

ному току через границу. И так, полученное нами соотношение (В) действительно представляет собой закон сохранения заряда. Изменение заряда в данном месте может быть связано только с его притоком или оттоком. Причем это должно быть справедливо для сколь угодно малой области и сколь угодно малого интервала времени.

Поэтому появление заряда в каком-то месте может быть связано только с током, т. е. с перераспределением заряда. Следующая из уравнений Максвелла формулировка закона сохранения заряда запрещает появление заряда, не связанное с его перераспределением. Одновременное рождение равных зарядов противоположного знака в разных точках пространства оказывается невозможным: только электрический ток между этими точками может вызвать появление отрицательного заряда в одной точке и равного ему положительного заряда — в другой.

Заметим, что без гипотезы о токе смещения мы не смогли бы получить из уравнений Максвелла закон сохранения заряда. Опустив в четвертом уравнении ток смещения, мы пришли бы к соотношению

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = 0,$$

которое означало бы, что полный ток через любую замкнутую поверхность равен нулю. А это заведомо неверно. Например, для тока электрического разряда.

Подчеркнем, что ток смещения играет важную роль для вывода правильного выражения закона сохранения заряда, но сам в это выражение не входит. Соотношение  $\partial \rho / \partial t = -\operatorname{div} \mathbf{j}$  связывает скорость изменения плотности заряда с дивергенцией плотности реального тока. В этом соотношении  $\mathbf{j}$  — именно плотность тока, а не сумма плотности тока проводимости и тока смещения. Но о важнейшей роли тока смещения речь, пожалуй, впереди.

### Электромагнитные волны

«Теория, которую я предлагаю, — писал Максвелл в своей статье «Динамическая теория поля», — может быть названа теорией электромагнитного поля, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные тела, и она может быть названа также динамической теорией, по-

сколько она допускает, что в этом пространстве имеется среда, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления».

Итак, вне зарядов и токов имеется среда, передающая их воздействие. Слово «среда» здесь — анахронизм, дань желанию построить механическую теорию эфира из зацепляющихся колесиков. Но суть дела не в словах и не в механической конструкции. Благодаря электромагнитным явлениям вне зарядов и токов, т. е. благодаря электромагнитной индукции и току смещения был получен вывод о возможности изменений электромагнитного поля, не связанных с зарядами и токами. Благодаря току смещения в уравнениях Максвелла появлялись решения нового типа — решения, описывающие распространение электромагнитных волн и обсуждаемые в Математическом дополнении, с. 227.

Эти решения отвечают волновому процессу взаимопревращения электрических и магнитных полей, распространяющемуся со скоростью  $c$ .

Скорость распространения электромагнитных волн  $c$  появилась в уравнениях Максвелла из соображений размерности. Выбрав единицы измерения электрического заряда, электрического тока, напряженностей электрического и магнитного полей, определив их связь из опытом Ампера и Фарадея, можно было найти числовое значение связывающих пространственные и временные изменения полей и потому имеющих размерность  $c$ . В двух уравнениях в отдельности константы зависят от единиц измерения. Однако результат для скорости распространения волны, конечно, не зависит от этого. Опыты Ампера и Фарадея не имели дела с волнами, но они позволили определить скорость распространения электромагнитной волны. Они дали для этой скорости величину, равную  $c$  — скорости света. Эта скорость оказалась равной  $300\,000\text{ км/с} = 3 \cdot 10^{10}\text{ см/с}$ . Скорость распространения электромагнитных волн оказалась равной скорости света! Это совпадение не было случайным. Оно подтверждало электромагнитную природу света.

