

Лекция 1

Закон Кулона. Закон сохранения заряда. Электрическое поле

(повторение материала из 1 семестра)

Закон Кулона. Закон сохранения заряда

В 1733 году французский физик Ш.Дюфе опубликовал результаты своих опытов по электризации различных тел. Из них он сделал вывод, что существуют два вида электричества. Одно электричество возникает при натирании *смолы*, воска, шелка и многих других веществ. Другое появляется при натирании *стекла*, горного хрусталя, драгоценных камней, шерсти и др. Поэтому Дюфе назвал первое из них *смоляным*, а второе – *стеклянным* электричеством. Тело, обладающее любым из двух видов электричества, притягивает к себе легкие тела (именно это свойство еще с античных времен обозначалась словом «электричество»). Различие же состоит в том, что тела, заряженные одним и тем же электричеством (смоляным или стеклянным), отталкивают друг друга, но если одно тело заряжено стеклянным электричеством, а другое смоляным, то они взаимно притягиваются. Несколько позже, Франклин предложил называть стеклянное электричество положительным, а смоляное – отрицательным. Таким образом, в первой половине 18 века были установлены фундаментальные факты: наличие двух видов электричества и существования электростатических сил притяжения и отталкивания.

Естественно возникал вопрос о том, как появляется у тел электричество. Окончательный ответ на этот вопрос был получен в конце 19-го – начале 20-го века. Теперь мы знаем, что в состав любого атома входит положительно заряженное ядро и отрицательно заряженные электроны. В нейтральном атоме суммарный заряд электронов равен заряду атомного ядра. Тело, состоящее из нейтральных атомов и молекул, имеет суммарный электрический заряд, равный нулю. Если же в результате какого-либо взаимодействия часть электронов переходит от тела *A* к телу *B*, то тело *B* приобретает отрицательный электрический заряд, а тело *A* – положительный.

Начало количественного изучения электрических явлений относится к концу 18-го века, когда в 1785 году Кулон установил на опыте закон взаимодействия электрических зарядов.

Для заряженных тел произвольных размеров такой закон в простой форме дать нельзя, так как сила взаимодействия протяженных тел зависит от формы и взаимной ориентации этих тел. Однако форма тел и их взаимная ориентация перестают сказываться, если размеры тел достаточно малы по сравнению с расстоянием между ними. Поэтому закон взаимодействия, имеющий общее значение, можно установить только для *точечных зарядов*.

Под **точечным зарядом (заряженной частицей)** в физике понимают протяженное

заряженное тело, размерами которого можно пренебречь в условиях данной задачи.

В частности, если мы рассматриваем взаимодействие двух заряженных тел, то их можно считать точечными зарядами, если их размеры малы по сравнению с расстоянием между ними.

В своих опытах Кулон измерял силы взаимодействия заряженных шариков с помощью крутильных весов. На тонкой проволоке была подвешена стеклянная палочка с двумя металлическими шарами на концах (один из шаров играл роль противовеса). Одному из шаров сообщался электрический заряд, против него устанавливался другой неподвижный заряженный шар. В положении равновесия измерялось расстояние между центрами заряженных шаров, а сила взаимодействия между ними определялась по углу поворота стеклянной палочки, закручивающей нить подвеса.

В результате этих опытов Кулон заключил, что *сила взаимодействия двух точечных зарядов A и B направлена вдоль линии, соединяющей оба заряда, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами:*

$$F_{AB} \sim \frac{1}{R^2}. \quad (1)$$

Однако сила взаимодействия между шариками зависит еще от величин их зарядов. Но поскольку Кулон делал самые первые шаги по количественному изучению электрических явлений, то у него не было и в принципе не могло быть метода измерения заряда на шарах. Наиболее строго эту проблему можно было бы решить следующим образом.

Сообщим шарикам A и B некоторые (неизвестные) заряды, поместим их на определенном расстоянии и измерим силу F_{AB} взаимодействия между ними. Заменяем далее шарик B другим (третьим) заряженным шариком C и измерим силу F_{AC} взаимодействия между A и C (при том же расстоянии между шариками, что и в первом случае). Если теперь изменить произвольным образом заряд шарика A и опять измерить силы взаимодействия шарика A с шариками B и C (при сохранении расстояния между шариками), то опыт показывает, что отношение сил $F_{AB} : F_{AC}$ остается неизменным, т.е. не зависит от величины заряда шарика A . Это значит, что указанное отношение $F_{AB} : F_{AC}$ зависит только от зарядов шариков B и C .

Это фундаментальное свойство сил электростатического взаимодействия справедливо только для точечных зарядов. Именно оно позволяет ввести количественную меру *электрического заряда, как физической величины, характеризующей интенсивность электрического взаимодействия.* Итак, **по определению** отношение электрических зарядов q_B и q_C двух заряженных частиц B и C равно отношению сил взаимодействия этих частиц с третьей заряженной частицей A :

$$\frac{q_B}{q_C} = \frac{F_{AB}}{F_{AC}}. \quad (2)$$

При этом возможность такого определения следует из экспериментально установленного факта не зависимости правой части (2) от степени заряженности частицы А (лишь бы она была хоть как-то заряжена).

