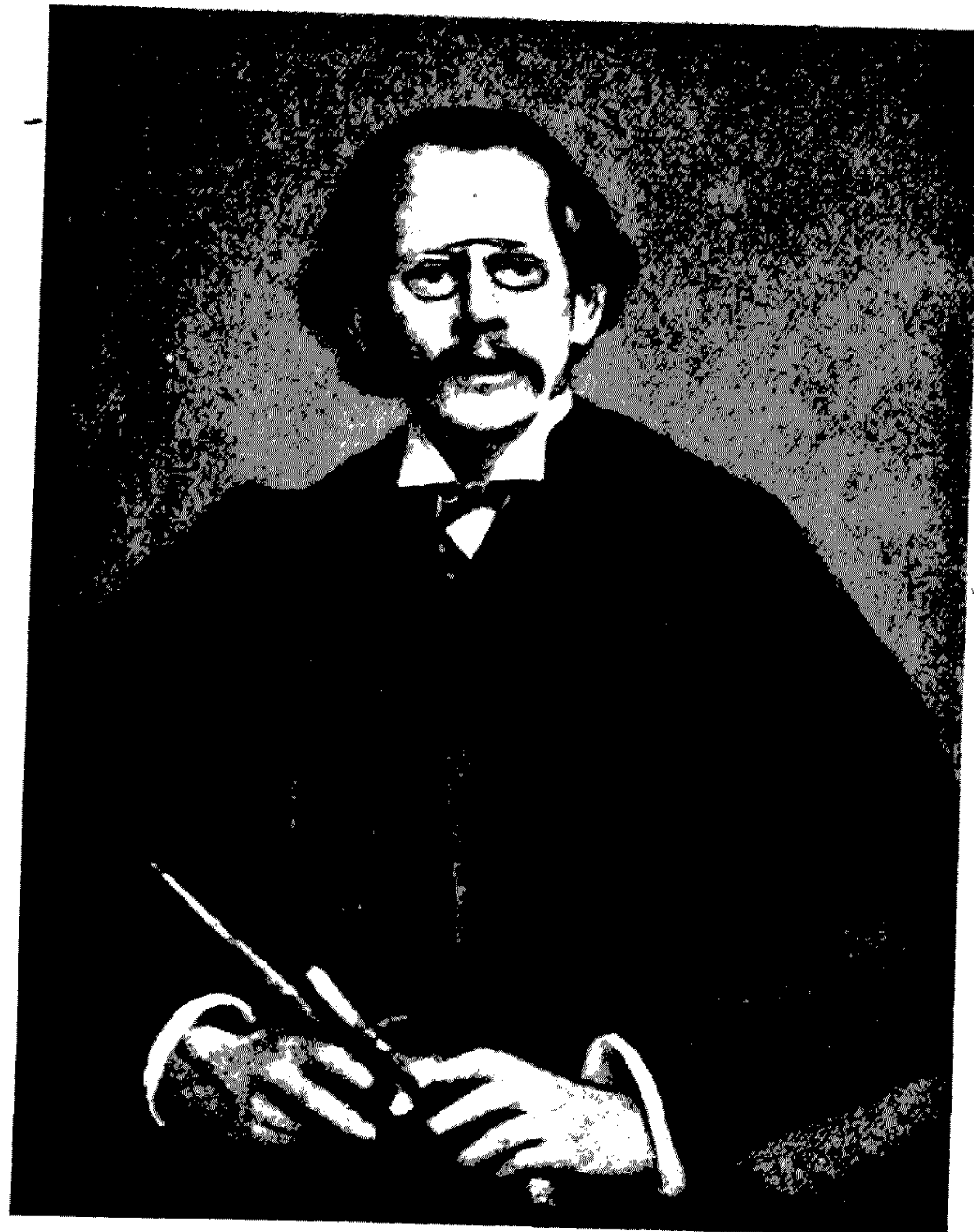


ДЖ. ДЖ. ТОМСОН

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 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-

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, обладающей 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-

