магнитное поле. (Вспомните, что электрическое поле было просто способом описания «действия на расстоянии» между неподвижными зарядами, которое выражается законом Кулона.) Мы говорим, что электрический ток сопровождается магнитным полем, которое пронизывает окружающее пространство. Другой ток или же любая движущаяся заряженная частица, находящаяся в этом поле, испытывает действие силы, пропорциональной величине магнитного поля в этой точке. Для заряженной частицы направление этой силы всегда перпендикулярно к скорости частицы. Полная сила, действующая на частицу с зарядом q, дается выражением

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}\,\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \qquad (1)$$

где **B** — магнитное поле.

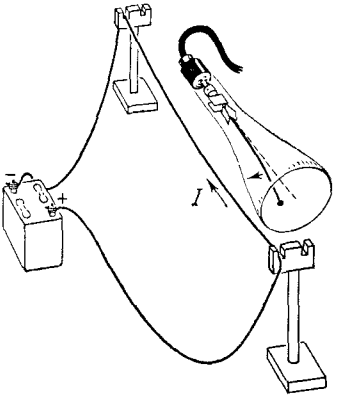

Рис. 5.3. Пример притяжения токов одинакового направления (ср. с рис. 5.1, *а*). Это явление можно описать как отклонение пучка электронов магнитным полем.

Мы используем уравнение (1) как определение **B**. Магнитное поле **B** есть вектор, с которым связана та часть силы, действующей на движущийся заряд, которая пропорциональна его скорости. Другими словами, приказание: «Измерить направление и величину вектора **B** в таком-то месте» — требует выполнения следующих операций. Необходимо иметь частицу с известным зарядом q и измерить силу, действующую на неподвижный заряд q. Это даст нам величину **E**. Затем измерим силу, действующую на частицу, когда ее скорость равна **v**; повторим эти измерения, придав **v** какое-нибудь другое направление. Наконец, найдем **B**, которое обеспечивает выполнение уравнения (1) для всех выполненных измерений,— это и будет магнитное поле в интересующей нас точке.

Ясно, что это ничего не объясняет. Почему уравнение (1) справедливо? Почему всегда можно найти **B**, удовлетворяющее при всех возможных скоростях такому простому соотношению? Мы хотим понять, почему существует сила, пропорциональная скорости. То, что эта сила в точности пропорциональна **v**, а действие электрического поля совсем не зависит от **v**, является замечательным фактом! На следующих страницах мы увидим, почему это происходит.

5.3. Измерение заряда во время движения

Что нужно сделать, чтобы измерить величину электрического заряда движущейся частицы? Пока не разрешен этот вопрос, бессмысленно говорить о том, как движение влияет на сам заряд. Заряд можно измерить только по явлениям, которые он вызывает. Покоя-

щийся точечный заряд Q можно измерить, определяя силу, действующую на пробный заряд q, находящийся на определенном расстоянии (рис. 5.4, *а*). Она подчиняется закону Кулона. Но если заряд, который мы хотим измерить, движется, то мы оказываемся на зыбкой почве. Теперь в пространстве существует выделенное направление — мгновенное направление движения. Может оказаться, что сила, действующая на пробный заряд q, зависит не только от расстояния между двумя зарядами, но также и от направления от Q к q. Может быть, при различных положениях пробного заряда, показанных на рис. 5.4, *б*, мы будем наблюдать разные силы? Подставляя их в

