

тивоположными по знаку электрическими зарядами на концах), — тоже поворачивающая. Но магнитная сила тока, действовавшая на магнит, поворачивала его не так, как поворачивала бы электрический диполь электрическая сила однородно заряженной проволоки (рис. 1). Магнитная сила тока поворачивала магнит «поперек».

Ньютоновское описание действия на расстоянии дало первую трещину. Нарушалось единообразие такого описания. Пройдет еще немного времени, и сама идея действия на расстоянии будет отвергнута в работах Фарадея и Максвелла. Потребуется еще сто лет, чтобы и идея о гравитационном действии на расстоянии перестала быть верной.

### Напряженность и потенциал

Закон Кулона определил силу взаимодействия зарядов. Но *как* они осуществляют свое взаимодействие? Можно было бы просто сказать, что два заряда действуют друг на друга на расстоянии по закону Кулона и не вдаваться в размышления о том, какие невидимые нити соединяют заряды, какие невидимые пружины притягивают разноименные заряды и расталкивают одноименные. Так поступил в свое время Ньютон, изучая тяготение: «Причину этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю... Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря».

Но (даже не задаваясь вопросом о природе электрических сил) чтобы упростить расчет силы взаимодействия неточечных заряженных тел, оказалось удобным, чисто формально, ввести некоторую характеристику окружающего заряд пространства — *напряженность*  $E$  — силу, с которой рассматриваемый заряд подействовал бы на малый заряд, помещенный в данную точку, и отнесенную к величине этого малого заряда. Если же мы поместим в эту точку заряд  $q$ , то на него подействует сила  $F = qE$ . Обратите внимание на то, что буквы  $F$  и  $E$  в этой формуле написаны более жирно, чем другие буквы. Это означает, что, так же как и сила, напряженность электрического поля — век-

тор. Она характеризуется не только величиной, но и направлением. Она, вообще говоря, меняется от точки к точке и по абсолютной величине, и по направлению. (Подробнее о том, что такое вектор, см. в конце книги Математическое дополнение, с. 179.)

Каждая точка пространства, окружающего данный заряд, заряженное тело или систему заряженных тел, характеризуется не только электрической напряженностью — отношением электрической силы, действующей на малый заряд, помещенный в данную точку, к величине этого малого заряда. С каждой точкой связана еще одна характеристика — *электрический потенциал* — потенциальная энергия взаимодействия пробного малого заряда, помещенного в эту точку (отнесенную к величине пробного заряда), с данным источником электрической силы (точечным зарядом, заряженным телом или системой заряженных тел). При перемещении пробного единичного заряда из одной точки в другую электрическая сила совершает работу, численно *равную разности электрических потенциалов двух точек*. Если мы выберем значение потенциала в какой-то точке пространства за начало отсчета потенциала, то определяя работу электрической силы при перемещении единичного заряда из этой точки в любую другую точку, мы можем однозначно определить потенциал любой точки пространства. Мы можем, например, выбрать бесконечно удаленную точку за начало отсчета потенциала и (это наиболее естественно) положить потенциал в ней равным нулю. Работа электрической силы при перемещении из бесконечно удаленной точки пробного единичного заряда в данную точку, удаленную на расстояние  $r$  от точечного заряда  $Q$ , составит

$$A = \frac{Q}{r}.$$

С другой стороны, эта работа равна разности потенциалов начальной и конечной точки перемещения. Мы положили потенциал начальной (бесконечно удаленной) точки равным нулю. Тогда потенциал конечной точки оказывается равным величине совершаемой работы  $A$ :

$$\varphi(r) = A = \frac{Q}{r}.$$

В определении потенциала есть элемент произвола. Ведь мы не проводили расчет потенциала бесконечно удаленной точки. Мы просто положили его равным нулю. Если бы мы положили его равным не нулю, а какой-то величине  $\varphi_\infty$ , то и потенциал всех остальных точек пространства, окружающего точечный заряд, был бы равен не  $Q/r$ , а

$$\varphi = \frac{Q}{r} + \varphi_\infty.$$

Получается, что потенциал определен неоднозначно, он определен с точностью до выбора потенциала в точке начала отсчета (в нашем примере — в бесконечно удаленной точке), а эту величину мы можем выбрать какой хотим, — от ее значения работа электрической силы не зависит. Мы впервые подошли к тому, с чем мы будем в самых разных аспектах сталкиваться на всем протяжении этой книги — к неизменности физических следствий при изменении определения числового значения той или иной физической величины (при ее преобразовании).