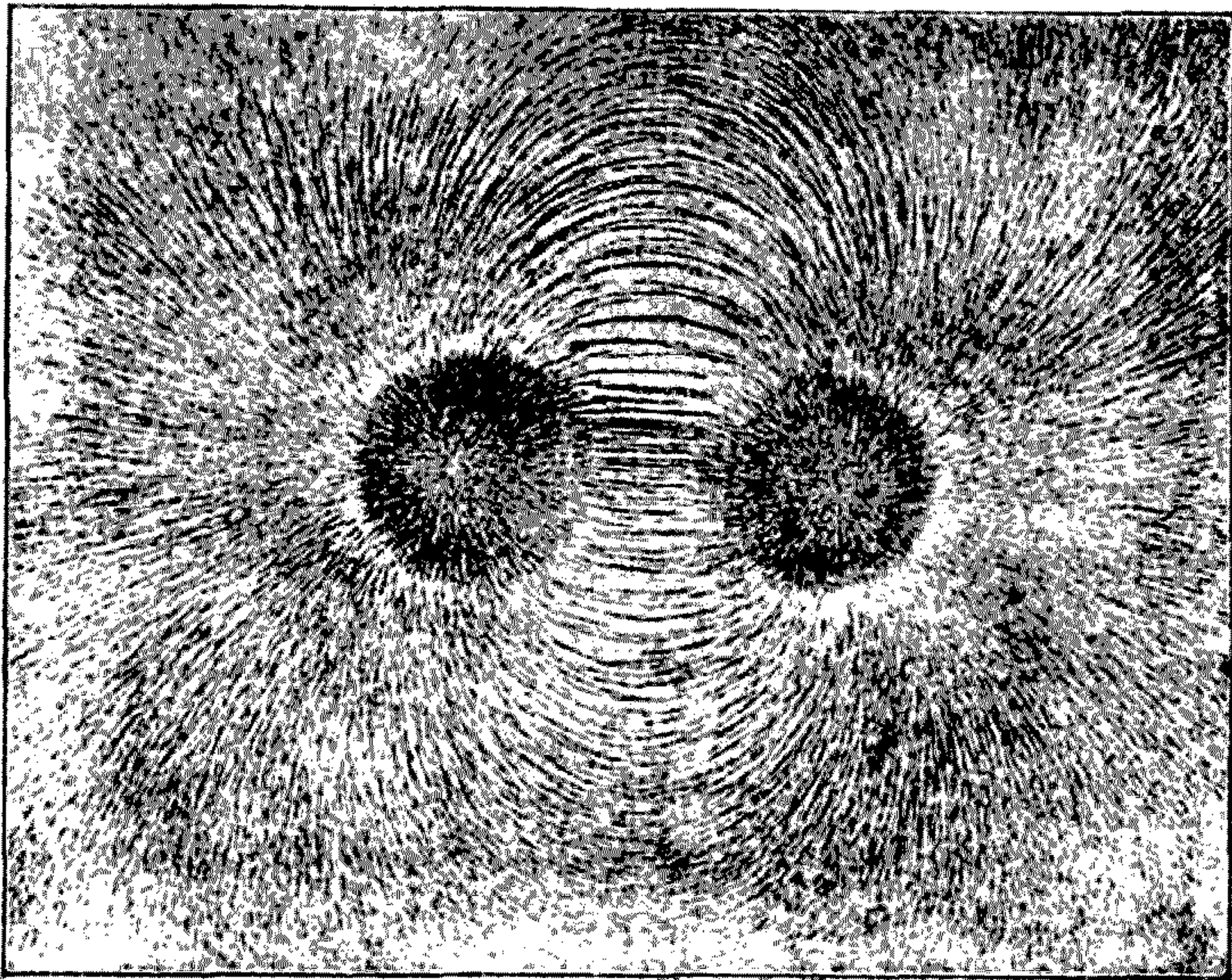


Рис. 1.

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.

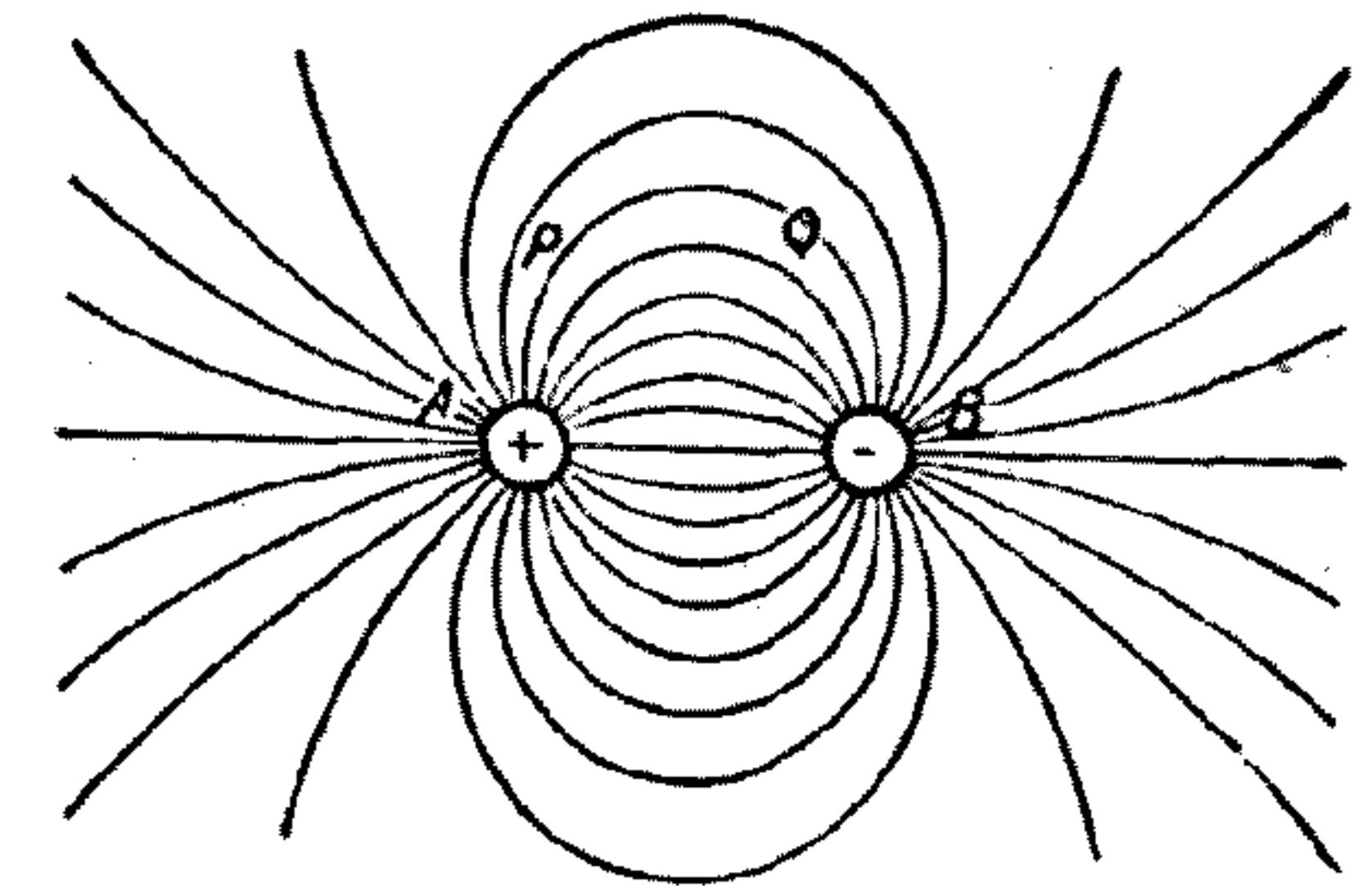


Рис. 2.

