

Рийна Мурулайд

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Учебник для гимназии

Издатель подтверждает соответствие учебника Государственной программе обучения для гимназии и требованиям, предъявляемым Министерством образования и науки к учебной литературе.

Рийна Мурулайд

Электромагнетизм

Учебник для гимназии

Рецензенты Калев Таркпеа (глава 1), Яна Михайлишина и Тоомас Рейманн

Редактор Кайдо Рейвельт

Рисунки Нильс Ауста

Перевод на русский язык Алексей Гаврилов

Корректурa Ирина Логвина

Вёрстка Хейси Вальяк

Фотографии: Нильс Ауста, Рийна Мурулайд, Микк Нооркыйв, Кайдо Рейвельт

ISBN 978-9916-663-12-7

Авторское право: Maurus Kirjastus OÜ

Первое издание: 2021

Печать: Printon OÜ

Kirjastus Maurus

Tartu mnt 74, 10144 Tallinn

Telefon 5919 6117

www.kirjastusmaurus.ee

tellimine@kirjastusmaurus.ee

Все права на данное издание защищены законом. Без письменного согласия владельца авторского права не разрешается размножение (как механическим методом, так и другими методами) любой части данного издания.

Содержание

Введение	7
1. Электрическое поле	8
1.1. Электрический заряд	9
1.2. Закон Кулона	13
1.3. Электрическое поле	17
1.4. Электрический ток и сила тока	26
1.5. Работа и энергия электрического поля	29
1.6. Потенциал и напряжение электрического поля	33
1.7. Напряженность электрического поля и напряжение	39
1.8. Конденсатор	44
Повторяем!	51
2. Магнитное поле	57
2.1. Постоянный магнит	58
2.2. Магнитное поле проводника с током	62
2.3. Магнитная индукция и магнитная сила, действующая на проводник с током	64
2.4. Электромотор	70
2.5. Магнитная сила между двумя проводниками с током. Закон Ампера	73
2.6. Действие магнитного поля на движущуюся заряженную частицу. Сила Лоренца	75
2.7. Генерирование электрического тока	81
2.8. Индукционный закон Фарадея	85
2.9. Генератор	91
2.10. Энергия магнитного поля	94
Повторяем!	97
3. Электромагнитное поле	103
3.1. Генерирование электромагнитных волн	104
3.2. Величины, описывающие электромагнитные волны	107
3.3. Спектр электромагнитных волн	111
3.4. Поглощение электромагнитных волн в атмосфере	116
3.5. Поляризация электромагнитных волн	118
3.6. Интерференция электромагнитных волн	122
3.7. Дифракция	126
3.8. Преломление электромагнитных волн	131
3.9. Спектральный анализ	138
3.10. Источники света	145
3.11. Энергия электромагнитных волн и фотон	149
Повторяем!	154
Ответы к упражнениям, которые требуют вычислений	161
Предметный указатель	164

Введение для гимназистов

Вы открыли учебник по физике для гимназии, рассчитанный на прохождение курса «Электромагнетизм». Учебник содержит три главы: «Электрическое поле», «Магнитное поле» и «Электромагнитное поле». В каждой главе вы найдете как теоретические основы, так и практические примеры по соответствующим темам, которые, помимо физики, связаны также с медициной, музыкой, техникой, химией, биологией и с многими другими областями.

Учебник содержит 29 подглав, в каждой из которых можно выделить следующие части:

- Теоретическая часть – черный шрифт на белом фоне – содержит формулы и рисунки, важные для понимания и усвоения данной темы;
- Задачи, приведенные в качестве примеров, и опыты – черный шрифт на светло-зеленом фоне. Задачи зачастую являются и практическими примерами. Опыты можно повторить самостоятельно и изучить, или познакомиться с ними посредством видео;
- Практические применения и примеры использования – черный шрифт на светло-оранжевом фоне. Они делают рассматриваемую тему более живой и раскрывают связь физики с другими областями;
- Упражнения в конце каждой главы напечатаны черным шрифтом на синем фоне. Ответы на упражнения, требующие вычислений, даны в конце учебника.

«ПОВТОРЯЕМ!» – каждая большая тема заканчивается частью, в которой повторяется пройденное. Она состоит из теоретического резюме, содержащего определение, формулы, примеры и рисунки.

Если вы желаете

- 1) знать, как работают, например, рентгеновский аппарат, электрическая гитара, шумоподавляющие наушники;
- 2) понять, как спектры и такие явления, как дифракция и поляризация, помогут расширить наш кругозор и как этому будут способствовать приобретенные знания о мире микрочастиц, Вселенной или нашей Земли;
- 3) понять, как работают электромоторы, конденсаторы и генераторы,

то этот учебник именно для вас!

