

Структура света

Дж.Дж. Томсон

(С предисловием А. К. Темиряева. В журнале отсутствуют первые страницы предисловия)

мыслей, с другой—дать дальнейшее развитие своих мыслей и отместить 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 нашего журнала 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 преимущества 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 представляет 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 получилось в результате достижений проникательности, 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 из себя 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, чтобы сделать 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.

Был один период, продолжавшийся больше столетия, в который практически господствовала Ньютонская или корпускулярная теория. Согласно точке зрения, которой придерживались непосредственные последователи Ньютона, энергия света переносится маленькими тельцами, называемыми корпус-

кулами, 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 ¹⁾. 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 обоих свойств. Мы увидим, что точка зрения, имеющая очень много сходства с этой, подсказывается открытиями, сделанными в течение последних двадцати пяти лет в области электрических свойств света. Я хотел бы обратить ваше особое 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 и француз Френель. 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

¹⁾ XVII вопрос Оптики Ньютона; что Ньютон придерживался синтетического взгляда на природу света, хорошо видно из его доклада 1675 г. — «Теория света и цветов».

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, гребень или долина проходит через нее. Принцип интерференции есть изложение того, что происходит, когда различные ряды волн проходят через среду. Предположим, что волна, отправляясь от точки O в пруде (рис. 1), 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.