В физике наряду с измеримыми величинами есть величины очень удобные, но прямо не измеримые. Эти величины можно менять (преобразовывать) так, что при этом физические следствия не меняются. Например, значения координат точки  $x$ ,  $y$ ,  $z$  зависят от выбора начала координат, зависят от того, как направлены оси координат. А вот непосредственно измеряемое расстояние между двумя точками ни от выбора начала координат, ни от направления осей координат, конечно, не зависит. Такой же удобной, как координата, но зависящей от выбора начала отсчета величиной является электрический потенциал.

Итак, есть две характеристики пространства, окружающего заряженное тело. Они говорят о том, что произойдет, если мы поместим пробный заряд в данную точку пространства. Одна — электрическая напряженность — говорит об электрической силе, которая будет действовать на пробный заряд в различных точках пространства вблизи данного заряженного тела. Другая — электрический потенциал — говорит о потенциальной энергии, которой будет обладать такой заряд в этой точке.

Обе характеристики связаны друг с другом. Математическое описание свойств электрической силы при-

водит к некоторому удобному приему — расчет электрической силы, действующей на данный заряд, упрощается, если предположить, что источник электрической силы действует на данный заряд не непосредственно на расстоянии, но каким-то образом преобразует окружающее его пространство. Оказывается удобным приписать действие данного заряда на другие заряды особому состоянию пространства, окружающего данный заряд, — его *электрическому полю*. Электрический потенциал, характеризующийся только своим числовым значением и не имеющий направления в пространстве, является скалярной характеристикой этого поля. Электрическая напряженность является его векторной характеристикой.

Как мы скоро убедимся, электрическое поле не просто удобный математический прием, а физическая реальность. Здесь же заметим, что, казалось бы, электрический потенциал — более удобная величина (просто число). Значительно проще связать с каждой точкой одно число (электрический потенциал), чем задавать в каждой точке вектор электрической напряженности, т. е. три числа (три составляющих этого вектора). Но, во-первых, электрический потенциал определен неоднозначно — с точностью до постоянной. А во-вторых, оказывается, существуют такие электрические поля, для которых можно определить электрическую напряженность, а электрический потенциал определить нельзя. Такие поля появляются, если от *электростатики* — науки о взаимодействии покоящихся зарядов — перейти к *электродинамике* — науке, рассматривающей заряды движущиеся. Электрическое поле неподвижного заряда потенциально — можно ввести его электростатический потенциал. Казалось бы, если заряд движется, то такой потенциал будет просто меняться со временем в соответствии со смещением заряда. Но движущийся заряд — это электрический ток, а электрический ток обладает и магнитным воздействием. А это, как увидим в следующем пункте, может приводить и к электрическому воздействию. И такое воздействие будет уже непотенциальным.

Описание магнитных свойств тоже упрощается, если чисто формально приписать и магнитному воздействию особое состояние пространства, осуществляющее это воздействие, т. е. предполагать, что магнит окружен магнитным полем. Если окружить магнит

маленькими магнитиками, на них будет действовать магнитная сила. Можно ввести формальную характеристику такой силы — ввести силу, действующую в каждой точке на «пробный магнит» — *магнитную напряженность*. Магнитная сила изменяет форму траектории движущегося электрического заряда. Она направлена перпендикулярно направлению его движения, и работу над зарядом не совершает.

Мы не можем ввести магнитный потенциал, в точности подобный электрическому потенциалу, потому что изолированные электрические заряды есть, а изолированных магнитных зарядов нет. Мы уже говорили, что нельзя разделить северный и южный полюса магнита. Ломая магнит, мы получаем меньшие магнитики. И у каждого — два полюса. Поэтому-то в присутствии электрических зарядов (покоящихся или движущихся) электрическое и магнитное поля выступают неравноправно. С разными точками пространства нельзя связать скалярные величины, разность которых определяет работу магнитной силы по перемещению магнитного заряда из одной точки в другую. Нельзя это сделать уже прежде всего потому, что нет изолированных магнитных зарядов. Для электрических зарядов эта работа равна нулю. Нужна другая характеристика, определяющая поворот движущегося в магнитном поле заряда. А поворот характеризуется не только величиной, но и направлением в пространстве. Характеристика искривления траектории заряда, движущегося в магнитном поле, должна быть величиной векторной, обладающей и числовым значением, и направлением в пространстве.

Как мы скоро убедимся, во всех практических приложениях электромагнетизма мы имеем дело с непотенциальными электрическими полями, описываемыми так же, как и магнитные поля.

### Электромагнитная индукция

Если ток является источником магнитного поля, то не может ли магнитное поле быть источником тока? Постоянное магнитное поле вызывается постоянным током. Не может ли постоянное магнитное поле вызывать ток? Задавшись этим вопросом, Фарадей поставил опыт с двумя проводниками, намотанными по спирали на единый железный сердечник. По-