергии в данной точке определяется формулами: <sup>1)</sup>

$$P_{cp} = \rho \frac{v^2}{8\pi} = k\rho\omega^2 = \frac{k\rho}{4\pi^2} \omega^2.$$

Здесь плотность энергии выражается тремя способами: а) через скорость  $v$ , б) через плотность вихрей  $\omega$ , при чем введен неопределенный коэффициент  $k$ , зависящий от формы вихревого движения, в) через угловую скорость  $\omega$ , связанную с  $\omega$  равенством  $2\omega = 4\pi\omega$ .

„Статистический“ характер теории Максвелла-Герца дает возможность при выводе уравнений электромагнитного движения не делать никаких предварительных предположений о деталях механизма этого движения, за исключением одного лишь того, именно, что эфир и заряды движутся подобно несжимаемой жидкости. Это предположение лежит в основе главных теорий электромагнетизма.

## 2.

Пусть  $P_{cp} = k\rho A^2$  будет плотностью энергии в некоторой точке. Величина  $A$  может означать скорость  $v$ , угловую скорость  $\omega$  или же вихрь  $\omega$ , в соответствии с чем коэффициент  $k$  будет иметь различные значения.

Из векторного анализа известно, что полное изменение во времени  $\frac{dA}{dt}$  вектора  $A$  складывается из двух частей: а) местного (локального) изменения  $\frac{\partial A}{\partial t}$  и б) стационарного со слагаемыми по осям координат

$$\left( v_x \frac{\partial A_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial A_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial A_x}{\partial z} \right)$$

<sup>1)</sup> Плотность энергии в обычных обозначениях будет  $\frac{\rho v^2}{2}$ ; коэффициент  $1/4\pi$  вводится для согласования с электродинамическими обозначениями.

См. книгу А. А. Эйхенвальда.



и аналогично для  $A_y$  и  $A_z$ . В векторной символике стационарное изменение изображается через  $(v \text{ grad}) A$ , так что

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + (v \text{ grad}) A.$$

В установившемся, например, течении жидкостей локальное изменение равно нулю, так как в каждой точке среды скорость неизменна; имеется лишь различие в скоростях различных точек; это различие и называют стационарным изменением скорости — стационарным ускорением.

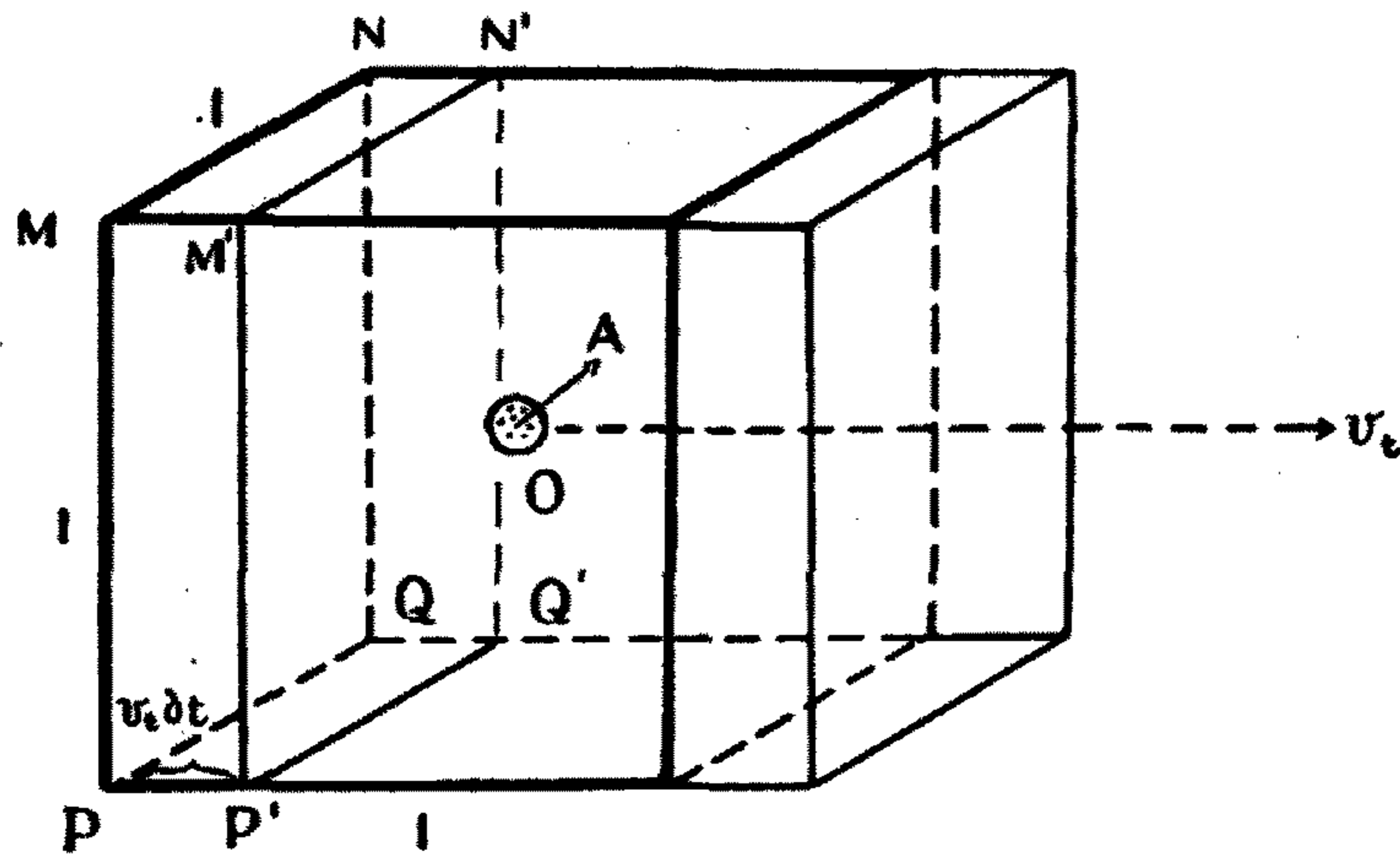


Рис. 48.

В уравнениях Максвелла-Герца мы имеем дело с местным изменением величин электромагнитного поля, так что для вывода этих уравнений нам придется рассмотреть, что происходит в данной точке поля, иначе — в соотнесенной к данной точке единице объема.

При этом, как было уже указано, нет надобности предварительно знать детали происходящих в данном месте среды движений, — важен лишь общий итог этих движений.

Таким итогом может быть или стационарное состояние, которого мы не рассматриваем, или же локальное изменение движения, связанное с изменением плотности энергии в данной точке среды. Это локальное изменение плотности энергии и является исходным пунктом нашего исследования.

Пусть в данной точке  $O$  среды в определенный момент времени плотность энергии будет  $P_{cp} = k\rho A^2$ .

Всякое изменение этой величины является результатом положительного или отрицательного притока энергии в данную точку среды, результатом движения энергии. Это движение происходит с определенной скоростью  $v_t$ , зависящей от характера среды (плотности, упругости и т. д.). Изобразим эту скорость вектором, исходящим из точки  $O$  и построим вокруг этой точки куб в единицу объема, с основанием, параллельным вектору  $v_t$ .

Энергия  $P_{cp}$ , равномерно распределенная по объему единичного куба, изобразит плотность энергии в данной точке в данный момент. Пусть теперь локальное изменение плотности энергии происходит таким образом, что в итоге оно эквивалентно движению энергии из соотнесенной к данной точке единицы объема со скоростью  $v_t$  в течение времени  $\partial t$ . Через время  $\partial t$  энергия куба  $MNPQ$  займет положение  $M'N'P'Q'$ , так что изменение плотности энергии за время  $\partial t$  будет равно энергии параллелепипеда

$$MNPQM'N'P'Q',$$

объем которого равен  $v_t \partial t \times 1 \times 1 = v_t \partial t$ , что при плотности  $P_{cp}$  даст для изменения —  $\partial P_{cp}$  величину

$$\partial P_{cp} = -P_{cp} v_t \partial t,$$

откуда

$$\frac{\partial P_{cp}}{\partial t} = -P_{cp} v_t.$$

Полученное соотношение представляет собою один из самых элементарных законов физики: изменение какой-либо величины пропорционально самой величине. Таков, например, закон распада радия или закон растворения веществ.<sup>1)</sup>

Мы принимаем формулированный закон изменения плотности энергии в данной точке в качестве нашей основной гипотезы и утвер-

<sup>1)</sup> Уравнение радиевого распада будет  $\frac{dR}{dt} = -kR$ , где  $R$  — наличное количество радия в момент  $t$ ; растворение веществ представляет собою так называемый процесс второго порядка, уравнение которого будет  $\frac{dm}{dt} = -km(s-c)$ , где  $m$  — наличное количество вещества,  $s$  — концентрация в насыщенном состоянии,  $c$  — зависящая от  $m$  концентрация в данный момент. Если  $c$  мало сравнительно с  $s$ , то уравнение процесса растворения будет:

$$\frac{dm}{dt} = -ksm = -Km.$$



ждем, что вихревое электромагнитное движение подчиняется именно этому закону.