С большим уважением,

Рийна Мурулайд

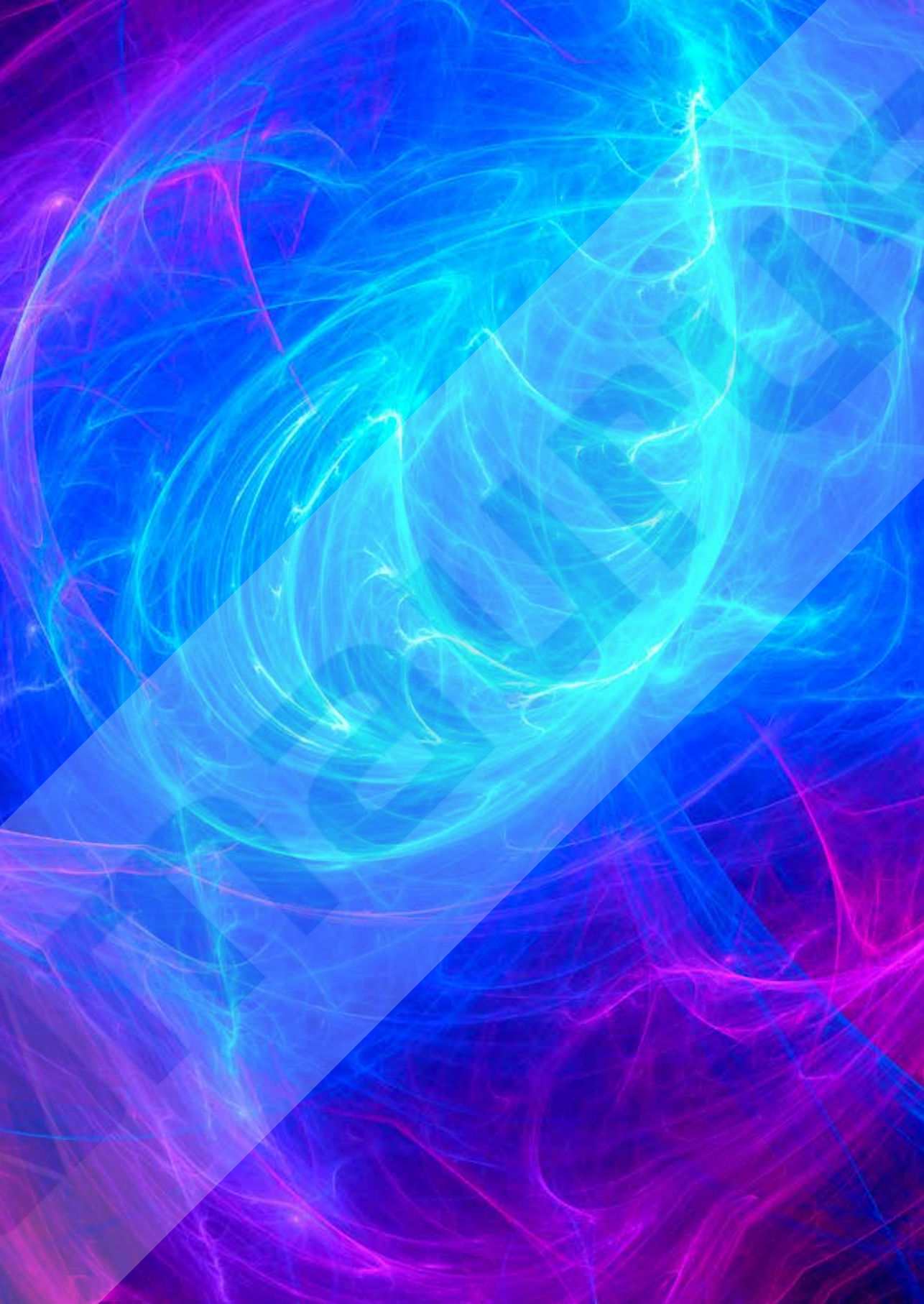
От переводчика

При переводе учебника переводчик старался точно следовать эстонскому оригиналу. В некоторых случаях оказалось необходимым познакомить читателя с русскими физическими терминами или пояснить, что означает тот или иной эстонский термин.

Полные названия единиц измерения физических величин приведены на русском языке, сокращенные же обозначения используются международные, так как они совпадают с сокращениями, принятыми в эстонской физической литературе (принятые в русской физической литературе сокращения единиц измерения можно легко найти в интернете).