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

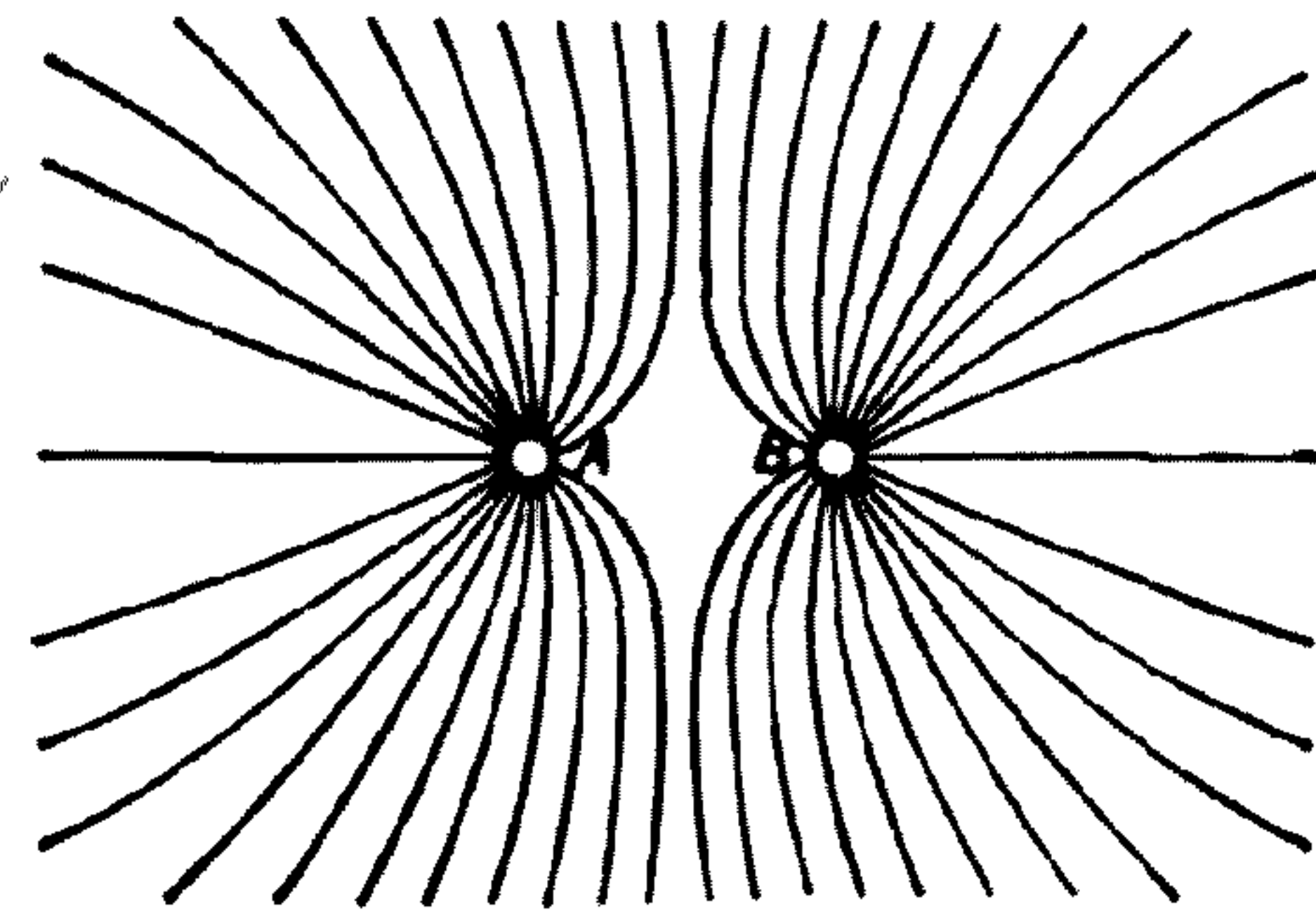


Рис. 3.

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

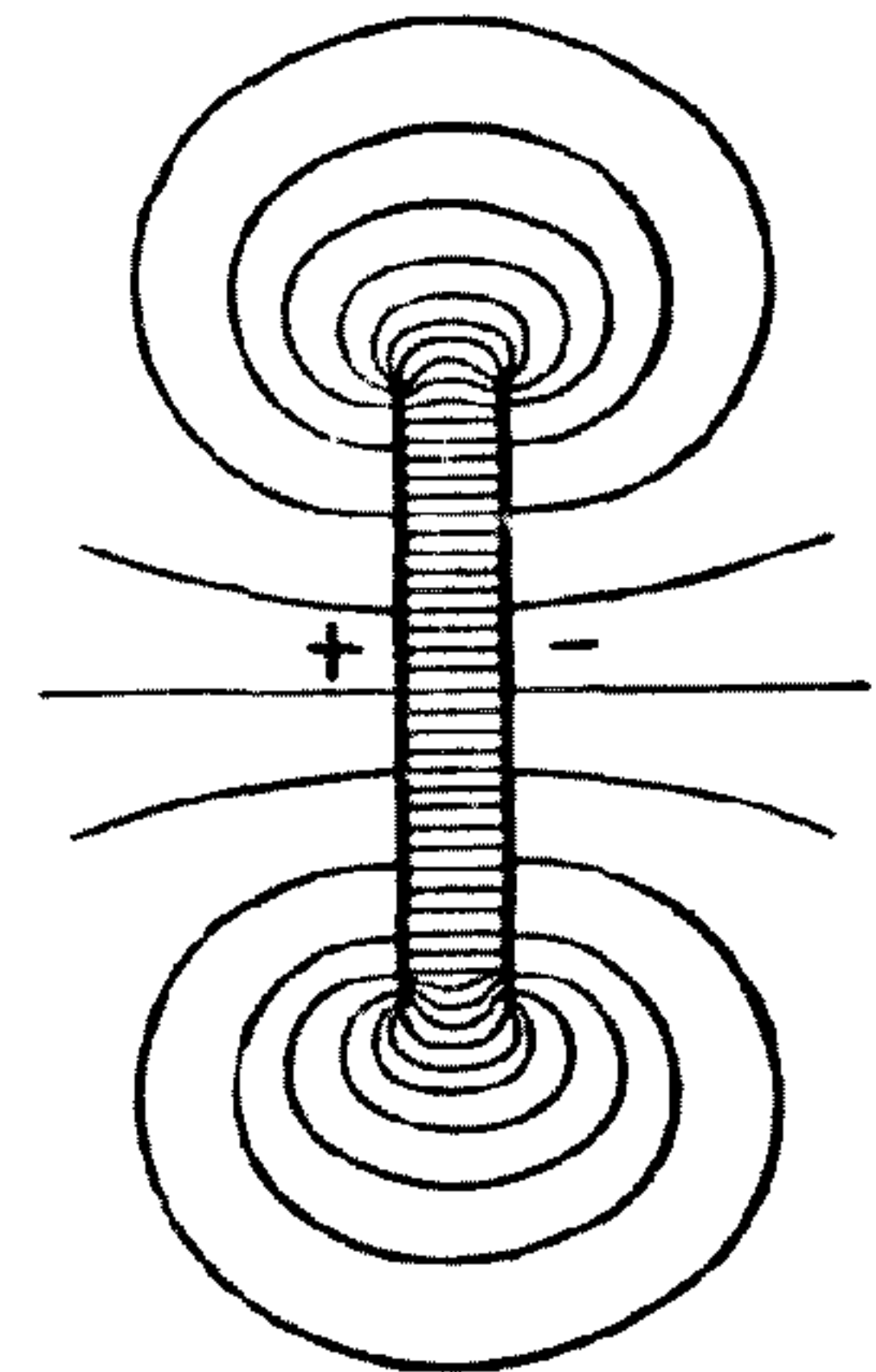


Рис. 4.