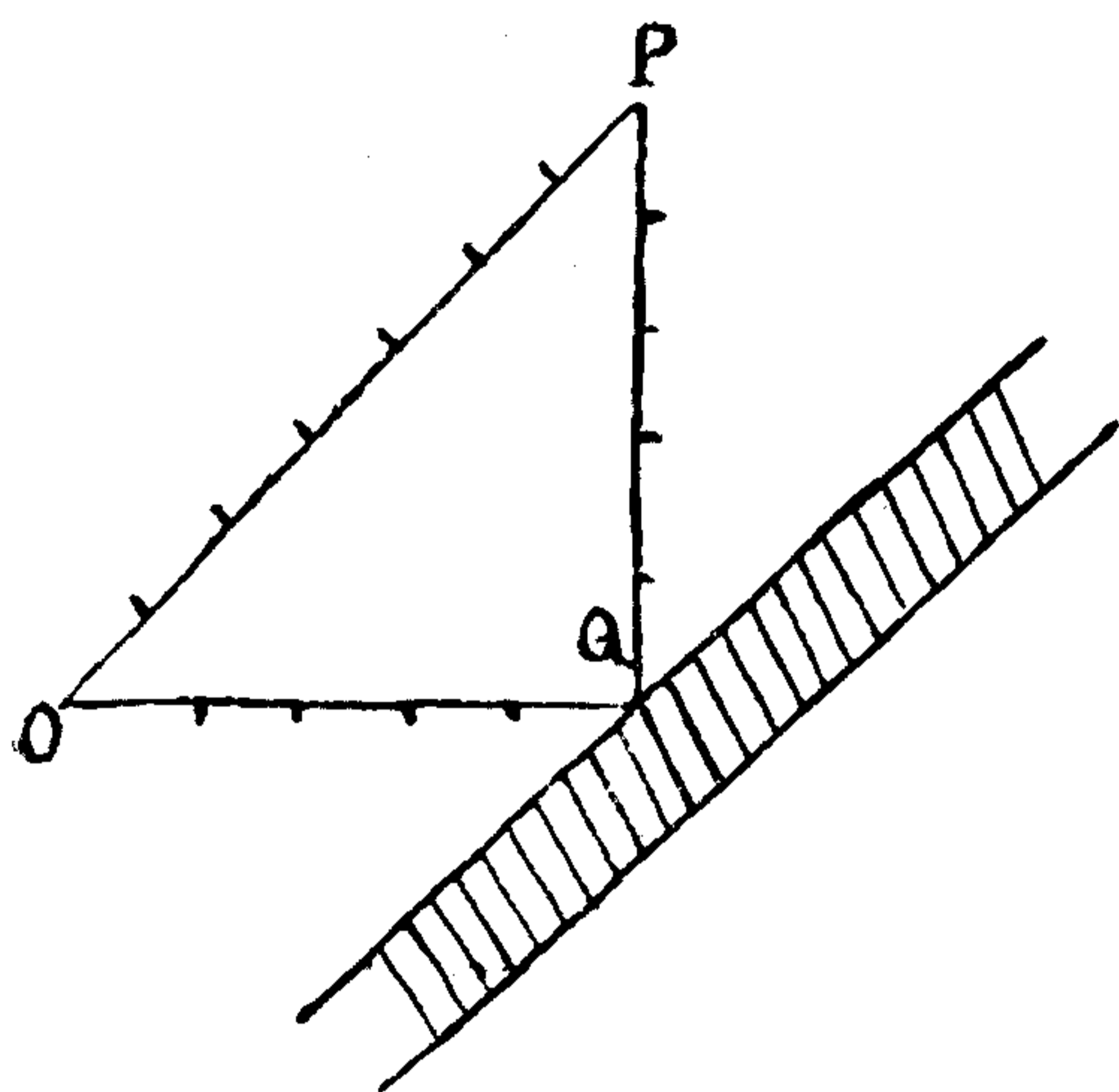


Рис. 1.



Рис. 2.

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 ¹⁾. Если теперь одна из отметок около P вдоль OP совпадет 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 α (рис. 2), те, которые длиннее на полтора фута — по другой кривой β и т. д. Вода вдоль этих кривых будет неподвижной, без энергии, энергия не движется ни вдоль, ни поперек них. Если мы

¹⁾ Здесь Томсон в целях популяризации допускает неточность, так как при отражении от более плотной среды теряется половина.

начертим кривые a , b , c , d , где ORQ больше чем OR на 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.

Хотя Юнг первый дал основную идею интерференции, но Френелю мы обязаны ее математическим обоснованием; он и другие крупнейшие математики разрабатывали те оптические эффекты, которые вытекали 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 то, что если мы изобразим колебания света 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, и, в действительности, произведение энергии на длину волны есть величина постоянная ¹⁾. 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 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, 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

¹⁾ Точное соотношение дается законом Эйнштейна: $\frac{1}{2}mv_2 = hn - p$, где p — работа вырывания электрона, hn — кванта энергии.

света, называется квантой этого света. Планк постулировал, что кванта света, делая n колебаний в секунду, пропорциональна n и равна nh , где h есть константа, всем известная в настоящее время константа Планка; отношение $E=hn$, 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 вроде 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; эти сильно различающиеся кванты все движутся в пространстве с совершенно одинаковой скоростью. Однако скорость кванты определяется той средой, через которую она проходит, а не так, как у электрона или α -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 было¹⁾. 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.

¹⁾ 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.

который 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 Герц 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 противостоять заключению Максвелла, что световые волны представляют из себя 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 ¹⁾. Я предложил путь, по кото-

¹⁾ Это утверждение Томсона не совсем точно. Сам Томсон в своей первоначальной теории «волокнутого эфира» (см. нашу статью в № 4 журнала за 1925 г.) утверждает прерывное, а не непрерывное строение поля на основании физического понимания силовых линий Фарадея-Максвелла.

рому, 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.

