

Д. Джанколи

Физика

Том 2

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Д11

Д11 **Д. Джанколи**
Физика: Том 2 / Д. Джанколи – М.: Книга по Требованию, 2024. – 673 с.

ISBN 978-5-458-37638-9

Написанная в живой и увлекательной форме книга американского ученого охватывает большой материал по всем разделам классической и современной физики. При изложении используются основы дифференциального и интегрального исчисления. Каждая глава снабжена хорошо подобранными задачами и вопросами с указанием категории трудности. В русском переводе выходит в двух томах. В томе 2 обсуждаются электричество, магнетизм, оптика, специальная теория относительности, теория элементарных частиц. Для школьников старших классов, желающих более глубоко изучить курс физики, для студентов младших курсов естественно-научных и технических вузов, для преподавателей средних школ и младших курсов вузов, а также для всех желающих расширить свои знания об окружающем нас мире.

ISBN 978-5-458-37638-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

22

Электрический заряд и электрическое поле

Слово «электричество» может вызвать представление о сложной современной технике: компьютерах, светильниках, электродвигателях, электрогенераторах. Но электричество играет в нашей жизни гораздо более серьезную роль. Ведь, согласно атомной теории строения вещества, силы, действующие между атомами и молекулами, в результате чего возникают жидкости и твердые тела, – это электрические силы. Они ответственны и за обмен веществ, происходящий в человеческом организме. Даже когда мы что-нибудь тянем или толкаем, это оказывается результатом действия электрических сил между молекулами руки и того предмета, на который мы воздействуем. И вообще большинство сил, с которыми мы имели дело начиная с гл. 4 (например, силы упругости и реакция опоры), сегодня принято считать электрическими силами, действующими между атомами. Сила тяжести, однако, не относится к электрическим силам¹⁾.

Электрические явления известны с древних времен, но лишь в последние два столетия они были досконально изучены. В следующих двенадцати главах мы проследим, как развивались представления об электричестве, а также рассмотрим связь между электричеством и магнетизмом и познакомимся с некоторыми практическими приложениями.

22.1. Статическое электричество. Закон сохранения электрического заряда

Слово *электричество* происходит от греческого названия янтаря – «электрон». Янтарь – это окаменевшая смола хвойных деревьев; древние заметили, что если потереть

¹⁾ В нынешнем столетии физики пришли к выводу о существовании лишь четырех различных видов сил: 1) гравитационных, 2) электромагнитных (далее мы увидим, что электрические и магнитные силы тесно связаны между собой), 3) сильных ядерных и 4) слабых ядерных. Последние два вида сил действуют в пределах атомных ядер и гораздо реже дают о себе знать в нашей повседневной практике, хотя именно они ответственны за такие явления, как радиоактивность и ядерная энергия. Мы поговорим о них в гл. 42 и 43.

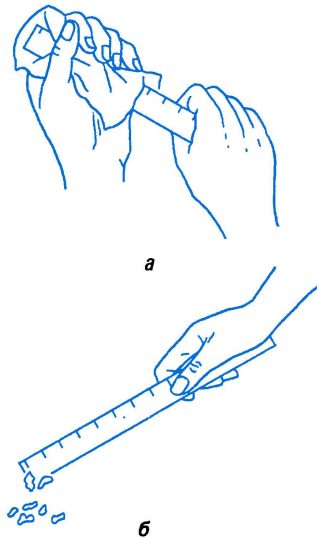


Рис. 22.1. Потрите пластмассовую линейку (а) и поднесите ее к мелко нарезанным кусочкам бумаги (б).

