



ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

ПЕРВОКУРСНИК АНАО РЭН РИСКУЕТ ЗАВАЛИТЬ ЭКЗАМЕНЫ И ОСТАТЬСЯ НА ВТОРОЙ ГОД. ИЗ ВСЕХ НАУК ОСОБЕННО ТЯЖЕЛО ЕМУ ДАЕТСЯ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ. ПО СЧАСТЛИВОЙ СЛУЧАЙНОСТИ АНАО ЗНАКОМИТСЯ С ОЧАРОВАТЕЛЬНОЙ СОТРУДНИЦЕЙ ЛАБОРАТОРИИ КУРЮ ШИЭРУ, КОТОРАЯ КАК РАЗ ПРОВОДИТ ОПЫТЫ В ЭТОЙ ОБЛАСТИ. КУРЮ БЕРЕТСЯ ПОМОЩЬ НЕЗАДАЧЛИВОМУ СТУДЕНТУ.

ВМЕСТЕ С ГЕРОЯМИ ЭТОЙ МАНГЫ ВЫ ИЗУЧИТЕ ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА, А ТАКЖЕ СУМЕЕТЕ ОБЪЯСНИТЬ С ИХ ПОМОЩЬЮ НЕКОТОРЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИРОДЫ. ОТ САМЫХ АЗОВ (ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, СИЛОВЫЕ ЛИНИИ, ЗАКОН КУЛОНА...) ВЫ ПЕРЕЙДЕТЕ К БОЛЕЕ СЛОЖНЫМ ТЕМАМ, СРЕДИ КОТОРЫХ УРАВНЕНИЕ МАКСВЕЛЛА, ТЕОРЕМА ГАУССА, КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕЩЕСТВ ПО МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ И ДР.

ЧТЕНИЕ КНИГИ ОБОГАТИТ ВАШИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МИРЕ ФИЗИКИ И ПОДВЕДЕТ К ПОНИМАНИЮ ТОГО, ЧТО СОВРЕМЕННАЯ ЦИВИЛИЗАЦИЯ ВО МНОГОМ СУЩЕСТВУЕТ БЛАГОДАРЯ УСПЕХАМ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА.

Интернет-магазин: www.dmkpress.com
Книга почтой: orders@allians-kniga.ru
Оптовая продажа: "Альянс-книга".
(499)782-3889, books@allians-kniga.ru



ISBN 978-5-97060-192-1



9 785970 601921 >

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Масамори Эндо
Мари Маниси

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ МАНГА



Масамори Эндо
Мари Маниси
Trend-770 Co., Ltd.



DMK
Ohmsha

DMK
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Занимательная физика

Электроматнетизм

Манга

ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ МАНГА

ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА

ЭЛЕКТРО- МАГНЕТИЗМ

Масамори Эндо / Автор
Мари Маниси / Художник

Перевод
Кэна Исидзимы,
Марии Яковлевой



УДК 621.38.01
ББК 32.85
М32

Масамори Эндо

М32 Занимательная физика. Электромагнетизм / Масамори Эндо (автор), Мари Маниси (худож.); пер. с яп. Кэн Исидзима, М. Яковлева. — М.: ДМК Пресс, 2017. — 256 с.: ил. — (Серия «Образовательная манга»). — Доп. тит. л. яп.

ISBN 978-5-97060-192-1

Первокурсник Андо Рэн рискует завалить экзамены и остаться на второй год. Из всех наук особенно тяжело ему дается электромагнетизм. По счастливой случайности Андо знакомится с очаровательной сотрудницей лаборатории Курю Шиэру, которая как раз проводит опыты в этой области. Курю берется помочь незадачливому студенту.

Вместе с героями этой манги вы изучите основные понятия и законы электромагнетизма, а также сумеете объяснить с их помощью некоторые явления природы. От самых азов (электрическое поле, силовые линии, закон Кулона...) вы перейдете к более сложным темам, среди которых уравнение Максвелла, теорема Гаусса, классификация веществ по магнитным свойствам и др.

Чтение книги обогатит ваши представления о мире физики и подведет к пониманию того, что современная цивилизация во многом существует благодаря успехам электромагнетизма.

УДК 621.38.01
ББК 32.85

Original Japanese edition
Manga de Wakaru Denjikigaku (Manga Guide: Electromagnetics) By Masamori Endo (Author),
Mari Manishi (Illustrator) and Trend-Pro (Producer)
Published by Ohmsha, Ltd.
3-1 Kanda Nishikicho, Chiyodaku, Tokyo, Japan
Russian language edition copyright © 2017 by DMK Press
Translation rights arranged with Ohmsha, Ltd.

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

ISBN 978-4-274-06849-2 (яп.) Copyright © 2011 by Masamori Endo and Trend-Pro Co., Ltd.
ISBN 978-5-97060-192-1 (рус.) © Перевод, оформление, издание, ДМК Пресс, 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мне кажется, что среди всех преподавателей университетов по основным предметам самыми нелюбимыми являются преподаватели по электромагнетизму. И, несмотря на то что эту дисциплину обязательно преподают на всех научных факультетах и кафедрах, а в некоторых образовательных учреждениях – даже на гуманитарных факультетах, по сложности понимания она не может сравниться ни с одной другой из базовых дисциплин. Когда спрашиваешь у студентов: чем же так сложна эта наука, электромагнетизм, они обычно говорят следующее: «Уж очень много всяких законов и формул приходится запоминать». И действительно, в этой отрасли физики существует огромное количество всяких законов: закон такого-то, закон такого-то. А знаете ли вы, что все эти законы произошли из закона Кулона, этого основного закона науки об электромагнетизме?

Наука об электромагнетизме начала развиваться с конца XVIII века на фоне множества независимых открытий и законов, совершенных учеными-физиками. Впоследствии же все эти законы, которые считались независимыми друг от друга, обнаружили взаимосвязь между ними и в итоге были отражены в так называемых уравнениях Максвелла – вот такая драматическая история у этих открытий. Кроме того, уравнения Максвелла позволили установить природу света, в то время еще неизвестную – электромагнитную, и, более того, Эйнштейн, глубоко изучив электромагнетизм, смог открыть свою специальную теорию относительности. Ну как, после всего сказанного мной не проснулся ли у вас какой-либо интерес к науке об электромагнетизме?

Для того чтобы действительно понять учение об электромагнетизме, необходимо знать о векторном поле, образованном вектором, а также его производной. Вот откуда такая нелюбовь студентов университетов к этому предмету. На своих занятиях я всегда стараюсь сделать объяснения векторного поля максимально понятными, сопровождая их рисунками, но даже и после этого каждый год сталкиваюсь с критикой от моих студентов, дескать, сложно.

Говорят, что, давая оценку уравнениям Максвелла, основатель статистической механики Людвиг Больцман восклицал ими, сказав: «Не Бог ли эти знаки начертал?» А нельзя ли как-то полюбить это искусство, начертанное Богом, но без всех этих теорий и формул? Эта мысль давно уже не покидала меня, став моим своеобразным домашним заданием... И тут очень кстати я получил заказ на создание серии пособий «Учимся с помощью манги». Манга – это замечательное средство выражения мыслей, ведь с помощью всего одной картинки удается выразить то, что никак не выразишь словами. Так, может, с помощью манги я смог бы передать студентам те мысли об учении электромагнетизма, которые никак не получалось донести на словах? Тем более в этот раз созданием сюжета и иллюстраций занимались профессионалы. Уж они-то наверняка смогут создать нечто замечательное и выразить то, чего не смог выразить я. Вот так и появилась эта книга.

Издание, которое вы держите в руках, не является учебником по электромагнетизму. Скорее, это собранные вместе попытки передать красоту и привлекательность теорий об электромагнетизме, которые не в состоянии передать обычный учебник, но не прибегая при этом к формулам. Я буду считать, что мои попытки увенчались успехом, если эта книга станет вашей ступенькой в мир полноценного изучения электромагнетизма на университетском уровне.

В связи с выходом данного издания хотелось бы выразить свое глубочайшее уважение и благодарность художнику Мари Маниси. Получившаяся манга превзошла мои самые смелые ожидания. Также хочется поблагодарить всех сотрудников компании ОАО «Тренд Про» за великолепный сценарий. Благодаря вам я еще раз убедился в великолепии выразительности манги. И в завершение хочу выразить огромную благодарность сотрудникам департамента развития издательства «Ohmsha» за предоставленную возможность выпустить эту книгу. Впервые написание книги доставило мне столько удовольствия!

СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ 1

- 1.1. Что такое электромагнетизм? 6
- 1.2. Формулы, обозначающие законы электромагнетизма 9
 - Голубизна неба и краснота заката 13
 - Модель атома Резерфорда 16
 - Об учении электромагнетизма и других академических дисциплинах 18

Глава 2

ЗАКОН КУЛОНА, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ПОТЕНЦИАЛ 19

- 2.1. Закон Кулона 23
- 2.2. Векторное поле и скалярное поле 26
- 2.3. Электрическое поле 28
- 2.4. Потенциал 33
- 2.5. Электрические силовые линии 35
 - Система единиц электромагнетизма и величина одного кулона... 39
 - Как узнать напряжённость электрического поля, исходя из распределения зарядов 40
 - Почему электрические силовые линии и напряжённость электрического поля совпадают? 44
 - В электростатическом поле всегда есть потенциал 45

Глава 3

ТЕОРЕМА ГАУССА, ПРОВОДНИК, ДИЭЛЕКТРИК 49

- 3.1. Электрическая индукция 52
- 3.2. Плоскость, окружающая точечный заряд, и проникающий сквозь неё электрический поток 55
- 3.3. Теорема Гаусса 57
- 3.4. Вектор электрической индукции и дифференциальная форма теоремы Гаусса 59
- 3.5. Проводник 65
- 3.6. Диэлектрик 72
 - Попробуем применить теорему Гаусса 78

Скалярное произведение векторов потока напряжённости электрического поля.....	81
Диэлектрики и конденсаторы	83
Алгебраическое выражение дивергенции векторного поля	87
Силовые линии и линии электрической индукции	89
О «физических величинах», «единицах измерения» и «размерностях»	91
Периодическая система химических элементов, проводники и изоляторы	94

Глава 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.....	97
4.1. Определение электрического тока	101
4.2. Закон Ома.....	104
4.3. Определение «магнитного поля»	105
4.4. Электрический ток и магнитное поле	109
Дрейф электронов и электрический ток	112
Сопротивление резистора и закон Ома.....	114
Джоулево тепло.....	116
Сущность магнитного поля	118

Глава 5

ТЕОРЕМА АМПЕРА, МАГНЕТИКИ	121
5.1. Закон Био-Савара.....	123
5.2. Теорема Ампера.....	126
5.3. Вращение векторного поля и дифференциальная форма теоремы Ампера.....	129
5.4. Магнитный момент и «намагниченность» веществ.....	136
5.5. Ферромагнетик и постоянный магнит	145
5.6. Принцип рельсотрона.....	148
Единицы измерения электрического тока (элементарный участок тока) и закон Био-Савара.....	156
Силы взаимодействия между линейными токами.....	160
В и Н и магнитная проницаемость вещества.....	163
Магнитное поле внутри соленоида и индуктивность.....	164
Эквивалентность закона Био-Савара и закона Ампера.....	167
Алгебраическое выражение вращения векторного поля.....	169
Магнитные силовые линии и линии магнитной индукции.....	171
Электромагнетизм отношения Е-Н.....	176
Диамагнетики и магнитная левитация.....	177

Глава 6

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ В ДВИЖЕНИИ И УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА.....

6.1. Электромагнитная индукция.....	182
6.2. Закон электромагнитной индукции Фарадея	187
6.3. Дифференциальная форма закона электромагнитной индукции Фарадея	189
6.4. Ток смещения и расширение теоремы Ампера	192
6.5. Уравнения Максвелла	196
6.6. Электромагнитное излучение	199
Доказательство закона электромагнитной индукции.....	205
Доказательство закона Ампера-Максвелла	207
Принцип появления электромагнитных волн.....	208
Скорость электромагнитных волн и определение метра	214
Принципы работы генератора и электродвигателя	216
Индукционная плита и электромагнетизм.....	218
Уравнения Максвелла и метаматериалы	222
В недалеком будущем.....	227

Приложение

ВЕКТОРЫ И СКАЛЯРЫ

Что такое векторы?	230
Понятие «поля»	234
Абсолютное значение вектора и единичный вектор.....	236
Декартовы координаты и обозначение векторных компонент	238
Скалярное и векторное произведения.....	240
Векторное поле как градиент скалярного поля	246

Справочная литература.....

Предметный указатель.....

ГЛАВА 1

ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ





НА СОН ТЭНЕТ...

МЕНЯ ЗОВУТ
АНАО РЭН

ПЕРВЫЙ ГОД УЧУСЬ
В УНИВЕРСИТЕТЕ ХАРУТО
В "ХАРУ".

"ХАРУ" -
ЭТО НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОРОДОК, СРЕДИ ГОР И ПОЛЕЙ.

ВСЮДУ ПРОВОДЯТСЯ
САМЫЕ ПЕРЕДОВЫЕ
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ,

ИЗ НЕОБЫЧНОСТЕЙ -
ЧАСОВАЯ БАШНЯ,
КОТОРАЯ В ДВА ЧАСА
НОЧИ ТРАНСФОРМИРУЕТСЯ
В РОБОТА.

БААМ



А ВОТ И
НЕ ТРАНСФОРМИРУЕТСЯ!

ЧТО ЭТО
ОН?

НЕ
ЗНАЮ

ТИ...ШИ...НА

НО ДЛЯ МЕНЯ
ЭТО ПРОСТО
ПРОВИНЦИЯ,
БЕЗ ВСЯКОГО
РАЗВЛЕЧЕНИЯ.

НУ, ЭТО БАЙКИ.



И ЕЩЁ ЧТО МЕНЯ
БЕСПОКОИТ...

ТАК ТЕБЕ
ПРИДЁТСЯ
НА ВТОРОЙ ГОД
ОСТАТЬСЯ.



НЕНАВИЖУ
ЭЛЕКТРОМАГНИТИЗМ!

ЧТО Я ПРОВАЛИВАЮ
ЭЛЕКТРОМАГНИТИЗМ.

ЧТО
ЭТО?

МОЛОДОСТЬ.



ОУ, ГДЕ ЖЕ ЭТО Я?

СОВСЕМ ДОРОГУ
ПОТЕРЯЛ.

А ЭТО, ЧТО...?



ВУХ!

БАБАХ!

ААА



ой!

ГДЕ Я...

ТЫ ОЧНУЛСЯ?
КАК ХОРОШО,
ЧТО ТЫ ЦЕЛ.

А ТО ИЗ-ЗА ЧП
ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТЕ
ПРОГРАММУ МОГУТ ЗАКРЫТЬ.



ЭТО ЧТО ЗА ОПАСНЫЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ?

САМЫЙ РЯДОВОЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ
ПО ЭЛЕКТРО-
МАГНЕТИЗМУ.

АА НЕТ,
НЕОПАСНЫЙ.

ТАК, ТЕБЯ ЗОВУТ
АНАО РЭН?

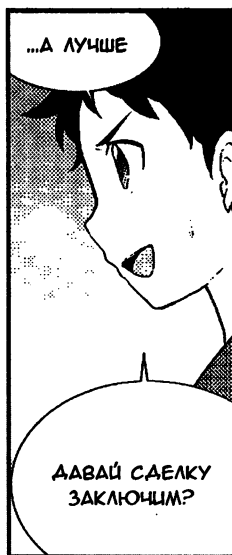


ОСТАВЬ В СЕКРЕТЕ,
ЧТО ПРОИЗОШЛО,
ЛАДНО?

А Я ТЕБЕ ЭТО
ПОДАРУ.

ДЕТСКИЙ НАБОР
МАГНИТОВ

"ДЕТСКИЙ НАБОР
МАГНИТОВ"



...А ЛУЧШЕ

ДАВАЙ СДЕЛКУ
ЗАКЛЮЧИМ?



ОХ, КАКОЙ ТЫ
ДЕРЗКИЙ.

НЭ

НЭ

ЧТО У НЕЁ
ЗА ФАНТАЗИИ?



ПРО ПРОИСШЕСТВИЕ
Я БУДУ МОЛЧАТЬ.

А ТЫ БУДЕШЬ МНЕ
ЗА ЭТО ПРЕПОДАВАТЬ
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.

ОЙ, КАК ЛЕНЬ...

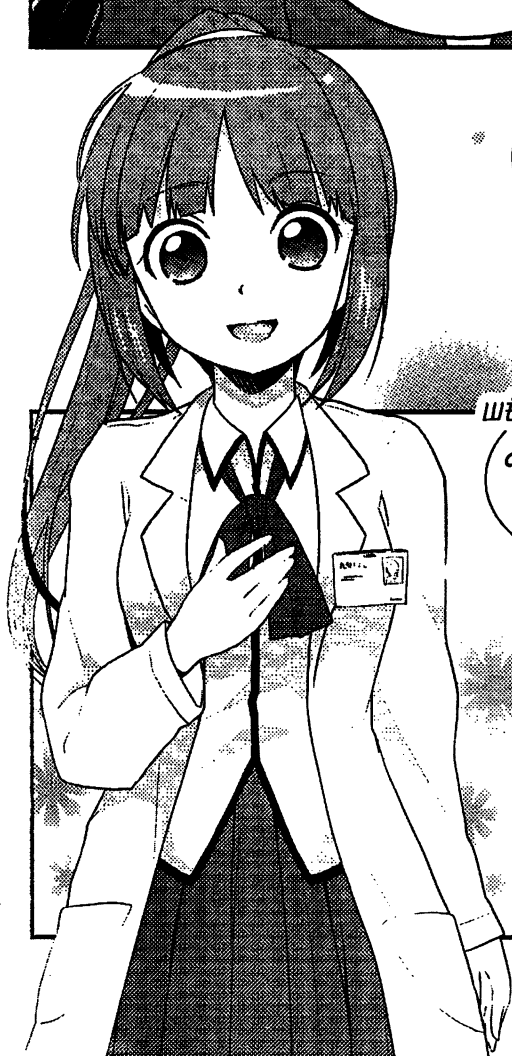


ТОГАА ВСЕМ
РАССКАЖУ.

СПАСИБО
ЗА ПОМОЩЬ

ЛАДНО, ЛАДНО,

Я БУДУ ТЕБЯ УЧИТЬ.



МЕНЯ ЗОВУТ
КУРЮ ШИЭРУ.

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ -
ЭТО МОЯ СТУХИЯ!

ШЁПОТ

В КРАЙНЕМ
СЛУЧАЕ, НА НЁМ
И ОПЫТЫ
МОЖНО
ПОСТАВИТЬ...

ТЫ ЧЕГО
ГОВОРИШЬ?

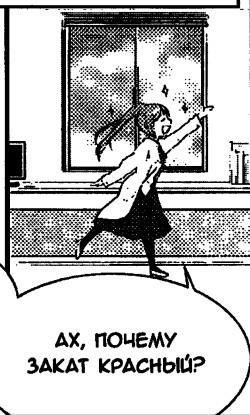
НИЧЕГО
ОСОБЕННОГО.