Решение полученного уравнения дает формулу

$$P_{cp} = P_0 e^{-v_t \cdot t},$$

которая изображает закон убывания плотности энергии в данной точке среды. Чтобы изобразить закон возрастания плотности, вводим отрицательное время и формулу:

$$P_{cp} = P_0 e^{+v_t \cdot t},$$

в которой  $t$  изменяется от  $-\infty$  до  $0$ . Левая и правая кривые (рис. 49) графически изображают возрастание и убывание плотности энергии в данной точке.

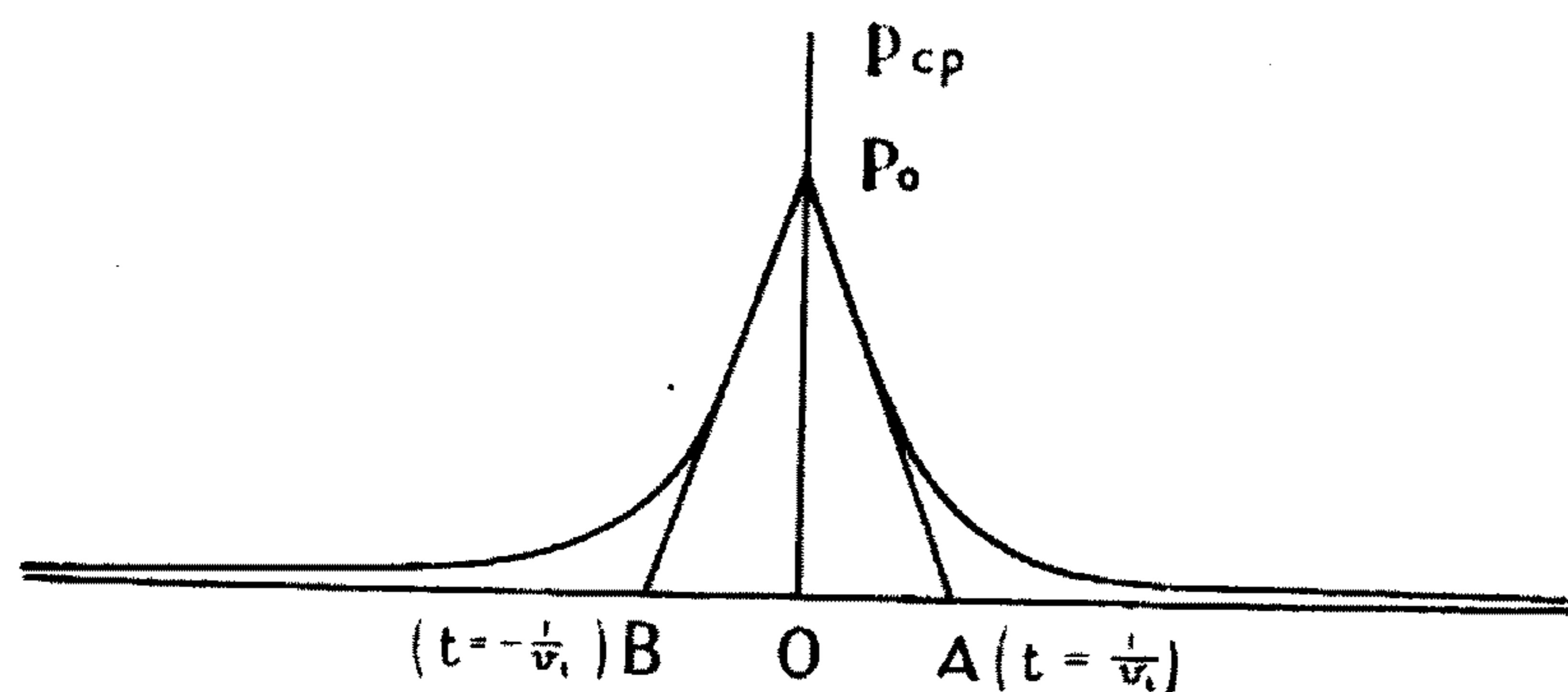


Рис. 49.

Так как для электромагнитных процессов в эфире  $v_t$  очень велико ( $v_t = c = 3 \cdot 10^{10}$ ), а  $P$ , вообще говоря, ничтожно мало (плотность энергии света, например), то верхние ветви кривых почти вертикальны. Эти ветви можно заменить поэтому касательными  $P_0A$  и  $P_0B$  в точке  $(P_0, O)$ , уравнения которых будут:

$$P_{cp} = P_0 \pm P_0 v_t \cdot t.$$

Эти уравнения изображают движение единичного „твердого“ куба плотности  $P_0$  через данную точку. Отсюда ясны происхождение и смысл нашего основного закона локального изменения плотности; как учит теория вихрей, вихри подобны твердым вращающимся телам и движутся подобно твердым телам (закон Гельмгольца); разница между твердым телом и вихрем та, что твердое тело имеет резко определенные границы, в то время как вихрь —

образование в сплошной среде, границей которого является определенная поверхность разрыва скоростей, но не разрыва движения вообще; отсюда и происходит различие между законами движения твердого тела и вихря через данную точку; однако, при наличии очень большой скорости  $v_t$  движение вихря почти тождественно с движением твердого тела.

Условившись считать время отрицательным для случая увеличения плотности, можно основной закон выразить формулой:

$$\frac{\partial P_{cp}}{\partial t} = \pm P_{cp} v_t.$$

Заменив  $P_{cp}$  через  $k\rho A^2$ , получим тот же закон в иной форме:

$$k\rho \frac{\partial(A^2)}{\partial t} = \pm k\rho A^2 v_t$$

или

$$2Ak\rho \frac{\partial A}{\partial t} = \pm k\rho A^2 v_t$$

или

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \pm \frac{1}{2} A v_t.$$

3.

Рассмотрим прежде всего при помощи полученного основного уравнения электромагнитное движение в свободном эфире. Для этого необходимо установить, во-первых, скорость перемещения электромагнитной энергии в свободном эфире, а, во-вторых, найти соотношение между величинами  $v$ ,  $w$  ( $\omega$ ) и величинами  $H$ ,  $E$ .

Сделать первое очень просто, — ныне окончательно признано, что лучистая энергия представляет собою энергию электромагнитного движения, так что электромагнитная энергия распространяется в свободном эфире прямолинейно и с постоянной скоростью  $c = 300\,000$  км/сек.

$$v_t = \text{const} = c.$$

Для установления соотношения между  $v$ ,  $w$  ( $\omega$ ),  $H$  и  $E$  придется выдвинуть гипотезу о характере векторов  $H$  и  $E$ . Из теории вихрей известно, что вихревое кольцо движется перпендикулярно к своей плоскости, т. е. направление движения перпендикулярно к вектору-вихрю.

Согласно теории Дж. Дж. Томсона, электромагнитное квантовое кольцо образуется из электрических ( $E$ ) силовых трубок и движется



перпендикулярно к своей плоскости. Если, стало-быть, электромагнитное кольцо действительно является вихревым, то  $E$  соответствует  $w(\omega)$ , а  $H$  — скорости  $v$ ; или, короче:  $E$  — аксиальный вектор,  $H$  — полярный. Вопрос о том, какой из векторов является аксиальным (или полярным) — вопрос спорный, и многие исследователи настаивают на обратном, нежели принимаемое нами соотношение.

Последующие наши выводы не зависят, однако, от той или иной гипотезы и легко могут быть обращены, если кто-либо пожелал бы рассматривать  $H$ , как аксиальный вектор, а  $E$ , как полярный.

Пользуясь теперь вышеприведенной формулой для плотности энергии  $P_{cp}$ , напишем два соотношения:

$$P_{cp} = \frac{\rho v^2}{8\pi} = \frac{H^2}{8\pi};$$

$H$  — выражено в электромагнитных единицах.

$$v = \pm \frac{1}{V\rho} H,$$

$$P_{cp} = k\rho w^2 = \frac{E^2}{8\pi};$$

$E$  — выражено в электростатических единицах.

$$w = \pm \frac{1}{\sqrt{8\pi k\rho}} E.$$

Остается определить величину коэффициента  $k$ . Эта величина не может быть найдена априори, так как она характеризует структуру электромагнитных силовых трубок, о которых мы не сделали никаких предварительных предположений. Наоборот, наш метод заключается именно в том, чтобы, получив из опыта величину  $k$ , определить тем самым структуру электромагнитных силовых волокон („линий“). Оказывается, что уравнениям Максвелла-Герца удовлетворяет простое значение  $k = 8\pi$ .

Это значение дает возможность определить структуру вихревых трубок; подставив в формулу для плотности энергии вместо  $k$  величину  $8\pi$ , получим:

$$P_{cp} = 8\pi\rho w^2 = \frac{2}{\pi} [\rho\omega^2]_{\max} = \frac{E^2}{8\pi}.$$

Общеизвестно, что при синусоидальном распределении какой-либо величины среднее значение этой величины за половину периода будет  $\frac{2}{\pi} \times$  — максимальное зна-

чение. Следовательно,  $[\rho\omega^2]$  — максимальное значение синусоидального распределения энергии в электромагнитном вихревом волокне, а  $8\pi\rho w^2 = \frac{E^2}{8\pi}$  — среднее значение энергии, что вполне соответствует теории Максвелла-Герца, как теория „средних значений“.