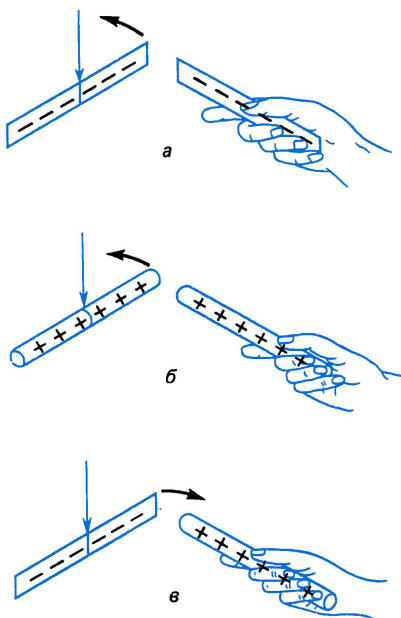


Рис. 22.2 Разноименные заряды отталкиваются, одноименные заряды притягиваются друг к другу. а — две пластмассовые линейки отталкиваются; б — два стеклянных стержня отталкиваются; в — стеклянный стержень притягивает пластмассовую линейку.

янтарь куском ткани, то он будет притягивать легкие предметы или пыль. Это явление, которое мы сегодня называем *статическим электричеством*, можно наблюдать, и натерев тканью эбонитовую или стеклянную палочку или же просто пластмассовую линейку. Пластмассовая линейка, которую хорошенько потерли бумажной салфеткой, притягивает мелкие кусочки бумаги (рис. 22.1). Разряды статического электричества вы могли наблюдать, расчесывая волосы или снимая с себя нейлоновую блузку или рубашку. Не исключено, что вы ощущали электрический удар, прикоснувшись к металлической дверной ручке после того, как встали с сиденья автомобиля или прошли по синтетическому ковру. Во всех этих случаях объект приобретает **электрический заряд** благодаря трению; говорят, что происходит *электризация трением*.

Все ли электрические заряды одинаковы или существуют различные их виды? Оказывается, существует два вида электрических зарядов, что можно доказать следующим простым опытом. Подвесим пластмассовую линейку за середину на нитке и хорошенько потрем ее куском ткани. Если теперь поднести к ней другую наэлектризованную линейку, мы обнаружим, что линейки *отталкиваются* друг друга (рис. 22.2, а). Точно так же, поднеся к одной наэлектризованной стеклянной палочке другую, мы будем наблюдать их отталкивание (рис. 22.2, б). Если же заряженный стеклянный стержень поднести к наэлектризованной пластмассовой линейке, они *притянутся* (рис. 22.2, в). Линейка, по-видимому, обладает зарядом иного вида, нежели стеклянная палочка. Экспериментально установлено, что все заряженные объекты делятся на две категории: либо они притягиваются пластмассой и отталкиваются стеклом, либо, наоборот, отталкиваются пластмассой и притягиваются стеклом. Существуют, по-видимому, два и только два вида зарядов, причем заряды одного и того же вида отталкиваются, а заряды разных видов притягиваются. Мы говорим, что *одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются*.

Американский государственный деятель, философ и ученый Бенджамин Франклин (1706–1790) назвал эти два вида зарядов *положительным* и *отрицательным*. Какой заряд как назвать, было совершенно безразлично; Франклин предложил считать заряд наэлектризованной стеклянной палочки *положительным*. В таком случае заряд, появляющийся на пластмассовой линейке (или янтаре), будет *отрицательным*; этого соглашения придерживаются и по сей день.

Разработанная Франклином теория электричества в действительности представляла собой концепцию «одной жидкости»: положительный заряд рассматривался как избыток «электрической жидкости» против ее нормального содержания в данном объекте, а отрицательный —

как ее недостаток. Франклин утверждал, что, когда в результате какого-либо процесса в одном теле возникает некоторый заряд, в другом теле одновременно возникает такое же количество заряда противоположного вида. Названия «положительный» и «отрицательный» следует поэтому понимать в *алгебраическом* смысле, так что суммарный заряд, приобретаемый телами в каком-либо процессе, всегда равен нулю. Например, когда пластмассовую линейку натирают бумажной салфеткой, линейка приобретает отрицательный заряд, а салфетка – равный по величине положительный заряд. Происходит разделение зарядов, но их сумма равна нулю. Этим примером иллюстрируется твердо установленный закон сохранения электрического заряда, который гласит:

Суммарный электрический заряд, образующийся в результате любого процесса, равен нулю.

Отклонений от этого закона никогда не наблюдалось, поэтому можно считать, что он столь же твердо установлен, как и законы сохранения энергии и импульса.