ВОТ ТАК Я НАЧАЛ УЧИТЬ
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ У НАУЧНОЙ
СОТРУДНИЦЫ КУРЮ ШИЭРУ...

1.1. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ?



АХ, ПОЧЕМУ
НЕБО СИНЕЕ,

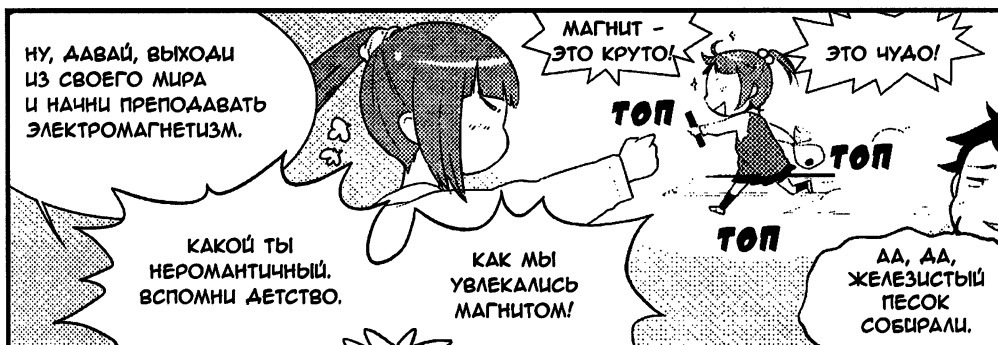


АХ, ПОЧЕМУ
ЗАКАТ КРАСНЫЙ?



ЭТОТ МИР ПОЛОН
ЗАГАДОК
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА.

Ой-ё...



НУ, ДАВАЙ, ВЫХОДИ
ИЗ СВОЕГО МИРА
И НАЧНИ ПРЕПОДАВАТЬ
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.

МАГНИТ -
ЭТО КРУТО!

ЭТО ЧУДО!

КАКОЙ ТЫ
НЕРОМАНТИЧНЫЙ.
ВСПОМНИ ДЕТСТВО.

КАК МЫ
УВЛЕКАЛИСЬ
МАГНИТОМ!

АА, АА,
ЖЕЛЕЗИСТЫЙ
ПЕСОК
СОБИРАЛИ.



КОРОЧЕ, Я ХОЧУ СКАЗАТЬ,

МНОГие УДИВИТЕЛЬНЫЕ,
НЕВЕРОЯТНЫЕ, ИНТЕРЕСНЫЕ
ЯВЛЕНИЯ ВОКРУГ НАС

ПРОИСХОДЯТ БЛАГОДАРЯ
"ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИЛЕ"
И "МАГНИТНОЙ СИЛЕ".



КУЛОН

ОМ

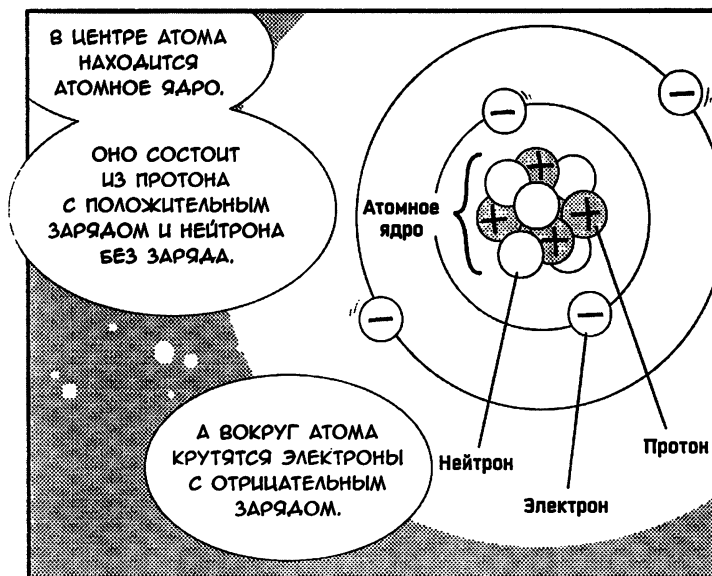
ЭТО И ЕСТЬ...
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

МАГНИТ, ГРОЗА,
СВЕТ, СТАТИЧЕСКОЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО...

ФАРАДЕЙ

НАУКА
ПРО ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
И НАУКА ПРО МАГНЕТИЗМ,
БЫЛИ ОБЪЕДИНЕНЫ
ЭТО ЛЕТ НАЗАД
В ЕВРОПЕ.

АМПЕР





ОДИНАКОВЫЕ
ЗАРЯДЫ ДРУГ ОТ ДРУГА
ОТТАЛКИВАЮТСЯ, А ЗАРЯДЫ
ПРОТИВОПОЛОЖНОЙ
ПОЛЯРНОСТИ
ПРЯТЯГИВАЮТСЯ
ДРУГ К ДРУГУ.

Между одинаковыми
зарядами – отталкивание



Между
противоположными
зарядами – притяжение

притягиваются



Между зарядами
действует сила Кулона

ЭТУ СИЛУ НАЗЫВАЮТ
СИЛА КУЛОНА, ЗАПОМНИ.

СИЛА КУЛОНА

ПРОПОРЦИОНАЛЬНА
КОЛИЧЕСТВУ ЗАРЯДА
И ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА
КВАДРАТУ РАССТОЯНИЯ.

ТО ЕСТЬ...



Сильный



Слабый



ЧЕМ ЗАРЯД БОЛЬШЕ
И РАССТОЯНИЕ БЛИЖЕ,
ТЕМ СИЛА БОЛЬШЕ.

КАК ГРАВИТАЦИЯ,
АА?

ОДИН СЛОВОМ,
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ
– ЭТО

НАУКА, ИССЛЕДУЮЩАЯ
ЯВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ
ИЗ-ЗА ДЕЙСТВИЯ ЗАРЯДА.

И ВСЁ-ТАКИ,
ЧТО ТАКОЕ ЗАРЯД?

ВЗРОСТ!

ЧТО ТАКОЕ ЗАРЯД...

ПОЧЕМУ ЗАРЯД
БЫВАЕТ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ
И ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ
И ПОЧЕМУ МЕЖДУ НИМИ
ДЕЙСТВУЕТ
СИЛА КУЛОНА.

НА САМОМ ДЕЛЕ
СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА
НЕ ИМЕЕТ ОТВЕТА.

НЕУЖЕЛИ?

ЗНАЧИТ, НЕ ТАК
СТРАННО, ЧТО
ЭЛЕКТРОМАГНИТИЗМ
СЛОЖНО ПОНЯТЬ.

НО ДАЖЕ НЕ ЗНАЯ,
ЧТО ТАКОЕ ЗАРЯД,

МОЖНО УЗНАТЬ
КАК ВЗАИМОДЕЙСТВУЮТ ЗАРЯДЫ,
ЧТО ПРОИСХОДИТ В РЕЗУЛЬТАТЕ
ОТТАЛКИВАНИЯ И ПРИТЯЖЕНИЯ.

ИССЛЕДОВАНИЕ
ЭТОГО ЯВЛЕНИЯ
И НАЗЫВАЕТСЯ
ЭЛЕКТРОМАГ-
НЕТИЗМОМ.

ЕСЛИ ТОЛЬКО
ОТТАЛКИВАНИЕ
И ПРИТЯЖЕНИЕ,
МОЖНО И ПОПРОЩЕ.

СЛИШКОМ МНОГО
ВСЯКИХ СИМВОЛОВ
И ФОРМУЛ.

1.2. ФОРМУЛЫ, ОБОЗНАЧАЮЩИЕ ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

ДА ЛАДНО. ФОРМУЛ,
ОБОЗНАЧАЮЩИХ ЗАКОНЫ
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА,
ВСЕГО ЛИШЬ 4.

ВСЁ НА САМОМ ДЕЛЕ
ОЧЕНЬ ПРОСТО.

ВСЕГО 4?

ТОГДА И Я СМОГУ
ЗАПОМНИТЬ.

КОНЕЧНО.
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ -
ОЧЕНЬ ЛАКОНИЧНАЯ И
КРАСИВАЯ ТЕОРИЯ.

ЭТО УРАВНЕНИЕ
МАКСВЕЛЛА.

Уравнение Максвелла

$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$ (теорема Гаусса)
для электростатического поля

$\operatorname{div} \vec{B} = 0$ (теорема Гаусса для магнитной индукции)

$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ (Закон электромагнитной индукции
Фарадея)

$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (закон Ампера–Максвелла)



ВОТ ЭТИ ПРОСТЫЕ
4 ФОРМУЛЫ ВМЕСТЕ

НАЗЫВАЮТСЯ
"УРАВНЕНИЕ МАКСВЕЛЛА".

НИЧЕГО СЕБЕ
"ПРОСТЫЕ"!
СОВСЕМ НЕПОЯТНО.

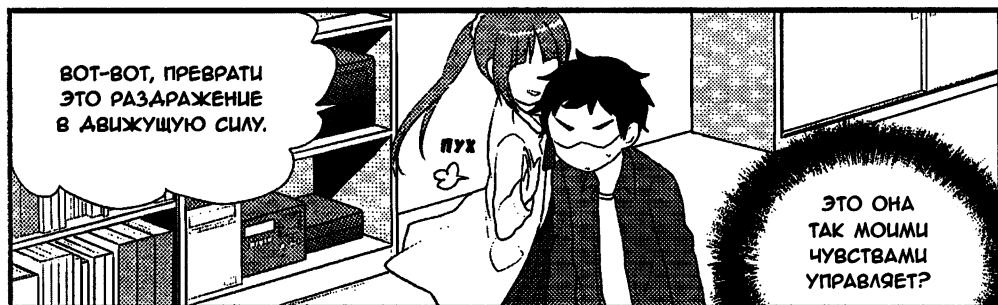
ПОЙМЁШЬ
СО ВРЕМЕНЕМ.

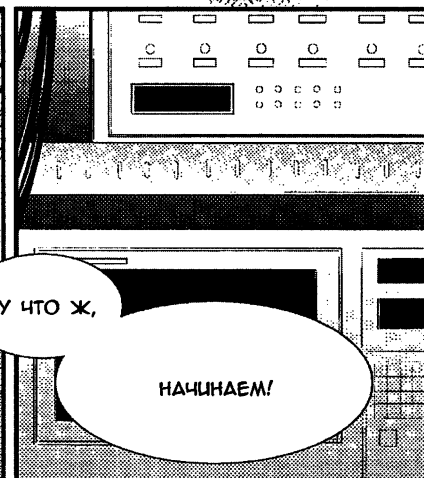
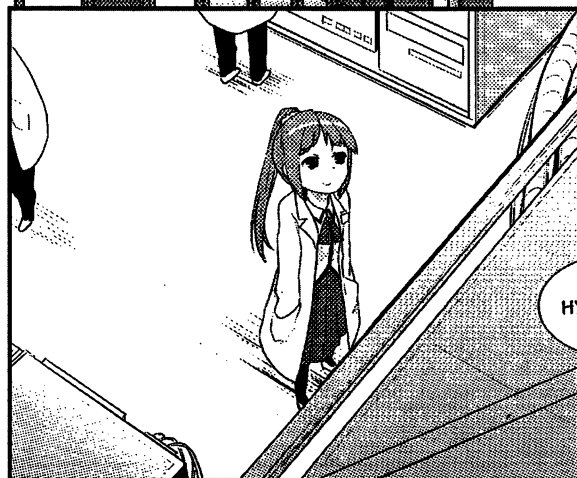
НЕТ,
НЕ СМОГУ!

СЫПЬ

СЫПЬ

ВИДИШЬ,
АЖ СЫПЬ ПОЯВИЛАСЬ!





А ТЕПЕРЬ ПОДРОБНЕЕ



Голубизна неба и краснота заката

В своё время вопросы природы света занимали умы многих ученых-физиков. Из наблюдений было известно, что свет – это нечто, движущееся с невероятно высокой скоростью, однако природа этого явления была неизвестна. В то время сложились две жёстко конкурирующие теории о природе света – теория Ньютона, согласно которой свет представляет собой поток частиц, и теория Гюйгенса, говорящая о том, что свет имеет волновую природу, при этом каждое из этих утверждений имело свои недостатки. Слабым местом теории волн являлось утверждение о том, что свет может распространяться в вакууме. Поскольку волна – это результат вибраций некоей материи (так называемой проводящей среды), то волны не могут распространяться в вакууме. Хотя солнечный свет, безусловно, достигает нас, распространяясь в безвоздушном пространстве.

Работая с уравнением, им же самим открытым, английский физик-теоретик Джеймс Клерк Максвелл заметил, что существует решение, при котором электрическое поле E и магнитное поле B сами становятся волнами. Максвелл назвал такие волны электромагнитными. А поскольку электростатическая сила и магнитная сила беспрепятственно распространяются в вакууме, то предположение о том, что свет является электромагнитной волной, вовсе не противоречиво. Максвелл вычислил скорость распространения электромагнитных волн, совпадавшую с известным тогда значением скорости света. Помимо всего прочего, это открытие позволило ему предположить, что свет является электромагнитной волной.

Длина волны света может быть измерена с помощью явления интерференции волн. Вычисления показали, что длина волны света находится в пределах 400–700 нм (1 нм равен одной миллиардной части метра) и является электромагнитной волной, при этом разные длины волн воспринимаются человеческим глазом как разные цвета. Кроме того, благодаря исследованиям того же периода было выявлено свойство тел при высоких температурах вследствие возбуждения атомов выделять электромагнитные волны видимого диапазона. Очевидно, подобное открытие не могло быть сделано без знаний об электромагнитной природе света. Поскольку солнце является круглым телом с очень высокой температурой (около 6000 °C), в результате этого оно излучает электромагнитные волны видимого глазу диапазона, а именно то, что мы привыкли называть словом «свет».

Перейдём к нашей основной теме – сразу же после открытия Максвеллом электромагнитных волн британский физик лорд Рэлей обнаружил, что при прохождении через мелкие частицы, например атмосферу, свет слегка рассеивается и проходит как бы под углом. Это явление называют «рэлеевское рассеяние». Согласно теории рассеяния

Рэля, интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны. Длина волны красного цвета почти в два раза больше длины волны голубого. Это значит, что интенсивность рассеяния у голубого цвета сильнее в 16 раз. Следовательно, при солнечном излучении значительная доля голубого цвета при прохождении через атмосферу рассеивается в стороны. Рэлеевским рассеянием солнечного света объясняется голубой цвет неба, который мы видим.

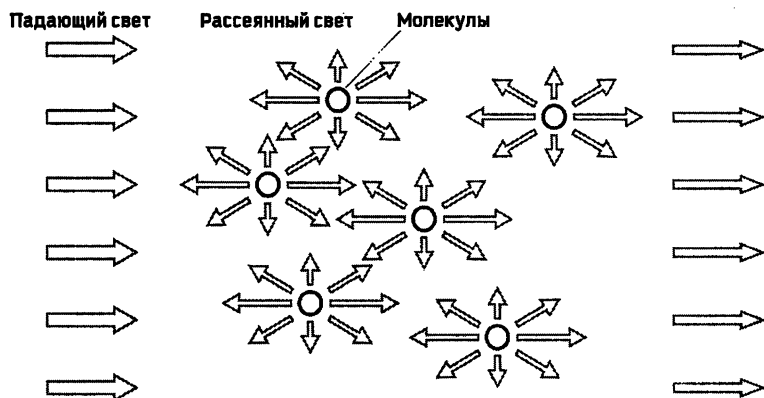


Рис. 1.1. Рэлеевское рассеяние

Красный цвет восхода и заката – это красная часть светового спектра, которая не рассеивается и доходит до поверхности земли, и мы видим, как она светится, проходя через облака и частицы атмосферы. Открытие Максвелла послужило толчком для множества других открытий, связанных с природой света. Именно поэтому открытие Максвеллом электромагнитных волн считается одним из наиболее важных открытий в физике.

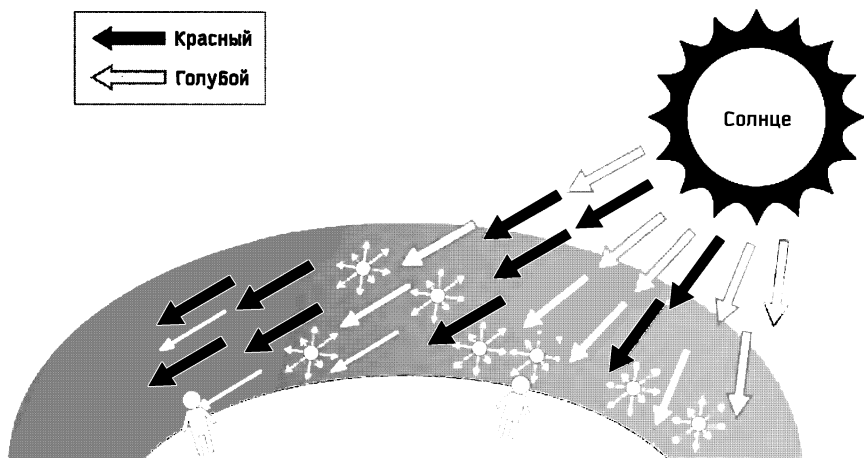


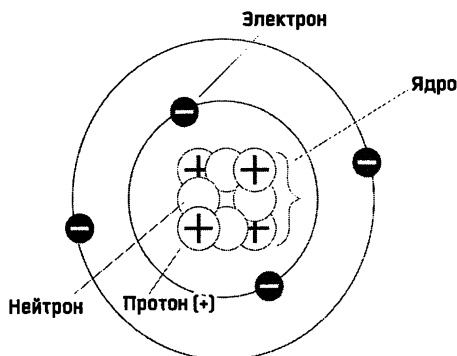
Рис. 1.2. Механизм рассеяния Рэля – голубое небо, красный закат

С другой стороны, если рассматривать электромагнитные волны как обычные волны, обнаруживаются необычные свойства, которые физическая наука того времени была не в силах объяснить. Объяснены эти свойства были позже, с помощью новых разделов физики, наиболее известных в XX веке, – квантовой теории и теории относительности. Например, при попадании излучения на поверхность металла происходит явление, получившее название фотоэффект, при котором происходит вылет электронов из металла. Этот феномен выглядит так, что энергетически заряженные частицы выбивают электроны из металла, но это невозможно объяснить, если рассматривать свет лишь как просто волну. Это явление блестяще объяснил Эйнштейн, предположив, что электромагнитная волна с частотой ν ведет себя как частица с энергией $h\nu$, где h – постоянная Планка. Эта гипотеза называлась «Гипотеза световых квантов», и в ней говорилось о том, что свет – это не частица и не волна, а нечто иное, как квант. За это открытие в 1921 году Эйнштейн получил Нобелевскую премию по физике¹.

¹ Как это ни странно, за всю свою жизнь Эйнштейн получил Нобелевскую премию только один раз, и именно за теорию фотоэффекта.

