

Величина напряженности поля в точке M в два раза меньше, чем в точке N на оси диполя (при том же значении r), а направление вектора E противоположно направлению момента диполя.

В общем случае произвольного θ , возводя выражение (2.16) в квадрат и принимая во внимание, что скалярное произведение (ri)

равно $r \cos \theta$, можно легко вычислить величину вектора E :

$$E = k_0 \frac{p}{\epsilon_0 r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta}. \quad (2.19)$$

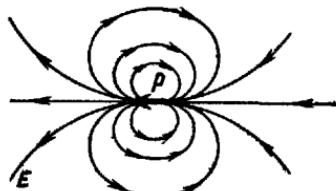


Рис. 1.9.

Устремляя l к нулю, а q к бесконечности так, чтобы их произведение ql оставалось неизменным, получаем так называемый точечный диполь ($l=0$), поле которого изображено на рис. 1.9.

В случае точечного диполя соотношение $l \ll r$ остается верным при всех значениях r , следовательно, формулы (2.16)–(2.19) верны без ограничений.

§ 3. Элементарные электрические заряды

При электризации трением оба трущихся тела заряжаются разноименно — одно положительно, а другое отрицательно. При этом абсолютные величины зарядов обоих тел (т. е. без учета их знаков) оказываются равными, и при соприкосновении они могут вновь нейтрализовать друг друга.

Это объясняется тем, что при трении происходит не возникновение электричества, а лишь разделение положительных и отрицательных зарядов, поровну существующих в нейтральных телах. Рассмотрим замкнутую систему, через поверхность которой заряды не переходят. Обозначим через q_i ($i=1, 2, 3, \dots$) величины отдельных зарядов, находящихся в системе; для положительных зарядов $q_i > 0$, а для отрицательных $q_i < 0$. Тогда, как показывает опыт, при всех процессах электризации и нейтрализации зарядов внутри системы (замкнутой!) выполняется закон сохранения электрического заряда

$$\sum_i q_i = \text{const} \quad (3.1)$$

— алгебраическая сумма электрических зарядов в замкнутой системе остается постоянной.

Изучая явления электролиза, Фарадей в начале XIX века установил прямую пропорциональность между количеством электричества, прошедшими через раствор электролита, и количеством вещества, выделившимся на электродах. Этот факт указывал на тесную связь электрической субстанции с веществом. Представления об атомисти-

ческом строении вещества приводили тогда к предположению о том, что и электрическая субстанция не является непрерывной, а существует в природе в виде совершенно определенных «дискретных» порций: с каждым ионом (заряженным атомом) вещества связана определенная порция электричества. Из законов Фарадея для электролиза (подробнее см. § 24) следует, что с каждым атомом любого одновалентного химического элемента, выделяющимся на электроде, связана одна и та же порция электрического заряда, с каждым двухвалентным атомом — ровно вдвое большая порция и т. д.

Однако вплоть до начала XX века само существование атомов и молекул оспаривалось многими учеными. Кроме того, законы электролиза были установлены для макроскопических количеств вещества, и могло возникнуть сомнение: может быть пропорциональность между количествами прошедшего электричества и выделившегося вещества соблюдается лишь в среднем для большого количества атомов, каждый из которых переносит с собой несколько различных порций заряда. Поэтому гипотеза о дискретной («атомной») природе электричества требовала прямого экспериментального доказательства.

В 20-х годах XIX века была установлена связь между электрическими и магнитными явлениями, и центр тяжести интересов физиков переместился в область изучения свойств электромагнитного поля, создаваемого зарядами. В теоретических работах Фарадея и Максвелла была установлена возможность распространения электромагнитных полей независимо от создающих эти поля движущихся электрических зарядов. Опытами Герца и Попова было подтверждено существование электромагнитных волн, и последние получили широкое применение в технике.

То обстоятельство, что электрические заряды всегда окружены полем, а поле может существовать и изменяться независимо от зарядов, приводило к представлению о первичности поля и вторичности зарядов. В наши дни с открытием новых взаимодействий (ядерного, «слабого», связанного снейтринно, — см. т. III, ч. III) проблема еще более усложнилась и, по-видимому, далека от решения. Ее рассмотрение выходит за пределы нашего курса.

