

теория может это сделать!) Что удерживает электрон от распада — так же таинственно, как и то, что определяет точную величину его заряда. Здесь должны существовать какие-то силы, отличные от электрических сил, так как электростатические силы, действующие между различными частями электрона, приводят к отталкиванию.

Изучая электричество и магнетизм, мы можем рассматривать заряженные частицы как носители заряда со столь малыми размерами, что вопрос об их протяженности и структуре в большинстве случаев не имеет значения. Например, из экспериментов по рассеянию при высокой энергии нам известно, что электрический заряд протона не выходит заметно за пределы сферы радиуса 10^{-13} см. Напомним, что опыты Резерфорда по рассеянию альфа-частиц показали, что даже у тяжелых ядер электрический заряд распределен по области, размеры которой не больше 10^{-11} см. Для физика девятнадцатого столетия «точечный заряд» оставался абстрактным понятием, довольно слабым аналогом которого служил заряженный шар. В настоящее время мы находимся в коротком знакомстве с частицами, из которых построен атом. Представление о дискретности заряда так глубоко вошло в наше современное описание природы, что точечный заряд кажется нам менее искусственной идеализацией, чем заряд, распределенный в объеме с непрерывной плотностью. Когда мы постулируем такие непрерывные распределения зарядов, мы можем их считать средними из очень большого количества элементарных зарядов, так же как, вводя макроскопическую плотность жидкости, мы не обращаем внимания на ее неоднородность на молекулярном уровне. Квантование заряда не может быть очень заметно на объектах, размеры которых гораздо больше масляных капель Милликэна!

1.4. Закон Кулона

Вам, вероятно, известно, что взаимодействие между электрическими зарядами, находящимися в покое, описывается законом Кулона: два неподвижных электрических заряда отталкивают или притягивают друг друга с силой, пропорциональной произведению величин зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.

Запишем эти утверждения в векторной форме:

$$\mathbf{F}_2 = k \frac{q_1 q_2 \hat{\mathbf{r}}_{21}}{r_{21}^2} . \quad (1)$$

Здесь q_1 и q_2 являются числами (скалярами), обозначающими величину и знак соответствующего заряда, $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ — единичный вектор, направленный *) от заряда 1 к заряду 2, и \mathbf{F}_2 — сила, действующая

*) Это условие может показаться не совсем естественным, но им обычно пользуются в некоторых других разделах физики, и мы будем его придерживаться на протяжении этой книги.

на заряд 2. Таким образом, уравнение (1) выражает, кроме всего прочего, тот факт, что одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются и что сила, входящая в уравнение, является ньютоновской, т. е. что $\mathbf{F}_2 = -\mathbf{F}_1$.

Умножение на единичный вектор $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ означает, что сила параллельна линии, соединяющей заряды. Это могло быть иначе, если бы само пространство имело свойство внутренней неоднородности, но в пустом и изотропном пространстве два точечных заряда не могут определить другого направления, кроме линии, их соединяющей.

Если «точечный заряд» имеет некоторую внутреннюю структуру с осью, определяющей направление, тогда его нельзя описать только одной скалярной величиной q .

Мы предполагаем в уравнении (1), что оба заряда занимают объемы, размеры которых малы по сравнению с r_{21} ; если это не соответствует действительности, то расстояние r_{21} не может быть определено так, чтобы уравнение (1) было всегда справедливо. Требование неподвижности зарядов необходимо в данном случае для исключения вопроса (который мы будем изучать в последующих главах) о магнитных силах, возникающих при движении зарядов.

Константа k в уравнении (1) определяется выбором системы единиц.

Обычно мы измеряем r_{21} в сантиметрах, F — в динах и заряд — в электростатических единицах СГС, обозначаемых СГСЭ_q. В этом случае постоянная $k=1$. Два заряда, каждый из которых равен 1 ед. СГСЭ_q, отталкивают друг друга с силой в одну дину, если расстояние между ними равно одному сантиметру; мы можем рассматривать уравнение (1) с $k=1$ как определение единицы заряда в системе единиц СГСЭ. Иногда в качестве единицы заряда мы будем пользоваться кулоном. Эта единица обычно входит в систему метр — килограмм — секунда. Величина этой единицы такова, что при зарядах, выраженных в кулонах, и расстоянии — в метрах уравнение (1) дает силу в ньютонах при условии, что $k=8,9875 \cdot 10^9$. Причиной введения кулона является то, что между этой единицей заряда и обычными электрическими единицами (ампер, вольт, ом и ватт), которыми пользуются в технике, в лаборатории и в повседневной жизни, существуют простые соотношения. Заряд в один кулон равен $2,998 \cdot 10^9$ ед. СГСЭ_q *).

