

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД И ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ

Со словами «электричество», «электрический заряд», «электрический ток» вы встречались много раз и успели к ним привыкнуть. Но попробуйте ответить на вопрос: «Что такое [электрический заряд](#)?» — и вы убедитесь, что это не так-то просто. Дело в том, что понятие заряда — это основное, первичное понятие, не сводимое на современном уровне развития наших знаний к каким-либо более простым, элементарным понятиям

Попытаемся сначала выяснить, что понимают под утверждением: данное тело или частица имеет электрический заряд.

Вы знаете, что все тела построены из мельчайших, неделимых на более простые (насколько сейчас науке известно) частиц, которые поэтому называют элементарными. Все [элементарные частицы](#) имеют массу и благодаря этому притягиваются друг к другу согласно [закону всемирного тяготения](#) с силой, сравнительно медленно убывающей по мере увеличения расстояния между ними, обратно пропорциональной квадрату расстояния. Большинство элементарных частиц, хотя и не все, кроме того, обладают способностью взаимодействовать друг с другом с силой, которая также убывает обратно пропорционально квадрату расстояния, но эта сила в огромное число раз превосходит силу тяготения. Так, в [атоме водорода](#), изображенном схематически на рисунке 1, [электрон](#) притягивается к ядру (протону) с силой, в 10^{11} раз превышающей силу гравитационного притяжения.

Если частицы взаимодействуют друг с другом с силами, которые медленно уменьшаются с увеличением расстояния и во много раз превышают силы всемирного тяготения, то говорят, что эти частицы имеют [электрический заряд](#). Сами частицы называются заряженными. Бывают частицы без электрического заряда, но не существует электрического заряда без частицы.

Взаимодействия между заряженными частицами носят название электромагнитных. Электрический заряд — физическая величина, определяющая интенсивность электромагнитных взаимодействий, подобно тому как масса определяет интенсивность гравитационных взаимодействий.

Электрический заряд [элементарной частицы](#) это не особый «механизм» в частице, который можно было бы снять с нее, разложить на составные части и снова собрать. Наличие [электрического заряда](#) у электрона и других частиц означает лишь существование

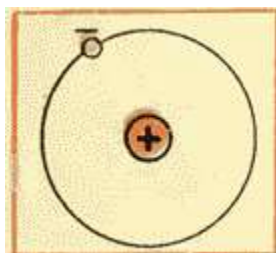


Рис. 1

определенных силовых взаимодействий между ними. Но мы, в сущности, ничего не знаем о заряде, если не знаем законов этих взаимодействий. Знание законов взаимодействий должно входить в наши представления о заряде. Законы эти не просты, изложить их в нескольких словах невозможно. Вот почему нельзя дать достаточно удовлетворительного краткого определения того, что такое [электрический заряд](#).

Два знака электрических зарядов. Все тела обладают массой и поэтому притягиваются друг к другу. Заряженные же тела могут как притягивать, так и отталкивать друг друга. Этот важнейший факт, знакомый вам из курса физики VII класса, означает, что в природе есть частицы с электрическими зарядами противоположных знаков. При одинаковых знаках заряда частицы отталкиваются, а при разных притягиваются.

Заряд [элементарных частиц](#) — протонов, входящих в состав всех [атомных ядер](#), называют положительным, а заряд электронов — отрицательным. Между положительными и [отрицательными зарядами](#) нет внутренних различий. Если бы знаки зарядов частиц поменялись местами, то от этого характер электромагнитных взаимодействий несколько бы не изменился.

Элементарный заряд. Кроме электронов и протонов, есть еще несколько типов заряженных элементарных частиц. Но только электроны и протоны могут неограниченно долго существовать в свободном состоянии. Остальные же заряженные частицы живут менее миллионных долей секунды. Они рождаются при столкновениях быстрых элементарных частиц и, просуществовав ничтожно мало, распадаются, превращаясь в другие частицы. С этими частицами вы познакомитесь в X классе.

К частицам, не имеющим [электрического заряда](#), относится [нейтрон](#). Его масса лишь незначительно превышает массу протона. Нейтроны вместе с протонами входят в состав [атомного ядра](#).