22.2. Электрические заряды в атомах

Лишь в прошлом столетии стало ясно, что причина существования электрического заряда кроется в самих атомах. Позднее мы обсудим строение атома и развитие представлений о нем более подробно; здесь же кратко остановимся на основных идеях, которые помогут нам лучше понять природу электричества.

По современным представлениям атом (несколько упрощенно) состоит из тяжелого положительно заряженного ядра, окруженного одним или несколькими отрицательно заряженными электронами. В нормальном состоянии положительный и отрицательный заряды в атоме равны по величине, и атом в целом электрически нейтрален. Однако атом может терять или приобретать один или несколько электронов. Тогда его заряд будет положительным или отрицательным, и такой атом называют *ионом*.

В твердом теле ядра могут колебаться, оставаясь вблизи фиксированных положений, в то время как часть электронов движется совершенно свободно. Электризацию трением можно объяснить тем, что в различных веществах ядра удерживают электроны с различной силой. Когда пластмассовая линейка, которую натирают бумажной салфеткой, приобретает отрицательный заряд, это означает, что электроны в бумажной салфетке удерживаются слабее, чем в пластмассе, и часть их переходит с салфетки на линейку. Положительный заряд салфетки равен по величине отрицательному заряду, приобретенному линейкой.

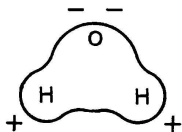


Рис. 22.3. Схематическое изображение молекулы воды. Такую молекулу называют «полярной», поскольку у нее возникает разделение зарядов.

Обычно предметы, наэлектризованные трением, лишь некоторое время удерживают заряд и в конце концов возвращаются в электрически нейтральное состояние. Куда исчезает заряд? Он «стекает» на содержащиеся в воздухе молекулы воды. Дело в том, что молекулы воды *полярны*: хотя в целом они электрически нейтральны, заряд в них распределен неоднородно (рис. 22.3). Поэтому лишние электроны с наэлектризованной линейки будут «стекать» в воздух, притягиваясь к положительно заряженной области молекулы воды. С другой стороны, положительный заряд предмета будет нейтрализоваться электронами, которые слабо удерживаются молекулами воды в воздухе. В сухую погоду влияние статического электричества гораздо заметнее: в воздухе содержится меньше молекул воды и заряд стекает не так быстро. В сырую дождливую погоду предмет не в состоянии надолго удержать свой заряд.

22.3. Изоляторы и проводники

Пусть имеются два металлических шара, один из которых сильно заряжен, а другой электрически нейтрален. Если мы соединим их, скажем, железным гвоздем, то незаряженный шар быстро приобретет электрический заряд. Если же мы одновременно коснемся обоих шаров деревянной палочкой или куском резины, то шар, не имевший заряда, останется незаряженным. Такие вещества, как железо, называют **проводниками** электричества; дерево же и резину называют **непроводниками**, или **изоляторами**.

Металлы обычно являются хорошими проводниками; большинство других веществ изоляторы (впрочем, и изоляторы чуть-чуть проводят электричество). Любопытно, что почти все природные материалы попадают в одну из этих двух резко различных категорий. Есть, однако, вещества (среди которых следует назвать кремний, германий и углерод), принадлежащие к промежуточной (но тоже резко обособленной) категории. Их называют *полупроводниками*.

С точки зрения атомной теории электроны в изоляторах связаны с ядрами очень прочно, в то время как в проводниках многие электроны связаны очень слабо и могут свободно перемещаться внутри вещества¹⁾. Когда положительно заряженный предмет подносится вплотную к проводнику или соприкасается с ним, свободные электроны быстро перемещаются к положительному заряду.

¹⁾ Свободные электроны довольно легко перемещаются внутри металла, однако обычно нелегко покидают его. Действительно, натирая металлический предмет, редко удается получить статический заряд, как в случае непроводников типа стекла или пластмассы.

Если же предмет заряжен отрицательно, то электроны, наоборот, стремятся удалиться от него. В полупроводниках свободных электронов очень мало, а в изоляторах они практически отсутствуют.