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 4π ; или, если σ есть плотность электрического заряда на пластинках, а v скорость, с которой движется заряд, магнитная сила равна $4\pi\sigma v$.¹⁾

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

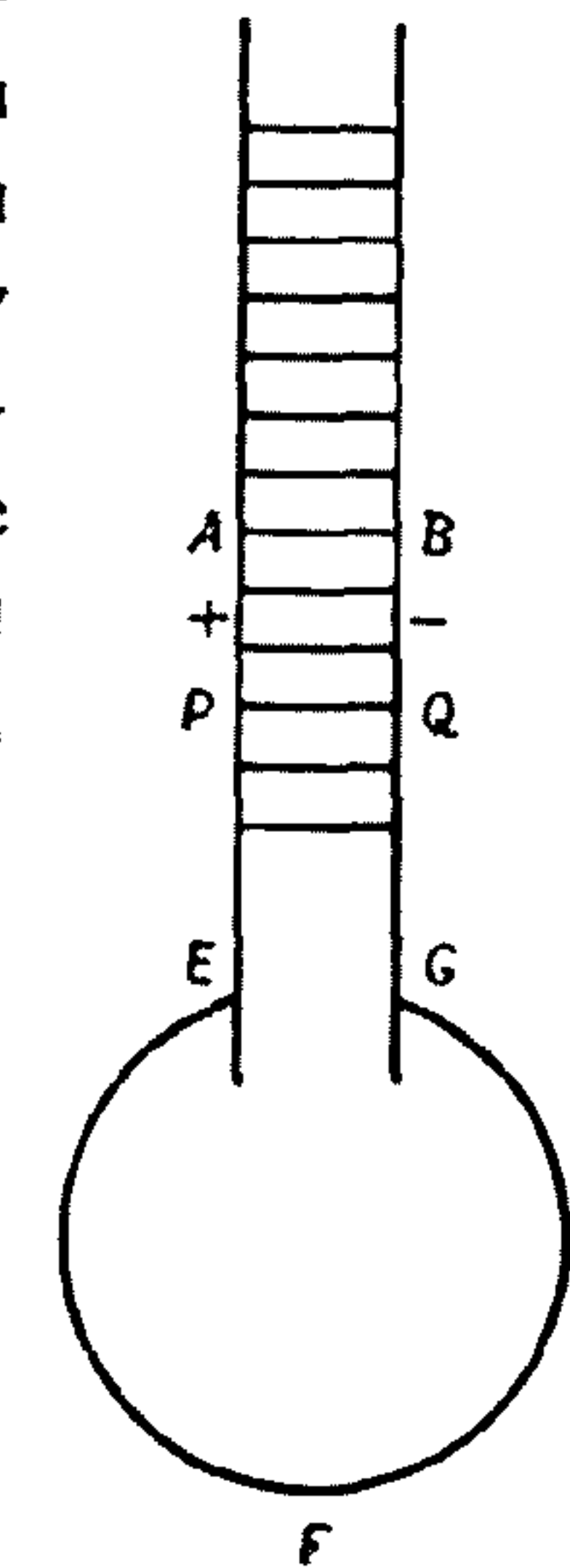


Рис. 5.

¹⁾ 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 σ , т. е. плотность заряда σ , то для напряжения магнитного поля имеем $M = 4\pi\sigma v$. Если трубки движутся по направлению, образуя угол θ 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. 1) 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 $4\pi v \sin \Theta$, 2) при чем направление магнитной силы перпендикулярно к фарадеевской трубке и к направлению движения; Θ 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, Θ — угол между OP и направлением движения сферы,

1) Этот вывод дан в добавлении IV. (Прим. ред.)