Если [элементарная частица](#) имеет заряд, то его значение, как показали многочисленные опыты, строго определено (об одном из таких опытов — опыте Милликена и Иоффе — было рассказано в учебнике для VII класса)

Существует минимальный заряд, называемый элементарным, которым обладают все заряженные элементарные частицы. Заряды элементарных частиц различаются лишь знаками. Отделить часть заряда, например у электрона, невозможно.

ЗАРЯЖЕННЫЕ ТЕЛА. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

Электромагнитные силы играют в природе огромную роль благодаря тому, что в состав всех тел входят электрически заряженные частицы. Составные части атомов ядра и электроны обладают электрическим зарядом

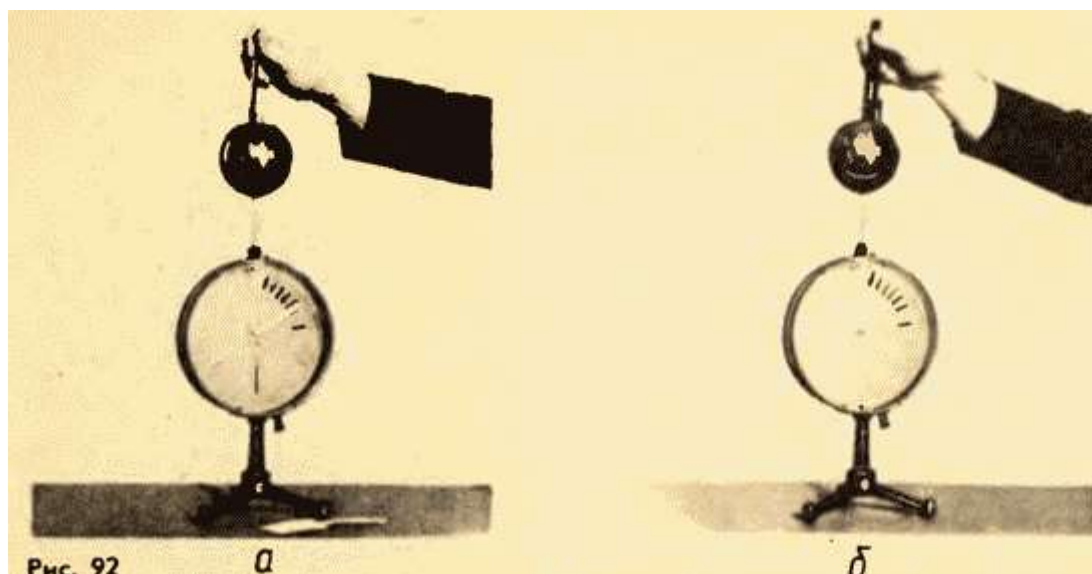


Рис. 2

Существующие между заряженными частицами электромагнитные силы огромны. Однако действие электромагнитных сил между телами непосредственно не обнаруживается, так как тела в обычном состоянии электрически нейтральны. Нейтрален атом любого вещества, так как число электронов в нем равно числу протонов в ядре. Положительно и отрицательно заряженные частицы связаны друг с другом электрическими силами и образуют нейтральные системы

Макроскопическое тело электрически заряжено в том случае, если оно содержит избыточное количество элементарных частиц с одним знаком заряда. Отрицательный заряд тела обусловлен избытком электронов по сравнению с протонами, а положительный — недостатком электронов.

Для того чтобы получить электрически заряженное макроскопическое тело, т. е. наэлектризовать его, нужно отделить часть отрицательного заряда от связанного с ним положительного. Это можно сделать с помощью трения. Если провести расческой по сухим волосам, то небольшая часть самых подвижных заряженных частиц — электронов — перейдет с волос на расческу и зарядит ее отрицательно, а волосы зарядятся положительно.

Равенство зарядов при электризации. С помощью опыта можно доказать, что при электризации трением оба тела приобретают противоположные по знаку, но одинаковые по модулю заряды. Возьмем электрометр с укрепленной на его стержне

металлической сферой с отверстием и две пластины на длинных рукоятках: одну из эбонита, а другую из плексигласа. При [трении](#) друг о друга пластины электризуются. Внесем одну из пластин внутрь сферы, не касаясь ее стенок. Если пластина заряжена положительно, то часть электронов со стрелки и стержня электрометра притянется к пластине и соберется на внутренней поверхности сферы. Стрелка при этом зарядится положительно и оттолкнется от стержня (рис. 2, а). Если внести внутрь сферы другую пластину, вынув предварительно первую, то электроны сферы и стержня будут отталкиваться от пластины и соберутся в избытке на стрелке. Это вызовет отклонение стрелки, причем на тот же угол, что и при первом опыте. Опустив обе пластины внутрь сферы, мы не обнаружим отклонения стрелки (рис. 2, б). Это доказывает, что заряды пластин равны по модулю и противоположны по знаку.