22.4. Индуцированный заряд. Электроскоп

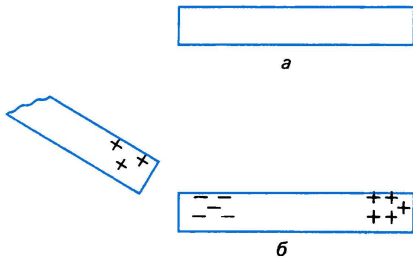


Рис. 22.4. Индуцированный заряд. *а* – нейтральный металлический стержень; *б* – металлический стержень в целом по-прежнему нейтрален, но на его концах возникает разделение зарядов.

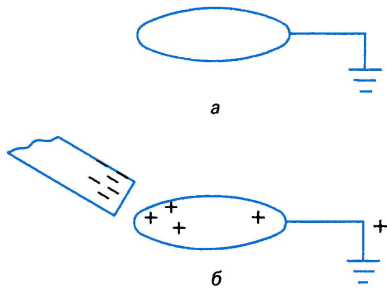


Рис. 22.5. Индуцированный заряд на объекте, соединенном с землей.

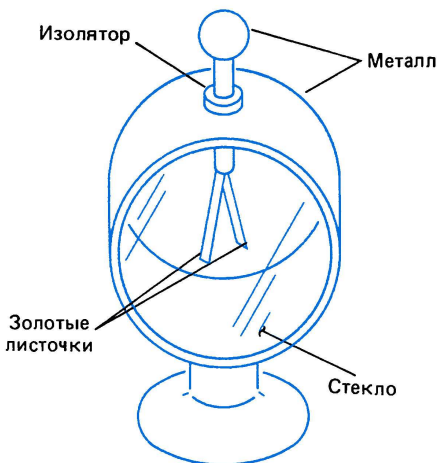


Рис. 22.6. Электроскоп.

Поднесем положительно заряженный металлический предмет к другому (нейтральному) металлическому предмету. При соприкосновении свободные электроны нейтрального предмета притянутся к положительно заряженному и часть их перейдет на него. Поскольку теперь у второго предмета недостает некоторого числа электронов, заряженных отрицательно, он приобретает положительный заряд. Этот процесс называется электризацией за счет электропроводности.

Приблизим теперь положительно заряженный предмет к нейтральному металлическому стержню, но так, чтобы они не соприкасались. Хотя электроны не покинут металлического стержня, они тем не менее переместятся в направлении заряженного предмета; на противоположном конце стержня возникнет положительный заряд (рис. 22.4). В таком случае говорят, что на концах металлического стержня индуцируется (или наводится) заряд. Разумеется, никаких новых зарядов не возникает: произошло просто *разделение* зарядов, в целом же стержень остался электрически нейтральным. Однако если бы мы теперь разрезали стержень поперек посередине, то получили бы два заряженных предмета – один с отрицательным зарядом, другой с положительным.

Сообщить металлическому предмету заряд можно также, соединив его проводом с землей (или, например, с водопроводной трубой, уходящей в землю), как показано на рис. 22.5, *а* (значок \perp обозначает заземление). Предмет, как говорят, заземлен. Благодаря своим огромным размерам земля принимает и отдает электроны; она действует как резервуар заряда. Если поднести близко к металлу заряженный, скажем, отрицательно предмет, то свободные электроны металла будут отталкиваться и многие уйдут по проводу в землю (рис. 22.5, *б*). Металл окажется заряженным положительно. Если теперь отсоединить провод, на металле останется положительный наведенный заряд. Но если сделать это после того, как отрицательно заряженный предмет удален от металла, то все электроны успеют вернуться назад и металл останется электрически нейтральным.