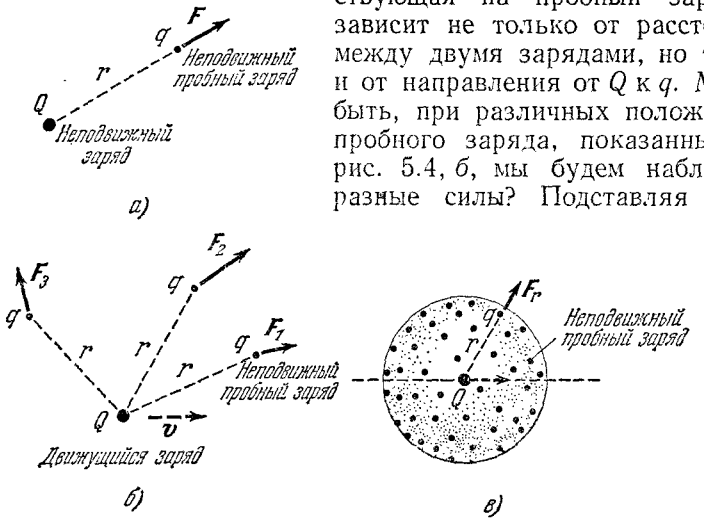

Рис. 5.4. *а*) Величина покоящегося заряда определяется силой, действующей на неподвижный пробный заряд, и законом Кулона $Q = \frac{F}{q} r^2$. *б*) В случае движущегося заряда сила, насколько мы знаем, может зависеть от положения пробного заряда. Если это так, мы не можем воспользоваться методом (*а*). Здесь $Q = \frac{?}{q} r^2$. *в*) В тот момент когда Q проходит через центр сферического размещения пробных зарядов, измерьте радиальную компоненту силы, действующей на каждый заряд, и используйте для определения Q среднее значение $\mathbf{F}_r$. Это эквивалентно измерению поверхностного интеграла от $\mathbf{E}$.

закон Кулона, мы будем получать в таком случае разные значения для одной и той же величины Q. У нас также не может быть уверенности в том, что сила всегда будет совпадать по направлению с радиусом вектором $\mathbf{r}$.

Чтобы учесть такую возможность, условимся определять Q, производя усреднение силы по всем направлениям. Представим себе большое количество бесконечно малых пробных зарядов, равномерно распределенных по поверхности сферы (рис. 5.4, *в*). В тот момент, когда движущийся заряд проходит через центр сферы, измеряется радиальная составляющая силы, действующая на каждый пробный заряд, и для вычисления Q используется среднее значение всех этих сил. Это та же самая операция, которая нужна для определения интеграла от электрического поля по поверхности сферы в момент времени t. Заметьте, что пробные заряды здесь неподвижны; сила, действующая на q и приходящаяся на единичный заряд, дает, по опре-

делению, электрическое поле в данной точке. Отсюда следует, что не закон Кулона, а теорема Гаусса дает естественный способ *) определения величины заряда движущейся заряженной частицы или совокупности движущихся зарядов. Это определение можно провести следующим образом.

Величина электрического заряда, находящегося внутри некоторой области, определяется поверхностным интегралом от электрического поля **E** по поверхности S, ограничивающей эту область. Поверхность S неподвижна в некоторой системе координат F. Поле **E** в любой точке (x, y, z) системы F в произвольный момент t измеряется силой, действующей на пробный заряд, покоящийся относительно F, в это время и в этом месте. Поверхностный интеграл следует относить к определенному времени t. Таким образом, используемые значения поля измеряются одновременно наблюдателями, расставленными по всей поверхности S. (Это не вызывает затруднений, поскольку поверхность S неподвижна в системе отсчета F.) Обозначим поверхностный интеграл по S в момент времени t следующим образом:

$$\int\limits_{S(t)} \mathbf{E}\cdot d\mathbf{a}. \tag{2}$$

Мы определяем количество заряда внутри S величиной этого интеграла, деленной на 4π:

$$Q = \frac{1}{4\pi}\int\limits_{S(t)} \mathbf{E}\cdot d\mathbf{a}. \tag{3}$$

Было бы удивительно, если бы величина Q, определенная таким образом, зависела от размеров и формы поверхности S. Для неподвижного заряда она от них не зависит — это теорема Гаусса. Но почему мы все же уверены, что теорема Гаусса справедлива, когда заряды движутся? К счастью, так оно и есть. Мы можем принять это как экспериментальный факт. Указанное фундаментальное свойство электрического поля движущихся зарядов позволяет нам определять величину заряда по уравнению (3). Теперь мы уже можем говорить о количестве заряда, находящегося внутри области или на частице, и это будет иметь вполне определенный смысл, даже когда заряд движется.

