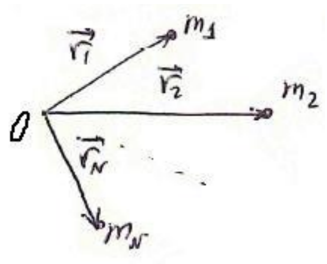
Лекция 5

Центр масс. Уравнение движения центра масс. Закон Кулона. Напряженность электрического поля

Центр масс. Уравнение движения центра масс

Рассмотрим N тел, взаимодействующих между собой и с другими телами (N – любое натуральное число). Если размерами каждого из них в условиях задачи можно пренебречь, т.е. каждое из них можно считать материальной точкой, то совокупность этих N тел называют *системой материальных точек (или частиц)*. Пусть положения всех этих N частиц в некоторой системе отсчета задается радиус – векторами $\boldsymbol{r}_1$, $\boldsymbol{r}_2$, …, $\boldsymbol{r}_N$, а их массы равны соответственно m_1, m_2, …, m_N.

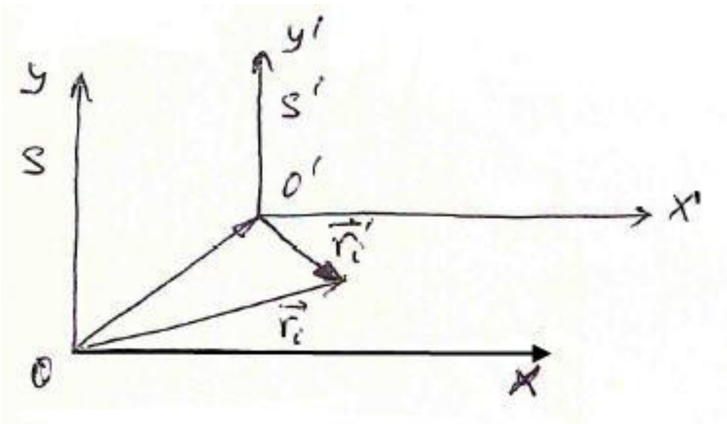


Определение. Центром масс системы N частиц называется такая точка C, радиус – вектор которой в данной системе отсчета определяется формулой

$$\vec{R}_C = \frac{m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2 + \ldots + m_N\vec{r}_N}{M} \equiv \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i\vec{r}_i\,, \qquad (1)$$

где $M = m_1 + m_2 + \ldots + m_N \equiv \sum_{i=1}^{N} m_i$ – общая масса системы частиц. Здесь для краткости использован знак $\sum_{i=p}^{N} f_i$, обозначающий суммирования по индексу i, изменяющемуся от p до N, величин f_p, f_{p+1}, …, f_N.

Замечание. Положение центра масс системы частиц относительно самой системы частиц не зависит от того, в какой системе отсчета его находить.



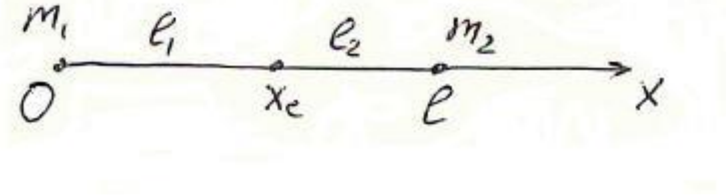
Доказательство. Пусть точка C – центр масс системы частиц в системе отсчета S с началом в точке О, связанной каким-либо образом с системой частиц, а точка B – центр масс системы частиц в другой системе отсчета S' с началом в точке О′. Тогда для любой частицы (и любой точки пространства) радиус – вектор $\vec{r}_i$ в системе отсчета S и радиус –

вектор $\vec{r}_i'$ в системе отсчета S' связаны соотношением: $\vec{r}_i = \vec{r}_i' + \overrightarrow{OO'}$. Поэтому

$$\vec{R}_C \equiv \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i (\vec{r}_i' + \overrightarrow{OO'}) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i' + \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \overrightarrow{OO'} = \vec{R}_B' + \overrightarrow{OO'} = \vec{R}_B.$$

И значит, точки C и B совпадают. Что и требовалось доказать.

В качестве примера найдём положение центра масс системы двух частиц массами m_1 и m_2, расположенных на расстоянии l друг от друга. Для простоты совместим начало координат с первой частицей и направим ось X по направлению ко второй частице.



