

физиков были бы очень удивлены или отнеслись бы весьма скептически к наблюдению какой-нибудь разницы в величине зарядов электрона и позитрона. Действительно, соотношение между электроном и позитроном аналогично соотношению между частицей и античастицей. В этом абсолютном равенстве зарядов, а также в равенстве масс проявляется какая-то универсальная симметрия природы, свойственная частице и античастице. Можно думать, что сохранение заряда является тогда только следствием несколько более общего закона сохранения, управляющего созданием и уничтожением частиц. Но может быть и так, что сохранение заряда представляет собой первичное требование, которому должны подчиняться все остальные законы. Имеют ли смысл эти вопросы? Пока что мы не знаем этого.

В процессе изучения электромагнетизма становится ясным, что несохранение заряда было бы совершенно несовместимым со строением нашей современной электромагнитной теории. Следовательно, закон сохранения заряда мы можем сформулировать либо как постулат теории, либо как эмпирический закон, подкрепленный всеми без исключения наблюдениями, проводившимися до сих пор:

В изолированной системе полный электрический заряд, т. е. алгебраическая сумма положительного и отрицательного зарядов, остается постоянным.

Рано или поздно мы должны будем спросить: удовлетворяет ли этот закон условию релятивистской инвариантности? Гл. 5 посвящена обсуждению этого важного вопроса. Ответ будет положительным и не только в том смысле, что вышеприведенная формулировка справедлива в любой заданной инерциальной системе координат, но и в более строгом смысле; расположенные в различных системах координат наблюдатели, измеряя заряд, получают одно и то же число. Другими словами, полный электрический заряд изолированной системы является релятивистски инвариантным числом.

1.3. Квантование заряда

Опыт Милликэна с каплей масла и ряд других экспериментов показали, что в природе электрические заряды состоят из дискретных зарядов постоянной величины. Эта величина обозначается через e и является зарядом электрона. Мы уже отмечали, что позитрон обладает в точности таким же количеством электричества. Еще более замечательным фактом является точное равенство зарядов всех других заряженных частиц — равенство по величине, например, положительного заряда протона и отрицательного заряда электрона.

Последнее равенство — а именно равенство зарядов протона и электрона — было проверено в очень тонком эксперименте, который

заключается в исследовании электрической нейтральности атома или молекулы водорода. Иными словами, нужно было попытаться отклонить пучок атомов или молекул электрическим полем. В опыте, поставленном для этой цели *), использовался хорошо коллимированный пучок атомов цезия в высоком вакууме, проходящий через сильное электрическое поле. По отсутствию какого-либо наблюдаемого отклонения можно сделать вывод, что полный заряд атома цезия должен быть меньше $10^{-16} e$. Еще более тонкий эксперимент был недавно проведен другим способом **). Большой объем водорода подвергался сжатию в резервуаре, полностью изолированном в электрическом отношении от окружающей среды. Затем газ выпускали из резервуара таким образом, чтобы с ним не могли выйти обычные ионы. Если бы заряд протона отличался от заряда электрона, скажем, на одну часть от биллиона, тогда каждая молекула водорода, состоящая из двух протонов и двух электронов, имела бы заряд, равный $2 \cdot 10^{-9} e$, и удаление всей массы водорода заметно изменило бы электрический заряд и потенциал резервуара. Действительно, этот эксперимент мог бы обнаружить такой остаточный заряд, как $10^{-20} e$ на атом, но наблюдения никаких зарядов не показали! Отсюда мы делаем вывод, что электрон и протон имеют одинаковые заряды с точностью до одной части на 10^{20} .

Согласно современным взглядам, между электроном и протоном существует наибольшее, возможное для элементарных частиц, различие. Никто еще не понимает, почему при этом их заряды равны с такой фантастической степенью точности. Очевидно, что квантование заряда является таинственным и универсальным законом природы. Опыт показывает, что заряды всех элементарных частиц в точности одинаковы. Мы можем надеяться, что в будущем какое-нибудь новое открытие или проициательность теоретиков объяснят нам, почему частицы с зарядом $0,500e$ или $0,999e$ не могут существовать ***).

Факт квантования заряда выходит, конечно, за пределы классического электромагнетизма. Обычно мы его игнорируем и поступаем так, как будто наши точечные заряды q могут иметь любую величину. Это не приводит к трудностям. Однако полезно вспомнить, что классическая теория не в состоянии объяснить структуры элементарных частиц. (Нельзя, впрочем, утверждать, что современная квантовая

*) J. C. Z o r n, G. E. C h a m b e r l a i n, V. W. H u g h e s, Phys. Rev. 129, 2566 (1963).

***) J. G. K i n g, Phys. Rev. Letters 5, 562 (1960). Ссылки на предыдущие опыты по определению равенства зарядов можно найти в этой статье и в гл. 13 книги V. W. H u g h e s, Gravitation and Relativity (W. A. Benjamin, Inc., New York, 1964).

***) На основании некоторых последних теоретических исследований элементарных частиц предполагается возможность существования частиц заряда, равного $1/3e$ и $2/3e$. Но последующие поиски таких частиц в условиях, казавшихся благоприятными для их создания и обнаружения, ни к чему не привели. (L. B. L e i p n e r, W. T. C h u, R. C. L a r s e n, R. K. A d a i r, Phys. Rev. Letters 12, 423 (1964).) В настоящее время поиски таких частиц продолжаются.

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.