Изучение катодных лучей, открытых в разрядной трубке Круксом в 1870 г., привело к заключению, что мельчайшие заряженные частицы, вырываемые из атомов вещества, обладают отрицательными зарядами. Эти частицы были названы электронами. Измеряя радиус кривизны траектории пучка электронов, заворачиваемых в магнитном поле, можно было определить удельный заряд электрона e/m , т. е. отношение его заряда e к массе m (подробнее см. часть III, гл. VIII, § 38). Многочисленные опыты показали, что (при скоростях электронов, много меньших скорости света)

величина удельного заряда e/m для всех электронов одинакова. Это указывало на тождественность всех электронов, вырываемых из атомов различных веществ, на одинаковость их заряда e и массы (покоящейся) m .

Величина e/m для электрона оказалась в 1836 раз больше, чем e/M для положительного иона водорода H^+ , т. е. для атома водорода, от которого оторван один электрон. Таким образом, физики пришли к заключению, что атомы вещества содержат «тяжелые» положительно заряженные частицы и «легкие» отрицательно заряженные частицы — электроны. Сообщая телу добавочное число электронов, мы заряжаем его отрицательным электричеством. Отнимая от тела часть электронов, мы заряжаем его положительно.

При обычных макроскопических процессах число участвующих в них электронов столь велико, что дискретность заряда может не учитываться в такой же мере, как несущественно при отмеривании порции жидкости то обстоятельство, что эта порция должна содержать целое число молекул. Однако для понимания механизма электрических явлений знание природы элементарных носителей электрического заряда совершенно необходимо. Для установления количественных закономерностей многих процессов существенной является и абсолютная величина элементарного заряда e .

Экспериментальное определение величины e и тем самым прямое доказательство дискретности электрического заряда было впервые осуществлено в 1909 г. Милликеном. Идея опытов Милликена состоит в следующем.

Представим себе микроскопическую капельку какой-нибудь нелетучей жидкости (например, минерального масла), помещенную между двумя строго горизонтальными пластинами, заряженными электричеством противоположного знака (плоский конденсатор). Меняя с помощью батареи и реостата заряд пластин, можно создавать в пространстве между пластинами вертикально направленное электрическое поле E различной напряженности.

Под воздействием радиоактивных излучений, рентгеновых или ультрафиолетовых лучей воздух между пластинами конденсатора ионизуется и в нем появляются отрицательно и положительно заряженные ионы, т. е. молекулы с избытком или недостатком электронов. Эти ионы оседают на капельке масла и заряжают ее. Обозначим полный заряд, приобретенный капелькой к данному моменту, через q . Тогда можно, изменения величину и направление электрического поля E в конденсаторе, подобрать его таким, чтобы электрическая сила $F_{эл}$, действующая на капельку ($F_{эл} = qE$), в точности уравновесила вес последней mg (m — масса капельки):

$$qE = mg. \quad (3.2)$$

При этом капелька повиснет в воздухе и будет оставаться неподвижной, как это изображено на рис. 1.10. Если масса капельки m известна, то легко определить несомый ею заряд:

$$q = \frac{mg}{E}. \quad (3.3)$$

Определение массы капельки ничтожных размеров является наиболее трудной частью опыта. Крошечные капельки масла Милликен получал, разбрызгивая с помощью пульверизатора масло над верхней пластиной конденсатора. Некоторые из этих микроскопических капелек, оседая, проникали в пространство между пластинами через

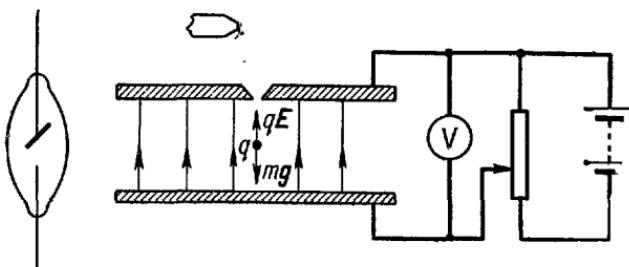


Рис. 1.10.

небольшое отверстие в верхней пластине. Как правило, вследствие трения при разбрызгивании эти капельки приобретали некоторый первоначальный заряд.