«Иногда я думаю, что согласился бы, чтобы меня заперли в подземной тюрьме, на десять сажен под землей, куда не проникал бы луч света, если бы только взамен я мог узнать, что же такое свет», —

говорит Галилей в пьесе Брехта «Жизнь Галилея». Природа «очевидного», того, что «бросается» нам в глаза, как только мы их открываем, природа света долгое время была непонятной. Для древних греков было даже совсем не очевидно, что свет приходит в глаза извне, и выражение «свет очей» они употребляли буквально. Первый постулат «Оптики» Евклида так и формулировался: «Испускаемые глазами лучи распространяются по прямому пути».

Да, лучи света, испускаемые, конечно, не глазами, а источниками света, распространяются по прямой. Так летели бы частицы, летели бы камни, летели бы любые предметы: если бы их не отклоняло земное притяжение. Если частицы летят очень быстро, то отклонение незаметно. Если частиц очень много и они очень мелкие, их полет сливается в один непрерывный поток. Может быть, свет — это поток мельчайших быстрых частиц? Гипотеза о частицах (корпускулах) света делала естественными законы геометрической оптики. Упругие столкновения частиц света с гладкой поверхностью объясняли явления отражения. Изменение скорости движения частиц в разных средах объясняло преломление света на границе разных сред.

Но почему частицы света отражаются при столкновении с поверхностью? Почему потоки этих частиц не рассеиваются внутри прозрачных тел и распространяются в них прямолинейно? Почему такие потоки не рассеиваются друг на друге? Свет исходит от огня, от пламени, сконцентрированный свет способен зажигать предметы.

Световые явления трудно объяснимы для частиц вещества и очень естественны для волнового движения. Свет подобен волнам звука, подобен волнам по поверхности воды, утверждали сторонники волновой теории света.

Оба эти представления — о частицах (корпускулах) света и о волнах света — были отчетливо сформулированы в XVII в. и противоборствовали почти два столетия. Но вот в начале XIX в. Юнг формулирует общий принцип интерференции света: «Представьте себе ряд одинаковых волн, бегущих по поверхности озера с определенной постоянной скоростью и попадающих в узкий канал, ведущий к выходу из озера. Представьте себе далее, что по какой-либо иной аналогичной причине возбуждена другая серия волн той

же величины, приходящих к тому же каналу с той же скоростью одновременно с первой системой волн. Ни одна из этих двух систем не нарушит другой, но их действия сложатся: если они подойдут к каналу таким образом, что вершины одной системы волн совпадут с вершинами другой системы, то они вместе образуют совокупность волн большей величины; если же вершины одной системы волн будут расположены в местах провалов другой системы, то в точности заполнят эти провалы и поверхность воды в канале останется ровной. Так вот, я полагаю, что подобные явления имеют место, когда смешиваются две порции света; и это наложение я называю общим законом интерференции света». В первой половине XIX в. интерференция света была установлена на опыте. Был подтвержден целый ряд предсказаний волновой теории. А в 1845 г. Фарадей сообщает о наблюдавшемся им вращении плоскости поляризации света в прозрачном теле, помещенном в магнитном поле. Оправдывая название своей статьи «Намагничивание света и освещение магнитных силовых линий», Фарадей делает примечание в корректуре: «Я полагаю, что в опытах, описываемых мною в настоящей статье, свет испытал на себе магнитное действие, то есть, что магнитному действию подвергалось то, что является магнитным в силах материи, а последнее, в свою очередь, воздействовало бы на то, что является подлинно магнитным в силе света» \*).

И вот, наконец, числовое совпадение постоянной, связывающей электромагнитные единицы, с величиной скорости света. Его отмечал в 1964 г. Вебер, но в чем истинный смысл такого совпадения? Веберу он был не ясен. Ответ дал Максвелл в своем «Трактате об электричестве и магнетизме»:

«В различных местах этого трактата делалась попытка объяснения электромагнитных явлений при помощи механического действия, передаваемого от одного тела к другому при посредстве среды, занимающей пространство между этими телами. Волновая

---

\*) В архиве Королевского общества было обнаружено письмо М. Фарадея, датированное 1832 годом, в котором обсуждалась электромагнитная природа света. Это письмо было написано, когда Максвеллу был всего год отроду.

