

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.

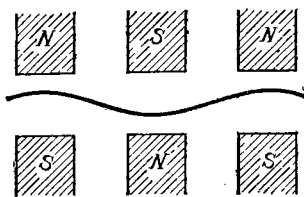


Рис. 6. Движение электронов по синусоидальной траектории в ондуляторе вызывает электромагнитное излучение в оптическом диапазоне. Здесь электромагнитная природа света проявляется «очевидным» образом

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.

Если мы находимся на расстоянии  $R$  от заряда, то только через время  $t=R/c$ , где  $c$  — скорость света, до нас дойдет сигнал об изменениях его состояния движения. Но, с другой стороны, в момент  $t=R/c$  до нас дойдет сигнал только о том, что происходило с зарядом в момент  $t=0$ . Как изменялось движение заряда в более поздние моменты времени, мы в этот момент узнать не можем. Если изменение было кратковременным, столь же кратковременным будет и воздействие на расстоянии  $R$  через время  $R/c$ .

С любым ограниченным во времени процессом изменения состояния движения заряда связан ограниченный во времени сигнал. На расстоянии  $R$  от заряда сначала через время  $R/c$  придет передний фронт волны — сигнал о начале изменения, потом, в течение всего времени процесса  $\Delta t$  будет поступать его воздействие, и, наконец, спустя время  $\Delta t$  процесс завершится, в момент  $R/c + \Delta t$  закончится и его воздействие на расстоянии  $R$ . Окончание процесса, запаздывая на время прохождения сигнала  $R/c$ , обрывает сигнал. У электромагнитной волны имеется передний и задний фронты, характеризующие начало и конец действия источника волны. Действие источника запаздывает на время, за которое сигнал распространяется от источника до данного места.

Изменение состояния движения электрического заряда меняет окружающее заряд поле. Изменение поля распространяется от точки к точке. Доходит до других зарядов. Меняет их состояние движения подобно тому, как волна от опущенной в воду палки вызывает колебания покоившихся на поверхности воды палочек.

Бросим в пруд камень. От него пойдут волны, и веточки, покоившиеся на поверхности воды, начнут колебаться в такт волне. Пройдет немного времени, и поверхность воды успокоится. Опустившийся на дно камень вытеснил немного воды. Уровень воды в пруду поднялся, но на глаз это не заметно. Так незаметное вдали от заряда изменение его стационарного поля вызывает заметный сигнал об этом изменении \*).

---

\*) Заметим, что приведенное сравнение не является точной аналогией. Распространение волн на поверхности воды происходит в двух измерениях, и в этом случае у волны отсутствует задний фронт, характерный для волн в трех и одном измерениях. Круги волн еще долго расходятся по поверхности воды после кратковременного возмущения этой поверхности брошенным камнем.

Электрическое поле неподвижного заряда спадает обратно пропорционально квадрату расстояния от него, а вот электрическое поле электромагнитной волны спадает с расстоянием медленней — обратно пропорционально только первой степени расстояния. Проще всего понять, почему поле волны должно зависеть от расстояния именно так, из соображений сохранения энергии.

Если произошло какое-то изменение состояния движения точечного заряда — он начал двигаться или

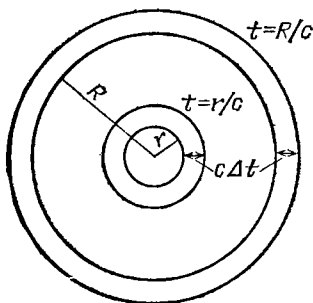


Рис. 7. Электромагнитный сигнал длительностью  $\Delta t$  приходит на расстояние  $r$  от источника за время  $r/c$ , а на расстояние  $R$  — за время  $R/c$ . При этом энергия сигнала сосредоточена в сферическом слое толщиной  $c\Delta t$

остановился — его поле должно меняться во всех направлениях — от этого заряда побежит сферическая электромагнитная волна. По мере распространения волны радиус  $R$  растет, расстояние между передним и задним фронтом волны не меняется. Для процесса длительностью  $\Delta t$  оно равно  $c\Delta t$ . При распространении волны меняется только площадь поверхности ее фронта  $4\pi R^2$  (рис. 7). Поэтому объем, занимаемый сферической волной, составляет  $V = 4\pi R^2 c\Delta t$ . Электромагнитная волна несет определенную энергию. Распространяясь со скоростью

света во всех направлениях, волна сохраняет свою энергию. Как мы увидим в дальнейшем, плотность энергии волны (энергия в единице объема) пропорциональна среднему квадрату ее электрической напряженности (знак напряженности может меняться, в волне оказывается, что ее среднее значение равно нулю, а вот квадрат напряженности — величина существенно положительная, его среднее значение нулю не равно). Сохранение энергии волны означает, что сохраняется величина  $E^2 V = E^2 \cdot 4\pi R^2 c\Delta t$ , т. е. в сферической электромагнитной волне произведение  $ER$  постоянно. Получаем, что напряженность поля волны спадает обратно пропорционально  $R$ .

Но это значит, что на очень больших расстояниях, на которых пренебрежимо постоянное электрическое поле, на которых уже не заметно непосредственное электростатическое воздействие заряда на заряд, переменное поле волны может быть заметным. Колебания одного заряда вызовут колебания поля, а колебания поля вызовут колебания другого заряда, находящегося вдали от первого. Благодаря электромагнитным волнам возможна передача сигнала на большие расстояния. Свойства света дают возможность определить, откуда, с какого направления пришли волны — и очень много узнать об их источнике.

Г. Герц провел первые опыты с искусственно созданными генераторами электромагнитных волн. Он доказал в своих исследованиях, что электромагнитные волны действительно существуют. Но Г. Герц так и не узнал о важнейшем практическом следствии своих исследований. Спустя год после его смерти, 7 мая 1895 г., А. С. Попов сообщил о возможности приема электромагнитных сигналов, а 24 марта 1896 г. с помощью своих приборов Попов передал первую в мире радиограмму, состоявшую из двух слов «Генрих Герц»...

Возникла радиосвязь. Для ее технического внедрения многое сделал Г. Маркони, подавший в 1896 г. заявку и получивший в 1897 г. патент на применение электромагнитных волн для беспроволочной связи. Но нельзя забывать, что роль первооткрывателя радиосвязи принадлежит А. С. Попову.

### **Электричество, магнетизм и принцип относительности**

Если электрический заряд покоится, он является источником электрического поля. Если же заряд движется, то течет электрический ток — источник магнитного поля. Движущийся заряд одновременно является источником и электрического и магнитного поля. Однако, сказав «движущийся», мы упустили одно важное обстоятельство: относительно кого движущийся? Ведь мы можем двигаться сами, вслед за движущимся зарядом, мы, в принципе, можем его нагнать и двигаться с той же скоростью, что и он. Но тогда какой же это движущийся заряд? Для движущегося вместе с зарядом наблюдателя заряд