Рис. 50 показывает структуру электромагнитного вихревого волокна (поперечное сечение).

$$P = P_m \sin\alpha r; \quad P_{cp} = \frac{2}{\pi} P_m.$$

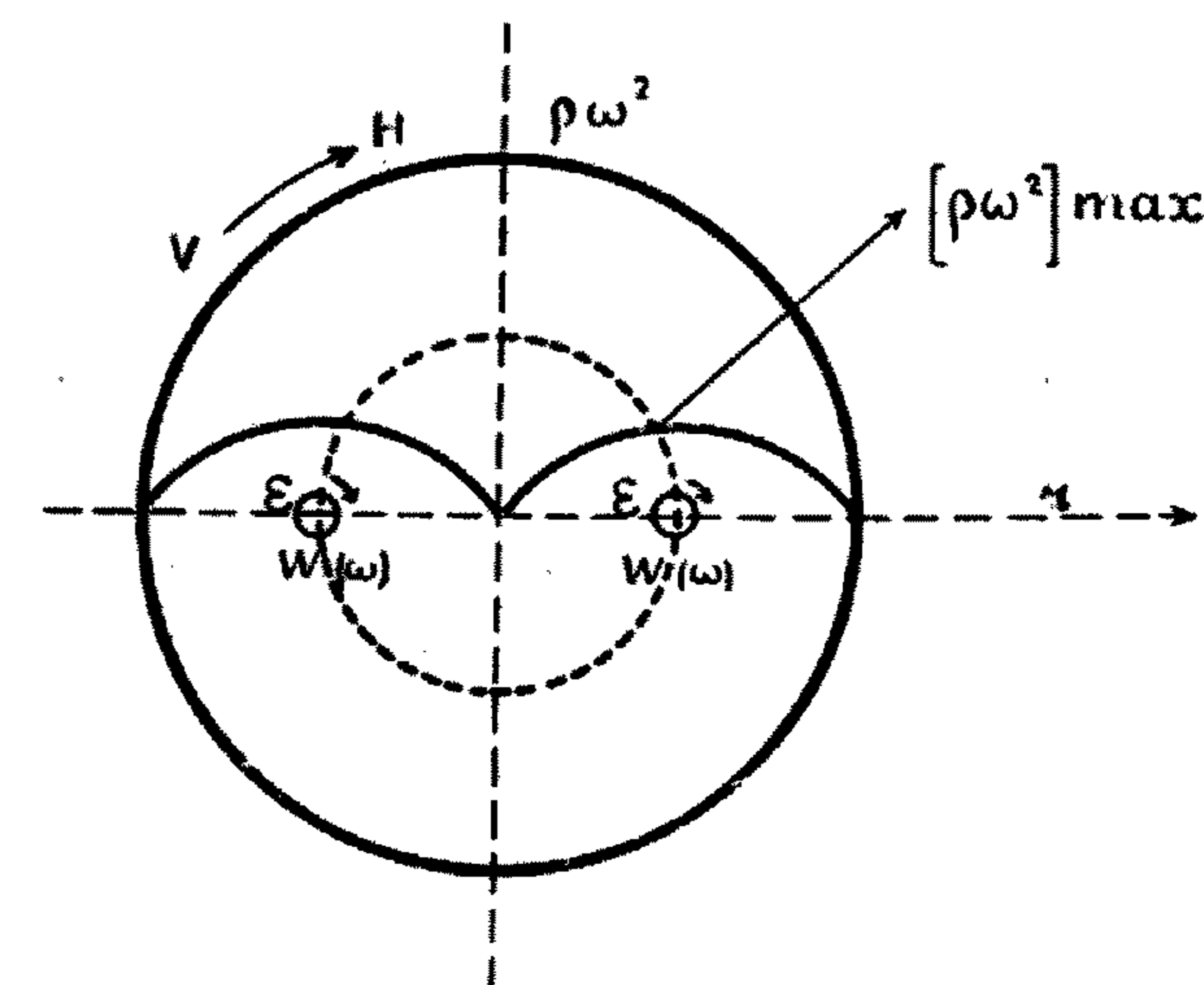


Рис. 50.

Магнитное поле  $H$  соответствует скорости  $\vec{v}$ , электрическое  $\vec{E}$  — вихрю  $w(\omega)$ , при чем  $E \perp H$  в каждой точке вихря. Вихрь достигает максимума на средней окружности, в центре же и на пограничной окружности он равен нулю. На пограничной окружности мы имеем „разрыв непрерывности“ скоростей, вследствие чего и происходит поступательное движение вихревой поверхности разрыва.<sup>1)</sup>

Подставим теперь полученные соотношения для  $v$ ,  $w$ ,  $H$  и  $E$  в основное уравнение локального изменения. Получим:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \pm \frac{1}{2} \omega c; \quad \frac{1}{c} \frac{\partial w}{\partial t} = \pm \frac{1}{2} \omega = \frac{1}{8\pi} \operatorname{curl} v,$$

так как

$$w = \frac{1}{4\pi} \operatorname{curl} v$$

<sup>1)</sup> См. „Механику“ Аппеля § 712: „О распространении волн и разрывах сплошности в движениях жидких сред“.



или

$$\frac{1}{8\pi v r c} \frac{\partial E}{\partial t} = \pm \frac{1}{8\pi v r} \operatorname{curl} H;$$

так как

$$\omega = \pm \frac{1}{\sqrt{8\pi k r}} E = \pm \frac{1}{8\pi v r} E,$$

откуда:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \pm \operatorname{curl} H.$$

Это и есть количественное выражение<sup>1)</sup> первого уравнения теории Максвелла-Герца. Второе уравнение можно получить двумя способами:

а) из равенства

$$P_{cp} = \frac{r v^2}{8\pi} = 8\pi r \omega^2 = \frac{E^2}{8\pi} = \frac{H^2}{8\pi}; E \perp H \text{ и } E = H.$$

Это именно равенство и характеризует особенность развиваемой нами теории. Написанные величины это лишь различные способы выражения плотности энергии одного и того же вихря:  $\frac{E^2}{8\pi}$  это — выражение через плотность вихря  $\omega(\omega)$ ;  $\frac{H^2}{8\pi}$  через скорость  $v$ . В обычных изложениях электромагнитного учения  $E$  и  $H$  рассматриваются как меры двух совершенно различных вещей: „электрического“ и „магнитного“ полей.

Такая точка зрения обусловлена тем, что наши понятия об электрическом и магнитном полях возникли на основе изучения взаимодействий магнитов, токов и зарядов. Опыт показывает, что магниты и токи всегда действуют друг на друга в то время, как для взаимодействия магнита (или тока) с зарядом необходимо особое движение последнего. Но взаимодействие между вихревыми системами, каковыми являются магниты, токи и заряды, — явление чрезвычайно сложное, для понимания которого необходима рациональная динамическая теория. Такой теории не существует, однако, до сих пор. Повидимому, отсутствие взаимодействия между магнитами, токами и неподвижными зарядами объясняется тем, что последние являются открытыми вихревыми системами; электромагнитный вихрь имеет концы на заряженных телах, в то время как магниты и токи — это — системы замкнутые. В случае же движения зарядов возможно имеет место то же явление, что и при движении тел друг относительно друга в жидкости.

<sup>1)</sup> Т. е. не принимая во внимание знаков ( $\pm$ ), характеризующих направление электромагнитных действий.

Необходимо, кроме того, подчеркнуть, что структура электромагнитного поля зарядов не тождественна со структурой поля магнитов и токов. Имеются, например, основания полагать, что электрический ток, это — так называемый динамической вихревой шнур, т. е. вихревая область сосредоточена главным образом на оси тока, область же вне провода это — безвихревая область, в которой скорость имеет потенциал скоростей. Электромагнитное поле изолированного и движущегося электрона имеет опять-таки свои особенности. В современной электродинамике все эти различия не принимаются во внимание. Уже давно Гегелем отмечен тот недостаток естественно-научного мышления, что оно, изыскивая повсюду единство и тождество, забывает о различиях, и наука поэтому часто бывает похожа на ночь, где все кошки серы. Таким образом, утверждение, что магнитное поле возникает лишь при движении электрических силовых линий, необходимо с нашей точки зрения<sup>1)</sup> понимать так, что движение силовой линии — одно из условий взаимодействия с магнитами и токами.

Если  $E = H$ , то, переставив  $E$  и  $H$  в первом уравнении Максвелла, получим второе уравнение

$$\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} = \pm \operatorname{curl} E,$$

совершенно симметричное с первым.

б) тот же результат можно получить на основании теории вихрей.

Теория эта учит, что, если положить

$$v = \operatorname{curl} B,$$

где  $B$  называется вектором-потенциалом (понятие, введенное Максвеллом), то плотность энергии выразится через

$$P_{cp} = \rho \frac{(B \cdot \omega)}{2},$$

где  $(B \cdot \omega)$  означает скалярное произведение, т. е.  $B \cdot \omega \cdot \cos \hat{(B \cdot \omega)}$ .

Получаем, стало быть,

$$P_{cp} = 8\pi r \omega^2 = \rho \frac{(B \cdot \omega)}{2};$$

так что можно считать

$$B \parallel \omega$$

<sup>1)</sup> Это и есть по существу точка зрения Дж. Дж. Томсона.