теория также допускает существование какой-то среды. Мы должны теперь показать, что свойства электромагнитной среды идентичны со свойствами световой среды...

Мы можем получить числовое значение некоторых свойств среды, таких, как скорость, с которой возмущение распространяется через нее, которая может быть вычислена из элементарных опытов, а также наблюдается непосредственно в случае света. Если бы было найдено, что скорость распространения электромагнитных возмущений такова же, как и скорость света..., мы получили бы серьезное основание для того, чтобы считать свет электромагнитным явлением, и тогда сочетание оптической и электрической очевидности даст такое же доказательство реальности среды, какое мы получаем в случае других форм материи на основании совокупности свидетельств наших органов чувств».

Поэтому Максвелл рассматривает числовое совпадение скорости распространения электромагнитных волн и скорости света как «подтверждение электромагнитной теории света».

В своих воспоминаниях Лаура Ферми рассказывает, как ее муж Энрико Ферми втолковывал ей, что раз скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света, то «значит, свет — это электромагнитные колебания» и сердился, что она этого не понимает. Настоящему физическому очевидно, что совпадение скорости не может быть случайным. Но обратимся к следующему витку логики — ведь скорость безмассовых нейтрино и гравитационных волн тоже должна быть равна  $c$  — а это не электромагнитные волны. Уверенность в том, что свет это электромагнитные волны, до совсем недавнего времени основывалась на всем комплексе данных об электромагнетизме (на существовании и закономерности переходов электронов в атомах, на существовании и свойствах радиоволн и т. д.). Наконец, в последние годы релятивистские электроны в ондуляторе (устройстве, предназначенном для создания периодических полей, действующих на проходящие в них заряженные частицы) (рис. 6) и синхротронное излучение в оптическом диапазоне в электронных накопителях обеспечили прямое получение света как электромагнитных колебаний.

Так на основе теории Максвелла было достигнуто единое описание электрических, магнитных и световых явлений. Создатели современных теорий единого описания фундаментальных сил природы не случайно упоминают Максвелла как своего великого предшественника. В свете современного развития теоретической физики, о котором мы будем говорить дальше, теорию Максвелла можно назвать Великим объединением XIX в. В этой связи весьма поучительно обратить внимание на формулируемый самим Максвеллом фундамент такого объединения. Максвелл говорит о единой среде, единстве электромагнитного и светового эфира. Объединение произошло на основе единого эфира. Физика XX в. исключила эфир, но сохранила объединение. Устранила фундамент (точнее то, что считали фундаментом строители), сохранив саму конструкцию. Так строят арки и мосты — и убирают строительные леса.

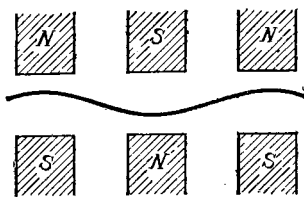


Рис. 6. Движение электронов по синусоидальной траектории в ондуляторе вызывает электромагнитное излучение в оптическом диапазоне. Здесь электромагнитная природа света проявляется «очевидным» образом

Устранила фундамент (точнее то, что считали фундаментом строители), сохранив саму конструкцию. Так строят арки и мосты — и убирают строительные леса.

### Распространение электромагнитных волн

Итак, теория Максвелла позволила объяснить физическую природу света. Но помимо объяснения света она содержала и предсказание: есть и другие невидимые глазом электромагнитные колебания, они переносят электромагнитное воздействие, они распространяются с конечной скоростью, с той же, что и свет.

Заряд — источник поля. Покоящийся — электрического, равномерно движущийся — постоянный ток — магнитного. Если заряд меняет состояние своего движения, начинает двигаться, или, наоборот, останавливается — поле должно измениться. А изменения поля в теории Максвелла передаются от точки к точке. С конечной скоростью. Со скоростью света. В виде электромагнитных волн.