Вихревое электрическое поле. При изменении со временем магнитного потока через поверхность, ограниченную проводящим контуром, в нём возникает, как вы уже знаете, электрический ток (явление электромагнитной индукции). Можно предположить, что электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем и это поле непосредственно порождается меняющимся магнитным полем. Тем самым утверждается новое фундаментальное свойство поля: изменяясь во времени, магнитное поле порождает электрическое поле.

Электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую природу, чем электростатическое.

Оно не связано непосредственно с электрическими зарядами, и его линии напряжённости не могут на них начинаться и кончаться.

Вихревым электрическим полем называется поле, силовые линии которого нигде не начинаются и не заканчиваются, а представляют собой замкнутые линии (рис. 6.1), подобные линиям индукции магнитного поля.

Чем быстрее меняется магнитная индукция, тем больше напряжённость электрического поля. Согласно правилу Ленца при возрастании магнитной индукции I — > 0 1 направление силовых линии вектора напряжённости Е возникающего электрического поля совпадает с направлением вращения ручки буравчика (винта), движущегося поступательно в направлении, противоположном вектору индукции В магнитного поля. Напротив, при убывании магнитной индукции I —- < О I буравчик должен поступательно двигаться по направлению вектора индукции В магнитного поля, и направление вращения ручки буравчика укажет направление силовых линий напряжённости возникающего электрического поля.

В свою очередь, направление силовых линий напряжённости Е совпадает с направлением индукционного тока. Сила, действующая со стороны вихревого электрического поля на заряд q (сторонняя сила), по-прежнему равна F = qE. Но в отличие от случая стационарного электрического поля работа вихревого поля по перемещению заряда q на замкнутом пути не равна нулю. Ведь при перемещении заряда вдоль замкнутой линии напряжённости электрического поля работа на всех участках пути имеет один и тот же знак, так как сила и перемещение совпадают по направлению.

Работа вихревого электрического поля при перемещении единичного положительного заряда вдоль замкнутого неподвижного проводника численно равна ЭДС индукции в этом проводнике.

Итак, согласно гипотезе Максвелла переменное магнитное поле вызывает появление вихревого электрического поля.

Изучая свойства электромагнитного поля, Дж. К. Максвелл задался вопросом: если переменное магнитное поле порождает электрическое поле, то не существует ли в природе обратного процесса? Не порождает ли переменное электрическое поле, в свою очередь, магнитное? Это соображение, диктуемое уверенностью в единстве природы, во внутренней стройности и гармонии её законов, составляет основу гипотезы Максвелла.

Возникновение магнитного поля при изменении электрического поля. Максвелл допустил, что такого рода процесс реально происходит в природе.

Во всех случаях, когда электрическое поле изменяется со временем, оно порождает магнитное поле.

Линии магнитной индукции этого поля охватывают линии напряжённости электрического поля (рис. 6.2), подобно тому как они охватывают проводник с током. При возрастании напряжённости электрического поля вектор индукции В возникающего магнитного поля направлен в сторону вращения ручки буравчика, поступательно движущегося в направлении вектора Е, а при убывании напряжённости электрического поля направление вектора В изменяется на противоположное.

Согласно гипотезе Максвелла магнитное поле, например, при зарядке конденсатора после замыкания ключа создаётся изменяющимся во времени электрическим полем, существующим в пространстве между обкладками конденсатора (рис. 6.3). Причём магнитное поле направлено так, как если бы между обкладками существовал электрический ток, такой же, как в проводнике. Справедливость гипотезы Максвелла была доказана экспериментальным обнаружением электромагнитных волн.

Электромагнитное поле. После открытия взаимосвязи между изменяющимися электрическим и магнитным полями стало ясно, что эти поля не существуют обособленно, независимо одно от другого. Нельзя создать переменное магнитное поле без того, чтобы одновременно в пространстве не возникло и электрическое поле. И наоборот, переменное электрическое поле не может существовать без магнитного.

Не менее важно и то, что электрическое поле без магнитного или магнитное без электрического может существовать лишь по отношению к определённой системе отсчёта. Так, покоящийся заряд создаёт только электрическое поле (рис. 6.4). Но ведь заряд покоится лишь относительно определённой системы отсчёта. Относительно других систем отсчёта он может двигаться и, следовательно, создавать и магнитное поле (рис. 6.5).

Точно так же в системе отсчёта, связанной с магнитом, обнаруживается лишь магнитное поле. Но движущийся относительно магнита наблюдатель обнаружит и электрическое поле. Ведь в системе отсчёта, движущейся относительно магнита, магнитное поле будет меняться с течением времени по мере приближения наблюдателя к магниту или удаления от него. Переменное же во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.