2) 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

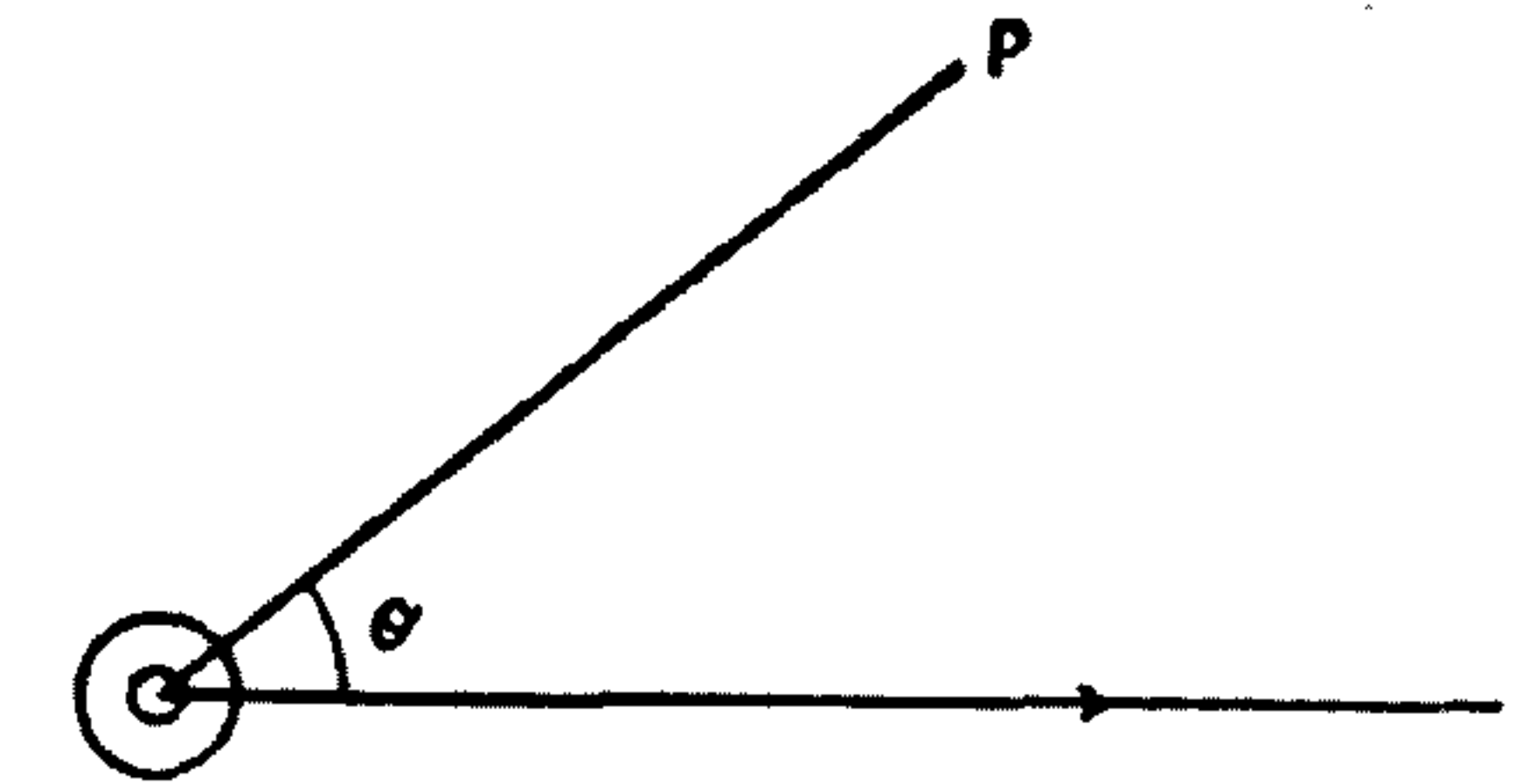


Рис. 6.

знаем, что в единице объема поля, где магнитная сила H , заключает $\frac{\mu H^2}{8\pi}$ единиц энергии, при чем μ 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, 1) 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-

1) 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 Θ от 0 до π и по OP от a до ∞ :

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

(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 Гринем 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“, ¹⁾) 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, Θ — 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. ²⁾ 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

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

²⁾ 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.

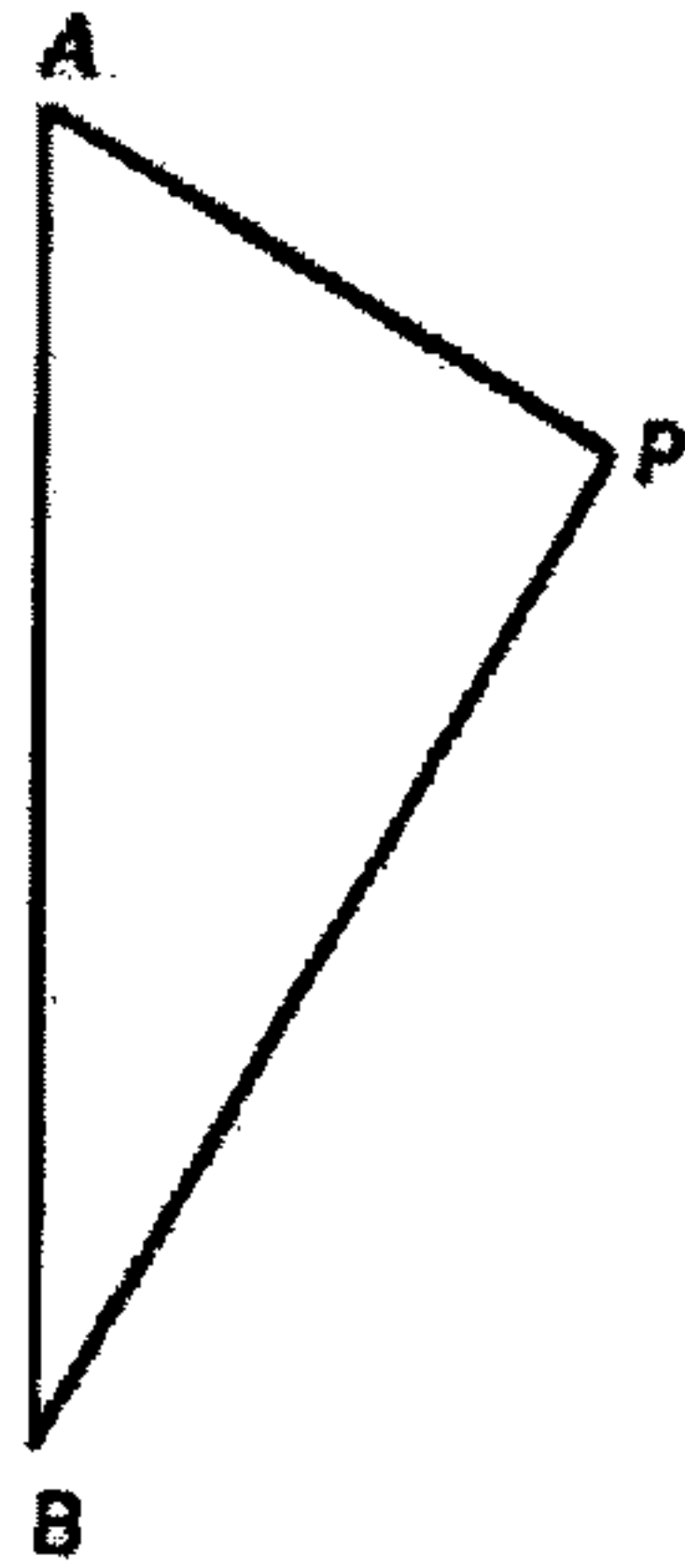


Рис. 7.