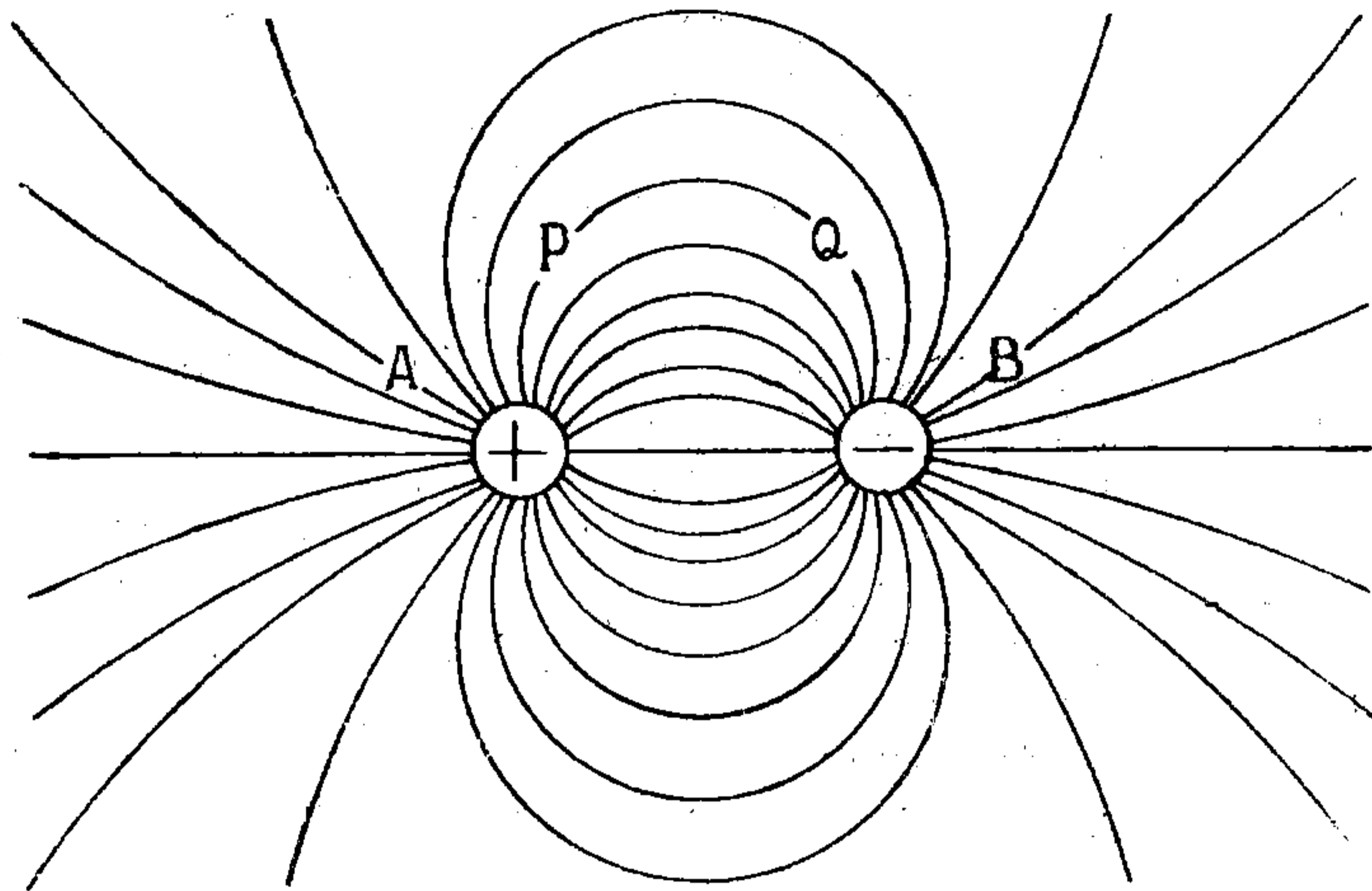


Рис. 3.

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. 3. Я предполагаю, что эти линии представляют из себя не только геометрические фикции, но что они, или вернее группы их, образующие силовые трубки, оканчивающиеся на электронах, 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. 3), 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 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, подводя итог, лучеиспускание светящейся молекулы или атома состоит из кольца или сердцевинки, содержащей почти всю энергию; оно окружено рядом волн Максвелловского типа, длина которых равна окружности кольца. Рассмотрим сейчас с большими подробностями строение сердцевинки и тот путь, которым она образуется.

Прежде всего о ее строении. Сердцевинка 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 матерьял 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.

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. 4. 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