Например: единицей работы является джоуль (сокращенно J), единицей силы является ньютон (сокращенно N) и так далее.

Алексей Гаврилов



Введение

«Находимся в информационном поле», «предстоит большое поле работ», «колышется в поле пшеница» – такие высказывания встречаются нам как в повседневных разговорах, так и в газетах и художественной литературе. В современной науке понятие **«поле»** имеет большое значение. Вместе с понятиями **«энергия», «атом», «скорость»** это слово входит в множество терминов, которые встречаются в большинстве научных и научно-популярных публикаций по физике.

С понятием «поле» мы сталкивались уже ранее – в основной школе. На уроках в 9 классе затрагивалось учение об электричестве, говорилось как об электрическом, так и о магнитном полях. Эти поля связывались с действующими в них силами. В основной школе в курсе механики мы познакомились с силой тяжести, а в гимназии в курсе механики добавилось еще понятие «гравитационное поле».

В этом учебнике будет рассматриваться электромагнитное поле, объясняющее электромагнитные явления. Если подробно изучить одно из вышеупомянутых полей, то можно сделать выводы и насчет других. Так, у всех полей имеется общее свойство, вызывающее взаимодействие (тел). Также все поля распространяются в пространстве с абсолютной скоростью $c = 299792458 \text{ m/s}$. В одной и той же точке пространства могут сосуществовать несколько различных полей. Если вещество относительно просто исследовать и воспринимать, то с полями дело обстоит сложнее. В то же самое время выяснить наличие магнитного поля (и исследовать его) проще других – чтобы сблизить между собой одноименные полюса магнита, нужно приложить силу, которая может быть довольно значительной. Образно говоря, во время сближения полюсов между магнитами можно почувствовать упругую область. В этой области и располагается магнитное поле, и мы чувствуем его посредством прикладываемой силы. Мы привели два магнита во взаимодействие друг с другом, и это взаимодействие осуществляется с помощью магнитного поля.

1.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Рентгеновская трубка

Цель: ускорение электронов

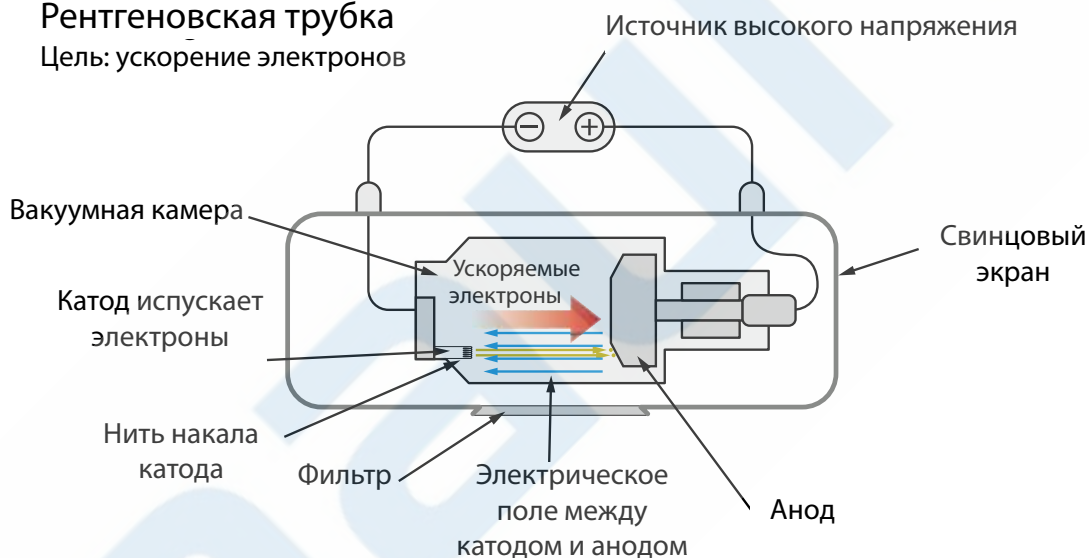


Рис. 1.1. Принцип действия рентгеновской трубки.

Электрическое поле используется для ускорения заряженных частиц. Одним из самых известных ускорителей электронов является **рентгеновская трубка** (в эстонском языке она также называется рентгеновской лампой – прим. переводчика). В рентгеновской трубке с помощью очень сильного электрического поля ускоряются испускаемые катодом электроны. Приобретая большую кинетическую энергию, электроны сталкиваются с анодом. Кинетическая энергия электронов при очень сильном торможении преобразуется в энергию рентгеновского излучения. С помощью специального фильтра выделяется рентгеновское излучение с более низкой энергией, которое, поглощаясь, не повреждало бы ткани. Таким образом выделяют рентгеновское излучение, которое подходит для получения рентгеновских снимков.