ШАГ ВПЕРЁД

Модель атома Резерфорда



Масса протонов и нейтронов практически одинакова.
Масса электрона примерно в 1800 раз меньше массы протона

Рис. 1.3. Модель атома Резерфорда

На рис. 1.3 изображена так называемая модель атома Резерфорда. За всю огромную историю человечества люди смогли «заглянуть» вглубь атома и понять его структуру всего лишь 100 лет назад (1911 год). То, что атомы состоят из положительного заряда и отрицательного заряда, ученые знали давно. Однако именно опыты британского физика, сэра Эрнэста Резерфорда впервые доказали, что атом – не сплошной шарик, а полый, и между ядром, находящимся в центре атома, и вращающимися вокруг него электронами – вакуум.

Зондирование атома Резерфорд осуществлял, направляя лучи (так называемые альфа-частицы) на золотую фольгу. Результат был неожиданным – учёный и его команда обнаружили, что большинство альфа-частиц проходит через тонкий слой металла, но небольшая часть частиц отклоняется в противоположном направлении. Говорят, Резерфорд очень удивился и сказал: «Это как если бы вы произвели выстрел снарядом по салфетке, а он бы вернулся и угодил в вас». Этот результат мог быть объяснён только тем, что почти вся масса атома сосредоточена в одной точке. Например, если орбиту электрона представить размером с бейсбольное поле, то ядро атома будет размером с шарик от пинбола.

Строго говоря, модель атома Резерфорда тоже не совсем правильная, так как последующие исследования показали, что электроны – это не совсем частицы, а неуловимые кванты. Эти открытия положили начало развитию новой отрасли науки –

«квантовой механики». Тем не менее для нас с вами, учитывая пределы, в которых мы изучаем электромагнетизм, допустимо называть электроны частицами.

На деле это выглядит так, что атомы не распадаются, в лучшем случае могут отделиться один-два электрона – можно сказать, они очень крепко держатся друг за друга. Таким образом, если просто думать о них как о «подвижных, лёгких отрицательных зарядах» и «неподвижных, тяжёлых положительных зарядах», то можно особо не задумываться о структуре атома, а сосредоточиться на учении об электромагнетизме. Металлы, описанные выше, изображены на рис. 1.4.

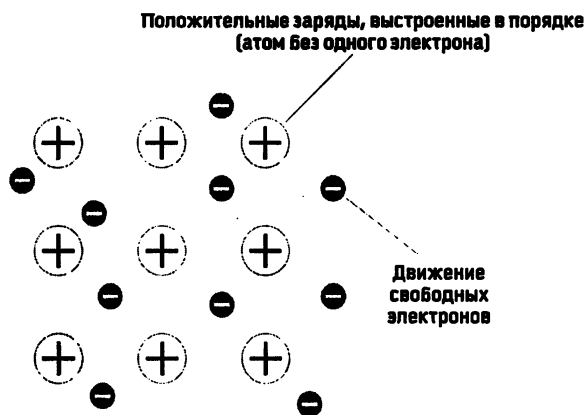


Рис. 1.4. Модель металла

Конечно же, объектом изучения всех отраслей физики является вселенная, в которой мы с вами живём. Нельзя забывать, что и мы, и наш земной шар – всё это часть вселенной. Однако эта вселенная – предельно сложная система. Всевозможные явления происходят по самым разным причинам, и не существует такого закона, который был бы в состоянии свести воедино все эти явления и причины.

Однако если внимательно изучить конкретные явления, можно почувствовать, что у них есть свой прекрасный порядок. Поняв это, учёные решили классифицировать наблюдаемые явления по их особенностям и разделить их на академические дисциплины, основываясь на законах, которые применяются в этой области. Наука, которую мы с вами будем рассматривать в этой книге, – электромагнетизм – и которая правильно называется классический электромагнетизм¹, как раз и является одной из таких дисциплин.

Как видно из первой главы, многие явления вокруг нас так или иначе связаны с электромагнетизмом. Но редкое явление можно объяснить только одним электромагнетизмом, зачастую приходится обращаться за помощью к другим наукам. Возьмём северное сияние: известно, что это не что иное, как разреженный газ – плазма, – в котором электроны отделились от ядра, однако для того, чтобы ответить на вопросы «почему оно светится» и «почему оно так движется», нам необходимо обратиться к таким дисциплинам, как атомная физика и газовая динамика.

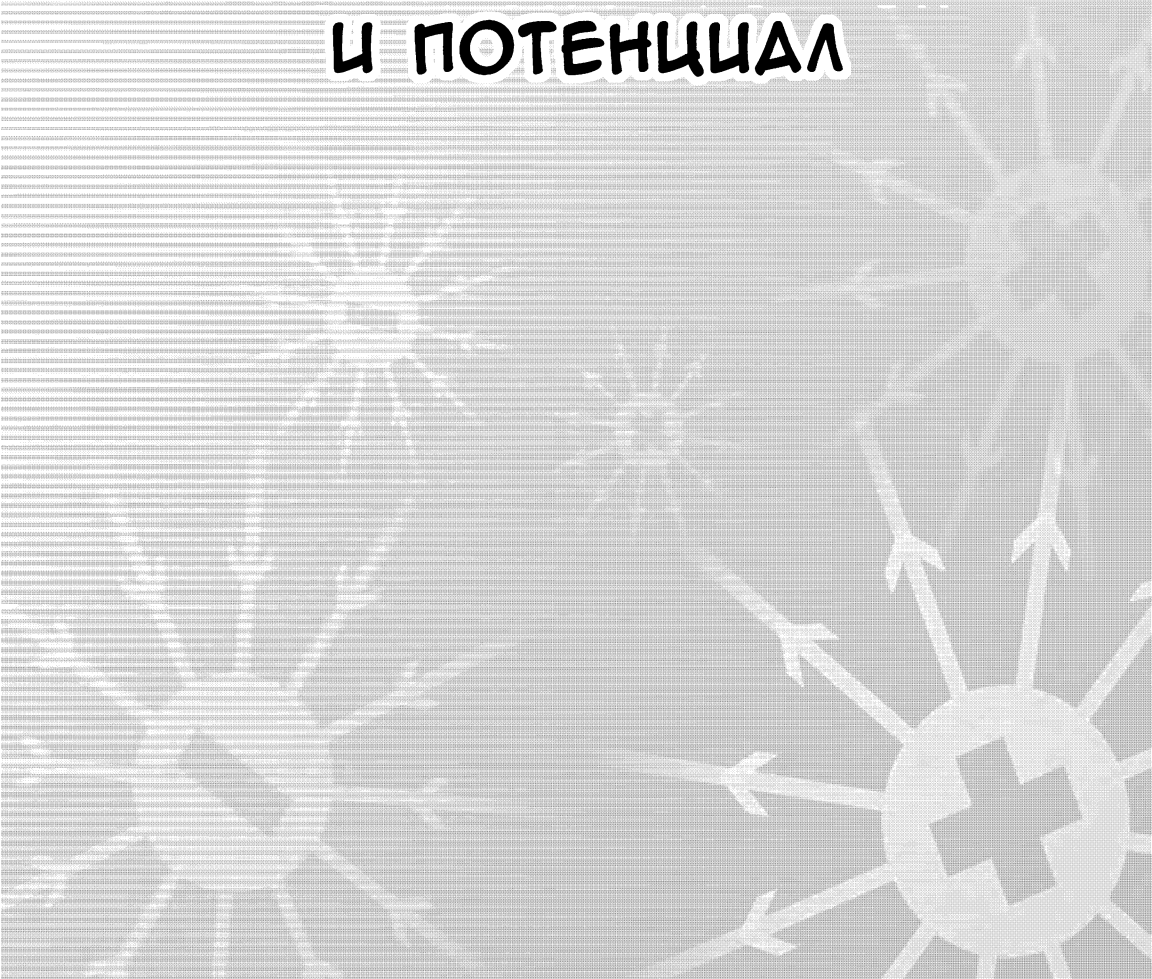
То же и в прикладных дисциплинах – чтобы понять, как работают транзисторы и диоды, которые применяются в электронных схемах, необходимо задействовать физику твёрдого тела, а если есть желание копнуть глубже – то и квантовую механику. С другой стороны, если записать движение частиц символами, то можно не задумываться о принципах действия и при этом запросто создавать сложные схемы – в этом нам помогает наука, изучающая электрические сети.

Вот такая классификация различных явлений и объяснение их с точки зрения разных научных дисциплин были приняты до XX века и имели большой успех. Электромагнетизм – один из таких примеров, и, можно сказать, наиболее успешный. В последнее же время объектом исследований стали так называемые комплексные системы – такие явления, которые невозможно объяснить, просто разделив их на составные элементы. Возьмём, к примеру, человеческую жизнь – это типичная комплексная система, так как стало ясно, что этот феномен невозможно постичь с помощью традиционного метода классификации. Но это не значит, что традиционные физические науки утратили свое значение. Ведь все устройства и механизмы, которые нас окружают, являются продуктом этих наук. Также можно сказать, что учёным никогда не удастся воспроизвести человеческую жизнь и интеллект именно потому, что способности традиционной науки не безграничны.

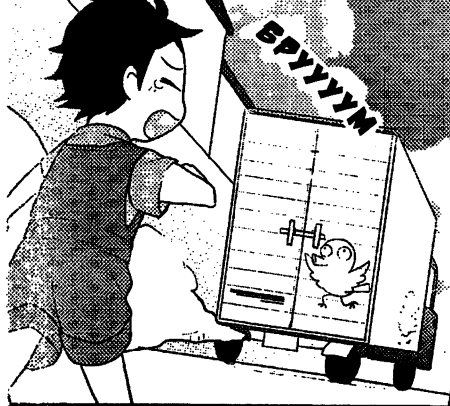
¹ Тогда что такое современный электромагнетизм? Это квантовая теория и сочетание теории электромагнитного поля и теории относительности. Например, квантовый электромагнетизм трактует электромагнитную силу как взаимодействие частиц.

ГЛАВА 2

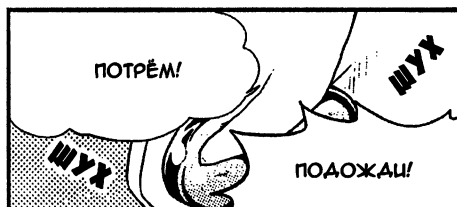
ЗАКОН КУЛОНА, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ПОТЕНЦИАЛ

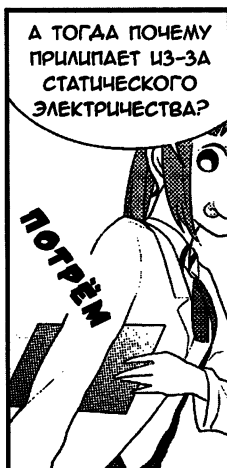






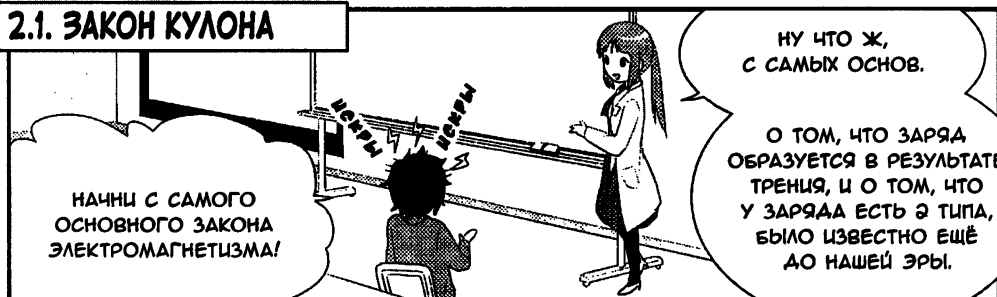
НАВЕРНОЕ,
ЭТО И СТАЛО ПРИЧИНОЙ,
ПОЧЕМУ Я ВЫБРАЛ
ЭТОТ ПУТЬ.







2.1. ЗАКОН КУЛОНА



- Сила, возникающая при взаимодействии двух заряженных тел, прямо пропорциональна произведению их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

ВОТ

ЛУЧШЕ, НАВЕРНОЕ,
ПОСМОТРЕТЬ
НА ФОРМУЛУ.

ЗАКОН КУЛОНА

Закон Кулона

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

F – сила (ньютон, Н);

q_1 и q_2 – точечные заряды (кулон, Кл);

R – расстояние между q_1 и q_2 (метр, м)

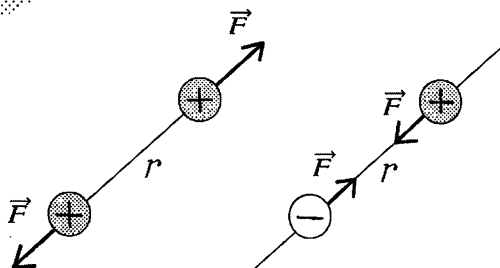
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ (Нм}^2/\text{Кл}^2) \epsilon_0 - \text{коэффициент пропорциональности}$$

* Про единицу заряда кулон см. главу 4.1.

Про ϵ_0 – диэлектрическую проницаемость вакуума см. главу 3.2.

ЭТО ОСНОВА ОСНОВ
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА –
ЗАКОН КУЛОНА.

НА РИСУНКЕ
ЭТО БУДЕТ ТАК



ТО ЕСТЬ

ЧЕМ БОЛЬШЕ ЗАРЯД,
ТЕМ БОЛЬШЕ СИЛА,

ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ
РАССТОЯНИЯ СИЛА
УМЕНЬШАЕТСЯ
ПО КВАДРАТИЧНОМУ
ЗАКОНУ

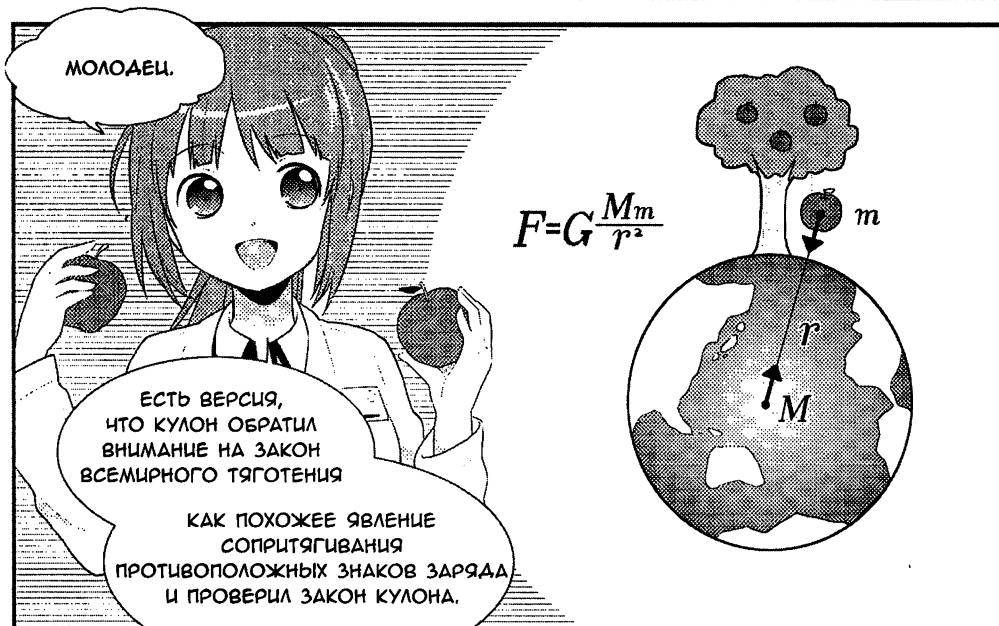
КСТАТИ, СИЛА,
КОТОРУЮ ПОЛУЧАЕТ q_1
ОТ q_2 , И СИЛА, КОТОРУЮ
ПОЛУЧАЕТ q_2 ОТ q_1 ,
РАВНЫ, НО НАПРАВЛЕНИЕ
ПРОТИВОПОЛОЖНО.

ЭТО **ЗАКОН ДЕЙСТВИЯ
И ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ**,
ТО, ЧТО МЫ ПРОХОДИМ
ПО ДИНАМИКЕ.

ХМ, ЧТО-ТО
ЗНАКОМОЕ...



АХ ДА, ЭТО ЗАКОН
ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ!

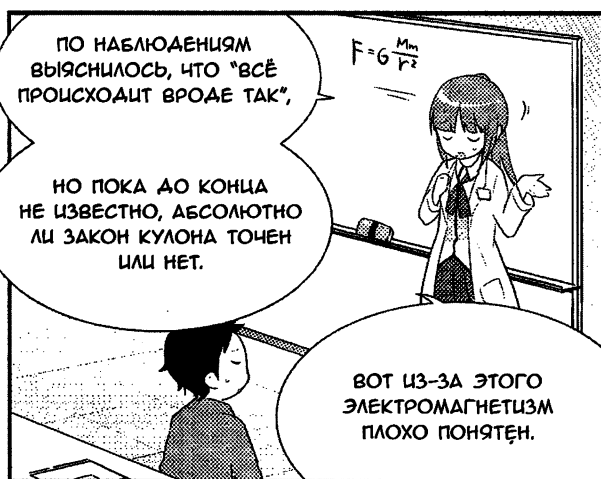
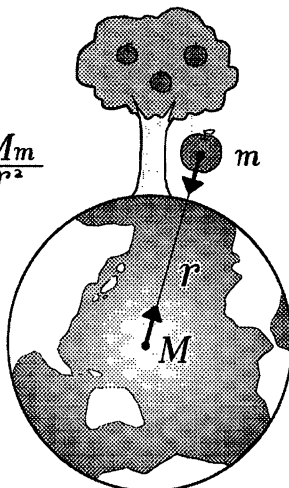


МОЛОДЕЦ.

ЕСТЬ ВЕРСИЯ,
ЧТО КУЛОН ОБРАТИЛ
ВНИМАНИЕ НА ЗАКОН
ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

КАК ПОХОЖЕЕ ЯВЛЕНИЕ
СОПРЯТЯГИВАНИЯ
ПРОТИВОПОЛОЖНЫХ ЗНАКОВ ЗАРЯДА
И ПРОВЕРИЛ ЗАКОН КУЛОНА.

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$



ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
ВЫЯСНИЛОСЬ, ЧТО "ВСЁ
ПРОИСХОДИТ ВРОДЕ ТАК",

НО ПОКА ДО КОНЦА
НЕ ИЗВЕСТНО, АБСОЛЮТНО
ЛИ ЗАКОН КУЛОНА ТОЧЕН
ЛИЛИ НЕТ.

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

ВОТ ИЗ-ЗА ЭТОГО
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ
ПЛОХО ПОНЯТЕН.

НО ЕСЛИ ПРИЗНАТЬ,
ЧТО СИЛА ПОДЧИНЕНА
ЗАКОНУ КУЛОНА,

ТО МОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ,
ЧТО МОЖЕТ ПРОИЗОЙТИ.
СЕЙЧАС Я РАССКАЖУ
О НЕКОТОРЫХ "ИНСТРУМЕНТАХ
ДЛЯ РАЗМЫШЛЕНИЯ".