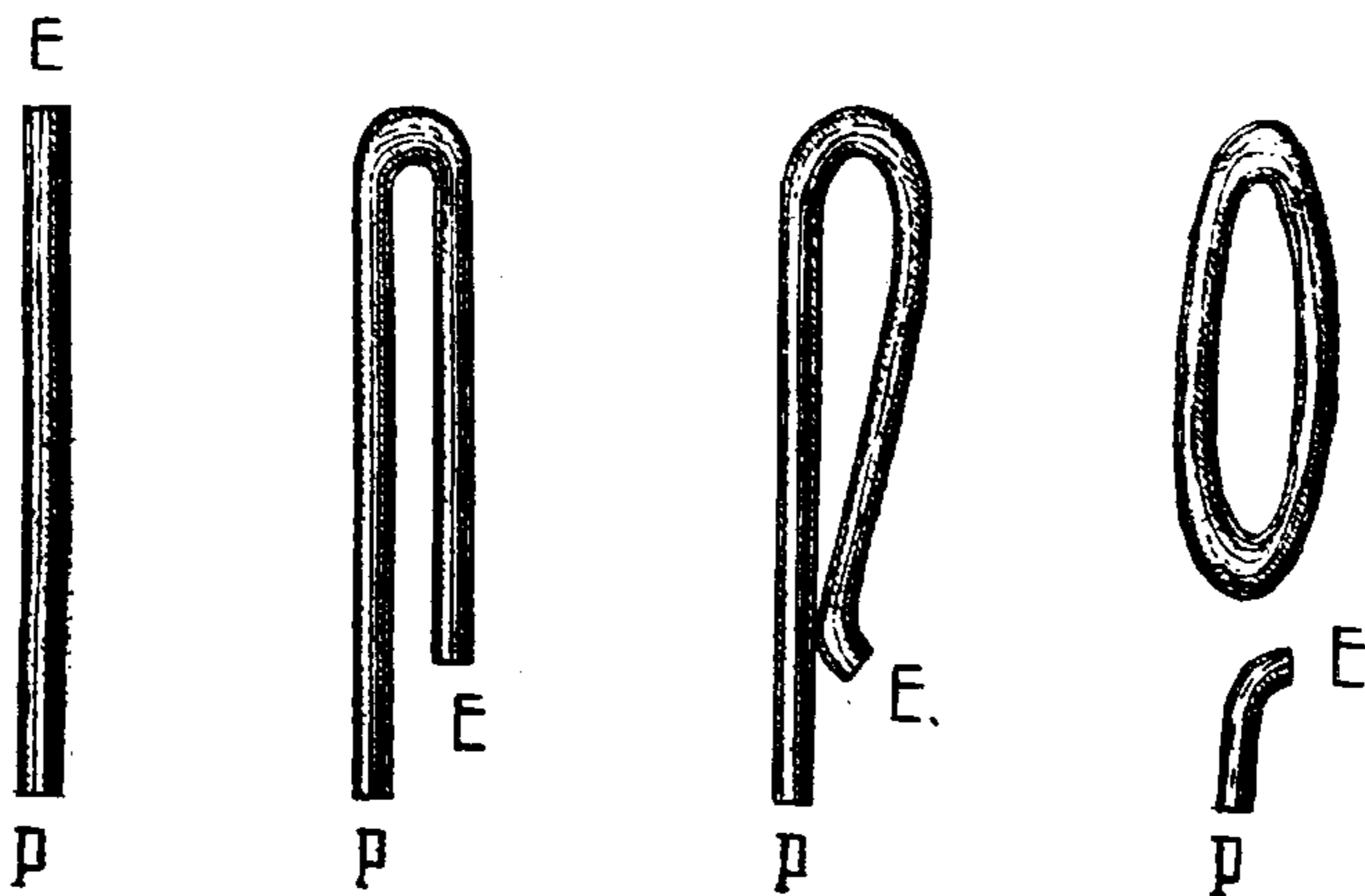


Рис. 4.

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 электрон¹⁾; 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

¹⁾ То, о чем здесь говорит Томсон, не что иное, как проявление инерции и силовых линий поля.

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 электроном и положительным зарядом. Для того, чтобы это случилось, должен произойти процесс обратный тому, который вел к