Для обнаружения электрического заряда используется *электроскоп* (или простой *электрометр*). Как видно из рис. 22.6, он состоит из корпуса, внутри которого находятся два подвижных листочка, сделанных нередко из золота. (Иногда подвижным делается только один листо-

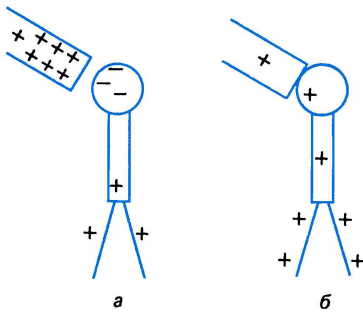


Рис. 22.7. Сообщение электроскопу заряда за счет индукции (а) и за счет проводимости (б).

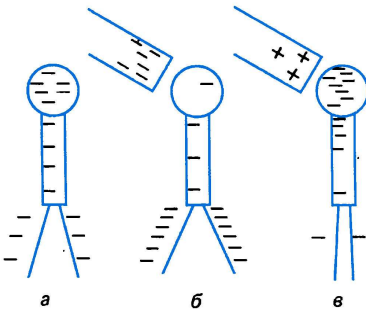


Рис. 22.8. Предварительно заряженный электроскоп может использоваться для определения знака неизвестного заряда.

22.5. Закон Кулона

Рис. 22.9. Схема опыта Кулона. Установка аналогична той, которую использовал Кавендиш для измерения гравитационной постоянной. Когда к шарiku на конце стержня, подвешенного на нити, подносят заряд, стержень слегка отклоняется, нить закручивается, и угол закручивания нити пропорционален действующей между зарядами силе (крутильные весы). С помощью этого прибора Кулон определил зависимость силы от величины зарядов и расстояния между ними.

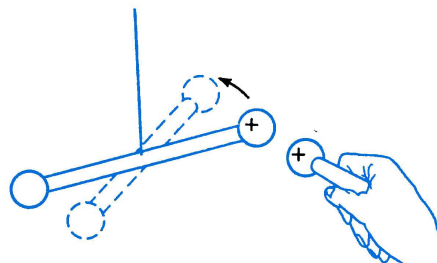
чек.) Листочки укреплены на металлическом стержне, который изолирован от корпуса и заканчивается снаружи металлическим шариком. Если поднести заряженный предмет близко к шарiku, в стержне происходит разделение зарядов (рис. 22.7, а), листочки оказываются одноименно заряженными и отталкиваются друг от друга, как показано на рисунке. Можно целиком зарядить стержень за счет электропроводности (рис. 22.7, б). В любом случае, чем больше заряд, тем сильнее расходятся листочки.

Заметим, однако, что знак заряда таким способом определить невозможно: отрицательный заряд разведет листочки точно на такое же расстояние, как и равный ему по величине положительный заряд. И все же электроскоп можно использовать для определения знака заряда — для этого стержню надо сообщить предварительно, скажем, отрицательный заряд (рис. 22.8, а). Если теперь к шарiku электроскопа поднести отрицательно заряженный предмет (рис. 22.8, б), то дополнительные электроны переместятся к листочкам и они раздвинутся сильнее. Наоборот, если к шарiku поднести положительный заряд, то электроны переместятся от листочков и они сблизятся (рис. 22.8, в), так как их отрицательный заряд уменьшится.

Электроскоп широко применялся на заре электротехники. На том же принципе при использовании электронных схем работают весьма чувствительные современные *электрометры*.

Итак, между электрическими зарядами действует сила. Как она зависит от величины зарядов и других факторов? Этот вопрос исследовал в 1780-е годы французский физик Шарль Кулон (1736–1806). Он воспользовался крутильными весами (рис. 22.9), очень похожими на те, которые применял Кавендиш для определения гравитационной постоянной (разд. 5.2).