2.2. ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ И СКАЛЯРНОЕ ПОЛЕ

ЧТОБЫ ПОНЯТЬ
ТУМАННЫЙ ЗАКОН КУЛОНА,
ЛЮДИ ПРИДУМАЛИ
МНОЖЕСТВО ПОНЯТИЙ.

И Т.Д., И Т.П.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ,
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ
ПОТЕНЦИАЛ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ,

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ
О ВЕКТОРНОМ
И СКАЛЯРНОМ ПОЛЕ...

ПОДОЖДИ,
ДАВАЙ ПО ОЧЕРЕДИ!

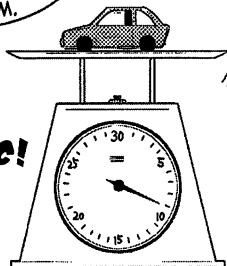
ДЛЯ НАЧАЛА,
ТЫ ЗНАЕШЬ, ЧТО
У ФИЗИЧЕСКОЙ
ВЕЛИЧИНЫ ЕСТЬ
СКАЛЯРНАЯ
И ВЕКТОРНАЯ
ВЕЛИЧИНЫ?

ЭТО ХОТЯ БЫ
ЗНАЮ.

СКАЛЯРНАЯ
ВЕЛИЧИНА –
ЭТО ВЕЛИЧИНА,
КОТОРУЮ МОЖНО
ИЗМЕРИТЬ
ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО
ОБЪЕМОМ.

Скалярная
величина

ВЕС!



ВЕС ИЛИ ВРЕМЯ,
НАПРИМЕР.

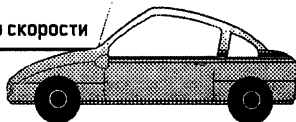
ВЕКТОРНАЯ
ВЕЛИЧИНА –

ЭТО НЕ ТОЛЬКО ОБЪЁМ,
НО И КОГДА ИМЕЕТСЯ
НАПРАВЛЕНИЕ.

Конечная
точка

Начальная
точка

Вектор скорости



Векторная величина

НАПРИМЕР,
ВЕКТОРНАЯ
ВЕЛИЧИНА –
ЭТО СКОРОСТЬ
АВТОМОБИЛЯ +
ЕГО НАПРАВЛЕНИЕ.

СТРЕЛКА ПОКАЗЫВАЕТ
НАПРАВЛЕНИЕ,
А ЕЁ ДЛИНА ОЗНАЧАЕТ
ВЕЛИЧИНУ СКОРОСТИ.
ЭТО ЗНАЧИТ, ВЕКТОР
СКОРОСТИ.

А ТЕПЕРЬ ПОПРОБУЕМ
ОПИСАТЬ СКАЛЯРНУЮ
И ВЕКТОРНУЮ ВЕЛИЧИНЫ
С ПОМОЩЬЮ ПОЛЯ.

ПРО ПОЛЯ ЧАСТО СЛЫШУ
В ФИЗИКЕ, НО СЛОЖНО
ЕГО ВОООБРАЗИТЬ...

НИЧЕГО
СЛОЖНОГО.

ТЫ, КОНЕЧНО ЖЕ,
БЫЛ В БАССЕЙНЕ
С ТЕЧЕНИЕМ ВМЕСТЕ
С РЕБЯТАМИ? НАВЕРНОЕ,
ЭТО СКУЧНО?

АА.

ХОТЯ ПРО СКУЧНО
ТЫ ЗРЯ.

ЭТО ТОЖЕ НЕЧТО
ВРОДЕ ВЕКТОРНОГО
ПОЛЯ.

В КАЖДОМ МЕСТЕ ЕСТЬ
ВЕКТОРНАЯ ВЕЛИЧИНА.

ТО ЕСТЬ
В КАЖДОМ МЕСТЕ
ЕСТЬ ОПРЕДЕЛЁННОЕ
НАПРАВЛЕНИЕ
И СКОРОСТЬ ТЕЧЕНИЯ.

ЕСТЬ И СКАЛЯРНОЕ ПОЛЕ.

В СКАЛЯРНОМ ПОЛЕ
В КАЖДОМ ОПРЕДЕЛЁННОМ
МЕСТЕ ЕСТЬ СКАЛЯРНАЯ
ВЕЛИЧИНА.

ВОТ

ВОТ КОНТУРНАЯ КАРТА.
ЗДЕСЬ ОДИНАКОВЫЕ
СКАЛЯРНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ
(ВЫСОТА НАД УРОВНЕМ МОРЯ)
СОЕДИНЕНЫ ЛИНИЯМИ.

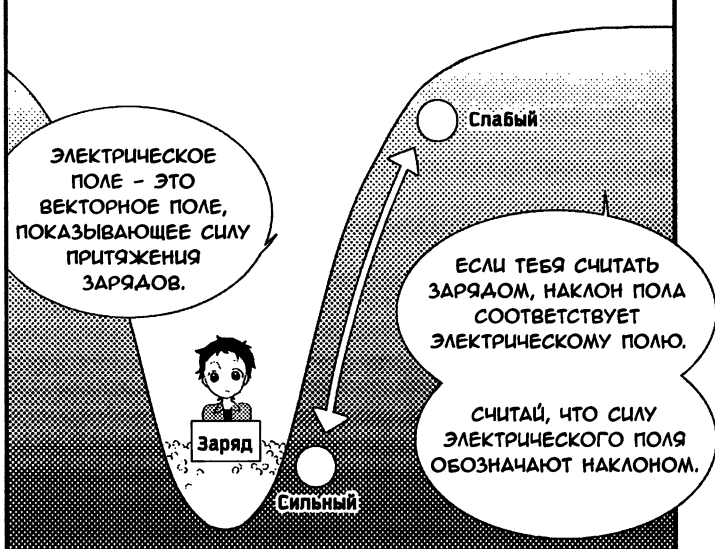
ЗНАЧИТ, КОНТУРНАЯ
КАРТА ПОКАЗЫВАЕТ
СКАЛЯРНОЕ ПОЛЕ
ВИЗУАЛЬНО.

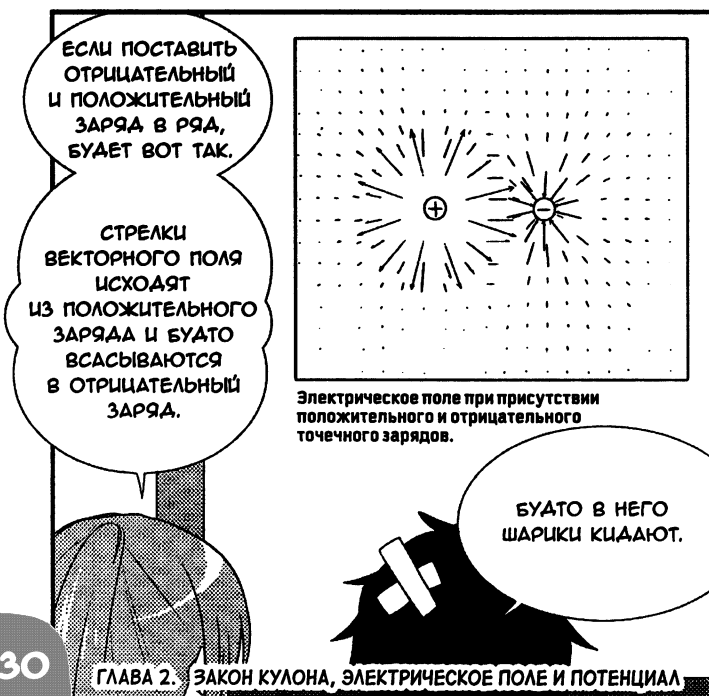
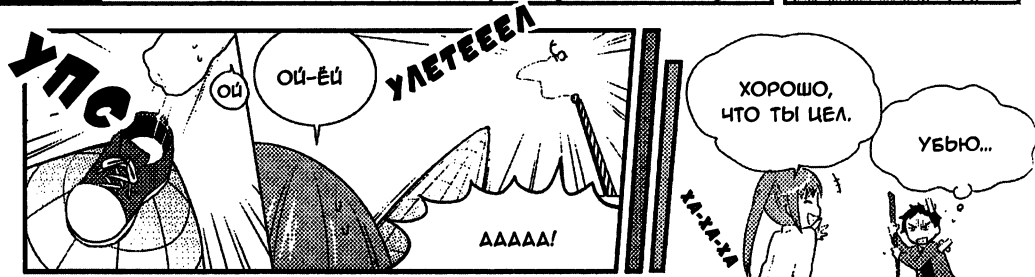
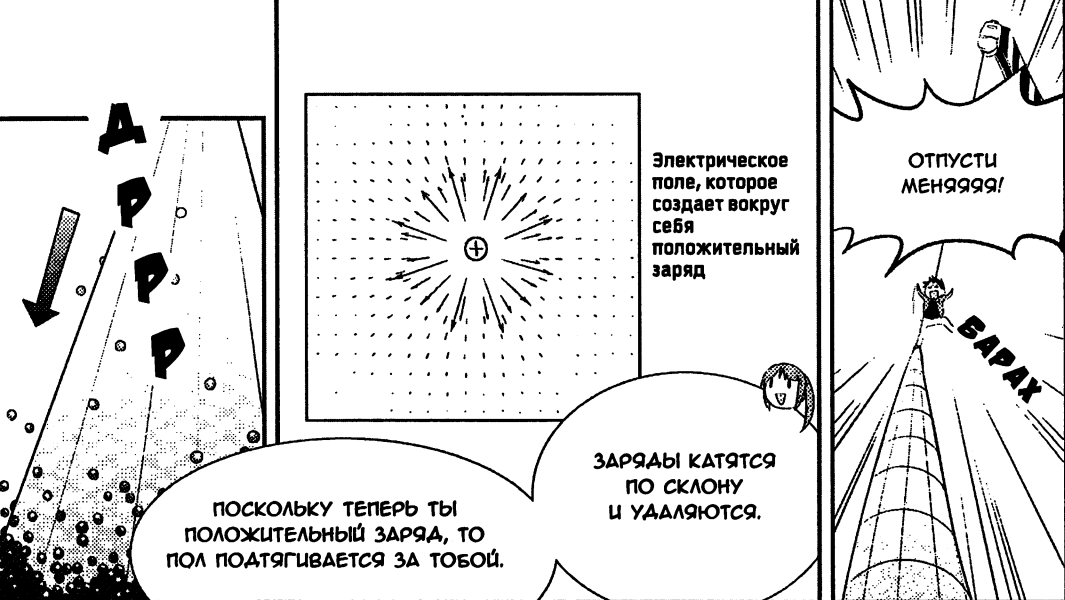
А ТЕПЕРЬ

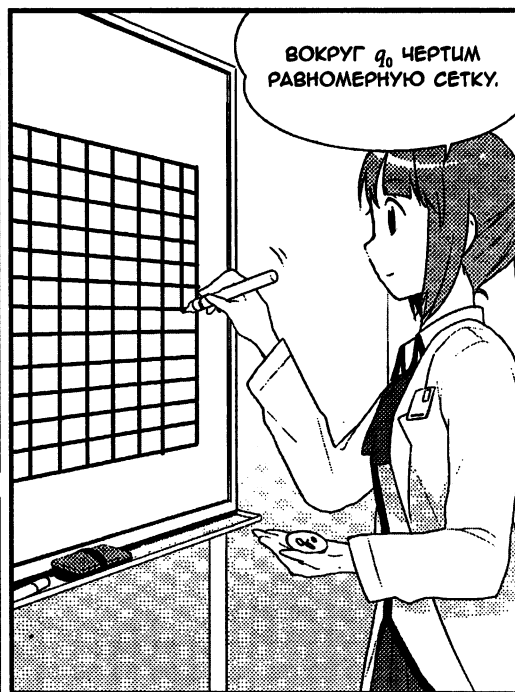
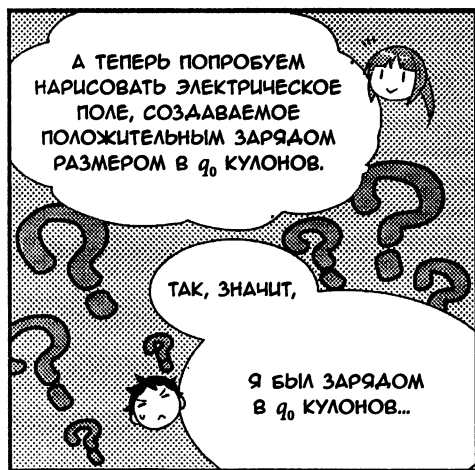
СВОИМ ТЕЛОМ
ПОЗНАЕМ, ЧТО ТАКОЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТЕНЦИАЛ!

2.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ









ЗАТЕМ СЧИТАЕМ
ВЕЛИЧИНУ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
НА ТОЧКЕ РЕШЁТКИ.

КЛАДЁМ МАЛЕНЬКИЙ
ЗАРЯД С ВЕЛИЧИНОЙ q
И ИЗМЕРЯЕМ СИЛУ,
КОТОРОЙ БУДЕТ
ПОДВЕРЖЕН ЗАРЯД.

КАКОВ БУДЕТ
РАЗМЕР?

ВОТ

ЗАКОН КУЛОНА?
ВСЁ ПРОСТО,

$$F = k \frac{q_0 q}{r^2} \text{ ВОТ.}$$

ХОРОШО,
А ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ПОЛЕ?

ТААК...

АХ АА,

$$E = k \frac{q_0}{r^2}$$

АА, ЭТО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ПОЛЕ, КОТОРОЕ СОЗДАЁТ
ЗАРЯД q_0 НА РАССТОЯНИИ r .

СРАВНИ $F = k \frac{q_0 q}{r^2}$
С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
 $\vec{F} = q \vec{E}$

НАПРАВЛЕНИЕ, КОНЕЧНО,
ОТТАЛКИВАЮЩЕЕ,
СООТВЕТСТВЕННО, ПРЯМО
В ПРОТИВОПОЛОЖНУЮ
СТОРОНУ ОТ ЗАРЯДА.

ПОПРОБУЕМ НАЧЕРТИТЬ
СТРЕЛКУ.

ПОДСЧИТАВ ЭТО
НА ВСЕХ ТОЧКАХ РЕШЁТКИ,
ПОЛУЧАЕТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ПОЛЕ ВОКРУГ q_0 .

ДЛИНЫ СТРЕЛОК ВЕЛИКИ
И ВАААА ОЧЕНЬ РАЗНЫТСЯ.

ЭТО ПРОИСХОДИТ
ИЗ-ЗА ТОГО, ЧТО ЭТО ОБРАТНЫЙ
КВАДРАТ. ЕСЛИ РАССТОЯНИЕ
В 2 РАЗА БОЛЬШЕ, ВЕЛИЧИНА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ $1/4$,
ЕСЛИ В 4 РАЗА - $1/16$.

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

ЗАРЯДЫ МЕЖДУ СОБОЙ
ДЕЙСТВУЮТ ПО ЗАКОНУ
КУЛОНА.

ТО, ЧТО Я РАССКАЗАЛА
ПРО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ,
И ТО, ЧТО СЕЙЧАС РАССКАЖУ
ПРО ПОТЕНЦИАЛ, - СПОСОБЫ
ЛЕГЧЕ ПОНЯТЬ ЭТО ЯВЛЕНИЕ.

2.4. ПОТЕНЦИАЛ

ТЕПЕРЬ ОБРАТИМ
ВНИМАНИЕ НА
ПОТЕНЦИАЛ ВОКРУГ q_0 .

НАДО ПРИДУМАТЬ
ТАКУЮ ГОРКУ,
ЧТОБЫ ВЕЛИЧИНА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
БЫЛА С УКЛОНОМ.

ЗНАЧИТ, ЧЕМ БЛИЖЕ К q_0 ,
ТЕМ ГОРКА БУДЕТ КРУЧЕ?

АА.

УКЛОН НАДО ПОНИМАТЬ
КАК ДИФФЕРЕНЦИАЛ
ПРО ФУНКЦИИ.

АНТОНИМ
ДИФФЕРЕНЦИАЛА?

ИНТЕГРАЛ!

ПРАВИЛЬНО! ИНТЕГРИРОВАВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ,
МОЖНО ПОЛУЧИТЬ
ПОТЕНЦИАЛ, ОБРАЗУЮЩИЙ
ДАННОЕ ПОЛЕ.

А ИНТЕГРАЛ r^{-2} ?

ЛЕГКО!

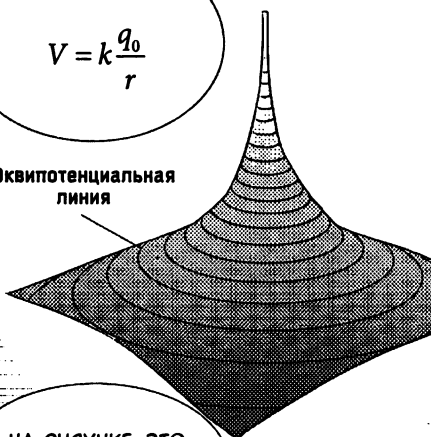
ПРИ РАЗОВОЙ
ИНТЕГРАЦИИ СТЕПЕНЬ
ПОДАНИМАЕТСЯ
НА ОДНУ, ЗНАЧИТ

r^{-1} , ТАК?

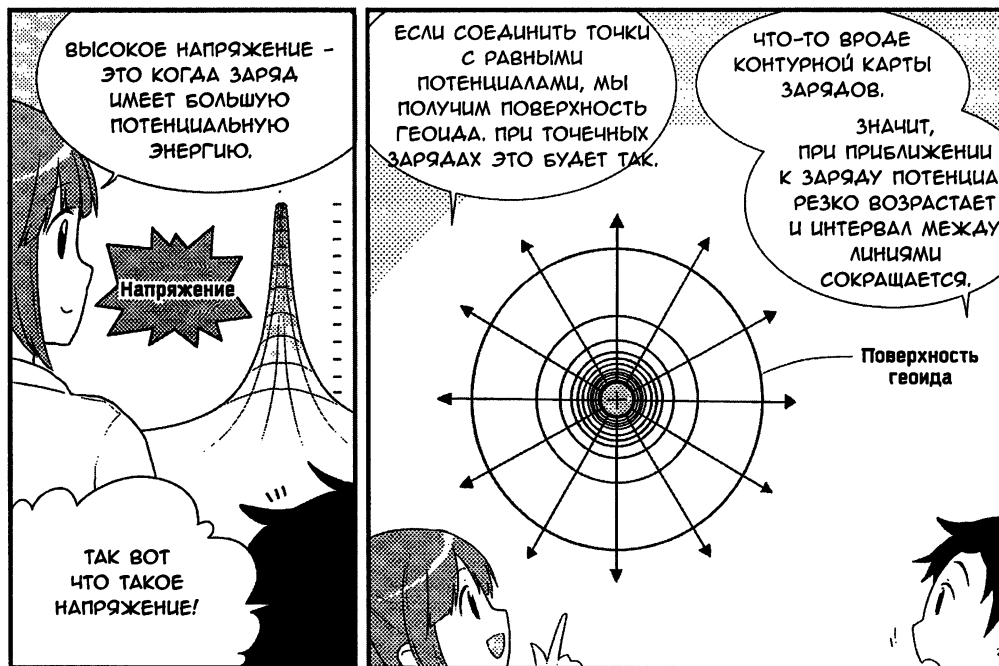
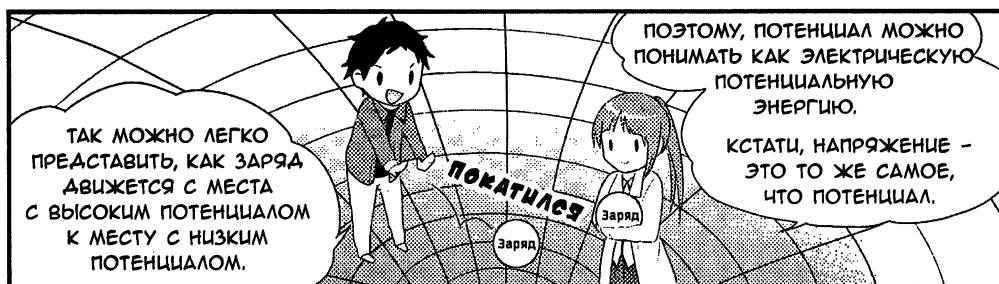
ПРАВИЛЬНО.
ПРИ ОТНОШЕНИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
И ПОТЕНЦИАЛА ПРИСТАЁТ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ЗНАК.
БУДЕТ

$$V = k \frac{q_0}{r}$$

ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНАЯ
ЛИНИЯ



НА РИСУНКЕ ЭТО
ВЫГЛЯДИТ ТАК.