1.1. Электрический заряд



Крестным отцом терминов «положительный» и «отрицательный» заряды можно считать Бенджамина Франклина (1706–1790), который одновременно является изобретателем громоотвода, а также одним из авторов Декларации о независимости Соединенных Штатов Америки. Франклин назвал положительным электричеством электрический заряд, возникающий на стеклянной палочке, потертой шелковой тканью. Электрический же заряд, возникающий на эбонитовой палочке, потертой мехом, он назвал отрицательным электричеством.

Заряжание тел связано с перераспределением свободных электронов в телах. Если в обычно нейтральном теле имеется избыток электронов, то тело заряжено **отрицательно**, а если нейтральное тело отдало часть электронов, то оно заряжено **положительно**.

Допустим, мы имеем дело с двумя металлическими шариками. Зарядим один из них положительно, а другой отрицательно. Заряды можно получить, используя способы Франклина, описанные выше. Поскольку шарики заряжены разноименными зарядами, между ними возникает сила притяжения. В металле внешние атомные электроны могут передвигаться в пределах всего тела. Таким образом, из-за **электрических сил** заряды располагаются вокруг шариков (рис.1.2). Электрические силы действуют как между заряженными телами, так и между находящимися в металле электронами. В обоих случаях эти силы передаются электрическим полем.



Рис. 1.2. Притяжение разноименно заряженных шариков.

Если снова зарядить нейтральные шарики – на этот раз одноименно, например, отрицательным зарядом, то между ними возникнет сила отталкивания (рис. 1.3). Заряды на поверхности металлических шариков также изменят свое местоположение.

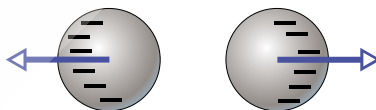


Рис. 1.3. Отталкивание одноименно заряженных металлических шариков.

Возьмем третий случай. Оставим один из металлических шариков нейтральным, а второй зарядим положительно. Несмотря на то, что один из них нейтральный, между ними можно заметить силу притяжения. Причиной является

перераспределение свободных зарядов в электрически проводящем теле под воздействием внешних электрических сил. В силу этого поверхность тела заряжается противоположным зарядом по сравнению с другим телом (рис. 1.4). Это явление называется **электрической или электростатической индукцией** (лат. *inducere* – вводить, проводить).

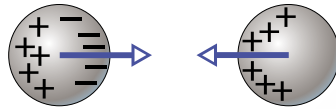


Рис. 1.4. Притяжение нейтрального и положительно заряженного металлических шаров.

Мы имели дело с электрической индукцией, когда, прикоснувшись к электропроводящей поверхности, чувствовали, что нас «бьет током». Возникновение молнии также связано с электрической индукцией.

Процесс электрической зарядки грозовых облаков связан с движением воздушных масс друг относительно друга. В процессе этого происходит взаимное трение частиц облаков в этих массивах – снежинок и градинок. В результате они заряжаются. Снежинки заряжаются положительно, а градинки отрицательно.

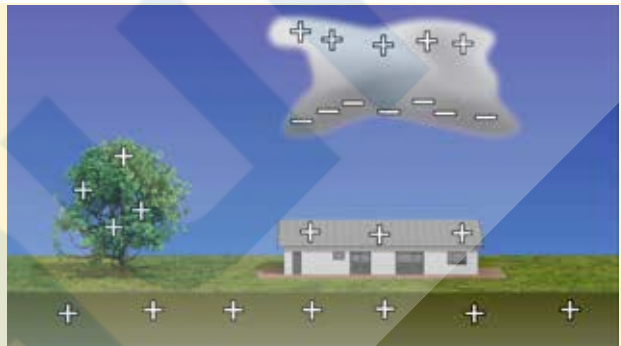


Рис. 1.5. Заряд грозового облака.

В результате их движения внутри облаков и их скопления вследствие силы тяжести заряжаются также целые области облаков. Отрицательно заряженные и более тяжелые градинки находятся чаще всего в нижней части облака, а более легкие, положительно заряженные снежинки – в его верхней части (рис. 1.5). Когда электрическое поле достигает достаточно большой величины, то возникает молния. Но измеренной в грозовых облаках напряженности электрического поля все же оказывается недостаточно для возникновения молнии. Для этого нужны более сильные электрические поля. По мнению ученых, исследующих атмосферные явления, здесь в качестве дополнительных факторов могут выступать солнечный ветер (поток заряженных частиц с высокой энергией) или остаточный заряд и поляризация самой атмосферы. Удар молнии длится примерно 0,2 секунды, за это время в молнии происходит до 30 электрических импульсов.