Тогда из определения (1) имеем:

$$l_1 = X_C = \frac{m_1 * 0 + m_2 l}{m_1 + m_2} = \frac{m_2 l}{m_1 + m_2},\ l_2 = l - X_C = \frac{m_1 l}{m_1 + m_2},\ Y_C = Z_C = 0,$$

где l_1 и l_2 – расстояния от центра масс до первой и второй частицы соответственно. Таким образом, центр масс двух частиц лежит на отрезке, соединяющем эти частицы, и делит его на части обратно пропорциональные массам частиц: ${l_1}/{l_2} = {m_2}/{m_1}$.

Пусть теперь частицы рассматриваемой системы движутся с некоторыми скоростями, причём скорость частицы с номером i ($i = 1, 2, \ldots, N$) равна $\boldsymbol{V}_i$. Тогда за малый интервал времени dt все они совершат малые перемещения. При этом радиус – вектор частицы с номером i станет равен $\boldsymbol{r}_i(t) + \boldsymbol{V}_i\, dt$. Новому положению частиц будет соответствовать новое положение центра масс:

$$\vec{R}_C(t+dt) \equiv \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i (\vec{r}_i(t) + \vec{V}_i dt) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{r}_i(t) + \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{V}_i dt = \vec{R}_C(t) + \left(\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{V}_i\right) dt.$$

Т.е. перемещение центра масс за малое время dt будет равно

$$d\vec{R}_C = \vec{R}_C(t+dt) - \vec{R}_C(t) = \left(\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{V}_i\right) dt,$$

и, следовательно, скорость движения центра масс определяется следующей формулой:

$$\vec{V}_C \equiv \frac{d\vec{R}_C}{dt} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{V}_i, \qquad (2)$$

Действуя аналогично получим, что, если частицы движутся с ускорениями, то ускорение центра масс можно вычислить по формуле:

$$\vec{a}_C \equiv \frac{d\vec{V}_C}{dt} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{N} m_i \vec{a}_i, \qquad (3)$$

где $\vec{a}_i$ – ускорение i-й частицы (i = 1, 2, …, N).

Т.е. ускорение центра масс системы частиц определяется только массами и ускорениями частиц, входящих в систему. Но ускорения частиц, как известно, определяется действующими на них силами. И, следовательно, ускорение центра масс частиц будет зависеть от сил, действующих на частицы рассматриваемой системы. Чтобы разобраться в этом подробнее, рассмотрим детально систему, состоящую из трех частиц.

Пусть на i-ю частицу системы (i = 1, 2, 3) со стороны j-й частицы (j = 1, 2, 3, $j \neq i$, т.к. частица сама на себя не действует) действуют так называемые внутренние силы $\boldsymbol{F}_{ij}$, и со стороны тел, не входящих в рассматриваемую систему частиц, действует внешняя сила $\boldsymbol{F}_{i,внеш}$. Запишем II закон Ньютона для каждой из частиц системы:

$$m_1\boldsymbol{a}_1 = \boldsymbol{F}_{12} + \boldsymbol{F}_{13} + \boldsymbol{F}_{1,внеш},$$

$$m_2\boldsymbol{a}_2 = \boldsymbol{F}_{21} + \boldsymbol{F}_{23} + \boldsymbol{F}_{2,внеш},$$

$$m_3\boldsymbol{a}_3 = \boldsymbol{F}_{31} + \boldsymbol{F}_{32} + \boldsymbol{F}_{3,внеш}.$$

В результате сложения всех трёх уравнений получим:

$$\sum_{i=1}^{3} m_i \vec{a}_i = \left(\vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32}\right) + \sum_{i=1}^{3} \vec{F}_{i,внеш}. \qquad (4)$$

Слева в (4) в силу (3) стоит произведение полной массы M системы частиц на ускорение её центра масс. Первая сумма в правой части – сумма всех внутренних сил. Она равна нулю, т.к. для любых i,j = 1, 2, 3 ($j \neq i$) наряду с силой $\boldsymbol{F}_{ij}$ в сумму входит также и сила $\boldsymbol{F}_{ji}$, и в силу III закона Ньютона $\boldsymbol{F}_{ij} = -\boldsymbol{F}_{ji}$. В частности, в рассматриваемом случае трех частиц $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, $\vec{F}_{13} = -\vec{F}_{31}$, $\vec{F}_{23} = -\vec{F}_{32}$. Поэтому из (4) имеем следующее уравнение движения центра масс системы из трех частиц:

$$M\,\vec{a}_C \equiv M\,\frac{d\vec{V}_C}{dt} = \sum_{i=1}^{3} \vec{F}_{i,внеш}. \qquad (5)$$

Этот результат очевидным образом обобщается на систему, состоящую из любого числа N

частиц. В результате получим следующее **уравнение движения центра масс** произвольной системы частиц:

$$M\,\vec{a}_C \equiv M\,\frac{d\vec{V}_C}{dt} = \sum_{i=1}^{N} \vec{F}_{i,внеш}. \qquad (6)$$

Таким образом, *центр масс системы частиц общей массой М движется так, как двигалась бы материальная точка массы М под действием силы, равной геометрической сумме всех внешних сил, действующих на входящие в систему частицы. Внутренние силы не влияют* ***непосредственно*** *на ускорение центра масс в каждый момент времени*. Однако внутренние силы могут влиять на движение центра масс ***косвенно***, меняя положение и скорости частиц системы и тем самым, меняя действующие на них силы.

