

1 ВВЕДЕНИЕ. ЗАКОН КУЛОНА. ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

Современной науке известны *четыре вида взаимодействия* материальных объектов: гравитационное, электромагнитное, сильное (ядерное) и слабое. Все они играют очень важную роль в природе, а теория, описывающее каждое взаимодействие, имеет основополагающее значение в физике.

Гравитационные силы являются заметными, как правило, если хотя бы одно из взаимодействующих тел имеет астрономический масштаб, то есть является, например, звездой или планетой. В гравитационном взаимодействии участвуют все тела в природе, и силы тяготения действуют при любых расстояниях между телами. Гравитационное взаимодействие обеспечивает устойчивость тел на Земном шаре, связывает Солнце и планеты в Солнечной системе и объединяет звезды в галактиках.

Ядерные, или сильные взаимодействия проявляются при сближении элементарных частиц на очень малые расстояния, порядка 10^{-15} м и меньше. Сильное взаимодействие связывает протоны и нейтроны (нуклоны) в ядрах всех атомов.

Слабые взаимодействия значительны, в основном, в микромире и играют очень важную роль при взаимопревращениях элементарных частиц. Слабое взаимодействие обладает очень малым радиусом действия, порядка 10^{-18} м, при удалении частиц слабое взаимодействие становится несущественным. Слабое взаимодействие не обладает способностью создавать устойчивые состояния вещества, в отличие от других взаимодействий. Примером частицы, которая обладает лишь слабым взаимодействием, является нейтрино. Процессы слабого взаимодействия с испусканием нейтрино играют очень важную роль в эволюции звезд. Без слабого взаимодействия были бы невозможными процессы превращения элементарных частиц, которые являются основным источником энергии Солнца и большинства звезд.

В пространственных масштабах, в которых проходит наша повседневная жизнь, очень значительно проявляется *электромагнитное взаимодействие*. Используя закон всемирного тяготения и закон Кулона, который будет рассмотрен ниже, можно сравнить гравитационные и электростатические силы. Для двух электронов отношение электростатической силы к гравитационной имеет порядок 10^{42} , для двух протонов, которые являются более тяжелыми частицами, это отношение сил составляет величину порядка 10^{36} . Электромагнитное взаимодействие обеспечивает стабильное положение электронов в атомах и удерживает в равновесии атомы в молекулах и кристаллах. Электромагнитные силы играют важную роль в химических и биологических процессах. Поэтому электромагнитные явления имеют большое практическое значение для жизнедеятельности человека. Солнечный свет, который представляет собой электромагнитное излучение, является одним из необходимых условий существования жизни на Земле. Силы упругости и трения, часто встречающиеся в быту, имеют, в конечном

счете, электромагнитную природу. Электрический ток незаменим в настоящее время в производстве, на транспорте и в быту. Телевидение, радио и телефонная связь используют электромагнитные волны для передачи сигналов. Действие персональных компьютеров, а также других современных устройств для получения, передачи, хранения и обработки информации, основано на использовании широкого круга электромагнитных явлений.

Теория электромагнетизма занимает одно из самых важных мест в современной науке. В рамках электромагнетизма впервые возникло и было развито понятие *поля* как материального объекта. В этом состоит общеприкладное и мировоззренческое значение электромагнитной теории.

Удивительным свойством электромагнитной теории является то, что законы электромагнетизма выполняются как на очень больших расстояниях, в масштабах Вселенной, так и в микромире, когда расстояния между взаимодействующими частицами становятся гораздо меньше размеров атома. В микромире проявляются, с одной стороны, волновые свойства частиц и с другой стороны, квантовые свойства полей. Поэтому для описания электромагнитных явлений в микромире используется квантовая электродинамика - очень точная и совершенная квантовая теория.

Электрические заряды. Тела участвуют в электрическом взаимодействии вследствие того, что они обладают *электрическими зарядами*. Заряд можно рассматривать как количественную меру электрического взаимодействия. Для любой элементарной частицы электрический заряд является одной из ее основных, фундаментальных характеристик, такой же важной, как масса частицы. Понятие «электрический заряд» в электромагнетизме является первичным, природа электрического заряда не может быть понята в рамках общей физики. Основные свойства электрического заряда следуют из опыта.

Во-первых, существует *два вида электрического заряда*: положительный и отрицательный. Еще в древности было известно, что тела могут приобретать электрические заряды в результате трения одного тела о другое. Например, если стекло потереть о шелк, то на стекле появляются электрические заряды, которые называли положительными. Если же эбонит потереть о мех, то эбонит приобретает заряды, которые называли отрицательными. Одним из веществ, способным легко электризоваться при трении о шерсть, является янтарь. Именно от греческого слова «электрон», что означает янтарь, и произошел термин «электричество», которым мы пользуемся в настоящее время.

Позднее ученые поняли, что для электризации тел необходим их тесный контакт, который достигается в результате взаимного трения. Как следует из опыта, одноименные заряды отталкиваются, а разноименные - притягиваются. Поэтому, по-видимому, два вида электрических зарядов существуют в природе для того, чтобы обеспечивать устойчивость атомов, молекул, молекулярных соединений и т.д.