* Потенциал обозначают скалярным полем V как $\vec{E} = -\text{grad}V$. См. приложение «Вектор и скаляр».

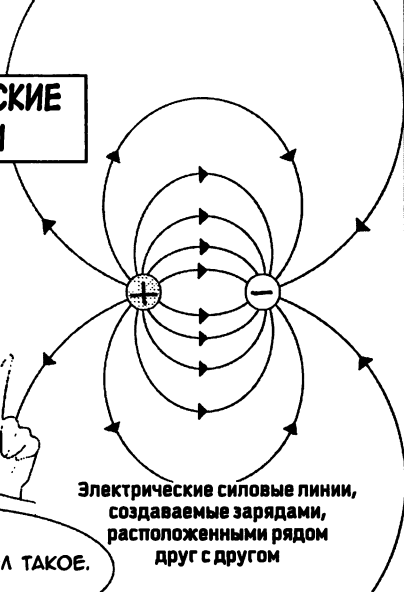
2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ

И ПОСЛЕДНЕЕ,
ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИЛОВЫХ ЛИНИЯХ.



НАВЕРНОЕ, ТЫ ВИДЕЛ ТАКОЕ.

Электрические силовые линии,
создаваемые зарядами,
расположенными рядом
друг с другом



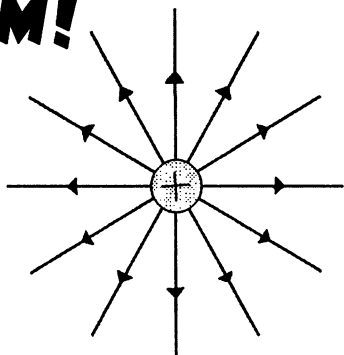
АА, ЕСЛИ МАГНИТ
ПОСТАВИТЬ У ЖЕЛЕЗНОГО
ПЕСКА, ПОЛУЧАЕТСЯ
ПОХОЖЕЕ.



ЭТО МАГНИТНЫЕ
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ. ПОХОЖИ,
НО ЕСТЬ И ОТЛИЧИЯ.

НАПРИМЕР...

ПУМ!



Электрические силовые линии,
созданные точечными зарядами

ПИК



МАГНИТНЫЕ
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ

ОБРАЗУЮТСЯ ТОЛЬКО
МЕЖДУ МАГНИТНЫМИ
ПОЛЮСАМИ.

ПОНЯЛ,

НО ВСЕ-ТАКИ,
ЭТО ЧТО ЗА ЛИНИИ?

ЭТО СПОСОБ
ВИЗУАЛЬНО ИЗООБРАЗИТЬ
ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ -
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

Правила черчения электрических силовых линий

Правило 1. Электрические силовые линии начинаются с положительных зарядов и заканчиваются на отрицательных. Лишние линии исчезают в бесконечности.

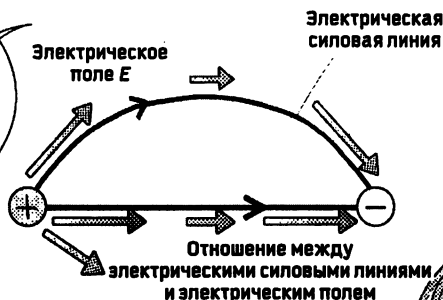
Правило 2. Количество электрических силовых линий, исходящих от заряда, пропорционально количеству зарядов.

Правило 3. Электрические силовые линии не пересекаются.

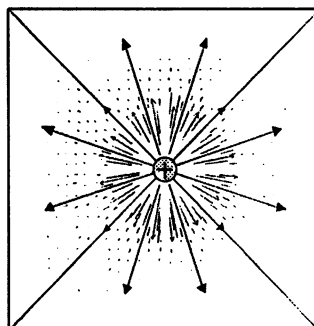
Правило 4. Электрические силовые линии пытаются отдалиться друг от друга.

А для черчения электрических силовых линий есть 4 правила.

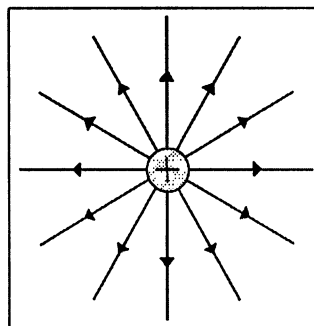
Следуя этим правилам при черчении электрических силовых линий: от заряда, автоматически получаются линии вдоль направления электрического поля.



А схема векторного поля не подходит?



Электрическое поле, созданное точечным зарядом, образуется вокруг себя



Электрические силовые линии, созданные точечным зарядом

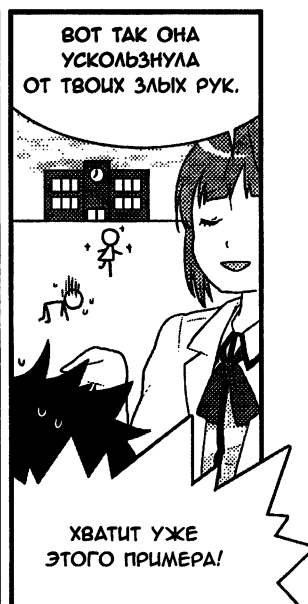
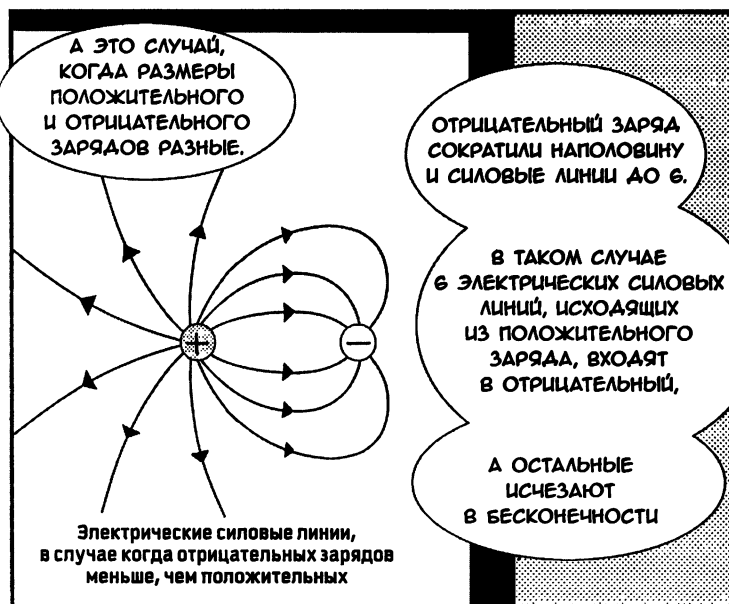
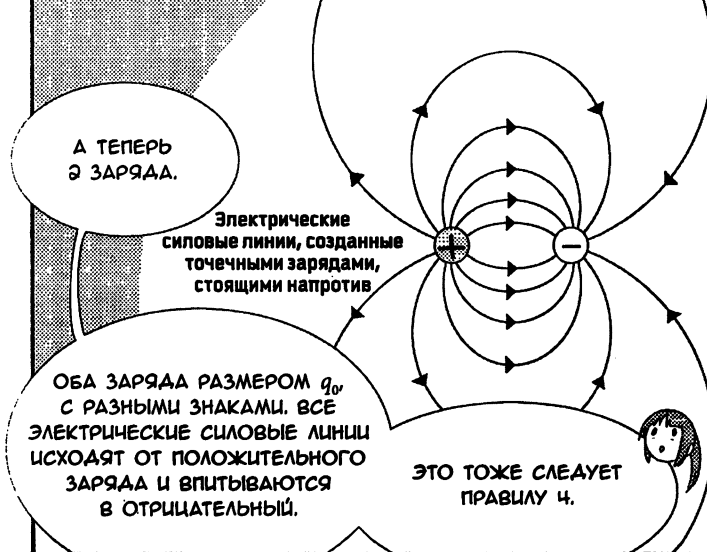
С электрическими силовыми линиями легче.

Попробуем изобразить векторное поле вокруг положительного заряда электрическими силовыми линиями.

На величину заряда q_0 здесь 10 электрических силовых линий.

Следуя правилам 1 и 4, электрические силовые линии становятся прямыми линиями с равными интервалами, начинаются от заряда и исчезают в бесконечности.

Действительно, стало понятнее!





НУ ЧТО Ж,
НА СЕГОДНЯ ВСЁ.



ОПЯТЬ
ОПАСНЫЕ
ОПЫТЫ?

А МЕНЯ С СОБОЙ
ВОЗЬМЁШЬ?

А У МЕНЯ
ЕСТЬ ДЕЛА



НЕЕ, НЕ ОПЫТЫ,
А ВОТ ЭТО.



ИГРОВЫЕ
АВТОМАТЫ!?

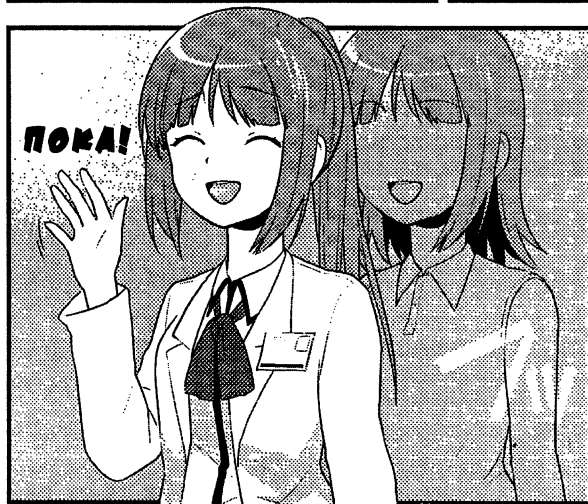
А ОПАСНЫЕ ОПЫТЫ
ТЫ УЖЕ
НЕ ДЕЛАЕШЬ?



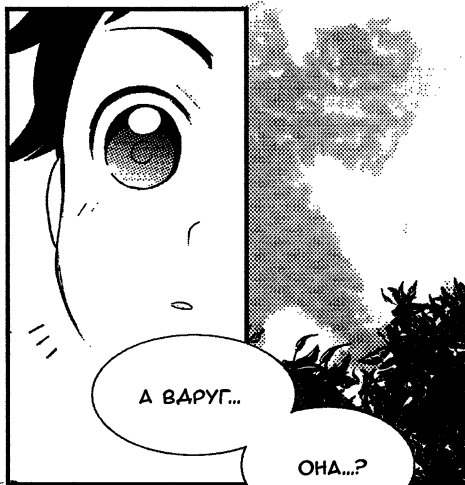
ТЕБЕ ЕЩЁ РАНО!

УАОВЛЕТОРИСЬ
СТАТИЧЕСКИМ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВОМ!

У МЕНЯ
СТРЕМЛЕНИЕ
К НАУКЕ, А ТЫ
ВСЁ ШУТИШЬ!



ПОКА!



А ВАРУГ...

ОНА...?

А ТЕПЕРЬ ПОДРОБНЕЕ

⊕ Система единиц электромагнетизма ⊖ и величина одного кулона

За всё время развития науки об электромагнетизме в ней присутствовали различные единицы измерения. И в этом нет ничего странного – взять даже такие понятия, как длина, масса, – и они имеют различные измерения. В метрической системе мер, которая получила наиболее широкое распространение, величины длины и массы привязаны к величине земного шара и массе воды. Итак, как же наиболее справедливо определить основную единицу электромагнетизма – величину заряда? Интуитивно можно предположить, что сила взаимодействия зарядов на определённом расстоянии и имеющая определённое значение и будет величиной заряда этих атомов. И действительно, величина, выведенная таким образом, существовала, но в настоящее время она не используется. В настоящее время в основном применяется международная система единиц СИ, составной частью которой является система МКСА. МКС в названии – это единицы длины (метр), единицы массы (килограмм) и единицы времени (секунда). Последняя буква аббревиатуры – это единица измерения силы электрического тока – ампер (глава 4). Здесь я не буду останавливаться на том, почему так произошло, поскольку это тема для отдельной книги. Тем более что такая книга уже существует, и я хотел бы, чтобы вы с ней ознакомились¹.

Как бы то не было, одним кулоном стали называть величину заряда, прошедшего через проводник при силе тока 1 А за время 1 с. Итак, какова же величина одного кулона? Ниже приводится закон Кулона, где 1 Кл – это величина зарядов, а 1 м – расстояние между ними:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ (Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2)),$$

в котором сила взаимодействия этих зарядов равна $9,0 \times 10^9$ Н. Для сравнения: такая сила соответствует силе тяжести самого большого в мире танкера массой в 900 000 т. В обычной же жизни мы практически не встречаемся с такой огромной величиной заряда. Ведь когда положительные и отрицательные заряды постоянно находятся по соседству друг с другом, очень трудно отделить большое количество зарядов на приличное расстояние друг от друга (если задуматься о результате, то это, наверное, естественно). С другой стороны, ток величиной в 1 А – это обычный ток, как, например, в лампочке 200 Вт. Такой контраст представляет для нас огромный интерес.

¹ Сигэо Кохата. Как появились электромагнитные единицы измерения. Развитие науки электромагнетизма. Эволюция системы измерений. Издательство Когакуся, 2003.

Итак, минимальный заряд – это один электрон, величина этого заряда – $1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Вам кажется, что это мало? Тем не менее слиток меди размером с 1 см^3 (как кусочек сахара) содержит около $8,5 \times 10^{22}$ штук свободных электронов, и если выразить это в кулонах, получится 14 000 Кл.

⊕ Как узнать напряжённость электрического поля, исходя из распределения зарядов

В книге уже упоминалось о том, что если от заряда провести, руководствуясь правилом, силовую линию электрического поля, то можно понять поведение электрического поля, однако вышеуказанное правило – вещь довольно абстрактная, и с его помощью сложно вычислить точную напряжённость электрического поля и его направление. Как же правильно вычислить напряжённость электрического поля? В некоторых случаях, когда наблюдается сферически симметричное распределение заряда либо бесконечная прямолинейная нить, нам может помочь теорема Гаусса, о которой говорится в третьей главе и с помощью которой мы с лёгкостью сможем сделать эти вычисления. Однако, для того чтобы вычислить напряжённость электрического поля, создаваемого любым распределением зарядов, необходимо решить дифференциальное уравнение. Если объединить дифференциальную форму закона Гаусса:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho (\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E})$$

и равенство «градиент (grad) электрического поля является электрическим потенциалом V »

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V$$

(приложение «Векторы и скаляры», стр. 247), то получим приведенное ниже уравнение Пуассона:

$$\begin{cases} \operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \vec{E} = -\operatorname{grad} V \end{cases} \rightarrow \operatorname{div}(\operatorname{grad} V) = -\frac{\rho}{\epsilon_0}.$$

Если записать это подробно, символами дифференциалов, то получаем:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}.$$

Только векторный анализ, преподаваемый в университетах, может помочь нам полностью понять всё вышесказанное, поэтому мы с вами попробуем понять хотя бы основную суть. Рассмотрим значение вышеприведённого уравнения:

- левая часть: сумма вторых производных (дифференциалов) во всех направлениях потенциала V (скалярное поле) в определённой точке;
- правая часть: частное со знаком минус заряда в этой точке, поделённого на объём (плотность заряда ρ) и поделённого на электрическую постоянную.

Мы понимаем, что и в правой, и в левой частях, если заданы координаты (x, y, z) , то значение в данной точке определено этими координатами. В правой части заранее известны координаты точечного заряда, поэтому мы можем получить все остальные значения. В левой же части нам неизвестно значение V . Однако если для V найти второй дифференциал через x, y и z , то нам известно лишь то, что сумма этих координат равна значению в правой части уравнения. Символ в левой части уравнения обозначает дифференциал, и если V является функцией (x, y, z) , то дробь $\frac{\partial V}{\partial x}$ имеет следующее значение: требуется найти скорость изменения $\frac{\partial V}{\partial x}$ в момент, когда потенциал V был отмечен в направлении, параллельном оси x .

Упростим задачу и возьмём для V лишь функцию x . Если V вместе с x увеличивается с постоянной скоростью, то дробь $\frac{\partial V}{\partial x}$ будет иметь постоянное значение со знаком плюс. Теперь найдём второй дифференциал: $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$. Графически это будет выглядеть, как на рис. 2.1а. Далее предположим, что V находится около начала координат, тогда кривая будет выпуклая вниз, как показано на рис. 2.1б. При этом $\frac{\partial V}{\partial x}$ будет располагаться возле начала координат и будет увеличиваться как линейная функция, во внешней же области будет плоской. Более того, $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$ будет располагаться близко к точке начала координат и иметь большую величину. Пойдём от противного: можно сказать, что когда дробь $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$ имеет значение со знаком плюс, то недалеко от этой точки кривая $V(x)$ будет выпуклая вниз. Если найти первый дифференциал функции, то мы узнаем степень наклона кривой, но для некоторых функций вычисление второго дифференциала даёт нам возможность узнать, в каком направлении прогибается функция – вверх либо вниз. Итак, значение уравнения Пуассона можно выразить следующим образом: «если присутствует отрицательная плотность заряда, то в этой точке функция V будет выпуклой вниз». Это не что иное, как математическое выражение взаимодействия Андо с мембраной, когда Шиеру толкнула Андо в комнату.