Иными словами: *Внутренние силы, действующие в любой момент времени* t_0 *не влияют на ускорение центра масс* ***в этот же*** *момент времени. Но они могут* ***косвенно*** *влиять на ускорение центра масс в последующие моменты времени* ($t > t_0$), т.к. меняют расположение и скорости движения частиц системы, от которых могут зависеть внешние силы.

Пример. Небольшой кубик массой m лежит в центре тонкой доски массой M, покоящейся на горизонтальной поверхности большого стола. В момент времени $t = 0$ на доску начинает действовать горизонтальная сила F. Через время τ после этого кубик соскакивает с доски. Найдите зависимость ускорения центра масс системы «доска и кубик» от времени. Коэффициент трения доски о поверхность стола равен μ, кубика о доску – μ_1, а кубика о поверхность стола – μ_2.

Решение. Найдем скорость кубика относительно стола в момент его соскакивания с доски. Т.к. на кубик до его соскакивания с доски действует только постоянная сила трения скольжения о доску (сонаправленная силе F), то его ускорение постоянно и равно $a = \mu_1 mg/m = \mu_1 g$. Поэтому в момент соскакивания с доски кубик будет иметь скорость $V = a\tau = \mu_1 g\tau$. Пока кубик движется по доске, на доску действует сила трения скольжения $F_{тр1} = \mu(M + m)g$, противоположная силе F. Поэтому ускорение центра масс системы «доска и кубик» в этот интервал времени будет равно $a_1 = (F - \mu(M + m)g)/(M + m) = F/(M + m) - \mu g$. После соскакивания кубика, на доску и кубик будет действовать суммарная сила трения скольжения $F_{тр2} = (\mu M + \mu_2 m)g$. Поэтому ускорение центра масс системы «доска и кубик» в этот интервал времени будет равна $a_2 = (F - (\mu M + \mu_2 m)g)/(M + m)$. Через время $\Delta = V/(\mu_2 g) = \mu_1\tau/\mu_2$ кубик остановится, действующая на него сила трения станет равной нулю, на доску по-прежнему будет действовать сила трения скольжения $F_{тр3} = \mu Mg$, а ускорение центра масс будет равно $a_2 = (F - \mu Mg)/(M + m)$. Видно, что во всех трех случаях ускорение центра масс не зависит от силы трения между кубиком и доской (от μ_1). Но временной интервал, в течение которого ускорение центра масс будет равно a_2, прямо пропорционален μ_1, т.е. определяется величиной внутренней силы (силы трения между кубиком и доской).

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 же появляется у тел то или иное электричество. Окончательный ответ на этот вопрос был получен лишь 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 в точности 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 одного тела к другому, то одно тело приобретает отрицательный электрический заряд, а второе – положительный.

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

Прежде всего, отметим, что для заряженных тел произвольных размеров такой закон в общей 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 зарядам, 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. Сила взаимодействия заряженных шаров определялась по углу поворота стеклянной палочки, закручивающей нить подвеса. Расстояние между центрами шаров нетрудно было измерить.

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*:

$$F_{AB} \sim \frac{1}{R^2}. \qquad (7)$$

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. Заменим 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*:

$$\frac{q_B}{q_C} = \frac{F_{AB}}{F_{AC}} \qquad (8)$$

Подчеркнём, что возможность такого определения следует из экспериментально установленного факта не зависимости правой части (8) от степени заряженности частицы A (лишь бы она была хоть как-то заряжена).

Заметим, что соотношение (8) является конструктивным определением, т.к. указывает прямой способ сравнения величин двух точечных зарядов.