и

$$B = 16\pi w = \pm \frac{2E}{V\rho}.$$

Применяя основное уравнение по вектору  $v$ , получим:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial v}{\partial t} = \pm \frac{1}{2} v = \pm \operatorname{curl} B = \pm \frac{1}{V\rho} \operatorname{curl} E$$

или

$$\begin{aligned} \frac{1}{cV\rho} \frac{\partial H}{\partial t} &= \pm \frac{1}{V\rho} \operatorname{curl} E; \\ \frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} &= \pm \operatorname{curl} E. \end{aligned}$$

Полученные уравнения Максвелла дают законы количественных (скалярных) изменений векторов  $H$  и  $E$ . Векторы эти имеют, однако, известные направления, и скалярные изменения связаны с определенными направлениями. Настоящая работа не ставит себе целью обосновать и выявить физический смысл направлений электромагнитных действий, мы ограничимся поэтому лишь приведением действительных знаков уравнений Максвелла: первое уравнение берется со знаками (+), второй со знаком (-):

$$\begin{aligned} \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} &= + \operatorname{curl} H, \\ \frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} &= - \operatorname{curl} E. \end{aligned}$$

Формально-физический смысл знака (-) таков: если магнитное поле получает приращение определенного направления, которое условно считается положительным (+ $\partial H$ ), то появляется вихрь электрического поля, который при принятых условных обозначениях считается отрицательным. 1) Написанное выражение уравнения Максвелла-Герца получится при нашем выводе, если в равенстве

$$P_{cp} = 8\pi w^2 = \rho \frac{(B \cdot w)}{2}$$

считать  $\angle Bw = \pi$  и, стало-быть,  $\cos(Bw) = -1$ , т. е. вектор-потенциал  $B$  — параллельным, но обратным по направлению вектору  $w$ .

Тогда

$$B = -16\pi w = -\frac{2E}{V\rho} \text{ и т. д.}$$

1) Эти условные обозначения можно найти в любом учебнике физики при формулировке законов индукции.

Третье и четвертое уравнения теории Максвелла-Герца непосредственно вытекают из учения о вихревом движении в несжимаемой жидкости. Расходимость (дивергенция) как скорости, так и вихрей равна в такой жидкости нулю:

$$\operatorname{div}(v) = 0; \quad \operatorname{div}(w) = 0.$$

Так как мы предположили, что эфир движется подобно несжимаемой жидкости, то эти уравнения имеют силу и для движения в эфире. Заменяя  $v$  и  $w$  их значениями через  $H$  и  $E$ , получим третье и четвертое уравнения Максвелла-Герца:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} H &= 0 \\ \operatorname{div} E &= 0. \end{aligned}$$

Выведем теперь первое уравнение Максвелла для случая наличия в поле заряда плотности  $\delta$ .

Из теории поля известно, что в этом случае

$$\operatorname{div} E = 4\pi\delta = E_2$$

$\operatorname{div} E$  или расходимость (дивергенция) поля означает положительный или отрицательный избыток числа силовых линий, выходящих из единицы объема, над числом входящих. Таким образом,  $E_2 = 4\pi\delta$ ; это — дополнительное число силовых линий поля на единицу объема, обусловленное наличием заряда плотности  $\delta$ . Приложим к дополнительному полю  $E_2$  основное уравнение:

$$\frac{\partial E_2}{\partial t} = \frac{1}{2} E_2 v = 2\pi\delta v = 2\pi J; \quad \delta \cdot v = J.$$

Здесь мы вместо скорости  $c$  берем скорость движения зарядов  $v$ ; произведение этой скорости на плотность  $\delta$  называется плотностью тока  $J$  (в электростатических единицах). Вставив полученное значение  $\frac{\partial E_2}{\partial t}$  в первое уравнение Максвелла-Герца, получим:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E_2}{\partial t} = \frac{2\pi J}{c} = K \operatorname{curl} H_2.$$

Коэффициент  $K$  введен в виду особой единицы, принятой для измерения движущихся зарядов  $\frac{\partial E_2}{\partial t}$ , т. е. силы тока. Эта единица силы тока определяется на основании уравнения:

$$KH = \frac{J(\text{элм.})}{r} = \frac{J(\text{элс.})}{cr},$$



где  $r$  — поперечное расстояние некоторой точки магнитного поля  $H$  от длинного (бесконечного) проводника. За единицу (электромагн.) силы тока принимается сила такого тока, который при  $r=1$  дает  $K=\frac{1}{2}$ , т. е. соответствует двум электромагнитным единицам магнитного поля. Подставив в полученное уравнение  $K=\frac{1}{2}$  будем, иметь:

$$\frac{4\pi J}{c} = \text{curl } H_2.$$

Сложив это уравнение с первым уравнением Максвелла-Герца, получим:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi J}{c} = \text{curl } H_1 + \text{curl } H_2 = \text{curl } H,$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{4\pi J}{c} = \text{curl } H.$$

Все предыдущие рассуждения и выводы приложимы, если вместо свободного эфира рассматривать диэлектрик с диэлектрическим и магнитным коэффициентами  $\epsilon$  и  $\mu$ . Необходимо только исходить из равенств:

$$\rho_{\text{ср.}} = \frac{\rho v^2}{8\pi} = 8\pi \rho \omega^2 = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} = \frac{\mu H^2}{8\pi}; \quad \sqrt{\epsilon} E = \sqrt{\mu} H.$$

Производя вычисления, как и раньше получим:

$$\frac{\sqrt{\epsilon}}{v} \frac{\partial E}{\partial t} = \sqrt{\mu} \text{curl } H,$$

$$\frac{\sqrt{\mu}}{v} \frac{\partial H}{\partial t} = -\sqrt{\epsilon} \text{curl } E.$$

Здесь вместо скорости  $c$  поставлена скорость распространения света в диэлектрике  $v$ . Полученные уравнения можно написать так:

$$\frac{\epsilon}{v\sqrt{\epsilon\mu}} \frac{\partial E}{\partial t} = \text{curl } H$$

$$\frac{\mu}{v\sqrt{\epsilon\mu}} \frac{\partial H}{\partial t} = -\text{curl } E.$$

Если считать, что  $v\sqrt{\epsilon\mu} = c$

или

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon\mu} = n \text{ — показателю преломления среды,}$$

получим уравнения Максвелла-Герца для диэлектриков:

$$\frac{\epsilon}{c} \frac{\partial E}{\partial t} = \text{curl } H$$

$$\frac{\mu}{c} \frac{\partial H}{\partial t} = \text{curl } E.$$

В обычных изложениях исходят из этих уравнений, и получают  $v\sqrt{\epsilon\mu} = c$ ; у нас же это соотношение является предварительной гипотезой, которая приводит к обычным уравнениям Максвелла-Герца. Опыт, как известно, не всегда подтверждает такого рода гипотезу.

4.

Основная особенность защищаемой нами точки зрения заключается, как мы уже это указали, в том, что  $E$  и  $H$  являются различными характеристиками одного и того же вихря по крайней мере для случая электромагнитного движения в свободном эфире. Вот почему плотность энергии в электромагнитном вихре будет  $\frac{E^2}{8\pi}$  или же  $\frac{H^2}{8\pi}$ . Но в обычной теории считают плотность энергии электромагнитной волны равной  $\frac{E^2}{8\pi} + \frac{H^2}{8\pi} = \frac{E^2}{4\pi}$  или  $\frac{H^2}{4\pi}$ , так как уравнения Максвелла-Герца дают  $E=H$ . Тот же результат получается из нашей теории при предположении, что на единицу объема энергия вращательного движения равна энергии поступательного, т. е. при допущении для электромагнитного движения известного в статистической механике закона равномерного распределения энергии по степеням свободы.

В самом деле,  $\frac{E^2}{8\pi}$  или  $\frac{H^2}{8\pi}$  это — в нашей теории энергия вращательного (вихревого) движения на единицу объема, энергия которая перемещается с поступательной скоростью  $c$ . Следовательно, если плотность эфира  $\rho$ , то, сверх энергии вращательного движения, мы имеем на единицу объема еще энергию поступательного движения  $\frac{1}{2}\rho c^2$ , так что полная плотность энергии в „волне“ будет:

$$P_b = \frac{E^2}{8\pi} \left( \text{или } \frac{H^2}{8\pi} \right) + \frac{1}{2} \rho c^2.$$

Приняв закон равномерного распределения энергии, получим:

$$\frac{E^2}{8\pi} = \frac{H^2}{8\pi} = \frac{1}{2} \rho c^2,$$



так что

$$P_b = \frac{E^2}{4\pi} = \frac{H^2}{4\pi} = \rho c^2.$$

Энергию поступательного движения  $\frac{1}{2} \rho c^2 = \frac{H^2}{8\pi}$  можно считать энергией обычного магнитного поля, энергию же вихря  $\frac{E^2}{8\pi} (= \frac{H^2}{8\pi})$  энергией электрического, хотя в действительности оно электромагнито-статическое.

Полученное соотношение замечательно тем, что дает рациональное объяснение известной формуле  $P = \rho c^2 (mc^2)$ , подтверждаемое опытами с давлением света.