Заметим, что соотношение (2) является конструктивным определением, т.к. указывает прямой способ сравнения величин двух точечных зарядов.

С другой стороны, соотношение (2) можно интерпретировать несколько иначе, переписав его с учетом (1) в виде:

$$\frac{F_{AB}}{q_B} = \frac{F_{AC}}{q_C} = \frac{G_A}{R^2}, \quad (3)$$

где G_A – некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий только от степени заряженности частицы А (он не может зависеть, например, от степени заряженности частицы С, т.к. первое отношение в (3) от неё не зависит). Соотношение (3) наглядно показывает, что при введенном выше определении величины заряда сила взаимодействия двух шариков (точечных зарядов) оказывается пропорциональной заряду одного из шариков:

$$F_{AB} = \frac{G_A}{R^2} q_B.$$

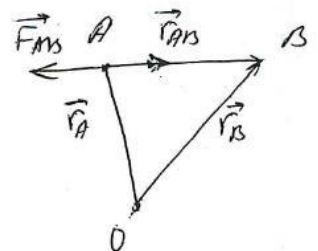
Но оба шарика равноправны, поэтому сила F_{AB} должна быть пропорциональна величине каждого из зарядов q_A и q_B . Таким образом, величина силы взаимодействия двух точечных зарядов равна:

$$F_{AB} = k \frac{q_A q_B}{R^2}, \quad (4)$$

где $k = G_A/q_A$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения заряда, расстояния и силы. Соотношение (4) называют **законом Кулона**. Чтобы выразить не только величину силы, но и ее направление, закон Кулона можно представить в векторной форме:

$$\vec{F}_{AB} = -k \frac{q_A q_B}{|\vec{r}_B - \vec{r}_A|^3} (\vec{r}_B - \vec{r}_A), \quad (5)$$

где \vec{F}_{AB} – вектор силы, действующий на заряд А со стороны заряда В, а $\vec{r}_{AB} = \vec{r}_B - \vec{r}_A$ – радиус – вектор, направленный от заряда А к заряду В.



Итак, пропорциональность силы взаимодействия двух точечных заряженных тел произведению их зарядов формально является следствием определения величины заряда, а фактически вытекает из того факта, что отношение сил взаимодействия двух зарядов с третьим зарядом не зависит от величины последнего.

Однако в своих опытах Кулон пошёл другим путём: он использовал дробление заряда.

Исходя из соображений симметрии, Кулон предполагал, что при соприкосновении металлического шарика, заряженного зарядом q , с незаряженным шариком такого же радиуса, электрический заряд разделяется на две равные части и на каждом из шаров оказывается заряд $q/2$. То, что заряд разделяется между двумя одинаковыми шарами поровну, действительно следует из соображений симметрии. Однако, из этого еще не следует, что на каждом из шаров оказывается заряд $q/2$. Это будет так только, если для электрических зарядов выполняется закон сохранения. Так как Кулону, несмотря на его не очень обоснованное предположение, удалось установить основной закон электростатики (4), то мы можем рассматривать его опыты одновременно и как первое экспериментальное подтверждение **закона сохранения электрических зарядов**. Последний в настоящее время тщательнейшим образом экспериментально проверен и формулируется следующим образом: *электрический заряд любого изолированного тела или изолированной системы тел со временем не изменяется*. Иными словами, изменение заряда тела или системы тел, находящихся в данной области пространства, может происходить только за счет перемещения каких-либо заряженных тел через границу рассматриваемой области.

Все свои опыты Кулон проводил в атмосферном воздухе, в котором взаимодействие зарядов ничтожно мало отличается от взаимодействия точечных зарядов в вакууме. Поэтому формулы (4) и (5) выражают закон взаимодействия точечных зарядов в вакууме.

Коэффициент пропорциональности в законе Кулона зависит от выбора единиц. При этом существует два основных подхода.

1. В системе CGS расстояние измеряют в сантиметрах, массу в граммах, время в секундах (соответственно единица измерения силы дина равна 10^{-5} Н). А единицу заряда выбирают таким образом, чтобы $k = 1$, т.е. так чтобы закон Кулона имел наиболее простую форму. Такая единица получила название *абсолютной электростатической единицы заряда* – это такой заряд, который действует в вакууме на равный ему заряд, удаленный на расстояние 1 см, с силой равной 1 дине.