На рис. 5.5 эти утверждения иллюстрированы примером. Здесь показаны, в определенный момент времени, два протона и два электрона, находящихся в движении. Поверхностный интеграл от электрического поля **E** по поверхности S_1 точно равен поверхностному

---

*) Этот путь — не единственно возможный. Например, можно было бы произвольно принять, что пробные заряды должны всегда находиться точно впереди (по направлению движения) измеряемого заряда. Заряды, определенные таким образом, уже не имели бы простых свойств и новая теория оказалась бы громоздкой и сложной.

интегралу по S_2, вычисленному в тот же момент,— это непреложный факт, и для определения полного заряда в замкнутой области мы можем использовать этот интеграл, как мы всегда пользовались теоремой Гаусса в электростатике.

Рис. 5.6 ставит новый вопрос. А что если те же частицы имели бы другие скорости? Предположим, например, что два протона и два электрона образуют молекулу водорода. Будет ли полный заряд точно таким же, как и раньше?

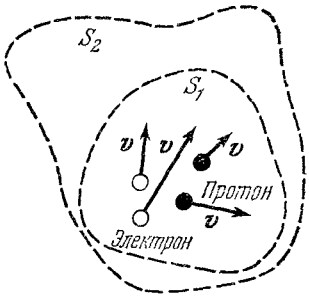

Рис. 5.5. Теорема Гаусса остается справедливой для поля движущихся зарядов. Поток **E** через S_2 равен потоку **E** через S_1, вычисленному в тот же момент времени.

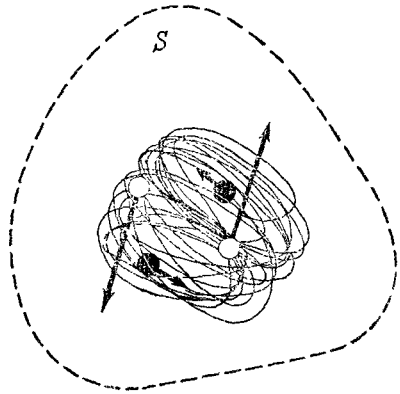

Рис. 5.6. Зависит ли поток **E** через S от состояния движения заряженных частиц? Равен ли поверхностный интеграл от **E** по S тому же интегралу на рис. 5.5? Здесь частицы связаны в молекуле водорода.

5.4. Инвариантность заряда

Имеются исчерпывающие экспериментальные доказательства того, что полный заряд системы не меняется от движения носителей заряда. Мы настолько привыкли к этому, что редко задумываемся над таким замечательным и фундаментальным фактом. В качестве доказательства мы можем сослаться на полную электрическую нейтральность атомов и молекул. В гл. 1 был рассмотрен опыт, подтвердивший нейтральность молекулы водорода. Из этого опыта следует, что заряды электрона и протона равны с точностью по крайней мере 10^{-20}. Аналогичный опыт был поставлен с атомами гелия. Атом гелия содержит два протона и два электрона, т. е. те же заряженные частицы, что и молекула водорода. В атоме гелия эти частицы движутся совершенно по-другому, чем в молекуле водорода. В частности, протоны, вместо того чтобы медленно обращаться на расстоянии 0,7 Å друг от друга, тесно связаны в ядре гелия, где они движутся с кинетической энергией порядка миллиона электрон-вольт. Если бы движение как-то влияло на величину заряда, то точной компенсации зарядов ядра и электронов не было бы как в молекуле водорода, так и в атоме гелия. На самом же деле измерения показали, что атом гелия нейтрален почти с такой же степенью точности.