Удвоение массы ( $m$  вместо  $\frac{1}{2} m$ ) для энергии света обусловлено, как мы видим, тем обстоятельством, что световая масса, кроме поступательного движения, имеет еще вращательное, при чем энергии этих двух движений равны между собою.

## 5.

Одно из решений максвелловских уравнений, найденное Герцем, соответствует вихревым электромагнитным кольцам, имеющим скорость в собственных плоскостях и распространяющихся, рассеиваясь от центра излучения, как это показано на чертежах в статье „Развитие воззрений на природу света“. Дж. Дж. Томсона нашел другую возможную форму электромагнитных колец — таких, именно, которые движутся перпендикулярно к собственной плоскости, сохраняя свои размеры. Кастерин и Уайттекер (E. T.) показали, что такого рода кольца также удовлетворяют уравнениям Максвелла-Герца. Томсон и Уайттекеры (E. T. и J. M.) разобрали в общих чертах вопрос об интерференции, поляризации, отражении и преломлении квантовых колец. Мы на этом останавливаться не будем, так как вопрос требует еще детальной разработки. Отметим лишь две особенности квантовых колец.

Первая касается найденного нами распределения энергии в поперечном сечении колец.

Мы видели выше, что средняя плотность энергии в данной точке  $P_{cp}$  изменяется согласно определенному закону вследствие прохождения вихря через данную точку с определенной скоростью  $v_t$ ; это изменение  $P_{cp}$  образует „волну“; но сама величина  $P_{cp}$  есть средняя от синусоидального распределения плотности в поперечном сечении вихря. Если поэтому вообразить себе ряд вихревых колец,

следующих друг за другом (рис. 51), то в каждой точке

$$P = P_m \sin \alpha (ct - r); P_{cp} = \frac{2}{\pi} P_m.$$

В среде, через которую проходят кольца, будет иметь место синусоидальная пульсация плотности энергии. На рис. изображена такого рода пульсация, при чем направление вихрей одно и то же. Физически мыслимо, однако, и чередующееся направление вращений, но в этом случае имеет место особое соотношение между вихрями. <sup>1)</sup>

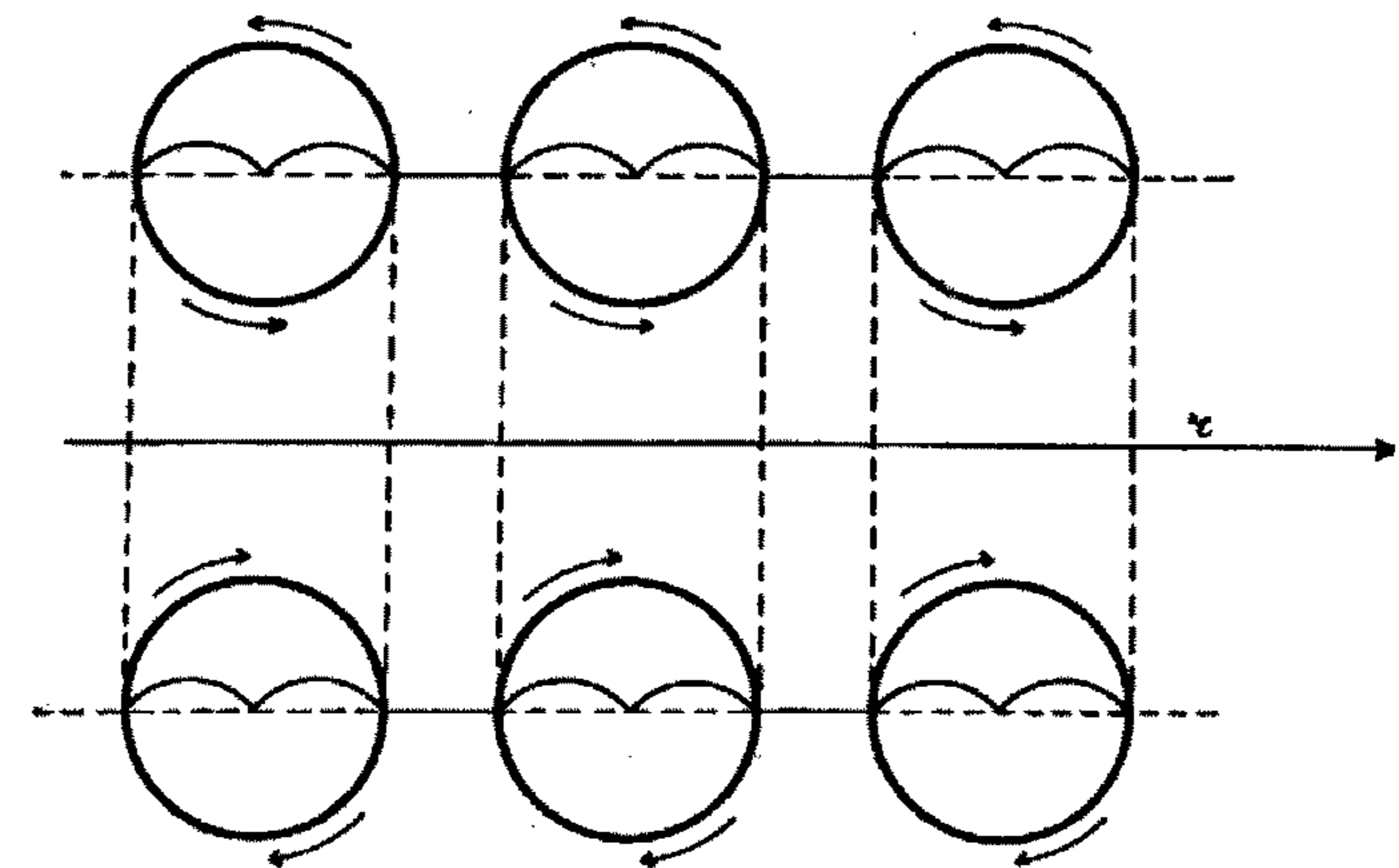


Рис. 51.

Так как вихревой и скоростный векторы, иначе векторы электрического и магнитного поля, пропорциональны корню квадратному из плотности энергии, то передвижение электромагнитного вихревого шнура образует в каждой точке поля периодическую пульсацию:

$$E(H) = \pm E_m(H_m) \sqrt{\sin \alpha (ct - r)}. <sup>2)</sup>$$

Таким образом, если электрон, например, вращается в атоме вокруг ядра, то имеет место внутренняя электромагнитная волна, распространяющаяся по замкнутым путям вокруг протона; внешнее же

<sup>1)</sup> См. „Механику“ М.Аппеля, § 774: „Круговые вихревые кольца с одной той же осью“.

<sup>2)</sup> Здесь  $E$  и  $H$  — распределение плотностей вихрей и скоростей в „среднем“ элементарном вихре  $E_{cp}$  ( $H_{cp}$ ). Кастерин доказал, что  $E_{cp}$  ( $H_{cp}$ ) для вихревого кольца также удовлетворяет уравнениям Максвелла-Герца, что ясно из предыдущего вывода этих уравнений.



излучение равно (или почти равно) нулю. Мы видим, стало быть, что модель атома Бора нисколько не противоречит уравнениям Максвелла-Герца.

Точно так же, если электрон движется внутри провода с постоянной скоростью (постоянный ток), то вихревая волна сосредоточена в проводе, во внешнем же поле имеет место безвихревое движение (обычное магнитное поле). Но если скорость электрона переменна, то электромагнитные вихревые шнуры отделяются от цепи и уносятся в окружающий эфир. 1) В этом случае электромагнитная волна распространяется наружу. Разумеется, в случае вибратора Герца электромагнитная волна более сложной структуры (двойко периодическая) нежели в случае кольца Томсона или внутренней волны в атоме. Мы на этом останавливаться не будем, так как вопрос этот не имеет принципиального значения для нашей темы. Необходимо вообще помнить основное положение диалектики о конкретности истины: действительность бесконечно богаче, нежели самые сложные теоретические схемы, которые являются лишь скелетами реальных процессов.

Вторая особенность, о которой мы упомянули, касается отражения света по перпендикулярному направлению. Если, как это делают некоторые, утверждать, что кванты, это — просто материальные частицы, то невозможно объяснить отражение по ответному направлению. В самом деле, отраженные частицы должны сталкиваться с падающими. На этом именно основании философ Шопенгауэр высмеивал теорию корпускулярного отражения, утверждая, что эта теория ведет к невозможности увидеть собственную физиономию в зеркале. Но, если кванты это — вихревые кольца, — явление отвесного отражения объясняется очень просто. Для этого необходимо лишь вспомнить об „игре“ вихревых колец, о которой упомянуто в статье Н. Е. Жуковского. Квантовые вихревые кольца могут проходить друг сквозь друга; при встречном, например, движении одно из колец расширяется и пропускает другое, которое сжимается.

Этим свойством вихревых колец легко объясняется явление отвесного отражения. Мы считаем такого рода объяснение важным аргументом в пользу вихревой структуры электромагнитных силовых трубок и вообще вихревой природы электромагнетизма и света.

1) Чтобы явление имело место во всей отчетливости, необходимы особые условия: значительная емкость, самоиндукция, открытая колебательная цепь, ток большой частоты и пр.