Как происходит электризация тел? При электризации тел важен тесный контакт между ними. [Электрические силы](#) удерживают электроны внутри тела. Но для разных веществ эти силы различны. При тесном контакте небольшая часть электронов того вещества, у которого связь электронов с телом относительно слаба, переходит на другое вещество. Перемещения электронов при этом не превышают размеров межатомных расстояний (1 см). Но если тела разъединить, то оба они окажутся заряженными.

Так как поверхности тел никогда не бывают идеально гладкими, то необходимый для перехода электронов тесный контакт между телами устанавливается только на небольших участках поверхностей (рис. 93). При [трении](#) тел друг о друга число участков с тесным контактом увеличивается и тем самым увеличивается общее число заряженных частиц, переходящих от одного тела к другому.

Электризация тел и ее применение в технике. Значительная электризация происходит при трении синтетических тканей. Снимая нейлоновую рубашку в сухом воздухе, можно слышать характерное потрескивание. Между заряженными участками трущихся поверхностей проскакивают маленькие искорки. С подобными явлениями приходится считаться на производстве. Так, нити пряжи на текстильных фабриках электризуются за счет [трения](#), притягиваются к веретенам и роликам и рвутся. Пряжа притягивает пыль и загрязняется.

Приходится применять специальные меры против электризации нитей.

Электризация тел при тесном контакте используется в электро-копировальных установках (типа «Эра», «Ксерокс» и др.).

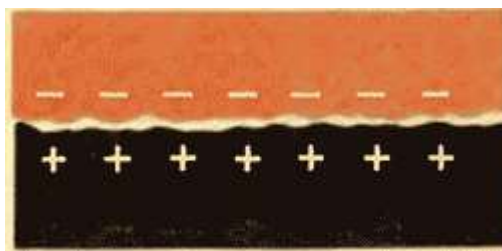


Рис.3

Так, в одной из этих установок черный смоляной порошок перемешивается с мельчайшими стеклянными шариками. При этом шарики заряжаются положительно, а частицы порошка — отрицательно. Вследствие притяжения они покрывают поверхность шариков тонким слоем.

Копируемый текст или чертеж проецируется на тонкую селеновую пластину, поверхность которой заряжена положительно. Пластина покоится на отрицательно заряженной металлической поверхности. Под действием света пластина разряжается и положительный заряд остается лишь на участках, соответствующих темным местам изображения. После этого пластина покрывается тонким слоем шариков. Благодаря притяжению разноименных зарядов смоляной порошок притягивается к положительно заряженным участкам пластины. Затем шарики стряхивают и, плотно прижав к пластине лист бумаги, получают на ней отпечаток. Отпечаток закрепляют с помощью нагревания.

ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Опыт с электризацией пластин доказывает, что при электризации трением происходит перераспределение имеющихся зарядов между нейтральными в первый момент телами. Небольшая часть электронов переходит с одного тела на другое. Новые заряженные частицы не возникают, а существовавшие ранее не исчезают. Алгебраическая сумма положительных и отрицательных зарядов тел равна нулю.

При электризации тел выполняется закон сохранения электрического заряда. Этот закон справедлив для системы, в которую не входят извне и из которой не выходят наружу заряженные частицы, т. е. для замкнутой системы. В замкнутой системе алгебраическая сумма зарядов всех частиц остается неизменной:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N = \text{const.}$$

Закон сохранения заряда имеет глубокий смысл. Если число заряженных элементарных частиц не изменяется, то выполнение закона сохранения заряда очевидно. Но элементарные частицы могут превращаться друг в друга, рождаться и исчезать, давая жизнь новым частицам. Однако во всех случаях заряженные частицы рождаются только парами с одинаковыми по модулю и

противоположными по знаку зарядами. Исчезают заряженные частицы, превращаясь в нейтральные, тоже только парами. Во всех случаях сумма зарядов изолированной системы остается одной и той же.

Справедливость закона сохранения заряда подтверждают наблюдения над огромным числом превращений элементарных

частиц. Этот закон выражает одно из самых фундаментальных свойств [электрического заряда](#).