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

¹⁾ 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 α изменяется от 0 до π , а r от 0 до ∞ . Интегрирование можно осуществить следующим образом: вместо α ввести переменное R , связанное с α 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,

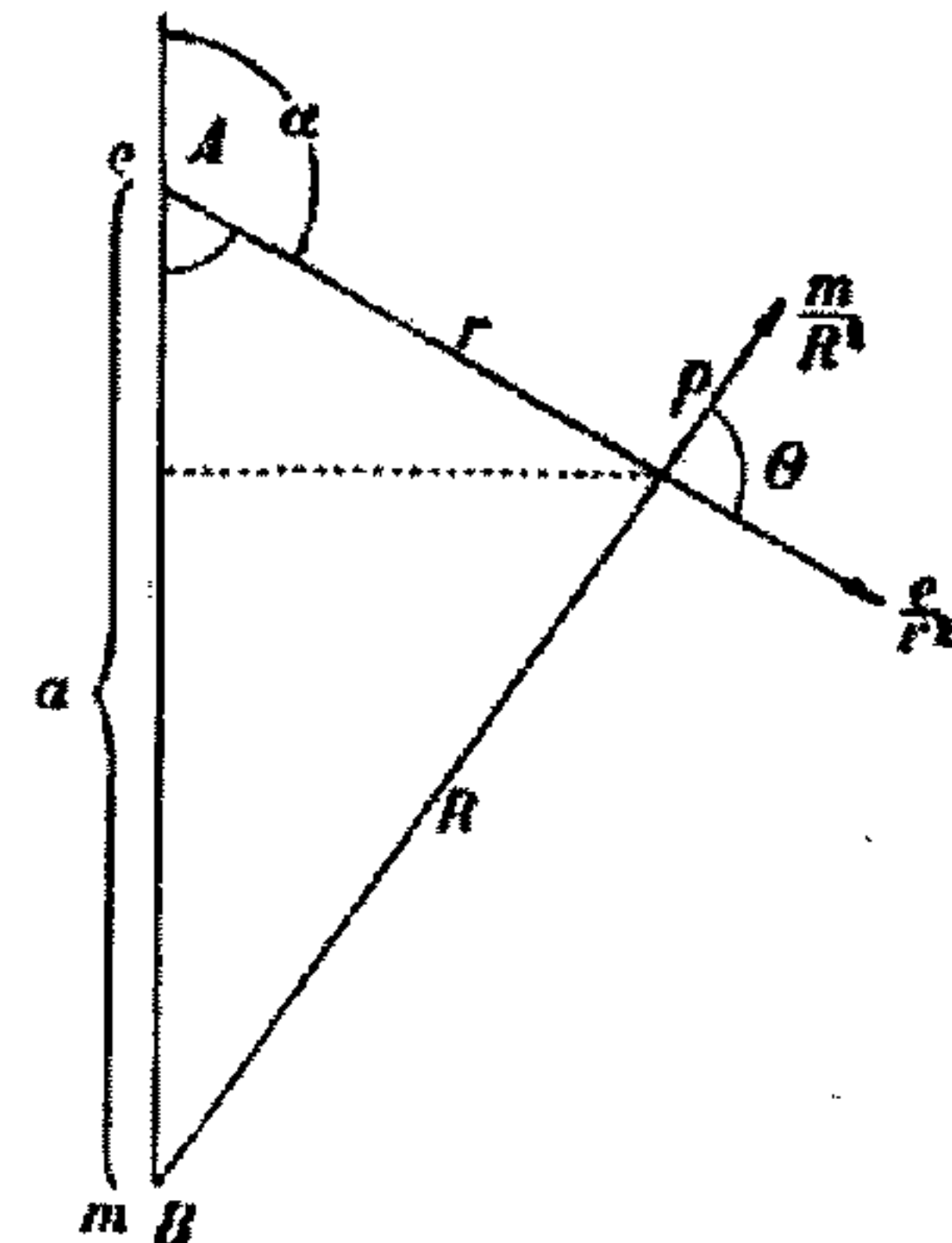


Рис. 7а.

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 δt 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 Θ есть угол ABA' , изменение момента количества движения будет $em \sin \Theta$ с осью, перпендикулярной к AB и лежащей в плоскости рисунка. Пусть δJ будет изменение количества движения в A , а $-\delta J$ изменение в B , тогда δJ 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, δJ должно быть перпендикулярно к плоскости рисунка и

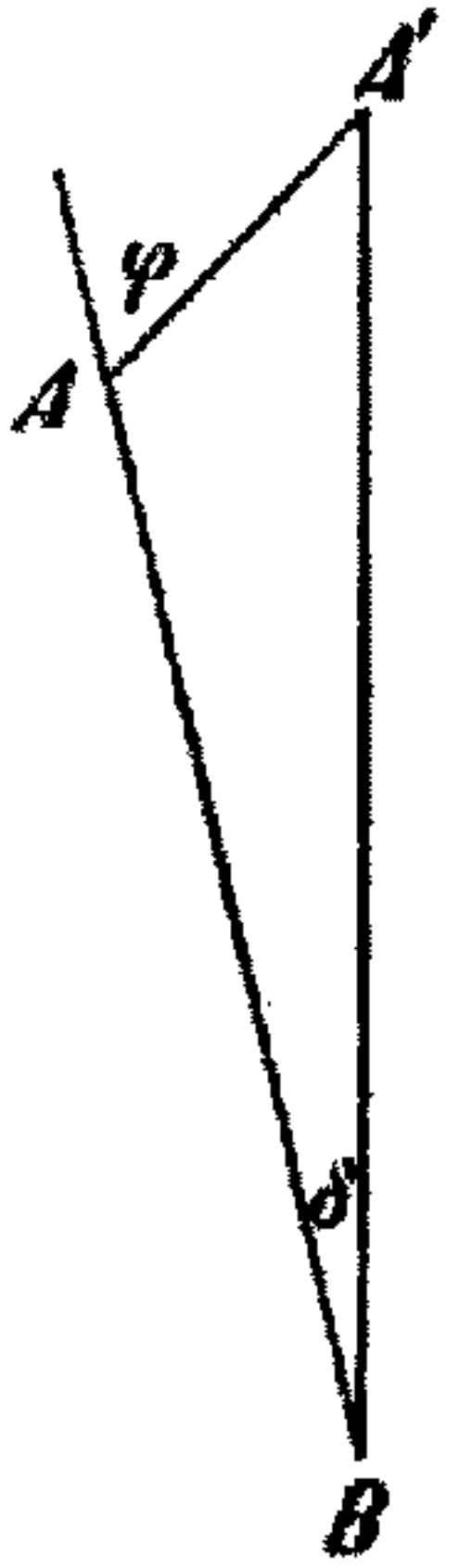


Рис. 8.