2. В Международной системе единиц СИ единицей электрического заряда служит Кулон (Кл), который является величиной, производной от основной единицы СИ (единицы силы тока) – ампера. Кулон равен заряду (количеству электричества), проходящему через сечение проводника при силе постоянного тока 1 А за время 1 с. Определение единицы силы тока будет дано при рассмотрении магнитных явлений. Такой выбор единиц, противоречащий логике электродинамики, объясняется возможностями эксперимента. Современная техника обеспечивает измерение величины силы тока с существенно большей точностью, чем измерение величины заряда. Как показывает опыт, при таком выборе единиц электрического заряда

коэффициент пропорциональности k в выражении закона Кулона оказывается равным

$$k = 8,897 * 10^9 \text{ Н} * \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \approx 9 * 10^9 \text{ ед. СИ.}$$

Вместо коэффициента k часто используют **электрическую постоянную**

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8,854 * 10^{-12} \text{ Кл}^2 / \text{Н} * \text{м}^2.$$

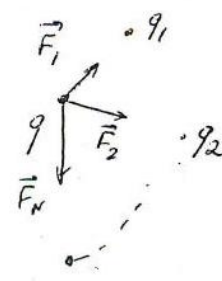
При этом закон Кулона записывается в виде:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Опыт показывает, что электростатическая (кулоновская) сила, действующая на **точечный заряд** со стороны системы **точечных зарядов**, равна векторной сумме кулоновских сил, которые действовали бы на этот заряд со стороны каждого из зарядов системы в отсутствии всех остальных зарядов системы:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Иными словами, для сил электростатического взаимодействия **точечных зарядов** справедлив **принцип суперпозиции**. Однако для заряженных протяженных тел принцип суперпозиции может не выполняться!



Понятие об электрическом поле. Напряженность электрического поля.

Взаимодействие зарядов по закону Кулона является экспериментально установленным фактом. Однако остается открытым вопрос, каким образом осуществляется действие одного заряда на другой. Великий английский физик Фарадей дал факту взаимодействия электрических зарядов следующее объяснение: вокруг каждого электрического заряда всегда существует **электрическое поле**. *Электрическое поле – непрерывный в пространстве материальный объект, создаваемый электрическими зарядами и способный действовать на другие электрические заряды.* Согласно этим представлениям взаимодействие зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и соответственно поля заряда q_2 на заряд q_1 . То, что электрическое поле объективно существует, следует из явлений, возникающих при ускоренном движении электрических зарядов. Этот вопрос будет рассмотрен позже, при рассмотрении электромагнитных волн.

Для количественной характеристики электрического поля служит специальная физическая величина – **напряженность электрического поля**.

Рассмотрим точечный электрический заряд величиной q . Согласно представлениям

Фарадея, он создает вокруг себя некоторое электрическое поле. Будем вносить в это электрическое поле другой точечный (пробный) заряд величиной q_0 . На пробный заряд q_0 будет действовать сила \vec{F} , различная в разных точках поля, которая согласно закону Кулона будет пропорциональна величине пробного заряда q_0 . Поэтому, если мы возьмем отношение этой силы к величине пробного заряда \vec{F}/q_0 , то величина этого отношения уже не будет зависеть от выбора пробного заряда и будет характеризовать электрическое поле, создаваемое зарядом q в той точке, где находится пробный заряд q_0 . Эта величина и получила название напряженности электрического поля \vec{E} точечного заряда q .

Рассмотрим теперь два точечных заряда q_1 и q_2 . Согласно принципу суперпозиции на пробный точечный заряд q_0 , помещенный в произвольную точку A , будет действовать сила

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2,$$

где \vec{F}_1 и \vec{F}_2 – силы, действующие на заряд q_0 со стороны зарядов q_1 и q_2 соответственно. Но по определению напряженности электрического поля точечного заряда

$$\vec{F}_1 = q_0 * \vec{E}_1 \text{ и } \vec{F}_2 = q_0 * \vec{E}_2,$$

где \vec{E}_1 – напряженность поля в точке A , создаваемая зарядом q_1 (когда q_2 нет вовсе), а \vec{E}_2 – напряженность поля в точке A , создаваемая зарядом q_2 (когда нет заряда q_1). Таким образом,

$$\vec{F} = q_0 * (\vec{E}_1 + \vec{E}_2).$$

Следовательно, величина $\vec{E} = \vec{F}/q_0$ не зависит от величины пробного заряда и характеризует электрическое поле, создаваемое в точке A двумя закрепленными точечными зарядами q_1 и q_2 , причём

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Аналогично можно показать, что для электрического поля, создаваемого любым числом N точечных зарядов, отношение силы \vec{F} , с которой электрическое поле действует на пробный точечный заряд q , к значению этого заряда, не зависит от выбора пробного заряда. Эта величина $\vec{E} = \vec{F}/q$ называется напряженностью электрического поля системы точечных зарядов. Причем

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N,$$

где \vec{E}_i ($i = 1, \dots, N$) – напряженность электрического поля, создаваемого зарядом q_i в отсутствии

всех остальных зарядов. Иными словами, напряженности электрических полей точечных зарядов также подчиняются **принципу суперпозиции**.

Из сказанного выше следует, что если известна напряженность электрического поля, создаваемого в какой-либо точке системой точечных зарядов, то тем самым определена и сила, действующая на электрический заряд q , помещенный в эту точку. А именно

$$\vec{F} = q * \vec{E}.$$

Как следует из определения, *направление вектора напряженности электрического поля совпадает с направлением вектора кулоновской силы, действующей на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля.*

В силу закона Кулона (5) и определения напряженность электрического поля, создаваемого в точке A с радиус – вектором \vec{r} точечным зарядом Q , помещенным в точку с радиус – вектором \vec{R} в системе СИ определяется формулой:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{|\vec{r} - \vec{R}|^3} (\vec{r} - \vec{R}).$$