Во-вторых, существует минимальное значение электрического заряда, так называемый *элементарный заряд*. В международной системе единиц СИ

элементарный электрический заряд имеет величину

$$e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (1.1)$$

Впервые элементарный заряд был измерен Р.Миллекеном в 1909 г., и затем его значение было уточнено в различных экспериментах. Современная теория предполагает, что электрон не имеет структуры, однако протон и нейтрон состоят в свою очередь из более мелких частиц, так называемых **кварков**, которые обладают дробным электрическим зарядом. Однако до настоящего времени кварки в свободном состоянии, то есть отдельно друг от друга, обнаружены не были. Поэтому мы вынуждены рассматривать значение e как минимально возможную порцию электрического заряда, встречающуюся в природе.

Отсюда следует, что электрический заряд любого тела должен быть кратным элементарному заряду:

$$q = ne, \quad (1.2)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$, и так далее.

Это свойство называется **дискретностью электрического заряда**.

Третьим важным свойством электрического заряда является его сохранение в любой электрически изолированной системе. В такой замкнутой системе алгебраическая сумма электрических зарядов не изменяется с течением времени при любых взаимопревращениях элементарных частиц. **Закон сохранения электрического заряда** является одним из фундаментальных законов природы. Электрический заряд не может существовать отдельно от своего носителя - элементарной частицы. В то же время заряд является в определенном смысле величиной самостоятельной, поскольку не изменяется при взаимопревращениях его носителей.

В-четвертых, величина электрического заряда не зависит от скорости движения заряженной частицы. Другими словами, заряд частицы является релятивистски-инвариантной величиной, то есть величина заряда одинакова во всех инерциальных системах отсчета. Независимость величины заряда от скорости движения его носителя является опытным фактом и подтверждается, в частности, электрической нейтральностью атомов. Связанное состояние электронов в атоме обеспечивается благодаря кулоновской силе притяжения электронов к ядру. В тяжелых атомах, ядра которых имеют большой электрический заряд, эта сила значительно возрастает. Следовательно, увеличиваются центростремительное ускорение и скорость движения электронов в атоме. Как показывают расчеты, в тяжелом атоме, например, атоме урана, скорость электронов может достигать величины порядка половины скорости света. В то же время протоны являются более тяжелыми и инертными частицами по сравнению с электронами и движутся внутри ядра с малыми скоростями даже в тяжелых

атомах. Если бы величина заряда частицы зависела от скорости её движения, то суммарный заряд электронов в тяжелом атоме не был бы скомпенсирован зарядом ядра. Однако опыт показывает, что как легкие, так и тяжелые атомы являются электрически нейтральными. Этот факт подтверждает **инвариантность электрического заряда**, то есть независимость величины заряда от скорости движения частицы.

Закон Кулона. **Закон Кулона** был установлен в 1785 г. и относится к основным законам электричества. Этот закон описывает взаимодействие точечных частиц, то есть таких частиц, размерами которых можно пренебречь по сравнению с расстоянием между ними. Согласно закону Кулона, сила взаимодействия двух покоящихся точечных частиц с зарядами q_1 и q_2 , находящихся в вакууме на расстоянии r друг от друга, имеет вид:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^3} \vec{r}_{12}, \quad (1.3)$$

где \vec{F}_{12} - сила, с которой первая частица действует на вторую, эта сила приложена ко второй частице;

q_1 и q_2 - заряды взаимодействующих частиц;

\vec{r}_{12} - радиус-вектор, проведенный от первой частицы ко второй;

$\epsilon_0 = (4\pi \cdot 9 \cdot 10^9)^{-1}$ Ф/м – электрическая постоянная;

фарад (Ф) – единица измерения электроёмкости, которая будет введена ниже, по мере изложения материала.

Векторная запись закона Кулона (1.3) означает, что сила взаимодействия двух покоящихся точечных заряженных частиц прямо пропорциональна произведению их зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена вдоль линии, соединяющей частицы. При этом разноименные заряды притягиваются, а одноименные отталкиваются. Коэффициент пропорциональности в формуле (1.3) зависит от выбора системы единиц измерения физических величин, в данном случае он записан для международной системы СИ. При использовании другой системы единиц коэффициент пропорциональности в формуле (1.3) может изменяться, однако характер зависимости силы взаимодействия от величины зарядов и расстояния между частицами остаётся прежним.

Формула (1.3) записана для случая, когда взаимодействующие частицы находятся **в вакууме**, то есть в пространстве, не содержащем вещества. Следует отметить, что очень многие электромагнитные явления, проявляющиеся в нашей повседневной жизни, происходят не в вакууме, а в воздухе. Однако ниже будет показано, что электромагнитные свойства воздуха, находящегося при обычных условиях, очень близки к свойствам вакуума. Поэтому законы электромагнетизма, сформулированные для вакуума, могут быть с высокой степенью точности применены для электромагнитных явлений, наблюдаемых в воздухе.