Единственный способ, при помощи которого мы можем обнаружить и измерить электрические заряды, это наблюдение за взаимодействием заряженных тел. Тогда возникает вопрос: что же в законе Кулона является только определением? Существенным физическим

*) Число 2,998, с которым мы еще не раз встретимся при рассмотрении соотношений между различными электрическими единицами, напоминает о скорости света, близкой к $2,998 \cdot 10^{10}$ см/сек. Мы не будем сейчас выяснять происхождение этого коэффициента. Часто в книгах и таблицах вы встретите просто число 3. Строго говоря, вместо коэффициента 3, принимающего участие в преобразовании электрических единиц, должен стоять коэффициент 2,99792..., стоящий перед 10^{10} см/сек в значении скорости света.

содержанием этого закона являются утверждения об обратной зависимости силы от квадрата расстояния и об *аддитивности* действия электрических зарядов. Чтобы понять последнее утверждение, мы должны рассмотреть *больше* чем два заряда. Заметим, что если бы в мире было только два заряда q_1 и q_2 , с которыми мы могли бы экспериментировать, мы никогда бы не смогли измерить их по отдельности. Мы могли бы только показать, что сила F пропорциональна $1/r_{21}^2$. Предположим, что мы имеем три тела, несущих заряды q_1 , q_2 и q_3 . Можно измерить силу, действующую на заряд q_1 , если заряд q_2 расположен на расстоянии 10 см от q_1 , а q_3 находится на очень большом расстоянии от q_1 и q_2 (рис. 1.2, а). Затем мы можем удалить заряд q_2 , перенести заряд q_3 в положение, которое занимал заряд q_2 , и снова измерить силу, действующую на q_1 . В заключение поместим заряды q_2 и q_3 очень близко друг к другу и расположим их на расстоянии 10 см от q_1 . Измеряя силы, мы убедимся, что сила, действующая на q_1 , равна сумме первоначально измеренных сил. Этот существенный результат не мог быть предсказан логически на основании соображений симметрии, подобных тем, которыми мы пользовались, чтобы показать, что сила, действующая между двумя точечными зарядами, долж-

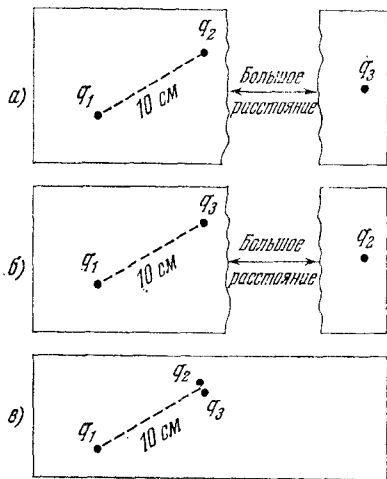


Рис. 1.2. Сила, действующая на q_1 в (в) является суммой сил, действующих на q_1 в (а) и (б).

на быть направлена вдоль соединяющей их линии. Сила взаимодействия двух зарядов не изменяется при наличии третьего заряда.

Независимо от числа зарядов, входящих в систему, закон Кулона (уравнение (1)) можно использовать для вычисления взаимодействия каждой пары. Это утверждение является основой *принципа суперпозиции*, с которым мы будем неоднократно встречаться при изучении электромагнетизма. Предположим, что мы имеем две группы зарядов и объединяем их в одну систему, не меняя конфигурации каждой группы. Принцип суперпозиции состоит в том, что сила, действующая на заряд, расположенный в любой точке объединенной системы, будет представлять собой векторную сумму сил, которые создаются каждой группой зарядов в отдельности и действуют на заряд в этой точке. Этот принцип нельзя считать не требующим доказательства. Ведь может существовать такая область явлений, в которой имеют место очень малые расстояния или очень большие силы и где принцип суперпозиции *не будет справедливым*. Действительно, нам известны такие квантовые явления в электромагнитном поле, в которых проявляется недостаточность принципа

суперпозиции, рассматриваемого с точки зрения классической теории.

Итак, полное представление о физике электрических взаимодействий можно составить только в том случае, если число зарядов больше двух. Мы можем выйти за пределы уравнения (1) и заявить, что при наличии трех зарядов (рис. 1.2), занимающих любые положения, сила, действующая на один из них, например на q_3 , может быть точно определена из следующего уравнения:

$$\mathbf{F}_3 = \frac{q_3 q_1 \hat{r}_{31}}{r_{31}^2} + \frac{q_3 q_2 \hat{r}_{32}}{r_{32}^2}. \quad (2)$$

Уравнение (2) соответствует, например, ситуации, показанной на рис. 1.3.