## 6.

### ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ КОНСТАНТЫ ПЛАНКА И ВИХРЕВАЯ ТЕОРИЯ ВОДОРОДНОГО АТОМА.

Дж. Дж. Томсон показал, что при известных простых предположениях выражение энергии квантового кольца совпадает с выражением закона Планка ( $E = h\nu$ ). Уайттекер и Кастерин доказали, что значение электрического и магнитного полей ( $E_{cp}$  и  $H_{cp}$ ) кольца удовлетворяют уравнениям Максвелла. Но эти исследования не дали обоснования непосредственного физического смысла планковской константы  $h$ , а такое обоснование имеет решающее значение для всякой физической теории квант. Мы попытаемся дать такого рода обоснование при помощи вышеразвитой вихревой теории электромагнетизма и в связи с теорией водородного атома Бора-Зоммерфельда.

Исходным пунктом нашего обоснования будут следующие теоремы:

#### 1. Теоремы Гельмгольца о вихрях.

Они гласят: а) вихревые нити всегда состоят из одних и тех же частиц, б) сила (циркуляция) вихревой нити во все времена и во всех сечениях постоянна, в) вихревые нити должны или замыкаться в себе или оканчиваться на границах инородных сред.

Эти теоремы выражают закон сохранения или „вечности“ вихревых нитей в „идеальных жидкостях“. С диалектической точки зрения это сохранение или „вечность“ необходимо толковать в относительном смысле подобно сохранению или вечности атомов, протонов и электронов, т. е. как выражение известной устойчивости. Атомы, электроны и протоны бесспорно возникают при известных условиях, но эти материальные системы характеризуются большой относительной устойчивостью. Той же устойчивостью обладают, согласно законам Гельмгольца, вихревые нити, которые являются как бы атомами вращательного движения.

С диалектической точки зрения вечны только материя и движение, а не отдельные конкретные формы материи и движения.

Относительно постоянную силу (циркуляцию) электромагнитных вихревых нитей мы обозначим через  $h$ . Циркуляция (сила) вихрей действительно имеет те же физические размеры ( $c^2/s$ ), что и постоянная Планка. Мы покажем, что это совпадение не случайно и что имеются серьезные основания предполагать, тождество физического



смысла планковской константы с циркуляцией скорости элементарных вихревых трубок. <sup>1)</sup>

2. Теорема Стокса, которая гласит: в односвязном пространстве циркуляция скорости по какому-либо контуру равна потоку вихрей сквозь этот контур.

Математически:

$$J = \int (v \cdot dl) = \int (\text{curl } v \cdot dS) = \int (2\omega \cdot dS) = \int (4\pi w \cdot dS);$$

$$\text{скалярные произведения } (\text{curl } v \cdot dS) = (2\omega \cdot dS) = (4\pi w \cdot dS),$$

это — элементарные циркуляции по контурам площадок  $dS$  вокруг отдельных вихревых нитей, пронизывающих контур. Принимая относительно-атомистическую природы электромагнитных вихревых нитей, т. е. их относительную тождественность и прерывность, мы должны интегралы заменить суммами, так что

$$J \text{ (циркуляция)} = \sum h = nh,$$

где  $h$  — циркуляция элементарной вихревой нити,  $n$  — целое число этих нитей, пронизывающих поперечное сечение вихревого шнура.

3. Теорема Бора о соотношении между кинетической и потенциальной энергиями.

Теорема гласит: „В каждой системе, состоящей из неподвижных ядер и из электронов, обращающихся по круговым орбитам со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света ( $c$ ), кинетическая энергия равна, если отвлечься от знака, половине потенциальной энергии“.<sup>2)</sup>

Зоммерфельд („Строение атома“) указывает, „что этот закон обладает гораздо большей общностью, — он остается справедливым не только для круговых орбит, но и для движений любого вида.“

<sup>1)</sup> Ср. со следующими замечаниями Дж. Дж. Томсона („Электричество и материя“, глава II, раздел „Электрическая и связанная масса“): „если  $m$  будет сила вихревого столба,  $a$  — скорость ненарушаемого вихрем течения жидкости, то можно легко показать, что масса увлекаемой столбом жидкости пропорциональна  $\frac{m^2}{a^2}$ . Таким образом, если будем считать  $m$  пропорциональным числу фарадеевских трубок в единице объема, — эта система будет нам иллюстрировать связь, существующую между силой электрического поля и связанной массой“.

<sup>2)</sup> Здесь, как и в дальнейшем под потенциальной энергией разумеется значение уровня энергии (потенциала); так как при вычислениях мы имеем дело с разностями энергий, то константу энергии можно считать равной нулю.

В последнем случае (при переменной кинетической и потенциальной энергиях) нужно только заменить в формулировке закона слова „кинетическая и потенциальная энергия“ словами „средняя (по времени) кинетическая и потенциальная энергия“. Закон этот остается за небольшим изменением справедливым и тогда, когда вместо силы, действующей по закону Кулона, будет действовать любая центральная сила“.

В случае круговых орбит при данном радиусе  $r$  орбиты, потенциальная энергия равна

$$P = -\frac{e_1 \cdot e_2}{r}; \quad e_1 \text{ и } e_2 \text{ — заряды.}$$

Следовательно, по теореме Бора, кинетическая энергия равна

$$K = \frac{1}{2} \frac{e_1 \cdot e_2}{r},$$

а полная

$$H = -\frac{e_1 e_2}{r} + \frac{1}{2} \frac{e_1 e_2}{r} = -\frac{1}{2} \frac{e_1 e_2}{r}.$$

Для эллиптических орбит средняя (по времени) потенциальная энергия будет

$$\bar{P} = -e_1 e_2 \frac{\bar{1}}{r} = -\frac{e_1 e_2}{a},$$

где  $\frac{\bar{1}}{r}$  — среднее значение обратности радиуса-вектора, которое, как известно, равно обратности большой полуоси эллипса  $a$  ( $= 1/a$ ).

4. Закон Кулона-Пуассона. Мы даем этот закон в формулировке Максвелла: <sup>1)</sup> „Кулон экспериментально установил, что напряжение электрической силы около данной точки проводника нормально поверхности и пропорционально поверхностной плотности в данной точке“. Количественное соотношение

$$R = 4\pi\sigma$$

установлено Пуассоном.

Сила действующая на элемент  $dS$  наэлектризованной поверхности, равна согласно § 79 (ибо напряженность равна нулю на внутренней стороне поверхности)

$$\frac{1}{2} R \sigma dS = 2\pi\sigma^2 dS = \frac{1}{8\pi} R^2 dS.$$

<sup>1)</sup> См. „Электричество и магнетизм“, § 79: „Сила, действующая на электризованную поверхность“, и § 80: „Наэлектризованная поверхность проводника“.



Сила, эта направлена наружу от проводника, безразлично—положителен ли заряд или отрицателен. Ее численное значение в динах на кв. см равно

$$\frac{1}{2} R\sigma = 2\pi\sigma^2 = \frac{1}{8\pi} R^2.$$

Она действует подобно давлению, проложенному к поверхности проводника и направленному наружу.

Рассмотрим теперь систему водородного атома, т. е. систему из протона и электрона. Электрон находится на расстоянии  $r$  от протона. Согласно закону Кулона, сила, действующая на электрон, будет

$$F = -\frac{e^2}{r^2}.$$

Протон и электрон соединены между собою целой системой силовых линий, общее число которых связано с понятием неизменного заряда. Расположение силовых линий нам неизвестно. Мы поэтому выдвинем следующую общую гипотезу: общее число силовых линий распадается на две части: одна часть силовых линий уравнивается внутри самой себя и может быть поэтому исключена из непосредственного рассмотрения; другая часть, именно центрально соединяющая протон с электроном, определяет стационарное равновесие системы. Эту последнюю, именно, часть мы и имеем в виду в нашем вычислении. Указанный характер силовых линий можно, примерно, представить себе из следующей схемы: на концах диаметра окружности находятся протон и электрон; первая часть силовых линий сосредоточена вдоль окружности, вторая — центральная — по диаметру.

В несколько другом разрезе выдвигаемая нами гипотеза подчеркивается на стр. 261 — в форме утверждения относительно числа  $n$ , определяющего стационарное равновесие системы силовых линий.

Итак, предположим, что силовые линии (вихревые нити) электрического поля, центрально соединяющие протон и электрон, равномерно распределены по некоторой нормальной площадке  $S$  поверхности электрона; средняя сила поля (а эта средняя величина и фигурирует в электромагнитной теории Максвелла, как это показано было выше) пусть будет  $E_{cp}$ .

Тогда, согласно закону Кулона-Пуассона, сила, действующая на элемент поверхности  $dS$ , будет

$$df = \frac{1}{8\pi} E_{cp}^2 dS,$$

а на всю поверхность  $S$ :

$$F = \int df = \frac{1}{8\pi} E_{cp}^2 \int dS = \frac{E_{cp}^2 S}{8\pi}.$$

Но  $E_{cp}^2 = 64\pi w^2$  (полагая плотность  $\rho = 1$ ), так что

$$F = 8\pi w^2 S = \frac{1}{2\pi S} (4\pi w S)^2 = kJ^2,$$

где  $k = \frac{1}{2\pi S}$ , а  $4\pi w S = J$  — циркуляции по контуру поверхности  $S$ .