Значит, утверждение, что в данной точке пространства существует только электрическое или только магнитное поле, бессмысленно, если не указать, по отношению к какой системе отсчёта эти поля рассматриваются.

Электрические и магнитные поля проявление единого целого — электромагнитного поля.

Электромагнитное поле — особая форма материи, осуществляющая электромагнитное взаимодействие.

В зависимости от того, в какой системе отсчёта рассматриваются электромагнитные процессы, проявляются те или иные стороны единого целого — электромагнитного поля. Все инерциальные системы отсчёта равноправны. Поэтому ни одному из обнаруживаемых проявлений электромагнитного поля не может быть отдано предпочтение.

Рассмотрим взаимодействие двух зарядов. Сместим один из зарядов. Перемещение заряда меняет электрическое поле вблизи него. Это переменное электрическое поле порождает переменное магнитное поле в соседних областях пространства. Переменное же магнитное поле, в свою очередь, порождает переменное электрическое поле и т. д.

Перемещение заряда вызывает, таким образом, электромагнитное поле, которое, распространяясь, охватывает всё большие и большие области окружающего пространства, изменяя электростатическое поле, которое существовало до смещения заряда. Наконец, это электромагнитное поле достигает другого заряда, что и приводит к изменению действующей на него силы.

Процесс распространения электромагнитного поля, механизм которого был открыт Максвеллом, происходит с конечной, хотя и очень большой, скоростью, равной скорости света.

В этом и состоит фундаментальное свойство поля, которое не оставляет сомнений в его реальности.

Электромагнитная волна. Представьте себе, что электрический заряд был приведён в быстрые колебания вдоль некоторой прямой. Заряд движется подобно телу, подвешенному на пружине, но только колебания его происходят со значительно большей частотой. Тогда электрическое поле в непосредственной близости от заряда начнёт периодически изменяться. Период этих изменений, очевидно, будет равен периоду колебаний заряда. Переменное электрическое поле будет порождать периодически меняющееся магнитное поле, а оно, в свою очередь, вызовет появление переменного электрического поля уже на большем расстоянии от заряда и т. д.

В окружающем заряд пространстве, захватывая всё большие и большие области, возникает система взаимно перпендикулярных, периодически изменяющихся электрических и магнитных полей. На рисунке 6.6 изображён мгновенный снимок такой системы полей на большом расстоянии от колеблющегося заряда.

На этом рисунке показаны векторы Е и В в различных точках пространства. Направление Z — одно из направлений распространения электромагнитных возмущений. Образуется так называемая электромагнитная волна, бегущая по всем направлениям от колеблющегося заряда.

В каждой точке пространства электрические и магнитные поля меняются во времени периодически. Чем дальше расположена точка от заряда, тем позднее достигнут её колебания векторов Е и В. Следовательно, на разных расстояниях от заряда колебания каждого из этих векторов происходят с различными фазами.

Колебания векторов Е и В в любой точке совпадают по фазе. Кратчайшее расстояние между двумя ближайшими точками, в которых колебания происходят в одинаковых фазах, есть длина волны X. В данный момент времени векторы Е и В меняются в пространстве по оси Z по формуле синуса с периодом X.

Направления двух колеблющихся векторов — напряжённости электрического поля и индукции магнитного поля — перпендикулярны направлению распространения волны. Электромагнитная волна является поперечной.

Таким образом, векторы Е и В в электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и перпендикулярны направлению распространения волны. Если вращать буравчик от вектора Е к вектору В, то поступательное перемещение буравчика будет совпадать с направлением вектора скорости волны с\* (см. рис. 6.6).

Излучение электромагнитных волн. Электромагнитные волны излучаются колеблющимися зарядами. При этом существенно, что скорость движения таких зарядов меняется со временем, т. е. что они движутся с ускорением.

Наличие ускорения у движущихся зарядов — главное условие излучения ими электромагнитных волн.

Электромагнитное поле излучается заметным образом не только при колебаниях заряда, но и при любом достаточно быстром изменении его скорости. Интенсивность излучаемой волны тем больше, чем больше ускорение, с которым движется заряд.

Наглядно это можно представить себе так. При движении заряженной частицы с постоянной скоростью созданные ею электрическое и магнитное поля, подобно развевающемуся шлейфу, сопровождают частицу. При ускорении частицы обнаруживается присущая электромагнитному полю инертность. Поле «отрывается» от частицы и начинает самостоятельное существование в форме электромагнитных волн.

Энергия электромагнитного поля волны в любой фиксированный момент времени меняется периодически в пространстве вместе с изменением векторов Е и В. Бегущая волна несёт с собой энергию, перемещающуюся со скоростью с\* вдоль направления распространения волны. В результате этого энергия, переносимая электромагнитной волной в любой точке пространства, меняется периодически со временем.