Хотя в те времена еще не было приборов для точного определения величины заряда, Кулон сумел приготовить небольшие шарики с известным *соотношением* зарядов. Если заряженный проводящий шарик, рассуждал он, при-



вести в соприкосновение с точно таким же незаряженным шариком, то имевшийся на первом заряд в силу симметрии распределится поровну между двумя шариками. Это дало ему возможность получать заряды, составлявшие $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ и т.д. от первоначального. Несмотря на некоторые трудности, связанные с индуцированием зарядов, Кулону удалось доказать, что сила, с которой одно заряженное тело действует на другое малое заряженное тело, прямо пропорциональна электрическому заряду каждого из них. Другими словами, если заряд любого из этих тел удвоить, то удвоится и сила; если же удвоить одновременно заряды обоих тел, то сила станет вчетверо больше. Это справедливо при условии, что расстояние между телами остается постоянным. Изменяя расстояние между телами, Кулон обнаружил, что действующая между ними сила обратно пропорциональна квадрату расстояния: если расстояние, скажем, удваивается, сила становится вчетверо меньше. Итак, заключил Кулон, сила, с которой одно малое заряженное тело (в идеальном случае – *точечный заряд*, т.е. тело, подобно материальной точке не имеющее пространственных размеров) действует на другое заряженное тело, пропорциональна произведению их зарядов Q_1 и Q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (22.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Это соотношение известно как **закон Кулона**; его справедливость подтверждена тщательными экспериментами, гораздо более точными, чем первоначальные трудно воспроизводимые опыты Кулона. Показатель степени 2 установлен в настоящее время с точностью 10^{-16} , т.е. он равен $2 \pm 2 \cdot 10^{-16}$.

Коль скоро мы теперь имеем дело с новой величиной – электрическим зарядом, – мы можем подобрать такую единицу измерения, чтобы постоянная k в формуле (22.1) равнялась единице. И действительно, такая система единиц еще недавно широко использовалась в физике¹⁾. Теперь, однако, заряд чаще всего выражают в системе СИ, где его единицей является *кулон* (Кл). Точное определение кулона через электрический ток и магнитное поле мы приведем позднее (разд. 29.4). В системе СИ постоянная k имеет величину

$$k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \approx 9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2.$$

¹⁾ Речь идет о системе СГС (сантиметр – грамм – секунда), в которой используется *электростатическая единица заряда* СГСЭ. По определению два малых тела, каждое с зарядом 1 СГСЭ, расположенные на расстоянии 1 см друг от друга, взаимодействуют с силой 1 дина.

Таким образом, заряды в 1 Кл, расположенные на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют с силой, равной $(9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2)(1,0 \text{ Кл})(1,0 \text{ Кл})/(1,0 \text{ м}^2) = 9,0 \cdot 10^9 \text{ Н}$.

Заряды, возникающие при электризации трением обычных предметов (расчески, пластмассовой линейки и т. п.), по порядку величины составляют микрокулон и меньше ($1 \text{ мкКл} = 10^{-6} \text{ Кл}$). Заряд электрона (отрицательный) приблизительно равен $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. Это наименьший известный заряд¹⁾; он имеет фундаментальное значение и обозначается символом e ; его часто называют *элементарным зарядом*:

$$e = (1,6021892 \pm 0,0000046) \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$$

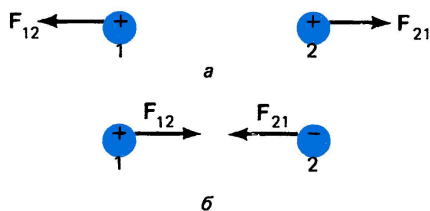
или

$$e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}.$$

Поскольку тело не может приобрести или потерять долю электрона, суммарный заряд тела должен быть целым кратным элементарного заряда. Говорят, что заряд *квантуется* (т. е. может принимать лишь дискретные значения). Однако, поскольку заряд электрона e очень мал, мы обычно не замечаем дискретности макроскопических зарядов (заряду 1 мкКл соответствуют примерно 10^{13} электронов) и считаем заряд непрерывным.

Формула (22.1) характеризует силу, с которой один заряд действует на другой. Эта сила направлена вдоль линии, соединяющей заряды. Если знаки зарядов одинаковы, то силы, действующие на заряды, направлены в противоположные стороны. Если же знаки зарядов различны, то действующие на заряды силы направлены навстречу друг другу (рис. 22.10). Заметим, что в соответствии с третьим законом Ньютона сила, с которой один заряд действует на другой, равна по величине и противоположна по направлению силе, с которой второй заряд действует на первый. Закон Кулона можно записать в векторной форме подобно закону всемирного тяготения

Рис. 22.10. Направление силы зависит от того, имеют ли заряды одинаковые (а) или противоположные (б) знаки. F_{12} – сила, действующая на заряд 1 со стороны заряда 2; F_{21} – сила, действующая на заряд 2 со стороны заряда 1.