Принимая во внимание направление действия силы и приравняв полученное выражение силы  $F$  обычному кулоновскому, мы получим:

$$F = -kJ^2 = -\frac{e^2}{r^2},$$

откуда

$$P \text{ (потенциальная энергия)} = -krJ^2 = -\frac{e^2}{r}.$$

Согласно закону Бора, полная энергия  $H$  будет:

$$H = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2} krJ^2.$$

Полученное нами выражение энергии явно зависит от квадрата циркуляции  $J$ , которая имеет размер так называемой переменной действия (WirkungsvARIABLE) теории Гамильтон-Якоби. Рассматривая  $J$  как переменную действия, мы, согласно теории Гамильтона-Якоби, <sup>1)</sup> получим для частоты или числа оборотов электрона вокруг ядра значение

$$\nu^0 = \frac{\partial H}{\partial J} = -krJ,$$

так что

$$H = \frac{1}{2} \nu^0 J = \frac{n}{2} h\nu^0, \text{ так как } J = nh.$$

Это и есть наиболее общее выражение закона Планка. Число  $n$  может быть как четным, так и нечетным.

Если предположить симметрию в расположении вихревых нитей, — по поверхности электрона с вихревой нитью в центре симметрии  $n$  будет нечетным:  $n = 2m + 1$ . Тогда

$$H = \left(m + \frac{1}{2}\right) h\nu^0;$$

<sup>1)</sup> См. M. Born, Vorlesungen über Atommechanik.



Сила, эта направлена наружу от проводника, безразлично—положителен ли заряд или отрицателен. Ее численное значение в динах на кв. см равно

$$\frac{1}{2} R\sigma = 2\pi\sigma^2 = \frac{1}{8\pi} R^2.$$

Она действует подобно давлению, проложенному к поверхности проводника и направленному наружу.

Рассмотрим теперь систему водородного атома, т. е. систему из протона и электрона. Электрон находится на расстоянии  $r$  от протона. Согласно закону Кулона, сила, действующая на электрон, будет

$$F = -\frac{e^2}{r^2}.$$

Протон и электрон соединены между собою целой системой силовых линий, общее число которых связано с понятием неизменного заряда. Расположение силовых линий нам неизвестно. Мы поэтому выдвинем следующую общую гипотезу: общее число силовых линий распадается на две части: одна часть силовых линий уравнивается внутри самой себя и может быть поэтому исключена из непосредственного рассмотрения; другая часть, именно центрально соединяющая протон с электроном, определяет стационарное равновесие системы. Эту последнюю, именно, часть мы и имеем в виду в нашем вычислении. Указанный характер силовых линий можно, примерно, представить себе из следующей схемы: на концах диаметра окружности находятся протон и электрон; первая часть силовых линий сосредоточена вдоль окружности, вторая — центральная — по диаметру.

В несколько другом разрезе выдвигаемая нами гипотеза подчеркивается на стр. 261 — в форме утверждения относительно числа  $n$ , определяющего стационарное равновесие системы силовых линий.

Итак, предположим, что силовые линии (вихревые нити) электрического поля, центрально соединяющие протон и электрон, равномерно распределены по некоторой нормальной площадке  $S$  поверхности электрона; средняя сила поля (а эта средняя величина и фигурирует в электромагнитной теории Максвелла, как это показано было выше) пусть будет  $E_{cp}$ .

Тогда, согласно закону Кулона-Пуассона, сила, действующая на элемент поверхности  $dS$ , будет

$$df = \frac{1}{8\pi} E_{cp}^2 dS,$$

а на всю поверхность  $S$ :

$$F = \int df = \frac{1}{8\pi} E_{cp}^2 \int dS = \frac{E_{cp}^2 S}{8\pi}.$$

Но  $E_{cp}^2 = 64\pi w^2$  (полагая плотность  $\rho = 1$ ), так что

$$F = 8\pi w^2 S = \frac{1}{2\pi S} (4\pi w S)^2 = kJ^2,$$

где  $k = \frac{1}{2\pi S}$ , а  $4\pi w S = J$  — циркуляции по контуру поверхности  $S$ .

Принимая во внимание направление действия силы и приравняв полученное выражение силы  $F$  обычному кулоновскому, мы получим:

$$F = -kJ^2 = -\frac{e^2}{r^2},$$

откуда

$$P \text{ (потенциальная энергия)} = -krJ^2 = -\frac{e^2}{r}.$$

Согласно закону Бора, полная энергия  $H$  будет:

$$H = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2} krJ^2.$$

Полученное нами выражение энергии явно зависит от квадрата циркуляции  $J$ , которая имеет размер так называемой переменной действия (WirkungsvARIABLE) теории Гамильтона-Якоби. Рассматривая  $J$  как переменную действия, мы, согласно теории Гамильтона-Якоби, <sup>1)</sup> получим для частоты или числа оборотов электрона вокруг ядра значение

$$\nu^0 = \frac{\partial H}{\partial J} = -krJ,$$

так что

$$H = \frac{1}{2} \nu^0 J = \frac{n}{2} h\nu^0, \text{ так как } J = nh.$$

Это и есть наиболее общее выражение закона Планка. Число  $n$  может быть как четным, так и нечетным.

Если предположить симметрию в расположении вихревых нитей, — по поверхности электрона с вихревой нитью в центре симметрии  $n$  будет нечетным:  $n = 2m + 1$ . Тогда

$$H = \left(m + \frac{1}{2}\right) h\nu^0;$$

<sup>1)</sup> См. M. Born, Vorlesungen über Atommechanik.



$\frac{1}{2} h\nu^0$  — не что иное как „Nullpunktenergie“ Планка и по своему физическому смыслу является энергией, соответствующей вихревой нити, образующей ось симметрии.

Чтобы перейти теперь от закона Планка к закону Бора, достаточно в выражении частоты заменить дифференциальное отношение разностным:

$$\nu_q^0 = \frac{\Delta H}{\Delta J} = \frac{H_2 - H_1}{n_2 h - n_1 h} = \frac{H_2 - H_1}{(n_2 - n_1)h};$$

$$\Delta J = J_2 - J_1 = n_2 h - n_1 h;$$

отсюда

$$\nu_q = (n_2 - n_1) \nu_q^0 = \tau \nu_q^0 = \frac{H_2 - H_1}{h}.$$

Это и есть закон Бора.

Если  $\tau = n_2 - n_1 = 1$ , то  $\nu_q^0 = \frac{H_2 - H_1}{h}$

в пределе соответствует (принцип соответствия) классической основной частоте  $\nu_k^0$ ; если же  $\tau = n_2 - n_1 \neq 1$ , то боровская частота  $\nu_q = \tau \nu_q^0$  в пределе соответствует классической  $\tau$ -ой гармонической.

Так как

$$H_2 - H_1 = \frac{1}{2} n_2 \nu_2^0 h - \frac{1}{2} n_1 \nu_1^0 h = \frac{n_2 \nu_2^0 - n_1 \nu_1^0}{2} h = \nu_q h,$$

то закон Бора устанавливает следующее соотношение между квантовой частотой  $\nu_q$ , квантовыми числами  $n_2$  и  $n_1$  и числами оборотов электрона  $\nu_2^0$  и  $\nu_1^0$ :

$$\nu_q = \frac{n_2 \nu_2^0 - n_1 \nu_1^0}{2}.$$

С точки зрения вихревой теории эта формула означает, что боровская частота не имеет непосредственного физического смысла, а является лишь энергетическим коэффициентом. В самом деле, квантовые числа  $n_2$  и  $n_1$  означают числа вихревых нитей; полная энергия, соответствующая этим нитям, будет  $\frac{1}{2} n_2 h \nu_2^0$  и  $\frac{1}{2} n_1 h \nu_1^0$ ; при перескоке электрона с одной орбиты на другую получается вихревое электромагнитное кольцо, энергия которого равна

$$H_2 - H_1 = \frac{1}{2} (n_2 \nu_2^0 - n_1 \nu_1^0) h = \nu_q h;$$

$\nu_q$ , стало быть, это — энергетический коэффициент пропорциональности, характеризующий кольцо. Этот коэффициент связан с числами оборотов на стационарных орбитах указанным соотношением.

Вычислим теперь значения радиуса  $r$  и угловой скорости  $\omega$  ( $= 2\pi\nu^0$ ) для стационарных круговых орбит в зависимости от квантового числа  $n$ .

Для этой цели примем во внимание условие равновесия при движении по круговой орбите, именно равенство центробежной силы кулоновской внешней силе:

$$\frac{mv^2}{r} = m r \omega^2 = \frac{e^2}{r^2} \dots \dots \dots (1)$$

Это уравнение совместно с уравнениями:

$$(H) = \frac{1}{2} k r J^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2}{r} \dots \dots \dots (2)$$

$$\nu^0 = \frac{\omega}{2\pi} = k r J \dots \dots \dots (3)$$

дает решение задачи.