Опыты с электроскопом

Электроскоп является прибором, предназначенным для изучения электрических зарядов в телах и электрической индукции. Простой электроскоп можно построить, используя следующие принадлежности: стеклянный сосуд объемом примерно 5дл (химический стакан или стеклянная банка), тонкая фольга, специальная пластиковая крышка или любой другой кусок пластика, закрывающий отверстие сосуда, медная и достаточно толстая (0,8 мм) проволока и липкая лента.

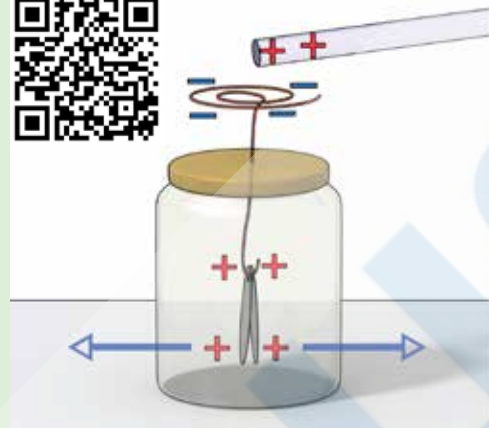


Рис. 1.6. Зарядка электроскопа.

Из фольги вырезают полоски овальной формы длиной 4-5 см. На одном из концов полосок проделывают отверстия. Один из концов медной проволоки скручивают в виде спирали, а второй конец пропускают через пластиковую крышку и загибают крючком. На этот крючок навешивают вырезанные из фольги полоски. После этого банку закрывают крышкой и части устройства закрепляют липкой лентой. Прибор готов. Для исследования электрической индукции к медной спирали нужно приблизить электрически заряженное тело, например, воздушный шарик, стеклянную палочку, линейку и исследовать поведение полосок из фольги.

Электроскоп можно зарядить, сообщив ему заряд. Для этого нужно коснуться медной спирали заряженным телом.

У понятия «электрический заряд» есть несколько значений. До сих пор мы рассматривали электрический заряд в значении либо свойства тела, либо количества заряженных частиц. В электростатике понятие «электрический заряд» является важной физической величиной.

В качестве физической величины электрический заряд характеризует то, насколько сильно заряженное тело участвует в электромагнитном взаимодействии.

Электрический заряд обозначается буквой q или Q . Единицей измерения является 1 кулон, сокращенно 1 С.

1 кулон является очень большим зарядом. Заряд грозовых облаков может быть порядка 100 С. Когда наши волосы наэлектризованы, то заряд каждого волоса может быть в промежутке 1 нС – 1 рС.

Наименьший свободно существующий в природе электрический заряд называется элементарным зарядом e .

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ С,}$$

$q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – это заряд электрона, $q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ – это заряд протона.

В химии при обозначении ионов используют относительные заряды, которые показывают, во сколько раз заряд иона больше элементарного заряда. Например, катион натрия обозначается как Na^+ , а анион сульфида как S^{2-} . Если вместо относительных зарядов применить значения электрического заряда, то зарядом катиона натрия является $q_{\text{Na}^+} = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, поскольку атом натрия отдал один электрон. Анион сульфида имеет заряд $q_{\text{S}^{2-}} = -3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, поскольку атом серы присоединил к себе два электрона.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Электроскоп. Исследуйте рисунок 1.6 или изготовьте сами электроскоп. Ответьте на следующие вопросы.
 - А. Поясните, почему полоски (листочки) фольги отталкиваются друг от друга?
 - Б. Смогут ли полоски фольги работать в качестве электроскопа без стеклянной банки и пластиковой крышки, если их подвесить на нейлоновой нити к штативу? Обоснуйте свой ответ. Если вы сами построили электроскоп, то проведите опыт.
2. У нас имеется два металлических шарика, расположенных далеко друг от друга. Один из них не заряжен, а другой заряжен отрицательным зарядом. Нарисуйте, как располагаются электрические заряды на шариках:
 - а) если сблизить шарики (но так, чтобы они не соприкасались);
 - б) если шарики будут касаться друг друга.
3. Какой заряд в кулонах будет у ионов Ca^{2+} и Cl^- ?
4. Два заряженных металлических шарика с зарядами 3 мкС и -6 мкС соединили между собой металлическим стержнем. Какой заряд остался на каждом шарике после удаления металлического стержня?