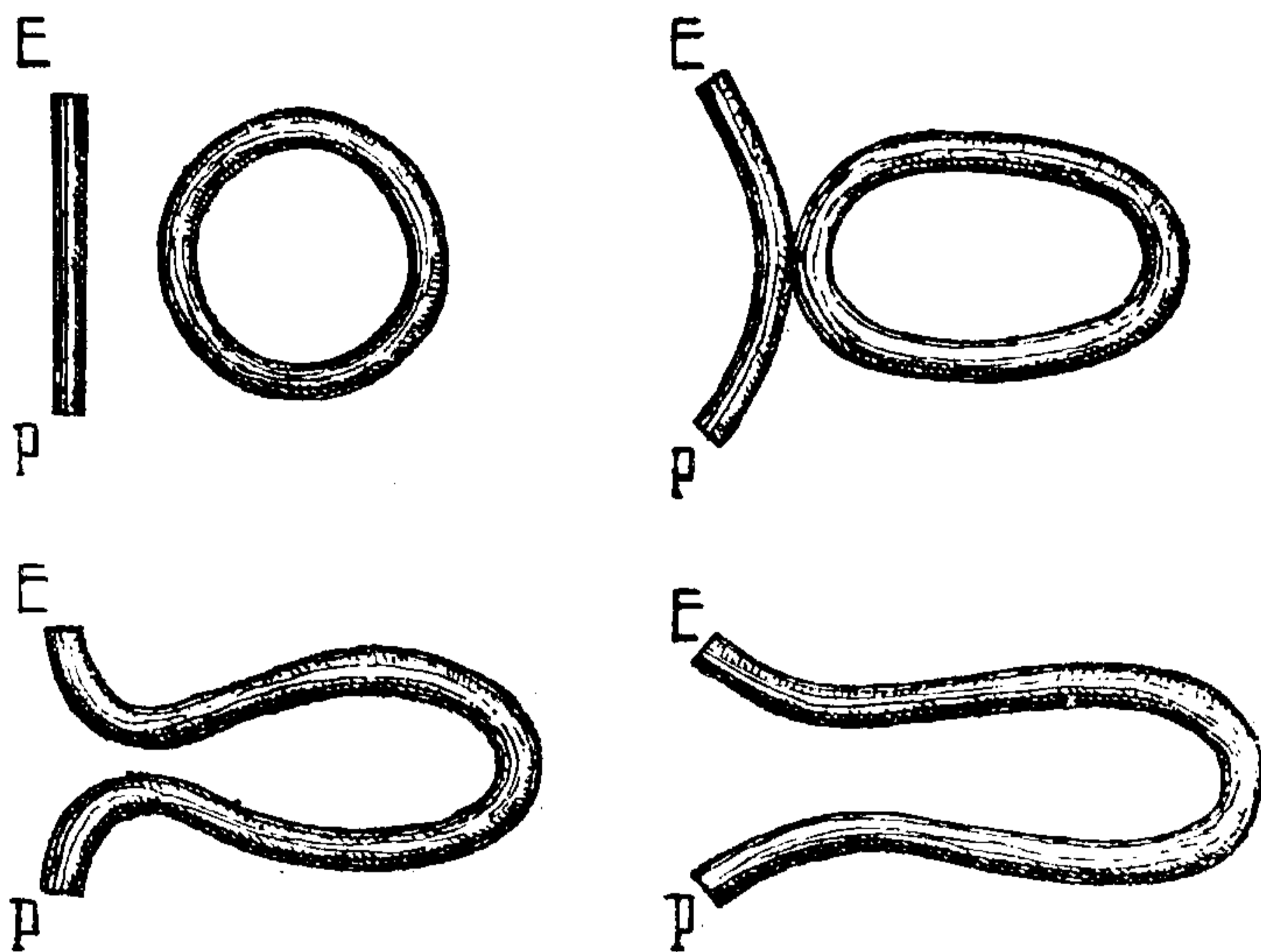


Рис. 5.

образованию кольца; стадии его указаны на рисунке 5. 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 внизу рис. 5, энергия, введенная кольцом в область между P и E , пригодна для проталкивания электрона дальше от P ; 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 Баркла, что когда пучок Рентгеновских лучей вполне поглощается газом без испускания характеристических 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 μ и 6 μ , 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 μ , имеет энергию больше приблизительно на 10 калорий на грамм эквивалент, чем у нормальной воды, или, применяя обычные выражения, скрытую теплоту в $10^{1/18}$ или 550, что очень близко к скрытой теплоте испарения воды; модификация, соответствующая полосе у 6 μ , имеет скрытую теплоту в половину этой.

Углекислый газ имеет резкую линию поглощения у 4,2 μ , соответствующую аллотропическому состоянию со скрытой теплотой в 160, другую все еще резкую полосу у 14,5 μ , соответствующую скрытой теплоте 48, которая близка к теплоте испарения 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 Максвеллевских 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 падающую 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 не 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 равномерна 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 большей. Так как длина волны повсюду пропорциональна частоте n , E —энергия в кванте равна n , помноженному на константу. Значение этой константы зависит от отношения наружного радиуса кольца к внутреннему. Значение, которое казалось бы разумным для этого отношения, делает значение этой константы как раз таким, какое требуется законом Планка ¹⁾. 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 2.000 вольт. Когда кванта с такой или с меньшей длиной волны проходит сквозь молекулу, для нее хватает места 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

¹⁾ 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 (№ 4 «П. З. М.», 1925 г.).

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 ярки. 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 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, Ламба и покойного Рэля показали, что, когда имеется резонанс между волнами, которые мы называем Максвеллевского 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 λ 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 λ^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 Максвеллевских 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.