Что касается закона обратной пропорциональности силы квадрату расстояния, то его экспериментальное подтверждение, в определенном диапазоне расстояний, можно считать завершенным. В 1785 г. Кулон измерил с помощью крутильных весов силу, действующую между маленькими заряженными шарами. Пристли за много лет до Кулона установил, по аналогии с гравитационным полем, что отсутствие электрического действия внутри полого заряженного шара служит доказательством обратной пропорциональности силы квадрату расстояния. Генри Кэвендиш, гениальный английский экспериментатор, чья работа была почти неизвестна его современникам, выполнил в 1772 г. проверку закона обратных квадратов с точностью до 2%. Кэвендиш заряжал сферическую оболочку, которую можно было затем разделить на две половины. Отсутствие заряда на внутренней части оболочки было доказательством закона обратной пропорциональности силы квадрату расстояния *).

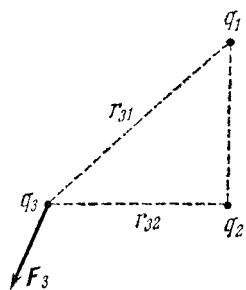


Рис. 1.3. Сила, действующая на заряд, которая создается двумя другими зарядами, входящими в равенство (2).

Современные повторения опыта Кэвендиша **) действительно подтвердили этот закон для расстояний порядка сантиметров или десятков сантиметров с точностью до нескольких частей на 10^9 .

Иногда этот экспериментальный результат описывают как измерение «показателя степени» в законе обратной пропорциональности силы квадрату расстояния. Однако реальная проблема состоит не в том, какой показатель степени является правильным, — 2 или какое-нибудь другое число, например — 1,99998, а скорее в том, при

*) В гл. 3 мы будем рассматривать вопрос о равенстве нулю поля внутри любой проводящей оболочки сферической или другой формы. Кэвендиш, пользуясь, как и Пристли, аналогией с гравитацией, кажется, не был знаком с этим более общим следствием закона Кулона.

**) S. J. P l i m p t o n, W. E. L a w t o n, Phys. Rev. 50, 1066 (1936).

каких расстояниях закон обратных квадратов становится недействительным. Имеются две области, в каждой из которых можно подозревать нарушение закона Кулона. Первой является область очень малых расстояний, меньших 10^{-14} см, где, как мы уже говорили, нет уверенности в возможности применения электромагнитной теории. Для очень больших расстояний, начиная с географических и до астрономических, мы также не имеем экспериментального подтверждения закона Кулона. Однако у нас нет определенной причины ожидать нарушения закона при больших расстояниях. Действительно, современная квантовая теория электромагнитного поля дает некоторое основание считать, что закон Кулона справедлив для расстояний, намного превышающих расстояния, применяемые в современных вариантах опыта Кэвендиша. Дело в том, что при нарушении закона Кулона на больших расстояниях квант света, или фотон, имел бы небольшую, но конечную массу покоя, что привело бы к некоторой зависимости в скорости электромагнитных волн в вакууме от длины волны. Непосредственные наблюдения *) показывают, что короткие радиоволны распространяются в вакууме с той же скоростью, что и видимый свет. Точность этого утверждения составляет по крайней мере одну часть на 10^6 . На этом основании теория предсказывает, что закон Кулона должен быть справедливым до расстояний по крайней мере в несколько километров. Вероятно, можно привести и более строгие доказательства. Подводя итоги сказанному, мы имеем полное основание считать, что закон Кулона справедлив для огромного диапазона расстояний от 10^{-13} см до нескольких километров, если не больше. Мы принимаем этот закон за основу нашего описания электромагнетизма.

1.5. Энергия системы зарядов

В принципе закон Кулона — это все, что есть в электростатике. Зная заряды и их координаты, мы можем определить все электрические силы. Если же заряды могут свободно перемещаться под действием сил другого типа, то закон Кулона позволяет найти состояние равновесия, при котором распределение зарядов останется постоянным. В этом же смысле законы движения Ньютона заключают в себе всю механику. Но и в механике, и в электромагнетизме мы получаем большую возможность проникновения в сущность проблемы с помощью введения других понятий, наиболее важным из которых является энергия.

В электростатике понятие энергии имеет большое значение, так как электрические силы *консервативны*. Рассмотрим вначале работу, которая должна быть совершена над системой для того,

*) Лучшим доказательством этому утверждению было недавнее наблюдение практически одновременного (в большинстве случаев в пределах нескольких минут) прибытия на Землю радиоизлучений и излучений света от вспышки «яркой звезды», находящейся от нас на расстоянии 20 световых лет. (B. Lovell, F. L. Whipple, L. H. Solomon, Nature **202**, 377 (1964).)