С другой стороны, соотношение (8) можно интерпретировать несколько иначе, переписав его с учетом (7) в виде:

$$\frac{F_{AB}}{q_B} = \frac{F_{AC}}{q_C} = \frac{G_A}{R^2}, \qquad (9)$$

где G_A – некоторый коэффициент пропорциональности, зависящий только от степени заряженности частицы A (он не может зависеть, например, от степени заряженности частицы C, т.к. первое отношение в (9) от неё не зависит). Соотношение (9) наглядно показывает, что при введенном выше определении величины заряда сила взаимодействия двух шариков (точечных зарядов) оказывается пропорциональной заряду одного из шариков:

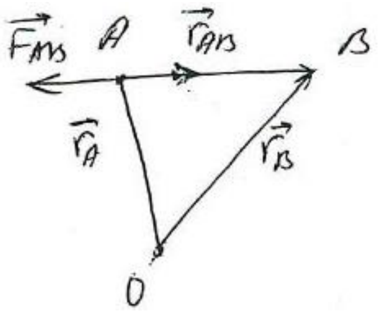
$$F_{AB} = \frac{G_A}{R^2} q_B.$$

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:

$$F_{AB} = k\frac{q_A\, q_B}{R^2} \qquad (10)$$

где $k = G_A/q_A$ – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения заряда, расстояния, силы. Соотношение (10) называют **законом Кулона**. Чтобы выразить не только величину силы, но и ее направление, закон Кулона можно представить в векторной форме:

$$\overrightarrow{F_{AB}} = -k\frac{q_A q_B}{|\vec{r}_B - \vec{r}_A|^3}(\vec{r}_B - \vec{r}_A) \qquad (11)$$



где $\overrightarrow{F_{AB}}$ – вектор силы, действующий на заряд A со стороны заряда B, а $\overrightarrow{r_{AB}} = \vec{r}_B - \vec{r}_A$ – радиус – вектор, направленный от заряда A к заряду B.

Ещё раз подчеркнём, что в приведенном подходе 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. Следует, однако, иметь в виду следующее. Утверждение о том, что заряд разделяется между двумя одинаковыми шарами поровну, действительно следует из соображений симметрии. Однако, из того, что заряды разделились между шарами поровну, 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 (10), 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.

Подчеркну, что все описанные выше опыты, приведшие к получению закона Кулона, проводились в атмосферном воздухе, в котором взаимодействие зарядов ничтожно мало отличается от взаимодействия точечных зарядов в вакууме. Поэтому формулы (10) и (11) 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 1см, 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 1А за время 1с. 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

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

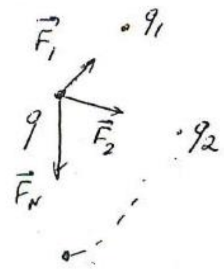
Вместо коэффициента *k* часто используется **электрическая постоянная**

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8{,}854 * 10^{-12}\ {}^{\text{Кл}^2}\!/_{\text{Н} * \text{м}^2}.$$

При этом закон Кулона записывается в виде:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} * \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

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



$$\vec{F} = \vec{F_1} + \vec{F_2} + \cdots + \vec{F_n}.$$

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 при этом 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

$$\vec{F} = \overrightarrow{F_1} + \overrightarrow{F_2},$$

где $\overrightarrow{F_1}$ и $\overrightarrow{F_2}$ – силы действующие на заряд q_0 со стороны зарядов q_1 и q_2 соответственно. Но по определению напряженности электрического поля точечного заряда

$$\overrightarrow{F_1} = q_0 * \overrightarrow{E_1} \text{ и } \overrightarrow{F_2} = q_0 * \overrightarrow{E_2},$$

где $\overrightarrow{E_1}$ – напряженность поля в точке A, создаваемая зарядом q_1 (когда q_2 нет вовсе), а $\overrightarrow{E_2}$ – напряженность поля в точке A, создаваемая зарядом q_2 (когда нет заряда q_1). Таким образом,

$$\vec{F} = q_0 * \overrightarrow{(E_1 + E_2)}.$$

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, причем

$$\vec{E} = \overrightarrow{E_1} + \overrightarrow{E_2},$$

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

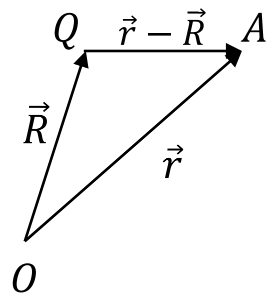
$$\vec{E} = \overrightarrow{E_1} + \overrightarrow{E_2} + \cdots + \overrightarrow{E_N},$$

где $\overrightarrow{E_i}$ (i = 1, …, 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

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

Заметим также, что 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*.



Из закона Кулона следует, что напряженность электрического поля, создаваемого в точке A с радиус – вектором ***r*** точечным зарядом Q, помещенным в точку с радиус – вектором ***R*** в системе СИ определяется следующей формулой:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{\left|\vec{r} - \vec{R}\right|^3}(\vec{r} - \vec{R}). \qquad (12)$$