Из системы трех уравнений (1), (2), (3) с тремя неизвестными  $r$ ,  $\omega$  и  $k$  получаем:

$$r = \frac{J^2}{4\pi^2 m e^2} = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m e^2}$$

$$\omega = \frac{8\pi^3 m e^4}{J^3} = \frac{8\pi^3 m e^4}{n^3 h^3}$$

$$k = \frac{1}{2\pi S} = \frac{16\pi^4 m^2 e^6}{J^6} = \frac{16\pi^4 m^2 e^6}{n^6 h^6}.$$

Энергия  $H$  равна:

$$H = -\frac{1}{2} k r J^2 = -\frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \cdot \frac{h}{n^2} = -\frac{R h}{n^2};$$

а частота —  $\nu_q$ :

$$\nu_q = \frac{H_2 - H_1}{h} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

где  $R = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3}$  — постоянная Ридберга — Ритца.

Если заряд ядра кратный от  $e$ ,  $e_1 = Ze$  тогда вместо  $e^4$  мы имеем  $e_1^2 e^2$ ; заменяя  $e_1^2$  через  $Z^2 e^2$  получим:

$$\nu_q = R Z^2 \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Полученное выражение для  $r$  и  $k$  показывает, что число центральных вихревых линий, а также занимаемая ими площадь ( $k = \frac{1}{2\pi S}$ ) возрастает с возрастанием квантового числа  $n$ . Вычислим радиус  $r_m$



орбиты и число центральных силовых линий при предположении, что эти линии пронизывают половину шаровой поверхности электрона: Имеем:

$$k = \frac{1}{2\pi S} = \frac{16\pi^4 m^2 e^4}{n^6 h^6},$$

откуда

$$S = \frac{n^6 h^6}{32\pi^5 m^2 e^4}.$$

При  $n = 1$  мы получаем поперечное сечение и, следовательно, радиус вихревой нити. Приравниваем выражение для  $S$  половине поверхности электрона. Радиус электрона равен, как известно,

$$r = \frac{e^2}{mc^2}$$

так что половина поверхности электрона равна

$$2\pi \frac{e^4}{m^2 c^4};$$

имеем:

$$\frac{n^6 h^6}{32\pi^5 m^2 e^4} = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4}.$$

откуда

$$n = 2\pi \sqrt[3]{\frac{e^2}{c^2} \frac{e}{h}}.$$

Число  $n$  пропорционально таким образом  $\frac{e}{h}$ ,  $n$  приблизительно равно 29 200.

Подставив в выражение для  $r$  величину  $n^2$  получим:

$$r_m = \frac{e}{cm} \sqrt[3]{\frac{e}{c}} = \frac{e}{m} \sqrt[3]{e},$$

если  $e$  выражать не в электростатических единицах, а в электромагнитных,  $r_m$  приблизительно равно 2,7 см.

Таким образом, для ближайшей к ядру стационарной орбиты число  $n$  вихревых нитей, центрально соединяющих ядро с электроном, равно 1 ( $n = 1$ ). С увеличением радиуса орбиты  $n$  возрастет, при чем теоретически (т. е. при предположении действительного существования соответствующей орбиты)  $n$  достигает максимума для определенного  $r_m$ .

При дальнейшем возрастании  $r$  число  $n$  должно уменьшаться. Это видно из основного соотношения

$$-kJ^2 = -\frac{1}{2\pi S} J^2 = -\frac{n^2 h^2}{2\pi S} = -\frac{e^2}{r}.$$

Так как предел поверхности  $S$  достигнут (мы полагаем эту поверхность равной половине поверхности электрона), то в приведенной формуле необходимо  $S$  рассматривать, как константу. При увеличении  $r$  правая часть равенства уменьшается по абсолютной величине, следовательно, должна уменьшаться по абсолютной величине и левая часть, т. е. число  $n$ .

Вычислим, при каком  $r$  числе  $n$  снова достигает минимума  $n = 1$ .

$$\text{Имеем, полагая } n = 1, S = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4}$$

$r = \sqrt{\frac{2\pi S e^3}{h^2}} = \frac{2\pi e^3}{m h c^2} = \text{приб. } 1,3 \text{ км, — величина, разумеется, чисто теоретическая.}$

Полученный результат соответствует экспериментальной картине обычных спектров электрических силовых линий; спектры эти показывают, что по мере увеличения расстояния между заряженными телами число силовых линий, центрально связывающих тела, уменьшается. Мы видим, таким образом, что законы микрокосма отличны от законов макрокосма.

Подчеркнем в заключение еще раз, что выведенные нами численные значения  $n$  имеют относительное значение. Это видно из наших исходных формул:

$$-kJ^2 = -\frac{e^2}{r^2}$$

$$-krJ^2 = -\frac{e^2}{r}$$

В правой части первой формулы фигурирует понятие силы — понятие относительное, означающее итог многообразных движений в среде. Точно так же величина  $-krJ^2 = -\frac{e^2}{r}$ , которую мы принимаем за значение потенциальной энергии, на самом деле является значением уровня энергии (потенциала). Если потенциал ядра равен константе  $-C$ , то потенциальная энергия на уровне  $r$  будет  $C - \frac{e^2}{r}$ ; но так как при вычислениях мы имеем дело с разностями энергий, то мы можем константу  $C$  приравнять нулю. Такое положение вещей мы имеем во всех задачах о равновесии. Здесь в первую очередь важны отношения факторов равновесия, а не их абсолютные величины. Так, с абстрактной точки зрения, равновесие рычага определяется отношением величин грузов; в физическом же рычаге имеют конечно, значение абсолютные величины грузов. Квантовые числа  $n$  являются, таким образом, определяющими равновесие системы отно-



сительными величинами. Разумеется, абсолютное значение числа вихревых нитей имеет значение в действительном физическом процессе, теорию которого еще предстоит разработать. Но даже в нашей абстрактной схеме (модели) уже фигурируют абсолютные величины, как, например, заряд  $e$  и значение  $r$  радиуса электрона — значение, полученное на основании формулы абсолютного значения энергии массы электрона ( $E = mc^2$ ).

Числа  $n$  являются также относительными и в более глубоком смысле. Как мы подчеркнули выше значение планковской константы  $h$  (и связанное с ним понятие „элементарной“ вихревой нити), будучи абсолютным, является вместе с тем и относительным. „Элементарная“ вихревая нить, подобно атому и электрону, бесспорно не является „истиной в конечной инстанции“, последним метафизическим элементом мира.

Перейдем теперь к определению эллиптических орбит Зоммерфельда. Имеем, как и раньше, для расстояния между протоном и электроном, равного  $a$  — большой полуоси эллипса:

$$-kJ^2 = -\frac{e^2}{a^2}$$

или

$$-kaJ^2 = -\frac{e^2}{a}.$$

Но  $-\frac{e^2}{a}$  есть среднее значение потенциальной энергии; согласно теореме Бора-Зоммерфельда, среднее значение кинетической энергии равно половине этой величины, так что совокупная средняя энергия будет

$$\bar{H} = -\frac{1}{2}kaJ^2 = -\frac{1}{2}\frac{e^2}{a}.$$

Мы видим таким образом, что, если оперировать со средними значениями энергий, радиус  $r$  орбиты Бора заменяется большой полуосью эллипса.

Отсюда.

$$a = \frac{J_1^2}{4\pi^2me^2} = \frac{n^2h^2}{4\pi^2me^2}$$

$$\omega = \frac{8\pi^3me^4}{J_1^3} = \frac{8\pi^3me^4}{n^3h^3}$$

$$\bar{H} = \frac{-2\pi^2me^4}{J_1^2} = \frac{-2n^2me^4}{h^2} \cdot \frac{h}{n^2} = -\frac{R\hbar}{n^2}.$$

Квантовое число  $n$  называют главным квантовым числом; мы его можем назвать средним квантовым числом, так как оно соответствует средним значениям энергии.

Для полного определения орбиты необходимо дополнительное квантовое число, которое очень просто получается из следующего соображения.

Если в уравнении эллипса

$$r = \frac{p}{1 + \varepsilon \cos \varphi}$$

эксцентриситет  $\varepsilon$  стремится к нулю, то параметр  $p$  стремится к  $r$ .

С физической точки зрения это значит, что параметр  $p$  должен удовлетворять тем же квантовым условиям, что и радиус орбиты Бора. Так как  $p \neq a$ , то, вводя второе квантовое число  $k$ , имеем:

$$p = \frac{J_2^2}{4\pi^2me^2} = \frac{k^2h^2}{4\pi^2me^2}.$$

Так как

$$p = a(1 - \varepsilon^2)$$

и

$$b \text{ (малая полуось)} = a\sqrt{1 - \varepsilon^2},$$

то

$$\varepsilon^2 = 1 - \frac{J_2^2}{J_1^2} = \frac{n^2 - k^2}{n^2},$$

и

$$b = \frac{J_1J_2}{4\pi^2me^2} = \frac{nk^2h^2}{4\pi^2me^2}.$$

Число  $k$  называют дополнительным или азимутальным квантовым числом; мы его можем назвать параметрическим квантовым числом, так как оно соответствует параметру эллиптического движения. Нетрудно показать, что среднее квантовое число соответствует полной скорости движения по орбите, а параметрическое — нормальной, слагающей, так что

$$n = k + n',$$

где  $n'$  называется обычно радиальным квантовым числом, соответствующим радиальной слагающей движения.