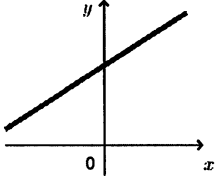
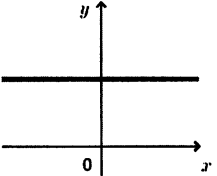
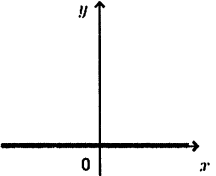
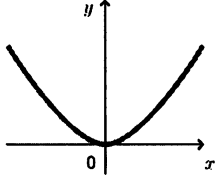
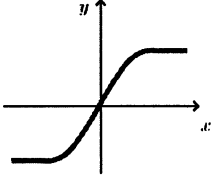
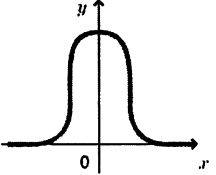
	Функция	Первый дифференциал	Второй дифференциал
(a)			
(б)			

Рис. 2.1. Форма функции и её вторая производная (дифференциал)

Итак, теперь, когда мы знаем, где и в каком количестве находится заряд, нам предстоит решить следующую задачу: требуется найти V , удовлетворяющую уравнению $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$. Если известна вторая производная функции, то для того, чтобы узнать саму функцию, требуется найти интеграл второго порядка. Нужно заметить, что такой интеграл практически невозможно вычислить самостоятельно, для подобных вычислений понадобится компьютер.

В результате вычислений получаем скалярное поле, которое выражает потенциал V в каждой точке пространства (по осям x, y, z). Конечно же, данный потенциал V в каждой точке удовлетворяет условию формулы $\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$. Для того чтобы из этой формулы вычислить напряжённость электрического поля, необходимо использовать формулу отношения потенциала и электрического поля:

$$\vec{E} = -\text{grad}V.$$

Если эту формулу записать с помощью знаков дифференциала, то получаем:

$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial z}\right).$$

Итак, если для потенциала V , полученного путём вычисления интеграла второго порядка, найти первый дифференциал, то получится напряжённость электрического поля \vec{E} . Этот метод – вычисление потенциала и напряжённости электрического поля в каждой точке пространства при взаимодействии электрических зарядов – широко применяется на практике, например при проектировании электроприборов.

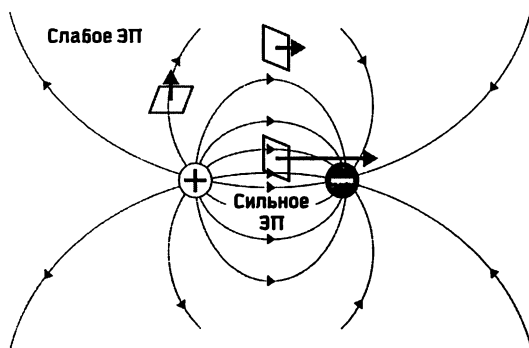


Рис. 2.2. Электрические силовые линии, которые образуют встречающиеся точечные заряды

Итак, теперь, когда нам известно электрическое поле \vec{E} , давайте подумаем, как из этого поля провести электрические силовые линии. Это очень просто: если провести от заряда линию, которая всегда будет идти в направлении электрического поля, то у нас автоматически получатся электрические силовые линии. Если присутствуют положительные и отрицательные заряды одинаковой величины, то если «выйти» из положительного заряда и двигаться вдоль направления электрического поля, мы обязательно «войдём» в отрицательный заряд. А траекторией этого движения и будет являться электрическая силовая линия. Электрические силовые линии, показанные на рис. 2.2, были проведены именно таким образом.

Изображение электрического поля с нарисованными электрическими силовыми линиями как нельзя лучше подходит для интуитивного распознавания распределения напряжённости и направления электрического поля. В манге уже говорилось о том, что направление электрического поля совпадает с направлением электрических силовых линий, но не будем забывать о том, что плотность электрических силовых линий также выражает напряжённость электрического поля. В местах, где силовых электрических линий много, напряжённость электрического поля велика, и, наоборот, в местах, где линий мало, поле слабое. Как показано на рисунке, если приложить эталонный квадрат перпендикулярно к линии, то количество проходящих в этом месте электрических силовых линий и будет напряжённостью этого электрического поля. При этом мы должны понимать, что если нет никаких линий вообще, то это не значит, что электрического поля нет вообще, это просто означает, что плотность линий низкая и напряжённость поля слаба.

ШАГ ВПЕРЁД

⊕ Почему электрические силовые линии и напряжённость ⊖ электрического поля совпадают?

Для того чтобы подробно ответить на этот вопрос, придется углубиться в науку об электромагнетизме, чего я делать не буду, а просто попытаюсь передать суть. Прежде всего правило, что из заряда выходят силовые электрические линии (или, наоборот, линии выходят только из заряда и не из каких других точек), отражено в первом уравнении Максвелла так: $\text{div} \vec{D} = \rho$. Одновременно это отражено в законе Кулона, который гласит о том, что «сила взаимодействия между двумя точечными электрическими зарядами обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними». Кроме того, он отражает свойство электрических силовых линий не пересекаться и не разветвляться, иными словами, электрические силовые линии – это обязательно такие линии, которые проходят вдоль направления силового поля. Ведь если бы они пересекались, это означало бы, что в одной и той же точке напряжённость электрического поля имеет два различных направления. Так вот, свойство силовых линий сокращаться и отталкиваться друг от друга выражает силу кулона. Свойство силовых линий сокращаться выражает силу притяжения, если знаки зарядов разные, а свойство соседних линий отдаляться друг от друга выражает силу отталкивания, когда знаки зарядов одинаковые.

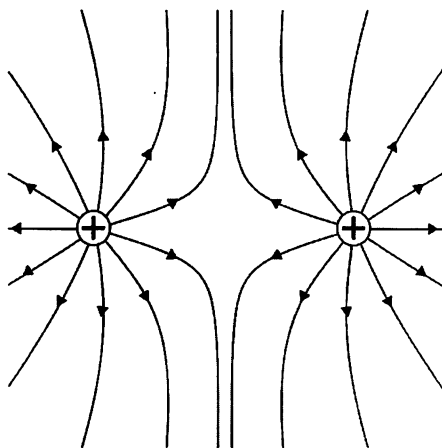


Рис. 2.3. Два заряда с одинаковыми знаками
и одинаковой величины и силовые линии

Линии, которые в определённом количестве выходят из заряда, никогда не пересекаются и стремятся оттолкнуться друг от друга и сократиться в длине, притягивают заряды с разными знаками и отталкивают заряды с одинаковыми знаками. Более того, их величина точно соответствует закону Кулона. Поэтому принципом силовых линий является то, что линии, проведённые в соответствии с правилом, выражают напряжённость силового поля, а именно направление и величину силы зарядов.

В качестве примера на рис. 2.3 мы привели силовые линии двух зарядов одинаковой величины с одинаковыми знаками. Этот рисунок, я думаю, хорошо демонстрирует свойство силовых линий взаимно отталкиваться, которое и выражает кулоновскую силу отталкивания для зарядов с одинаковыми знаками.

Я понимаю, что все мои объяснения довольно абстрактны, и среди вас немало таких, кто так и не понял, что по силовой линии электрического поля можно узнать и напряжённость электрического поля. Математические основы свойств электрических силовых линий во многих учебниках по электромагнетизму упоминаются как тензор напряжений Максвелла. Обязательно почитайте.

В электростатическом поле всегда есть потенциал

Почему же можно сказать, что когда есть электростатическое поле \vec{E} , то обязательно существует и скалярное поле V (потенциал), градиент которого будет электрическим полем? Ключом к ответу на этот вопрос может стать понимание принципа суперпозиции электрических полей. Принцип суперпозиции гласит: для нескольких точечных зарядов напряжённость электрического поля в точке P равна векторной сумме электрических полей этих зарядов. Схематично этот принцип продемонстрирован на рис. 2.4.

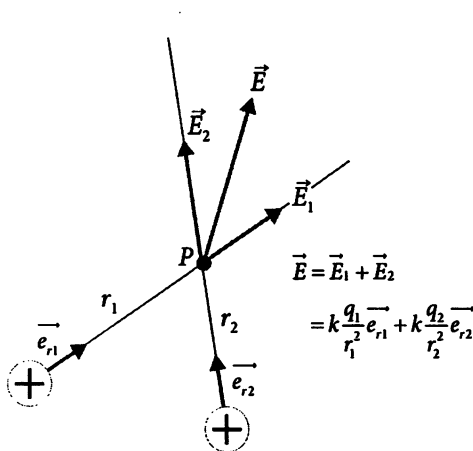


Рис. 2.4. Принцип суперпозиции электрического поля

Конечно же, чтобы узнать, работает ли этот принцип, нужна строгая проверка. Однако мы с вами просто поверим в то, что принцип суперпозиции электрического поля работает, что и доказывают нижеприведённые факты.

Из закона Кулона выходит, что электрическое поле в точке P , которая удалена от заряда величиной q^1 на расстояние r^1 , записывается формулой:

$$\vec{E}_1 = k \frac{q_1}{r_1^2} \vec{e}_{r1},$$

где k – постоянная Кулона ($\text{Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$);

r_1 – расстояние от точечного заряда (м);

q_1 – величина точечного заряда (Кл);

\vec{e}_{r1} – единичный вектор с направлением r_1 .

Если в эту же точку попадает заряд q_2 , то электрическое поле будет:

$$\vec{E}_{1+2} = k \frac{(q_1 + q_2)}{r_1^2} \vec{e}_{r1}.$$

Два заряда, находящихся в одной точке, не взаимодействуют друг с другом, а напряжённость электрического поля в точке P будет просто равна сумме напряжённостей электрических полей q_1 и q_2 . Это абсолютная правда¹, и если нарушится это правило, закон Кулона не будет работать. Теперь попробуем переместить q_2 из положения q_1 . И в этом случае q_1 и q_2 не взаимодействуют, а напряжённость электрического поля в точке P опять же будет равна сумме электрических полей, которые образуют по отдельности q_1 и q_2 . Кстати, в настоящее время не существует ни одного экспериментального факта, опровергающего принцип суперпозиции.

Следовательно, если есть потенциал V , соответствующий электрическому полю, которое создает один точечный заряд, то при любом распределении зарядов можно разделить их на точечные заряды и совместить потенциалы каждого из точечных зарядов, поэтому для различных видов распределения зарядов существуют соответствующие потенциалы.

Когда один точечный заряд q_0 имеет нулевые координаты, то силовое поле вокруг него можно выразить только с помощью функции радиуса r :

$$E = k \frac{q_0}{r^2}.$$

Электрическое поле выражено градиентом потенциала, а поскольку градиент вычисляется по тому же принципу, что и дифференциал, давайте рассмотрим дифференцируемую функцию. Итак, функция $\frac{1}{r^2}$ после дифференцирования станет $-\frac{1}{r^3}$, поэтому временно примем

¹ Я не говорю, что это «абсолютно правильно», а просто говорю о том, что всё классическое учение об электромагнетизме берёт своё начало именно из веры в то, что это правда. Хотя и то, и другое не верно.

$$V = k \frac{q_0}{r}$$

за потенциал, который образует точечный заряд.

Функция V проверяет, есть потенциал, который образует электрическое поле \vec{E} , или нет. Электрическое поле – это градиент со знаком минус, таким образом, формула $\vec{E} = -\text{grad}V$ означает, что направление вектора электрического поля, находящегося в определённой точке, совпадает с наиболее изменившимся направлением скалярного поля V в той точке, и его значение будет равно $\frac{dV}{ds}$, если небольшое расстояние, которое он проделал в этом направлении, взять за ds .

Рассмотрим V в положении радиуса r от нуля. Тогда, поскольку r во всех точках имеет постоянную величину, до тех пор, пока V будет двигаться вдоль сферической поверхности радиуса, потенциал будет иметь постоянное значение. Таким образом, мы понимаем, что V наиболее всего изменится в направлении, перпендикулярном к сфере радиуса. Далее, если чуть-чуть сместиться в направлении радиуса r , то V слегка изменится, коэффициент изменения будет равен $\frac{dV}{dr}$, из чего получается $\text{grad}V$.

Итак, попробуем подробно расписать формулу $-\text{drag}V = \frac{dV}{dr}$:

$$-\frac{d}{dr}\left(k \frac{q_0}{r}\right) = k \frac{q_0}{r^2}.$$

Таким образом, мы получили электрическое поле, которое совпадает с законом Кулона. Следовательно, мы выяснили, что точечный заряд создает потенциал, выраженный в функции $V = k \frac{q_0}{r}$, и можно сказать, что при любом распределении зарядов будет присутствовать соответствующее скалярное поле V .

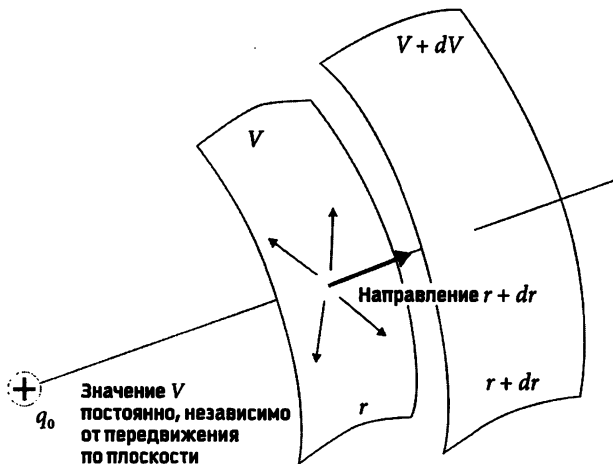
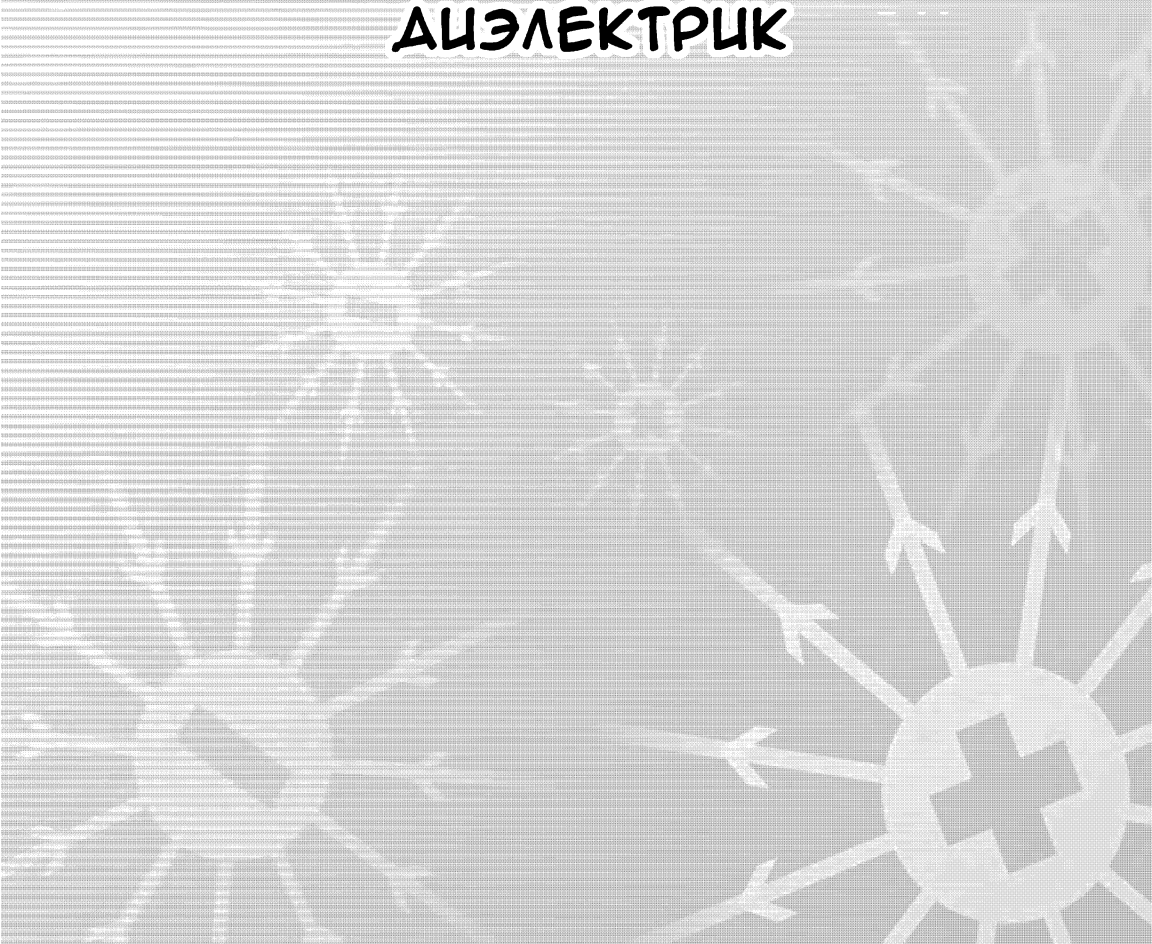


Рис. 2.5. Направление потенциала и электрического поля, создаваемые точечными зарядами

ГЛАВА 3

ТЕОРЕМА ГАУССА, ПРОВОДНИК, ДИЭЛЕКТРИК





НАКОНЕЦ, СЕГОДНЯ
БУДЕТ БОЛЬШОЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ.

уф-ф

ВОТ КУПИЛ!
ЧЕРТОВСКИ ДАЛЕКО
ПРИШЛОСЬ ХОДИТЬ!

СПАСИБО!
ДОВОЛЬНО БЫСТРО.



ВКУСНЯШКА!
ВОТ ЭТО ШЕДЕВР.



ЭЙ!
ТЫ ЖЕ ГОВОРИЛА,
ЭТО ДЛЯ
ЭКСПЕРИМЕНТА!

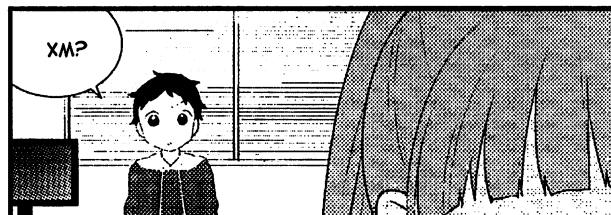
НУ ВОТ, ЧТОБЫ
ГОЛОВА ХОРОШО
РАБОТАЛА, НАДО
СЛААКОГО ПОЕСТЬ.

* Ёкан – это разновидность
японской пастилы из бобов.



АА И КАК ЖЕ
МОЖНО ЁКАН*
ИСПОЛЬЗОВАТЬ
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ?

ИЗ-ЗА ТАКОЙ ЕРУНАЫ
ОНА ПОГНАЛА МЕНЯ
В МАГАЗИН...



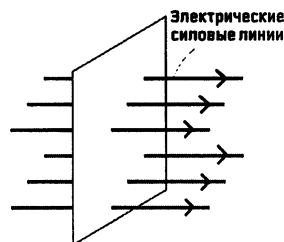
3.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ

ПЕРЕД ТЕМ, КАК ОБЪЯСНИТЬ ТЕОРЕМУ ГАУССА, НАДО ЗНАТЬ О ТАКОМ ПОНЯТИИ, КАК "ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ".

ЭТО ТОЖЕ КАК И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ПОТЕНЦИАЛ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ, СЧИТАЙ КАК СПОСОБ МЫШЛЕНИЯ.

Электрические силовые линии, созданные точечными зарядами, стоящими напротив

ПУМ!