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

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 ∞ 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-

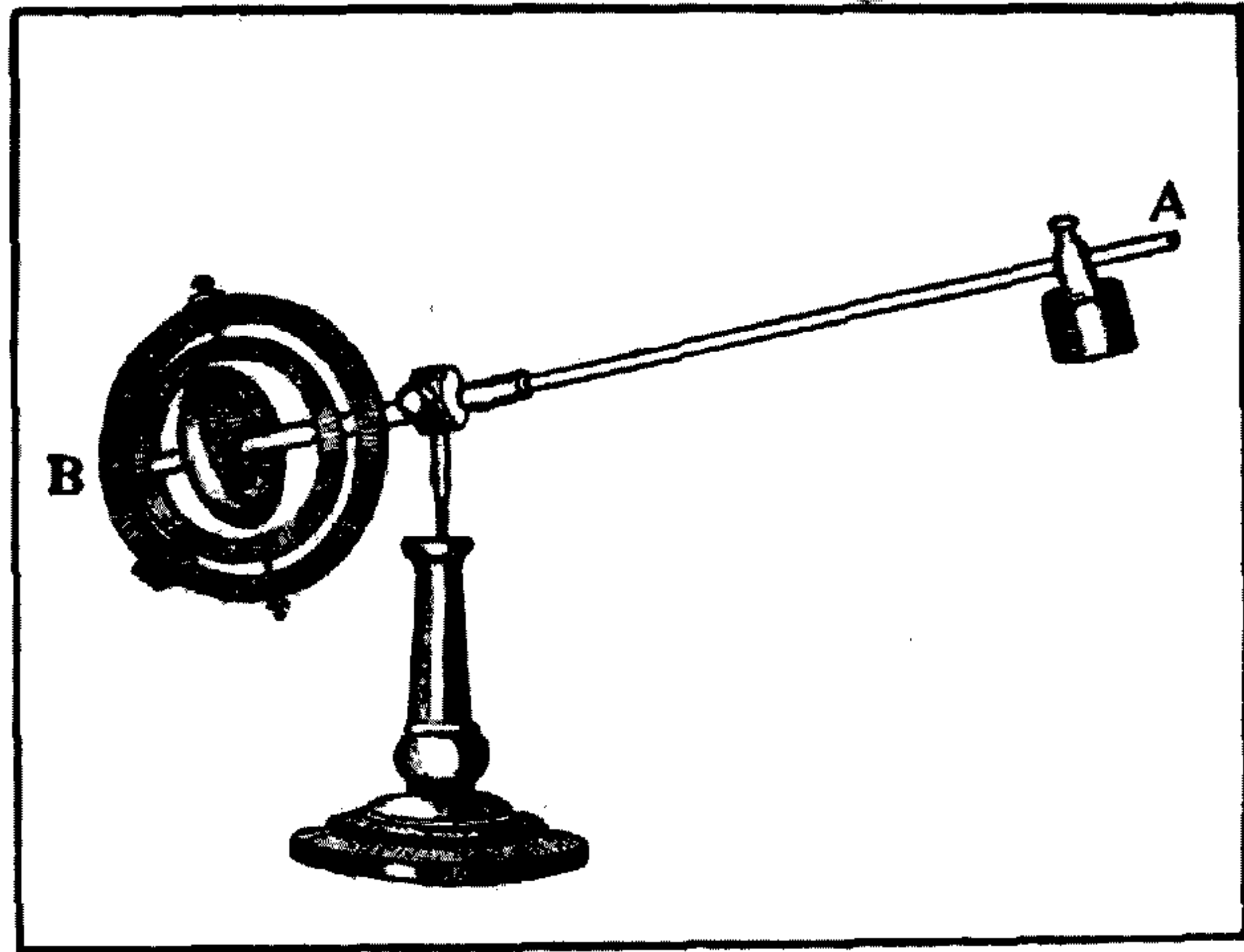


Рис. 9.

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 $e \cdot m \cdot AB \frac{\sin \varphi}{OP}$ ¹⁾, где φ есть угол, образованный прямыми AB и