В международной системе СИ единицей измерения величины электрического заряда является кулон [Кл]. Далее мы увидим, что величина электрического заряда связана с силой электрического тока:

$$1\text{Кл} = 1\text{А} \cdot 1\text{с}. \quad (1.4)$$

Здесь ампер [А] - единица измерения силы тока.

Закон Кулона полностью описывает взаимодействие двух частиц, если они покоятся или только одна из них движется равномерно. В случае равномерного движения обеих частиц возникает дополнительно магнитное взаимодействие. В то же время электрические силы, действующие между равномерно движущимися частицами, по – прежнему подчиняются закону Кулона.

До работ Фарадея закон Кулона трактовался с позиции **дальнегодействия** или действия на расстоянии, то есть считалось, что одно тело действует на другое без посредников. В 1831 – 1855 гг. Фарадеем была развита теория **близкогодействия**, согласно которой взаимодействие между телами осуществляется лишь путем непрерывной "передачи сил" через пространство между телами с помощью посредника.

В результате борьбы концепций дальнегодействия и близкогодействия в науку вошло представление о поле как посреднике, осуществляющем взаимодействие. Поле существует в пространстве и времени, как и вещество, является формой существования материи, обладает свойствами материи - энергией, импульсом и т.д.

Основной характеристикой электрического поля является **напряженность**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, \quad (1.5)$$

где q - заряд некоторой частицы, находящейся в поле;

\vec{F} - сила, действующая на частицу со стороны поля и приложенная к частице.

Из формул (1.3) и (1.5) следует, что напряжённость не зависит от заряда частицы, находящейся в поле, и характеризует само электрическое поле. Это свойство напряжённости проявляется не только при взаимодействии двух точечных зарядов, но и для любых электрических полей.

Для получения наглядной картины распределения электрического поля в пространстве вводят понятие **силовых линий**, которые обладают двумя основными свойствами. Во-первых, вектор напряженности электрического поля \vec{E} всегда направлен по касательной к силовой линии. Во-вторых, густота силовых линий численно равна величине напряженности электрического поля. Чтобы определить величину напряжённости электрического поля, необходимо построить поверхность, перпендикулярную силовым линиям в выбранной области пространства.

Число силовых линий, пересекающих единицу площади этой поверхности, численно равно величине напряжённости электрического поля. Силовые линии называют также *линиями напряжённости* электрического поля.

Необходимо ввести понятие *пробного заряда*. Это такой точечный заряд, который используется для измерения напряженности поля. Предполагается, что при помещении пробного заряда в рассматриваемую точку пространства значение напряженности поля не изменяется. Это означает, что не изменяется расположение заряженных частиц, создающих исследуемое поле.

Из формулы (1.5) следует, что напряженность является силовой характеристикой электрического поля. Напряженность поля измеряется в единицах Н/Кл.

Закону Кулона может быть дана *полевая трактовка* в виде следующих двух утверждений:

1) Произвольный точечный заряд q_1 , находящийся в вакууме, создает в окружающем его пространстве электрическое поле с напряженностью \vec{E}

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r^3} \vec{r}, \quad (1.6)$$

где \vec{r} - радиус-вектор, проведенный от заряда в точку наблюдения.

2) На произвольный точечный заряд q , находящийся в электрическом поле с напряженностью \vec{E} , со стороны этого поля действует сила

$$\vec{F} = q\vec{E}. \quad (1.7)$$

Физический смысл полевой трактовки закона Кулона состоит в том, что электрическое поле рассматривается как материальный объект, который играет роль посредника при взаимодействии электрических зарядов. Следует особо отметить, что понятия поля и заряда неразрывно связаны друг с другом. Поле создается зарядами и проявляет себя действием на заряды. Взаимосвязанность поля и заряда приводит к тому, что сила вычисляется как произведение заряда на напряженность поля. А именно сила является физической величиной, которая может быть измерена на эксперименте.

Принцип суперпозиции полей. **Принцип суперпозиции** является обобщением экспериментальных данных и может быть сформулирован следующим образом: сила, действующая на заряженную частицу со стороны других частиц, равна векторной сумме сил, действующих на неё со стороны каждой из частиц при отсутствии всех других:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i. \quad (1.8)$$

Таким образом, электростатические силы складываются, не влияя друг на друга. Если изменяется количество взаимодействующих частиц, то изменяется количество слагаемых в формуле (1.8), изменяется также результирующая сила, однако каждое слагаемое остается неизменным.

Полевая формулировка принципа суперпозиции:

$$\vec{E} = \sum_i \vec{E}_i. \quad (1.9)$$

Напряженность электрического поля, создаваемого несколькими заряженными частицами в любой точке пространства, равна векторной сумме напряженностей полей всех зарядов, причем напряженность каждого поля вычисляется при условии отсутствия всех других полей. Это означает, что электрические поля складываются, не искажая друг друга. Принцип суперпозиции позволяет вычислить силу взаимодействия произвольного количества заряженных частиц. Для этого необходимо мысленно разбить рассматриваемую систему точечных частиц на пары и для каждой пары частиц применить закон Кулона, а затем сложить все силы, действующие на некоторую частицу.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. Ф. СКОРНИНЫ