Причина сохранения заряда до сих пор неизвестна.

ОТВЕТИТЬ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Какие взаимодействия называют электромагнитными? 2. Что такое элементарный заряд? 3. Приведите примеры явлений, вызванных электризацией тел, которые вы наблюдали в повседневной жизни. 4. Эбонитовая палочка при электризации зарядилась отрицательно. Осталась ли неизменной масса палочки? 3. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. 6. Приведите примеры явлений, в которых наблюдается сохранение заряда.

ОСНОВНОЙ ЗАКОН ЭЛЕКТРОСТАТИКИ — ЗАКОН КУЛОНА

Приступим к изучению количественных законов электромагнитных взаимодействий. Вначале рассмотрим наиболее простой случай, когда электрически заряженные тела находятся в покое. Раздел [электродинамики](#), посвященный изучению покоящихся [электрических зарядов](#), называют электростатикой. Основной закон [электростатики](#) — закон взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел или частиц — был экспериментально установлен французским физиком Ш. Кулоном в 1785 г. и носит его имя.

Точечных заряженных тел не существует. Но если расстояние между телами во много раз больше их размеров, то ни форма, ни размеры заряженных тел существенно не влияют на взаимодействие между ними. В этом случае тела можно рассматривать как точечные. Помните, что и [закон всемирного тяготения](#) тоже сформулирован для точечных тел.

Сила взаимодействия заряженных тел зависит от свойств среды между заряженными телами.

Пока будем считать, что взаимодействие происходит в вакууме. Впрочем, опыт показывает,

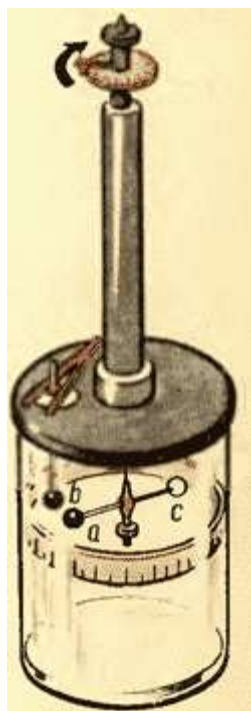


Рис. 4

что воздух очень мало влияет на силу взаимодействия заряженных тел: она оказывается почти такой же, как в вакууме.

Опыты Кулона. Открытие закона

взаимодействия [электрических зарядов](#) облегчалось тем, что эти силы велики. Здесь не нужно было применять особо чувствительной аппаратуры, как при проверке [закона всемирного тяготения](#) и земных условиях. С помощью крутильных весов удалось установить, как взаимодействуют друг с другом неподвижные заряженные тела. Крутильные весы состоят из стеклянной палочки, подвешенной на тонкой упругой проволочке (рис. 4) На одном конце палочки закреплен маленький металлический шарик *a*, а на другом — противовес *c*. Еще один металлический шарик *b* закреплен на крышке весов неподвижно.

При сообщении шарикам одноименных зарядов они начинают отталкиваться друг от друга. Чтобы удержать шарики на фиксированном расстоянии, упругую проволочку нужно закрутить на некоторый угол. По углу закручивания проволоки определяют силу взаимодействия шариков.

Крутильные весы позволили изучить зависимость силы взаимодействия заряженных шариков от зарядов и от расстояния между ними. Измерять силу и расстояние в то время умели. Единственная трудность была с зарядом, для измерения которого не существовало даже единиц. Кулон нашел простой способ изменения заряда одного из шариков в 2, 4 и т. д. раз, соединяя его с таким же незаряженным шариком. Заряд при этом распределялся поровну между шариками, что и уменьшало исследуемый заряд в известном отношении. Новое значение силы при новом заряде определялось экспериментально.

Закон Кулона. Опыты Кулона привели к установлению закона, поразительно напоминающего [закон всемирного тяготения](#).

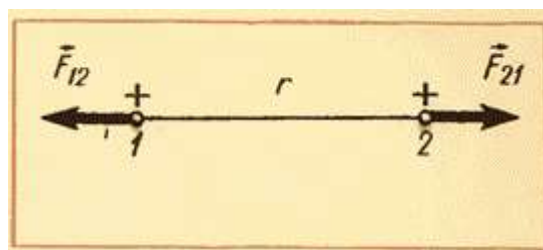


Рис.5

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Эту силу называют кулоновской.