1.2. Закон Кулона



Опыт по измерению электрических сил

На рисунке 1.7 изображены чувствительные весы с установленным на них основанием высотой по крайней мере 15 см. На основании расположен заряженный шарик. Если к этому заряженному шарiku приблизить другой шарик, заряженный противоположным зарядом, то показание весов изменится в меньшую сторону. Первоначальное показание весов можно изменить несколькими способами. Один из них – это увеличить или уменьшить заряд шариков. Второй – это увеличить или уменьшить расстояние между шариками. Третий способ – это заставить взаимодействовать одноименно заряженные шарики. Из этого эксперимента можно сделать следующие выводы: а) между заряженными шариками действует электрическая сила, б) эта сила зависит как от зарядов тел, так и от расстояния между ними, в) эту действующую силу мы можем косвенным образом измерить.

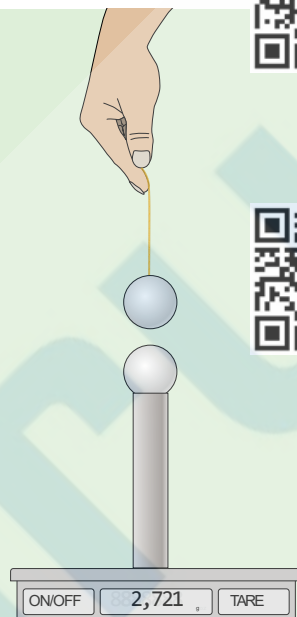


Рис. 1.7. Измерение электрических сил.

В 18-ом столетии электрические силы исследовал Шарль Огюстен де Кулон (1736–1806). Будучи выдающимся инженером, он сконструировал гораздо более чувствительный прибор, чем устройство, изображенное на рис. 1.7. Из результатов его измерений **выяснилось, что помимо величины зарядов сила взаимодействия изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния между заряженными телами.** Это и называют законом Кулона.

Закон Кулона в математическом виде:

$$F \approx \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Если мы желаем вычислить силу взаимодействия между двумя заряженными телами, то можем использовать следующую формулу:

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

где k называется **постоянной Кулона**, значение которой: $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$.

Чтобы лучше понять значение постоянной Кулона, рассмотрим следующий рисунок (рис.1.8).

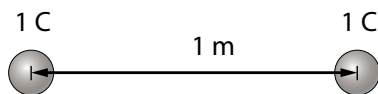


Рис. 1.8. Два тела с зарядами по $+1\text{C}$ каждый, которые расположены на расстоянии одного метра друг от друга.

На рисунке 1.8 изображены два тела с зарядами по $+1\text{C}$ каждый, которые расположены на расстоянии одного метра друг от друга. Поскольку тела заряжены одноименными зарядами, между ними действует сила отталкивания, и значение этой силы равно $9 \cdot 10^9\text{ N}$. Это очень большая сила, и разместить эти тела, несущие на себе заряды по одному кулону, на расстоянии одного метра невозможно. Таким образом, заряд в один кулон – это очень большой заряд.

В предыдущей главе мы изучали явление электрической индукции, и в этой связи нужно уточнить, что же означает расстояние r . Рассмотрим рисунок 1.9.

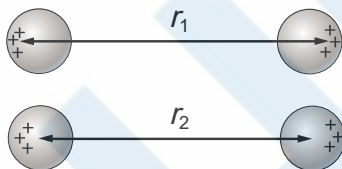


Рис. 1.9. Расстояние между зарядами r_1 превышает расстояние между телами r_2 .

Вследствие электрической индукции заряды смещаются и внутри тела. Поэтому расстояние между зарядами r_1 больше расстояния между телами r_2 . В силу этого закон Кулона можно применять только тогда, когда размеры тел по сравнению с расстоянием между ними пренебрежимо малы. Поэтому в электростатике часто используется понятие **«точечного заряда»**.

Точечными зарядами называются заряженные тела, размеры которых пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием между ними, то есть точечный заряд – это тело, заряд которого можно рассматривать сосредоточенным в одной точке.

Формула, отражающая закон Кулона, действует в вакууме. Если заряженные тела находятся в какой-то среде, то сила их взаимодействия уменьшается. Например, в воде сила взаимодействия между зарядами примерно в 80 раз меньше, нежели она была бы в вакууме.

В физике величина, которая показывает, во сколько раз в данной среде электрическая сила меньше, чем в вакууме, называется диэлектрической проницаемостью. Она обозначается буквой ϵ (в греческом алфавите эта буква называется эpsilon).