ВСПОМНИ,

ГДЕ ПРОХОДИТ МНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ, ЭТО МЕСТА С СИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ.

ТУК
ТУК

ПОПРОБУЕМ ПОЛУЧИТЬ ПЛОТНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ, УМНОЖИВ ДАННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НА ПОСТОЯННУЮ.

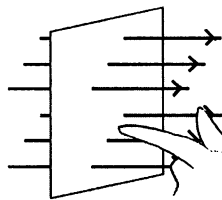
$D = \epsilon_0 E$ – электрическая индукция (Кл/м^2), где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($\text{Кл}^2/\text{Н}\cdot\text{м}^2$);

E – напряжённость электрического поля (Н/Кл)

D – ЭТО ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ, ПОЛУЧЕННАЯ ПУТЕМ УМНОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВАКУУМА.

* E – прописная буква Electric Field (электрическое поле)
 D – прописная буква Displacement (электрическое смещение)

А ПОЧЕМУ
НЕ "ПЛОТНОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ
ЛИНИЙ", А "ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ
ИНДУКЦИЯ"?



D - ОБОЗНАЧАЕТ
ПЛОТНОСТЬ
ПРОНИКАЮЩИХ
ЧЕРЕЗ ЭТУ ПЛОСКОСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ.

ПРО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ
ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВАКУУМА
ГОВОРИЛОСЬ И В СВЯЗИ
С ЗАКОНОМ КУЛОНА.

ЧТО ЭТО ВООБЩЕ?

ХОРОШИЙ ВОПРОС,

НО ЭТО ОСТАВИМ
НА ПОТОМ.

СТРОГО ГОВОРЯ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ
ЛИНИИ И ИНДУКЦИЯ -
ЭТО РАЗНЫЕ ВЕЩИ.

НО ПОКА МЫ НЕ
РАССМАТРИВАЕМ
"ДИЭЛЕКТРИКУ",
ТАК ЧТО СЧИТАЙ,
ЧТО ЭТО ОДНО И ТО ЖЕ.



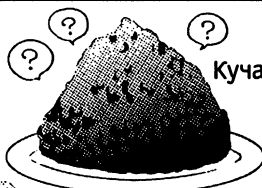
ОБРАТИ
ВНИМАНИЕ
НА ЕДИНИЦУ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ИНДУКЦИИ.

$(\text{Кл}/\text{м}^2)$

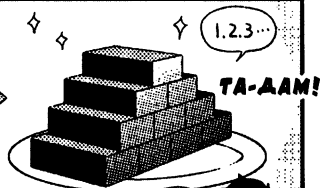
КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ
НА ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ,
КУЛОН НА КВАДРАТНЫЙ
МЕТР.

ТО ЕСТЬ В ЭТОМ
ЗАКЛЮЧАЕТСЯ СМЫСЛ -
"ЗАРЯД НА ЕДИНИЦУ
ПЛОЩАДИ".

НЕМНОГО СТРАННО,
ЧТО ДЛЯ ПЕРЕСЧЕТА
КОЛИЧЕСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ,
ИСПОЛЬЗУЮТСЯ
ЕДИНИЦЫ
"ЗАРЯДОВ"



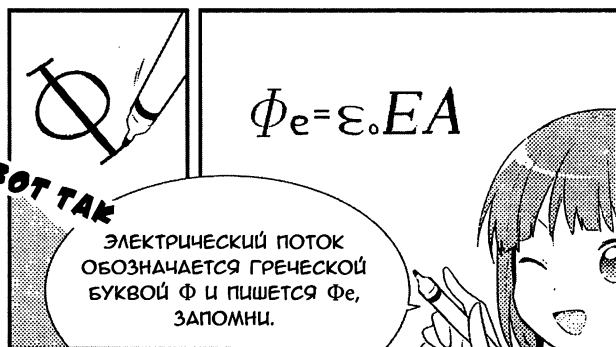
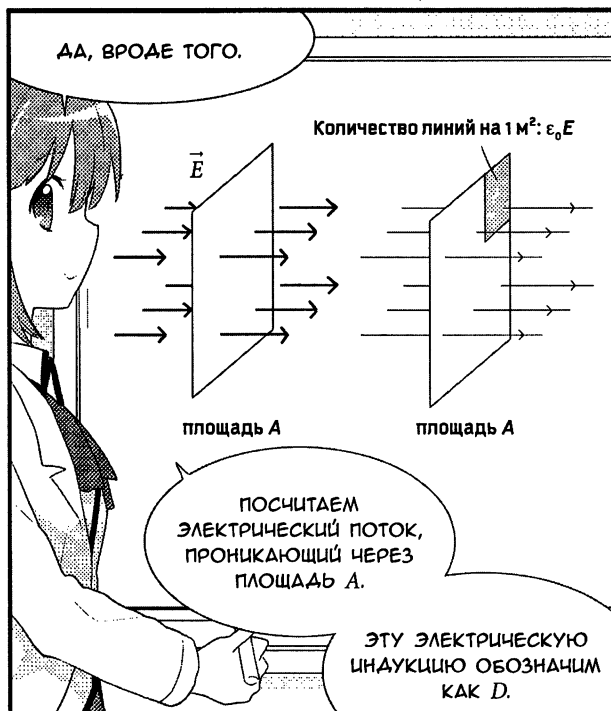
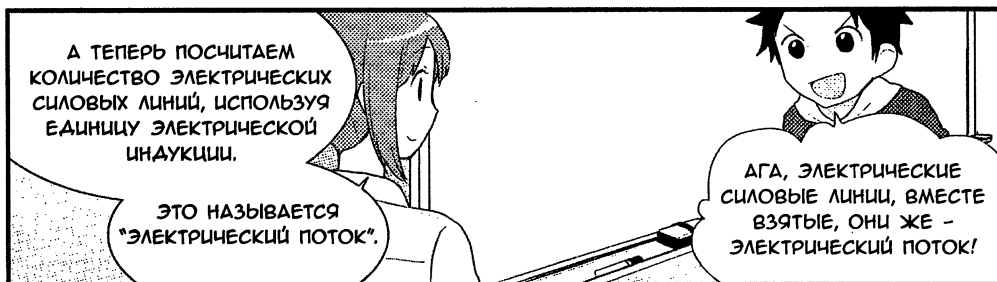
Куча...



ТО ЕСТЬ ЗАРЯДЫ
ОБОЗНАЧАЮТСЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОЛИЧЕСТВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ.


ЧТО-ТО ВРОДЕ
КОМ СЛАДКИХ БОБОВ
ЛЕГЧЕ ПЕРЕСЧИТАТЬ,
СДЕЛАВ ИЗ НИХ ЕКАНЫ...?

* См. раздел «Диэлектрика» на стр. 72.



* Φ соответствует прописной букве от англ. Flux (поток).

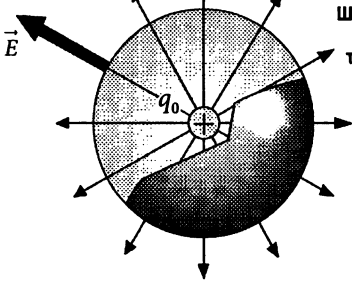
3.2. ПЛОСКОСТЬ, ОКРУЖАЮЩАЯ ТОЧЕЧНЫЙ ЗАРЯД, И ПРОНИКАЮЩИЙ СКВОЗЬ НЕЁ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК



А ТЕПЕРЬ МЫ ВЦАИМ ТОЧЕЧНЫЙ ЗАРЯД С ВЕЛИЧИНОЙ q_0 , НАХОДЯЩИЙСЯ В ЦЕНТРЕ ШАРА С РАДИУСОМ r . ВЫЧИСЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК, ПРОНИКАЮЩИЙ ЧЕРЕЗ ЭТУ СФЕРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ.

Шар с радиусом r , окружающий точечный заряд

ТАК ВАРУГ?



ТО ЖЕ, ЧТО И ПРЕЖДЕ. ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ ШАРА КАК НАХОДИМ?

ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ $4\pi r^2$, ТАК?

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ D НА ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ...

ВОТ!

ЕЩЕ ЧУТЬ-ЧУТЬ

$D = \epsilon_0 E$
 $\Phi_e = \epsilon_0 E \times 4\pi r^2$





ВОСПОЛЬЗУЕМСЯ ЗАКОНОМ КУЛОНА.

ПО ЗАКОНУ КУЛОНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ E НА МЕСТЕ РАДИУСА r

$E = k \frac{q_0}{r^2},$
 $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ (Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2 \text{)},$
СООТВЕТСТВЕННО,
 $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2},$

ИТАК, ВЫЧИСЛЯЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК Φ_e

ПОЛУЧИЛОСЬ!

ТОЛЬКО q_0
ОСТАЛСЯ.

ОЙ?

$$\Phi_e = \epsilon_0 \times \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0}{r^2} \times 4\pi r^2 = q_0$$

МОЛОДЕЦ!

НА САМОМ ДЕЛЕ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ
ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВАКУУМА -
ЭТО КОЭФФИЦИЕНТ,
ПРИ КОТОРОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК,

ПРОНИКАЮЩИЙ ЧЕРЕЗ
ОКРУЖАЮЩУЮ ТОЧЕЧНЫЙ
ЗАРЯД ПОВЕРХНОСТЬ, СТАЛ
 q_0 КУЛОНОМ.

ТЕПЕРЬ ПОНЯЛ.

ВОТ ПОЧЕМУ
С k БЫЛИ π ...

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК =
ЗАРЯД q_0 ...

НО ЧТО ЭТО ЗНАЧИТ?

ВОТ ОНО!

ЭТО И ЕСТЬ
ТЕОРЕМА ГАУССА!

ВОТ ЧТО
ОНА ЗНАЧИТ!

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК,
ПРОНИКАЮЩИЙ
ЧЕРЕЗ
ОКРУЖАЮЩУЮ
ТОЧЕЧНЫЙ
ЗАРЯД
ПОВЕРХНОСТЬ,
РАВЕН
ЗАРЯДУ
ВНУТРИ

ПУСТЬ ЭТОТ СВИТОК
КРАСУЕТСЯ У ТЕБЯ
В ГОСТИННОЙ

НЕТ У МЕНЯ
ГОСТИНОЙ...

3.3. ТЕОРЕМА ГАУССА

ЭТУ ТЕОРЕМУ
ОТКРЫЛ НЕМЕЦКИЙ
МАТЕМАТИК, ФИЗИК
КАРЛ ФРИДРИХ ГАУСС.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК.

ПРОНИКАЮЩИЙ
ЧЕРЕЗ

УКАЖУЩУЮ
ТОЧЕЧНУЮ

ЗАРЯД
ПОВЕРХНОСТЬ.

КОЛЫШЕТСЯ

СВИТОК

НАУБАЕМ!

ШАРИК

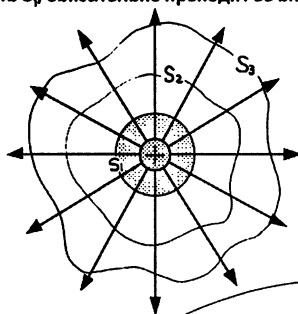
ТЕОРЕМА ГАУССА -
ЭТО НЕ СФЕРИЧЕСКАЯ
ПОВЕРХНОСТЬ.

ОНА СОСТОИТ
ИЗ ЗАРЯДОВ
И ОКРУЖАЮЩИХ ИХ
ВСЕВОЗМОЖНЫХ
ЗАМКНУТЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ.

ЗАМКНУТАЯ
ПОВЕРХНОСТЬ?

ЭТО ЛЮБАЯ ФИГУРА,
ПЛОТНО ОГРАЖДАЮЩАЯ
ПРОСТРАНСТВО
И ЧЕТКО ДЕЛИМАЯ
НА "ВНУТРЕННЮЮ"
И "ВНЕШНЮЮ"
СТОРОНЫ.
КАК ВОЗДУШНЫЙ
ШАР.

Электрический поток, проходящий через сферическую
поверхность S , обязательно проходит её внешнюю S_2, S_3 .



А ОТКУДА ЭТО
ИЗВЕСТНО?

ВСПОМНИ ПРАВИЛО:
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ
РАСХОДЯТСЯ И НЕ ПЕРЕСЕКАЮТСЯ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
СИЛОВЫЕ ЛИНИИ, ВЫХОДЯЩИЕ
ОТ ЗАРЯДА, НЕ ПЕРЕСЕКАЮТСЯ
И ОБЯЗАТЕЛЬНО ПРОХОДЯТ
СКВОЗЬ ПОВЕРХНОСТЬ
НАРУЖУ.

КАКОЙ БЫ ФОРМЫ
НЕ БЫЛА ЗАМКНУТАЯ
ПОВЕРХНОСТЬ, ЕСЛИ ОНА
ОГОРАЖИВАЕТ ЗАРЯД,
ТО ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК,

ПРОХОДЯЩИЙ СКВОЗЬ
ПОВЕРХНОСТЬ, СТАНЕТ q_0

АГА, ЗНАЧИТ, КАК БЫ
НИ БЫЛ ОГОРОЖЕН ЗАРЯД,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК
НЕ МЕНЯЕТСЯ.

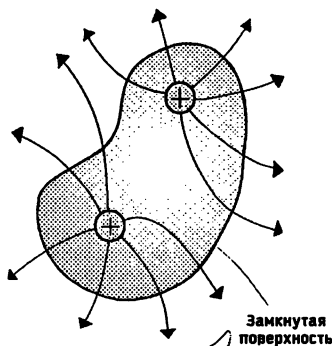
ДАЖЕ ЕСЛИ 2 ЗАРЯДА,
ПО ПРАВИЛАМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ
ОНИ НЕ ПЕРЕСЕКАЮТСЯ.

ТАК ЧТО
ВСЕ СИЛОВЫЕ ЛИНИИ
ВЫХОДЯТ ЧЕРЕЗ
ПЛОСКОСТЬ НАРУЖУ.

СЛЕДУЮЩИЙ
ВОПРОС...

ПАК

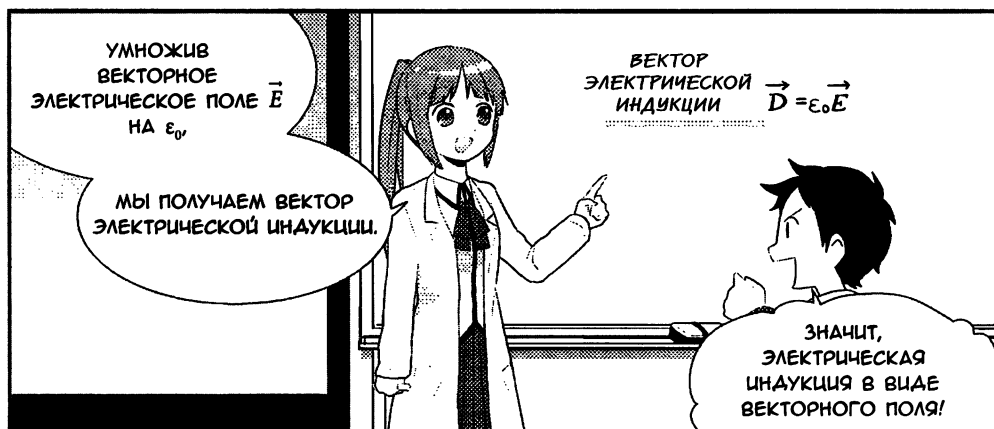
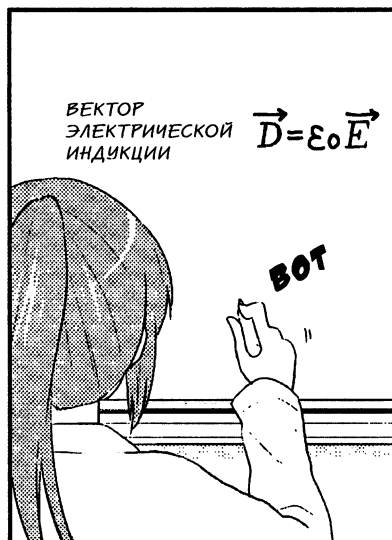
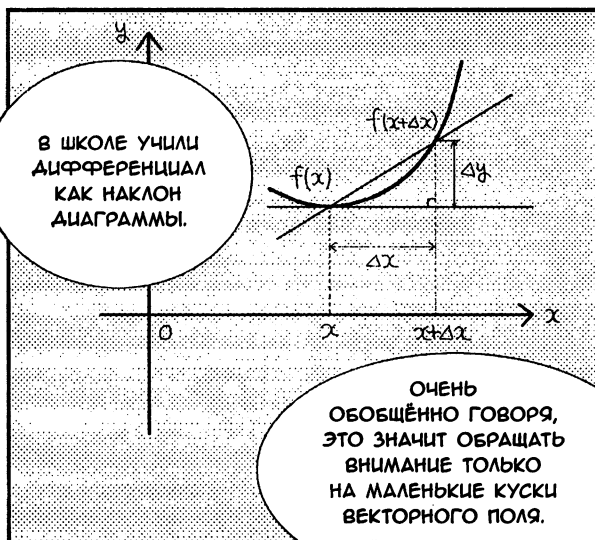
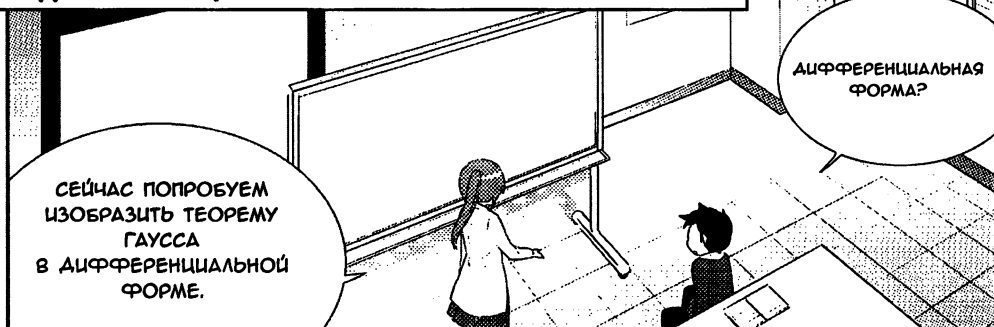
КАКОЙ ЗАЕБСЬ
БУДЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК, ПРОХОДЯЩИЙ
ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ?



ВСЁ ВМЕСТЕ
 $q_1 + q_2$

ПРАВИЛЬНО!

3.4. ВЕКТОР ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ФОРМА ТЕОРЕМЫ ГАУССА





ТЕПЕРЬ ПРЕДСТАВЬ,
ЧТО ЗАРЯДЫ РАСПОЛОЖЕНЫ
ТУМАННО, КАК ТУЧА.



В ОБЩЕМ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ЗАРЯД - ЭТО ЭЛЕКТРОН.

НО КОГДА СОБРАНО
МНОЖЕСТВО ЭЛЕКТРОНОВ,
ЛЕГЧЕ ИХ ПОНЯТЬ
КАК СОБРАНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ЗАРЯДА.