Если обозначить модули зарядов через q_1 и q_2 а расстояние между ними через r то [закон Кулона](#) можно записать в следующей форме:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2},$$

где k — коэффициент пропорциональности, численно равный силе взаимодействия единичных зарядов на расстоянии, равном единице длины

Такую же форму (8.2) имеет [закон всемирного тяготения](#): вместо зарядовой формулы закона тяготения входят массы, а роль коэффициента k играет гравитационная постоянная

Пока еще ничего не было сказано о направлении сил взаимодействия между зарядами. Легко обнаружить, что два заряженных шарика, подвешенных на нитях, либо притягиваются друг к другу, либо отталкиваются. Отсюда следует, что силы взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела (рис.5). Подобные силы называют центральными. В соответствии с [третьим законом Ньютона](#)

Открытие [закона Кулона](#) — первый конкретный шаг в изучении свойств [электрического заряда](#). Наличие электрического заряда у тел или [элементарных частиц](#) означает, что они взаимодействуют друг с другом по закону Кулона.

ЕДИНИЦА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Выбрать единицу [электрического заряда](#), как и единицы других физических величин, можно произвольно. Дело здесь в целесообразности того или другого выбора.

Создать макроскопический эталон единицы электрического заряда, подобный эталону длины — метру, невозможно из-за неизбежной утечки заряда. Естественно было бы за единицу принять заряд электрона (это сейчас и сделано в атомной

физике). Но во времена Кулона еще не было известно о существовании в природе электрона. Заряд электрона слишком мал, и поэтому пользоваться им в качестве единицы заряда не всегда удобно.

[Единица заряда](#) — **кулон**. В Международной системе единиц (СИ) единица заряда является не основной, а [производной](#) и эталон для нее не вводится. Наряду с метром, секундой и килограммом в СИ введена одна основная единица для измерения электрических величин — единица силы тока — ампер. Эталонное значение ампера устанавливается с помощью магнитных взаимодействий токов. Об этом было сказано в учебнике физики для VII класса.

[Единицу заряда](#) в СИ — кулон - устанавливают с помощью единицы силы тока. 1 кулон (Кл) — это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А.

Коэффициент k в [законе Кулона](#) при записи его в единицах имеет наименование ¹, так как согласно (8.2)

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1||q_2|},$$

а сила измеряется в ньютонах, расстояние — в метрах и заряд — в кулонах. Численное значение этого коэффициента можно определить экспериментально. Для этого достаточно измерить силу взаимодействия между двумя известными зарядами, находящимися на заданном расстоянии, и подставить значения ² в формулу (8.3). Полученное значение ³ таково:

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Заряд в 1 Кл очень велик. Сила взаимодействия двух точечных зарядов по 1 Кл каждый, расположенных на расстоянии 1 км друг от друга, чуть меньше силы, с которой земной шар притягивает груз массой 1 т. Поэтому сообщить небольшому телу (размером порядка нескольких метров) заряд 1 Кл невозможно. Отталкиваясь друг от друга, заряженные частицы не могут удержаться на теле. Никаких других сил, которые были бы способны в данных условиях компенсировать кулоновское отталкивание, в природе не существует.

Но в проводнике, который в целом нейтрален, привести в движение заряд 1 Кл не составляет большого труда. Ведь в обычной электрической лампе мощностью 100 Вт при напряжении 127 В устанавливается ток, немного меньший 1 А. При этом за 1 с через поперечное сечение проводника проходит заряд, почти равный 1 Кл.

Минимальный заряд, существующий в природе, это заряд [элементарных частиц](#). В единицах СИ модуль этого заряда равен:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Электрическая постоянная. Коэффициент k в СИ принято записывать в форме:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

Величину ϵ_0 — греческая буква; читается «эпсилон») называют электрической постоянной. Она равна:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Мы в дальнейшем для простоты записи формул будем почти всегда оставлять в них коэффициент k , не прибегая к его выражению (8.6).

Контрольные вопросы:

1. В чем сходство и различие [закона всемирного тяготения](#) и закона Кулона?
2. Как определяется [единица заряда](#) в СИ? Запишите [закон Кулона](#).
4. Чему равен коэффициент k в законе Кулона?
5. Чему равен заряд электрона?