При комнатной температуре диэлектрическая проницаемость воды равна примерно 80. Диэлектрическая проницаемость воздуха очень мало отличается от диэлектрической проницаемости вакуума, то есть $\epsilon_{\text{возд}} = 1$. Из таблицы 1.1 видно, что имеются вещества, диэлектрическая проницаемость которых в сотни и даже тысячи раз больше диэлектрической проницаемости вакуума.

Таблица 1.1. Диэлектрическая проницаемость некоторых материалов.

Материал	Диэлектрическая проницаемость
Вакуум	1,0
Воздух	1,0006
Техническое масло	2,2
Полиэтилен	2,26
Пчелиный воск	2,8
Кварц	3,78
Вода	80
Титанат кальция	168
Титанат бария	1250

При рассмотрении процессов, связанных с передвижением и переносом электрических зарядов, нужно учитывать **закон сохранения электрического заряда**. Он гласит, что **в электрически изолированной системе суммарный заряд является сохраняющейся величиной (остается неизменным)**. Заряд может возникать и исчезать только попарно ($+q$ и $-q$ совместно).

Пример 1.

Заряд одного металлического шарика составляет 10 нС, а другого -4 нС. Размеры и массы шариков одинаковы. Металлические шарики (электроскопов) соприкоснулись друг с другом и потом были снова разъединены.

А. Какой заряд получил каждый металлический шарик?

Б. Как изменилось взаимодействие шариков?

Решение

А. Поскольку мы имеем дело с металлическими телами одинаковых параметров, то при соприкосновении происходит перенос зарядов, в процессе которого заряды выравниваются. Согласно действующему в природе закону сохранения электрического заряда, общий заряд до и после переноса зарядов остается неизменным. В данном случае $10 \text{ нС} + (-4 \text{ нС}) = 6 \text{ нС}$. Это значение остается неизменным как до, так и после переноса зарядов. Поэтому оба электроскопа получают заряд по 3 нС.

Б. Если в начале опыта электроскопы были заряжены разноименными зарядами, то после соприкосновения шариков они будут заряжены одноименными зарядами. Поэтому взаимное притяжение электроскопов изменяется на взаимное отталкивание. Взаимодействие изменилось в $\frac{40}{9}$ раз, то есть стало примерно в

4 раза слабее. Здесь по закону Кулона мы учитываем только произведение зарядов, поскольку расстояние между телами остается неизменным и не влияет на результат.

Пример 2.

Оцените электрическую силу, действующую между двумя грозowymi облаками, если заряд одного облака равен -10 С, а второго – равен 20 С. Центры облаков находятся на расстоянии 5 km.

Решение

Вычисляем силу, используя закон Кулона.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad F = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2} \frac{-10\text{C} \cdot 20\text{C}}{(5 \cdot 10\text{m})^2} = \underline{\underline{-7 \cdot 10^4 \text{ N}}}$$

Знак «минус» показывает, что мы имеем дело с силами притяжения между положительными и отрицательными зарядами.

Поскольку исходные данные приведены с точностью до одной значащей цифры, то и ответ приводим с такой же точностью. Мы имеем дело с очень приближенными данными, поскольку расстояние между облаками можем оценить лишь приблизительно. И заряды здесь приведены лишь оценочные.

В результате мы получили довольно большое значение силы: $F = 70000$ N. Вопрос в том, как эта сила действует на облака. Для ответа на этот вопрос используем второй закон Ньютона $F = ma$ ja leiame kiirenduse a . Для этого мы должны, в свою очередь, оценить массу облака, которая может достигать тысяч тонн.

Если масса облака равна 10^6 kg, тогда ускорение, которое получает облако под воздействием вычисленной силы, равно 10^{-1} ms⁻². Это по сравнению с естественным движением облаков пренебрежимо малая величина, и, следовательно, указанная электрическая сила не влияет на движение облаков. Электрическая сила притяжения между облаками, несомненно, будет еще меньше, поскольку все грозовые облака содержат в себе как положительно, так и отрицательно заряженные области, и в силу этого общий заряд будет значительно меньше.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Оцените величину силы, действующей между двумя наэлектризованными волосинками, если на них находятся заряды по 10^{-9} С и расстояние между ними составляет 1 мм. Заставит ли вычисленная сила двигаться эти волосинки?
2. Два одинаковых металлических шарика с зарядами 12 μ С и 4 μ С находятся на расстоянии одного метра друг от друга. Шарик на мгновение соединили и затем снова разнесли их на расстояние одного метра.
 - А. Увеличилась или уменьшилась сила взаимодействия шариков? Во сколько раз?
 - Б. Как изменилось направление сил?
3. В кристаллах поваренной соли ионы находятся на расстоянии 0,3 нм друг от друга. В водном растворе это расстояние составляет 10 нм.
 - А. Во сколько раз сила взаимодействия между ионами Na^+ и Cl^- в кристаллах соли больше этой силы, когда ионы находятся в водном растворе?
 - Б. Почему соль кристаллизуется в растворе, если выпарить большую часть воды?
4. Изготовьте из алюминиевой фольги две трубки длиной по 4 см и диаметром 1 см. Подвесьте их с помощью нитей на штатив и наэлектризуйте одну или обе трубки заряженной пластмассовой линейкой. Исследуйте различные случаи поведения трубок. Опишите и обоснуйте результаты эксперимента.