В отсутствие электрического поля ($E=0$) капелька под действием силы тяжести начинала ускоренно падать. По мере возрастания скорости падения на нее действовала все большая сила трения о воздух F_{tr} , направленная против силы тяжести и уменьшающая ускорение капельки. Микроскопические капельки масла под действием сил поверхностного натяжения принимают строго сферическую форму, и силу трения для них можно рассчитывать по закону Стокса:

$$F_{tr} = 6\pi\eta rv, \quad (3.4)$$

где η — вязкость воздуха, r — радиус капли и v — скорость ее падения.

Зная плотность масла δ , можно выразить массу капли m и ее вес mg через ее радиус:

$$F_{тяж} = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \delta g. \quad (3.5)$$

Спустя весьма короткий промежуток времени сила трения сравнивается с силой тяжести и капля начинает падать равномерно с

постоянной скоростью v_0 такой, что

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \delta g = 6\pi r \eta v_0. \quad (3.6)$$

Наблюдая за падающей каплей в отсчетный микроскоп (см. рис. 1.11), можно определить ее перемещение за определенный промежуток времени и тем самым найти величину v_0 . Из (3.6) тогда находится радиус капли

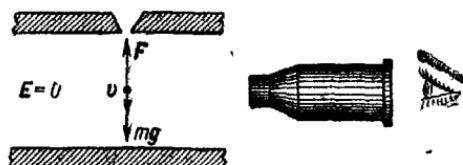


Рис. 1.11.

$$r = \sqrt{\frac{9 \eta v_0}{2 \delta g}} \quad (3.7)$$

и ее вес

$$mg = 6\pi r \eta v_0 \sqrt{\frac{9 \eta v_0}{2 \delta g}}. \quad (3.8)$$

Подбирая напряженность электрического поля E_1 , каплю можно остановить и определить находящийся на ней заряд $q_1 = mg/E_1$. Затем включается облучение воздушного промежутка до тех пор, пока капля не приобретет дополнительный положительный или отрицательный заряд и ее равновесие нарушится. Изменяя напряженность электрического поля до некоторого значения E_2 , вновь добиваются равновесия капли и определяют ее новый заряд $q_2 = mg/E_2$. Затем вновь включают облучение воздушного промежутка и т. д.

Получив ряд последовательных значений заряда капли q_1, q_2, q_3, \dots , Милликен установил, что как сами величины q_i , так и их последовательные разности являются целыми кратными некоторого элементарного заряда e , т. е.

$$q_i = \pm n_i e, \quad (3.9)$$

где n_i — всегда целое число.

Опыты Милликена многократно повторялись, видоизменялись и уточнялись. В результате использования нескольких неточных данных о вязкости воздуха и вследствие других мелких погрешностей значение e , полученное Милликеном, оказалось заниженным примерно на $0,6\%$. Это было установлено окончательно лишь в 30-е годы и повлекло за собой необходимость пересмотра численных значений многих других важнейших физических постоянных. Современное уточненное значение величины элементарного заряда равно

$$e = \frac{(4,802 \pm 0,002) \cdot 10^{-10} \text{ СГС ед. заряда}}{(1,601 \pm 0,001) \cdot 10^{-19} \text{ к.}} \quad (3.10)$$

Определение числа Авогадро N_0 , произведенное Перреном в 1916 г., дало возможность вычислить величину элементарного заряда e другим путем, используя установленные Фарадеем законы

электролиза. При выделении на электродах одного килограмм-атома, т. е. N_0 атомов, одновалентного вещества через раствор проходит вполне определенное количество электричества F . Отношение

$$\frac{F}{N_0} = e \quad (3.11)$$

представляет собой заряд, переносимый одним одновалентным ионом. Измерения дали значение $F = 96,5 \cdot 10^6 \text{ к}$, число Авогадро $N_0 = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул в килограмм-молекуле. Отсюда для e получается то же значение (3.10).

Изучение строения атомов показало, что атомы состоят из положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, и движущихся вокруг ядра отрицательно заряженных электронов. Электроны во всех атомах одинаковы и имеют массу покоя $m_e = 9,11 \cdot 10^{-28} \text{ г}$ и заряд $e = -4,80 \cdot 10^{-10} \text{ СГС ед. заряда} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ к}$. Ядра различных атомов имеют разную массу, а их положительный заряд является целым кратным заряду электрона. Наиболее легкое ядро атома водорода, частица, называемая протоном, имеет массу $m_p = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ и заряд $e = +4,80 \cdot 10^{-10} \text{ СГС ед. заряда} = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ к}$.