¹⁾ В физике элементарных частиц предполагается существование субэлементарных частиц – кварков с зарядом $1/3 e$ и $2/3 e$. Экспериментально кварки не удалось зарегистрировать, а теория предсказывает, что кварки не могут существовать в свободном состоянии (см. гл. 43).

Ньютона (гл. 5):

$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{Q_1 Q_2}{r_{21}^2} \hat{\mathbf{r}}_{21},$$

где \mathbf{F}_{12} – вектор силы, действующей на заряд Q_1 со стороны заряда Q_2 , а $\hat{\mathbf{r}}_{21}$ – единичный вектор, направленный от Q_2 к Q_1 ¹⁾.

Следует иметь в виду, что формула (22.1) применима лишь к телам, расстояние между которыми значительно больше их собственных размеров. В идеальном случае это точечные заряды. Для тел конечного размера не всегда ясно, как отсчитывать расстояние r между ними, тем более что распределение заряда может быть и неоднородным. Если оба тела – сферы с равномерным распределением заряда, то r означает расстояние между центрами сфер. (Мы обсудим это далее в настоящей и следующей главах.) Важно также понимать, что формула (22.1) определяет силу, действующую на данный заряд со стороны *единственного* заряда. Если система включает несколько (или много) заряженных тел, то результирующая сила, действующая на данный заряд, будет равнодействующей (векторной суммой) сил, действующих со стороны остальных зарядов.

Пример 22.1. Чему равна электрическая сила, действующая на электрон в атоме водорода со стороны ядра (единственного протона) с зарядом $Q_2 = e$, когда электрон движется вокруг протона по орбите со средним радиусом $0,53 \cdot 10^{-10}$ м?

Решение. Подставим в формулу (22.1) значения $Q_2 = +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, $Q_1 = -Q_2$, $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$ м:

$$F = (0,53 \cdot 10^{-10} \text{ м})^{-2} (9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2) \times \\ \times (+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл})(-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}) = \\ = -8,2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}.$$

Знак минус означает, что заряды притягиваются.

Пример 22.2. Рассчитайте результирующую электрическую силу, действующую

на заряд Q_3 на рис. 22.11, а со стороны двух других зарядов.

Решение. Результирующая сила, действующая на заряд Q_3 , представляет собой сумму сил \mathbf{F}_{31} , действующей со стороны Q_1 , и \mathbf{F}_{32} , действующей со стороны Q_2 . Эти силы равны:

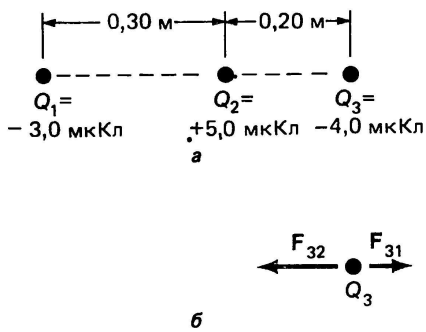
$$\mathbf{F}_{31} = (0,30 \text{ м})^{-2} (9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2) \times \\ \times (-4,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл})(-3,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}) = \\ = 1,2 \text{ Н},$$

$$\mathbf{F}_{32} = (0,20 \text{ м})^{-2} (9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2) \times \\ \times (5,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл})(-4,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}) = \\ = -4,5 \text{ Н}.$$

Сила \mathbf{F}_{31} – отталкивание, а \mathbf{F}_{32} – притяже-

¹⁾ Заметим, что если Q_1 и Q_2 имеют одинаковый знак, то $Q_1 Q_2 > 0$ и сила, действующая на Q_1 , направлена в сторону, противоположную Q_2 : заряды отталкиваются. Если же знаки Q_1 и Q_2 различны, то $Q_1 Q_2 < 0$, и сила \mathbf{F}_{12} направлена в сторону Q_2 : заряды притягиваются.