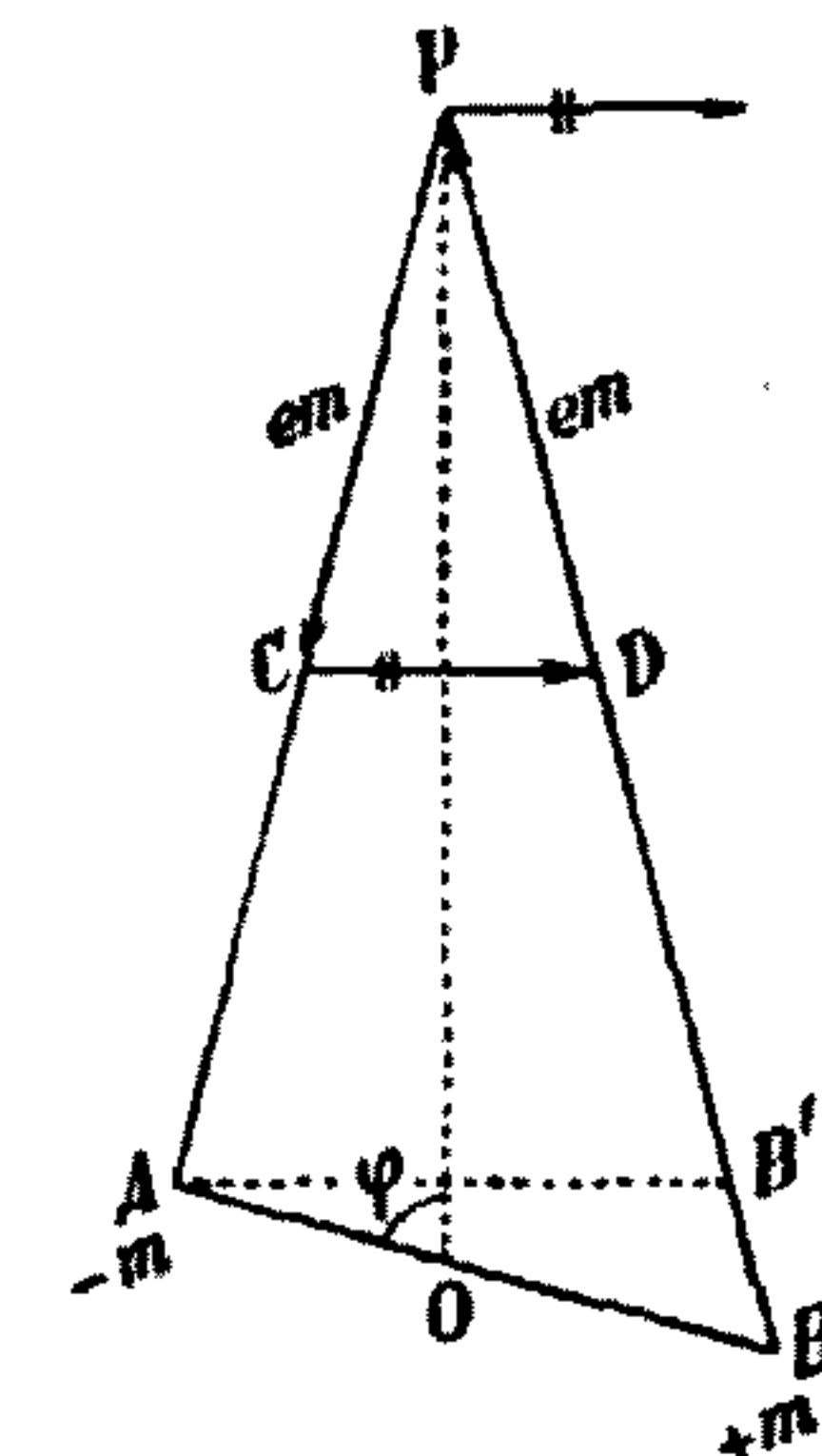


Рис. 9а.

¹⁾ 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 δu и δF — 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 , μ — магнитная проницаемость среды, окружающей сферу, то магнитная индукция в P будет $4\pi\mu Nv \sin \theta$, где v — скорость движения сферы, θ — 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

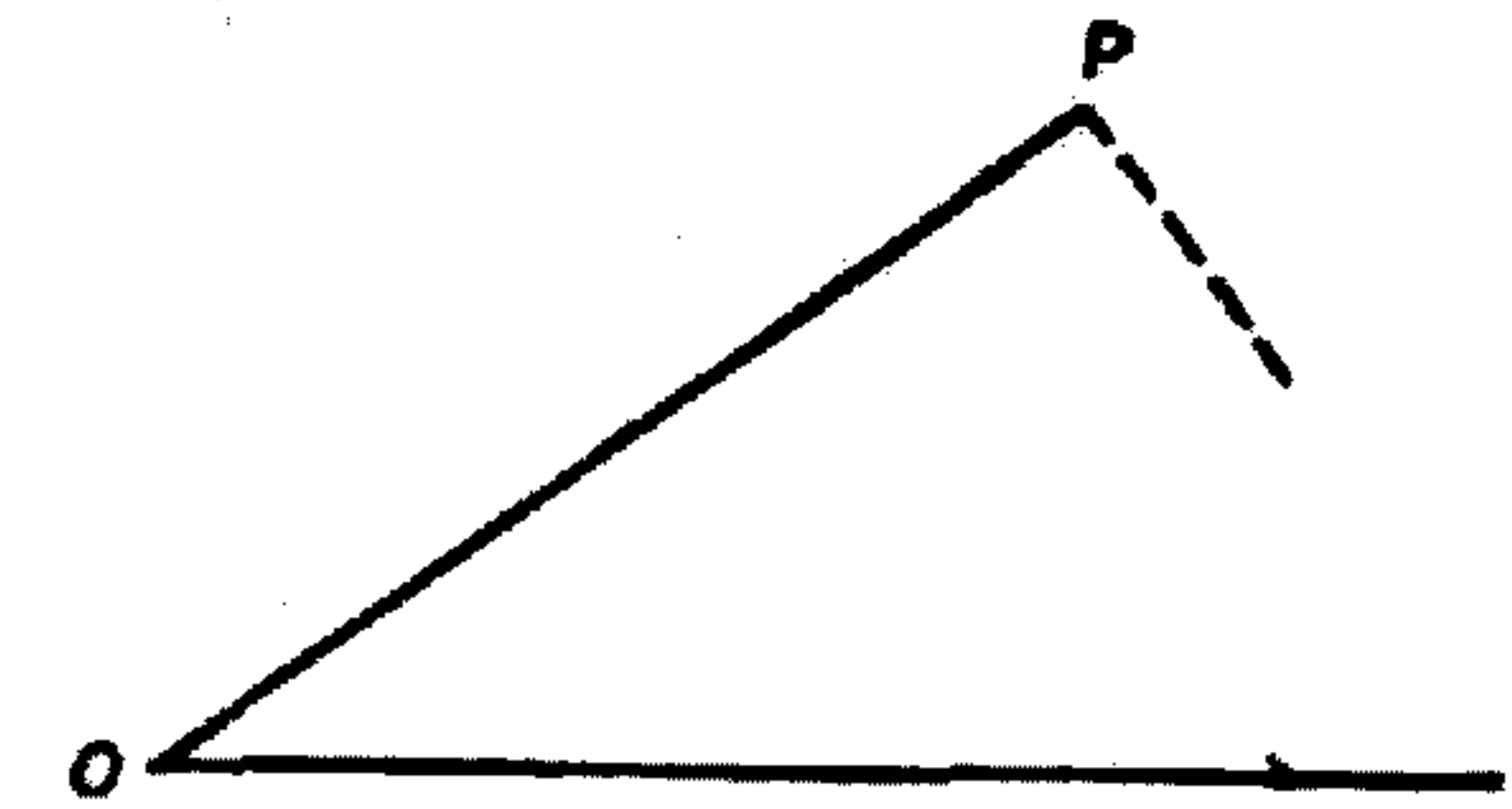


Рис. 10.