Атом в целом электрически нейтрален, суммарный заряд всех его электронов равен по величине и обратен по знаку заряду ядра. Если от атома оторвать один или несколько электронов, то возникает положительно заряженный ион. Если к атому присоединяется один или несколько лишних электронов, то возникает отрицательно заряженный ион. Процессы переноса электронов или ионов с одного тела на другое обусловливают электризацию или нейтрализацию этих тел.

Закон сохранения заряда (3.1) представлялся ранее простым следствием неуничтожимости элементарных заряженных частиц — электронов и протонов. Положение, однако, усложнилось в 30-х годах нашего века, когда были открыты новые элементарные частицы — нейтрон и позитрон. Нейтрон является частицей с массой, близкой к массе протона, $m_n \approx m_p$, и зарядом, равным нулю. Позитрон же представляет собой положительный электрон, т. е. имеет массу $m_e = 9,11 \cdot 10^{-28} \text{ г}$ и заряд $e = +4,80 \cdot 10^{-10} \text{ СГС ед. заряда} = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ к}$. Одновременно с открытием этих частиц было обнаружено, что все известные частицы способны к взаимным превращениям.

Так, например, при встрече позитрона (e^+) с электроном (e^-) обе частицы превращаются в два нейтральных фотона жестких γ -лучей:

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma. \quad (3.12)$$

Нейтрон (n), находящийся в свободном состоянии, в среднем через 12 минут распадается на 3 частицы: положительно заряженный протон (p^+), отрицательно заряженный электрон и нейтральную частицу малой массы, получившую название антинейтрино ($\bar{\nu}$):

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} \quad (3.13)$$

Указанные процессы превращения одних элементарных частиц в другие могут протекать и в обратном направлении. Например, достаточно жесткий

электрически нейтральный γ -квант вблизи тяжелого ядра может превращаться в пару противоположно заряженных частиц — электрон и позитрон:

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+. \quad (3.14)$$

Ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, которые способны при определенных условиях превращаться друг в друга как по реакции (3.13), так и в противоположном направлении, по реакции

$$p^+ \rightarrow n + e^+ + v, \quad (3.15)$$

где v — нейтрино, причем тяжелые частицы остаются внутри ядра, а легкие (электрон, позитрон, нейтрино и антинейтрино) вылетают за пределы атома.

Наконец, наряду с относительно тяжелыми ядерными частицами (нейтрон, протон) и легкими (электрон, позитрон, нейтрино, антинейтрино) в последние годы был обнаружен целый ряд неустойчивых частиц с различными массами, как промежуточными между массой электрона и массой протона (мезоны), так и с массами больше массы протона (гипероны). Существуют положительные, отрицательные и нейтральные мезоны и гипероны, причем электрически заряженные мезоны и гипероны имеют заряд, в точности равный элементарному заряду $e = \pm 4,80 \cdot 10^{-10}$ СГС ед. заряда.

При взаимных превращениях различных элементарных частиц, примерами которых являются написанные выше реакции (3.12) — (3.15), происходит возникновение и исчезновение отдельных элементарных зарядов. Однако и в этих случаях, как при макроскопических процессах разделения зарядов, алгебраическая сумма зарядов исчезающих частиц равна алгебраической сумме зарядов возникающих частиц.

Таким образом, закон сохранения электрического заряда является совершенно универсальным, справедливым при всех макроскопических и микроскопических процессах. Сам же электрический заряд является одним из свойств элементарных частиц, у которых он может принимать лишь одно из трех значений:

$$e = \begin{cases} +4,80 \cdot 10^{-10} \text{ СГС ед. заряда,} \\ 0, \\ -4,80 \cdot 10^{-10} \text{ СГС ед. заряда.} \end{cases} \quad (3.16)$$

§ 4. Электрическое поле в диэлектрике. Свободные и связанные заряды

Рассмотрим причины того, что наличие непроводящего вещества между электрическими зарядами уменьшает их взаимодействие, т. е. что напряженность электрического поля в среде оказывается меньшей, чем в вакууме.

Все тела (твердые, жидкие и газообразные) состоят из атомов и молекул. Последние представляют сложные системы электрических зарядов, хотя в целом электрически нейтральны. В некоторых телах часть микроскопических зарядов может свободно перемещаться