14 22. Электрический заряд и электрическое поле



Решение. Силы F_1 и F_2 направлены, как показано на чертеже, поскольку Q_1 создает силу притяжения, а Q_2 — силу отталкивания. По величине силы F_1 и F_2 составляют (без учета знаков, так как их направления нам известны):

$$F_1 = (0,60 \text{ м})^{-2} (9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2) \times (6,5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}) (8,6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}) = 140 \text{ Н},$$

$$F_2 = (0,30 \text{ м})^{-2} (9,0 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2) \times (6,5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}) (5,0 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}) = 330 \text{ Н}.$$

Рис. 22.11. К примеру 22.2.

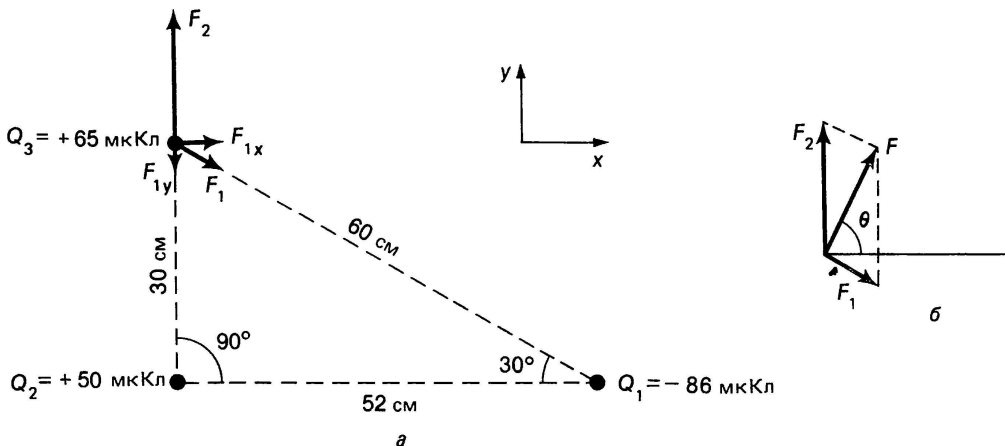


Рис. 22.12. К определению сил в примере 22.3.

ние, и эти силы действуют как показано на рис. 22.11, б. Тогда результирующая сила, действующая на заряд Q_3 , равна $F = F_{32} + F_{31} = -4,5 \text{ Н} + 1,2 \text{ Н} = -3,3 \text{ Н}$.

Результирующая сила имеет величину 3,3 Н и направлена на рисунке влево. (Обратим внимание на тот факт, что средний заряд Q_2 никак не препятствует влиянию заряда Q_1 , а лишь создает свою собственную силу.)

Пример 22.3. Рассчитайте силу, действующую на заряд Q_3 со стороны зарядов Q_1 и Q_2 на рис. 22.12.

Разложим F_1 на составляющие по осям x и y :

$$F_{1x} = F_1 \cos 30^\circ = 120 \text{ Н},$$

$$F_{1y} = -F_1 \sin 30^\circ = -70 \text{ Н}.$$

Сила F_2 имеет только составляющую по оси y . Таким образом, результирующая сила F , действующая на заряд Q_3 , имеет составляющие $F_x = F_{1x} = 120 \text{ Н}$ и $F_y = F_2 + F_{1y} = 330 \text{ Н} - 70 \text{ Н} = 260 \text{ Н}$. Отсюда величина результирующей силы составит $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(120 \text{ Н})^2 + (260 \text{ Н})^2} = 290 \text{ Н}$, а угол θ , который составляет направление этой силы с осью x , определится (рис. 22.12, б) соотношением $\text{tg } \theta = F_y / F_x = 260 \text{ Н} / 120 \text{ Н} = 2,2$; отсюда $\theta = 65^\circ$.

Постоянная k в формуле (22.1) обычно выражается через другую константу, ϵ_0 , так называемую **электрическую постоянную**, которая связана с k соотношением $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$. С учетом этого закон Кулона можно пе-