1.3. Электрическое поле

Электрическая сила, как и гравитационная или магнитная силы, не требует для своего действия непосредственного контакта (с телами, на которые она воздействует). Это воздействие на электрически заряженные тела происходит посредством **электрического поля**, которое окружает эти тела. Электрическое поле окружает каждое заряженное тело. Наглядно представить себе электрическое поле помогают **силовые линии электрического поля**.



Касательная к какой-то точке силовой линии электрического поля показывает направление действия в этой точке поля электрической силы на положительный заряд.

В девятом классе мы рассматривали силовые линии магнитного поля. Их относительно легко показать с помощью железных опилок и магнитов – железные опилки ориентируются вдоль силовых линий и образуют видимую картину. Силовые линии электрического поля продемонстрировать сложнее, поскольку необходимые для этого принадлежности более сложны и требуют применения источника высокого напряжения.

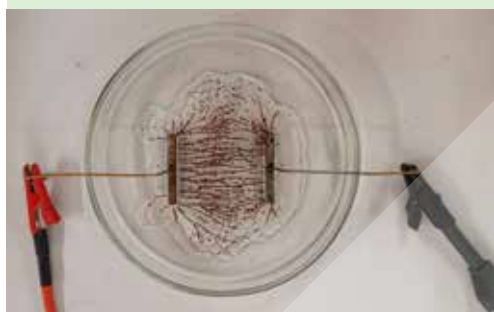
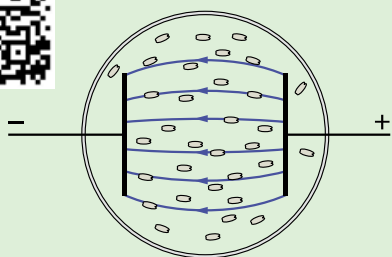


Рис. 1.10. Опыт для исследования силовых линий электрического поля.

Опыт с семенами и электродами

Для опыта требуются чашка Петри, вязкая жидкость (например, касторовое масло), как можно более мелкие семена растений темной окраски (например, семена душицы), медная проволока и электрофорная машина.

Из медной проволоки изготавливаются электроды, которые помещаются в вязкую жидкость. В последнюю насыпаются семена (см. рис. 1.10). Если соединить электроды с клеммами электрофорной машины, то семена ориентируются вдоль силовых линий электрического поля. Чем это объясняется? В электрическом поле на концах семян появляются индуцированные заряды. На заряды в электрическом поле действуют силы – на положительные заряды в одном направлении и на отрицательные в противоположном. Вследствие этого семена ориентируются по направлению электрического поля. Положительно и отрицательно заряженные половинки семян, оказавшиеся рядом, также притягиваются друг к другу. В результате образуются цепочки из семян. Поскольку они образуются в направлении действия электрической силы, они и показывают нам силовые линии электрического поля.

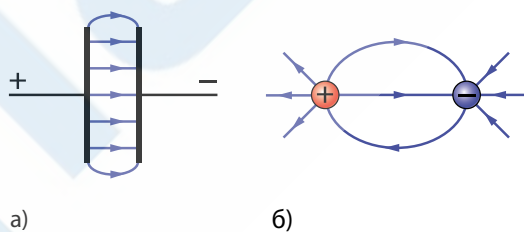


Рис. 1.11. Электрическое поле, образованное двумя прямыми отрезками проволоки (а) и двумя шариками (б).

Электрическое поле является **однородным (гомогенным)**, если его силовые линии параллельны. На рис. 1.11 изображены силовые линии электрического поля, образованного электродами в виде двух параллельных отрезков проволоки. Видно, что и силовые линии электрического поля являются параллельными прямыми, отклоняясь от параллельности только на концах отрезков. Таким образом,