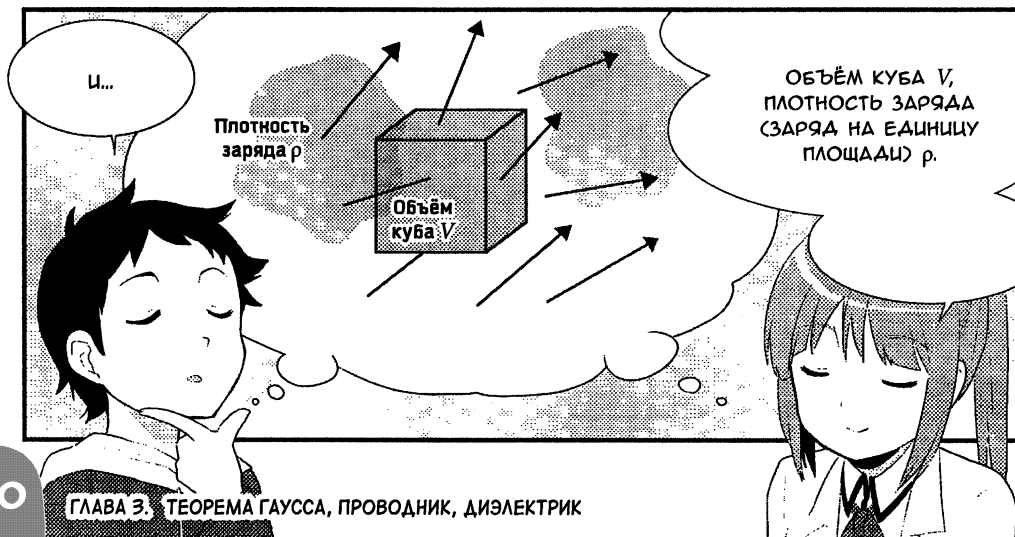
ВЕДЬ КОГДА МЫ ЕДИМ
ЁКАН, МЫ ЖЕ НЕ АУМАЕМ
О МОЛЕКУЛАХ САХАРА?

КОНЕЧНО.



ПРЕДСТАВЬ,
ЧТО РАЗБРОСАННЫЕ ЗАРЯДЫ
ФОРМИРУЮТ ВЕКТОРНОЕ
ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ИНДУКЦИИ.

И ТУДА
МЫ ПОЛОЖИМ
МАЛЕНЬКИЙ КУБ.



И...

Плотность
заряда ρ

Объём
куба V

ОБЪЁМ КУБА V ,
ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДА
(ЗАРЯД НА ЕДИНИЦУ
ПЛОЩАДИ) ρ .

ЧТО БУДЕТ
С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОТОКОМ,
ВЫХОДЯЩИМ ИЗ КУБА?

ЭЛЕКТРИ-
ЧЕСКИЙ
ПОТОК

$$\Phi_e =$$

ХМММ

ТАК СРАЗУ
Я НЕ ПОЙМУ.

ВСПОМНИ
ТЕОРЕМУ ГАУССА.

"ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК,
ПРОНИКАЮЩИЙ ЧЕРЕЗ
ОКРУЖАЮЩУЮ ТОЧЕЧНЫЙ
ЗАРЯД ПОВЕРХНОСТЬ, РАВЕН
ЗАРЯДУ ВНУТРИ".

СООТВЕТСТВЕННО,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК -
ЭТО СОБРАННЫЕ ЗАРЯДЫ
ВНУТРИ КУБА.

ОПЯТЬ
ОНА
СВЕТИТСЯ...

ЗНАЧИТ, ПЛОТНОСТЬ
ЗАРЯДА ρ

УМНОЖИТЬ
НА ОБЪЕМ V .

$$\Phi_e = \rho V$$

А ФОРМУЛУ
ИЗМЕНИМ
ВОТ ТАК.

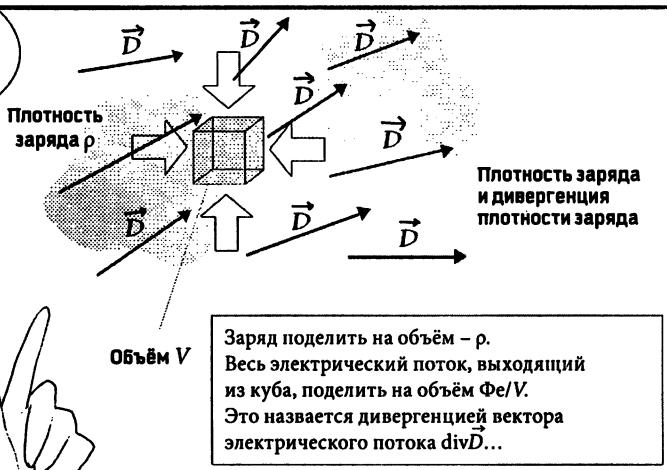
ПРАВИЛЬНО.

$$\Phi_e = \rho V \rightarrow \frac{\Phi_e}{V} = \rho$$

ТО ЕСТЬ "ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК / ОБЪЕМ" ОБЯЗАТЕЛЬНО
РАВЕН ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДОВ
ДАННОГО МЕСТА.

ТЕПЕРЬ ПРЕДСТАВЬ,
ЧТО КУБ СТАНОВИТСЯ
ВСЁ МЕНЬШЕ.

ЧТО БУДЕТ С ЛЕВОЙ
СТОРОНЫ ФОРМУЛЫ?

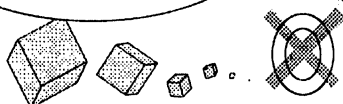


Заряд поделить на объём - ρ .
Весь электрический поток, выходящий
из куба, поделить на объём Φ_{ϵ}/V .
Это называется дивергенцией вектора
электрического потока $\text{div}\vec{D}$...

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК, ВЫХОДЯЩИЙ
ИЗ БЕЗГРАНИЧНО
МАЛЕНЬКОГО КУБА, НАДО
РАЗДЕЛИТЬ НА ОБЪЁМ
БЕЗГРАНИЧНО МАЛЕНЬКОГО
КУБА...

ТАК...

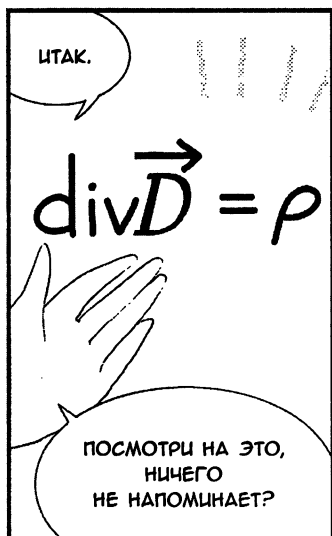
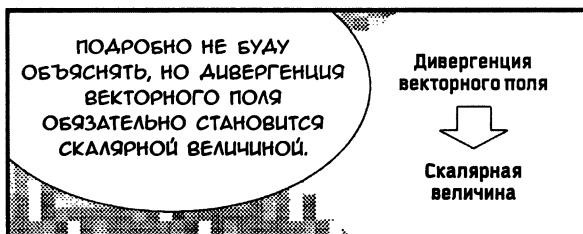
АА, НО КАКИМ БЫ
МАЛЕНЬКИМ НИ БЫЛ КУБ,
"ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК /
ОБЪЁМ" НУЛЁМ НЕ СТАНЕТ.



В ЭТОМ СМЫСЛЕ
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
ДИВЕРГЕНЦИЕЙ
ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ.

УМЕНЬШАТЬ РАЗМЕР -
ЭТО МЕТОДИКА
ДИФФЕРЕНЦИАЛА.

АА, В ДВУХМЕРНОЙ
АНАГРАММЕ ОНО С НАКЛОНОМ...
ПРЕВРАЩАЕТСЯ В КАСАТЕЛЬНУЮ
ПРЯМУЮ.



ТЕОРЕМА ГАУССА

В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ФОРМЕ ОЗНАЧАЕТ, ЧТО
"ДИВЕРГЕНЦИЯ ВЕКТОРНОГО
ПОЛЯ \vec{D} ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ИНДУКЦИИ РАВНА

ПЛОТНОСТИ
ЗАРЯДА ρ "

А ВЕДЬ НА СВЕРТКЕ
ПРО ТЕОРЕМУ ГАУССА
ДРУГОЕ БЫЛО
НАПИСАНО!?

Электрический
поток, выходящий
из замкнутой
поверхности,
равен заряду,
находящемуся
внутри

Дивергенция
векторного поля
электрической
индукции равна
плотности заряда
данного места

НА САМОМ ДЕЛЕ

МАТЕМАТИЧЕСКИ
ЭТО ОДНО И ТО ЖЕ

ТЕОРЕМА ГАУССА
В СООТВЕТСТВИИ
С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ
ФОРМОЙ ОБЫЧНО
НАЗЫВАЮТ
"ИНТЕГРАЛЬНОЙ
ФОРМОЙ".

ХОТЯ
НА ОДИНАКОВЫЕ
ВЕЩИ ОНИ
НЕ ПОХОЖИ...

И ЕЩЁ.

НЕ ЗАБУДЬ, ЧТО ТЕОРЕМА
ГАУССА СФОРМУЛИРОВАНА
НЕПОСРЕДСТВЕННО
ЧЕРЕЗ ЗАКОН КУЛОНА.

ТЕОРЕМА ГАУССА -
ВСЕГО ЛИШЬ
ПЕРЕФРАЗИРОВАННЫЙ
ЗАКОН КУЛОНА.

- ЗАКОН КУЛОНА
- ТЕОРЕМА ГАУССА
(ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ФОРМА)
- ТЕОРЕМА ГАУССА
(ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМА)

ЭТО ВСЕ ГОВОРЯТ
ОБ ОДНОЙ
И ТОЙ ЖЕ ВЕЩИ.

3.5. ПРОВОДНИК

А ТЕПЕРЬ ДАВАЙ
СДЕЛАЕМ ИНТЕРЕСНЫЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ.

ЭКСПЕРИМЕНТ!
ОТЛИЧНО!

ГАЦ!
ГАЦ!

ОУ?

ТАДАМ!

IT'S SHOW TIME!

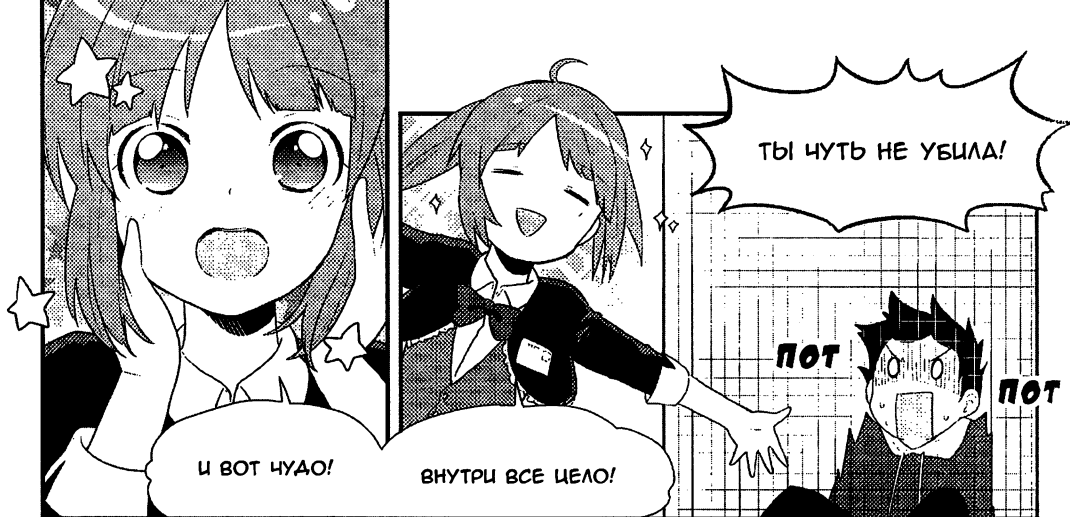
ОУ?

А?

ПОЛУЧАЙ
30 ТЫСЯЧ ВОЛЬТ!

УДАР ТОКА!

АААААА!

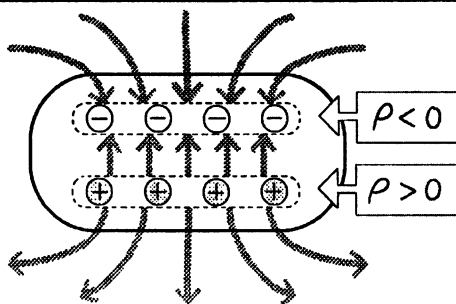




ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗВНЕ,
ЭЛЕКТРОНЫ СДВИГАЮТСЯ.

А ПЛОТНОСТЬ ЗАРЯДОВ
КАК БУДЕТ МЕНЯТЬСЯ?

ТААК...

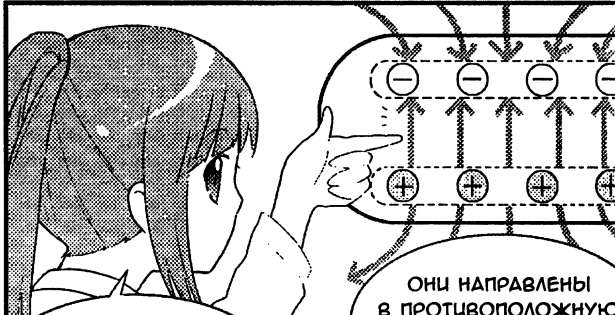


ТАМ, КУДА ПЕРЕАВЫНУЛИСЬ
ЭЛЕКТРОНЫ, ПОВЫШАЕТСЯ
КОЛИЧЕСТВО ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ЗАРЯДОВ И ρ БУДЕТ МЕНЬШЕ НУЛЯ.

С ДРУГОЙ СТОРОНЫ
ЭЛЕКТРОНОВ СТАНОВИТСЯ
МЕНЬШЕ, И ОБРАЗУЕТСЯ
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД,
И ρ БУДЕТ БОЛЬШЕ НУЛЯ.



ВЕРНО,
НА ОБОИХ КОНЦАХ
В СООТВЕТСТВИИ С ТЕОРЕМОЙ
ГАУССА $\text{div} \vec{D} = \rho$ ЗАРЯДЫ
СОЗДАЮТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК.



ОБРАТИ ВНИМАНИЕ
НА НАПРАВЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
ВНУТРИ ПРОВОДНИКА.

ОНИ НАПРАВЛЕННЫ
В ПРОТИВОПОЛОЖНУЮ
СТОРОНУ ВНЕШНЕГО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ...

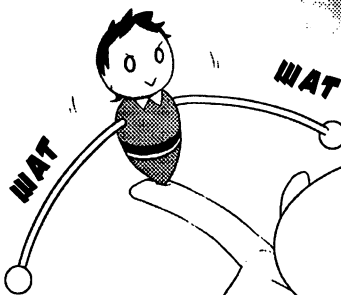
АА?

АА.

ЕСЛИ ИЗВНЕ НА ПРОВОДНИК ВОЗДЕЙСТВУЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ЭЛЕКТРОНЫ ДЕЙСТВУЮТ, БУАТО ОТРИЦАЯ ВНЕШНЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, И ОСТАНАВЛИВАЮТСЯ.

ЭТО СОСТОЯНИЕ И ЕСТЬ "ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ РАВНОВЕСИЕ".

ЗНАЧИТ, В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЭЛЕКТРОНЫ БОЛЬШЕ НЕ ДВИГАЮТСЯ.



"РАВНОВЕСИЕ" ЗНАЧИТ "БАЛАНС".

ЕСЛИ В ПРОВОДНИКЕ БОЛЬШЕ НЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ЭЛЕКТРОНЫ УЖЕ НЕ ПОЛУЧАЮТ ВОЗДЕЙСТВИЯ.

...ЭТО??

У ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ ЕСТЬ ТАКИЕ СВОЙСТВА.

Теорема 1 Под воздействием электрического поля свободные электроны в проводнике сдвигаются в направлении, компенсирующем внешнее электрическое поле.

Теорема 2 В состоянии равновесия внутри проводника, находящегося в электрическом поле, не существует электрического поля.

Теорема 3 Соответственно, внутри проводника при электростатическом равновесии во всех местах равный электростатический потенциал.

А ТЕПЕРЬ
ПРЕДСТАВЬ.



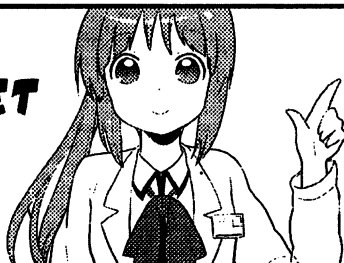
СОЗДАДИМ ПРОВОДНИК
С ПОЛОСТЬЮ И ДАДИМ
С ВНЕШНЕЙ СТОРОНЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.
ЧТО БУДЕТ?

САМ ПРОВОДНИК
БУДЕТ В СОСТОЯНИИ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО
РАВНОВЕСИЯ,

НО ЧТО ЖЕ БУДЕТ
В ПОЛОСТИ, ОБЪЯТОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ?

НЕТ,
НЕ ПОЙМУ.

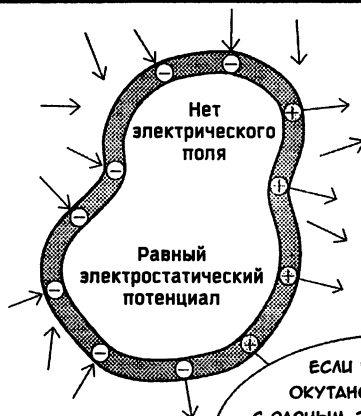
ОТВЕТ



ВНЕШНЕЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
НИКАК НЕ МОЖЕТ ПОПАСТЬ
ВНУТРЬ.

У ПРОВОДНИКА
В СОСТОЯНИИ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО
РАВНОВЕСИЯ ВО ВСЕХ МЕСТАХ
РАВНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ
ПОТЕНЦИАЛ.

ВО ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПРОВОДНИКА ТОЖЕ РАВНЫЙ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ.
ТАК ЧТО И ВНУТРИ ПОЛОСТИ
ВЕЗДЕ РАВНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ.



Из-за
электростатического
экранирования
создается
пространство
без электрического
поля

ЕСЛИ ПРОСТРАНСТВО
ОКУТАНО ПРОВОДНИКОМ
С РАВНЫМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ
ПОТЕНЦИАЛОМ, ТО ВНУТРИ ЭТОГО
ПРОСТРАНСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ПОЛЕ СУЩЕСТВОВАТЬ
НЕ МОЖЕТ





ПРИ РАВНОМ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ
ПОТЕНЦИАЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО
НЕ ПРОПУСКАЕТСЯ.

ТО ЕСТЬ МОЖНО
СОЗДАТЬ ПРОСТРАНСТВО
АБСОЛЮТНО
БЕЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ.

ЭТО И НАЗЫВАЕТСЯ
"ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ
ЭКРАНИРОВАНИЕ".



ЭТО, НАВЕРНОЕ,
ПРИНЦИП ТОЙ СЕТКИ,
В КОТОРОЙ Я БЫЛ?



АГА.

АНГЛИЙСКИЙ ФИЗИК XIX ВЕКА
МАЙКЛ ФАРАДЕЙ ПРОВЁЛ
ТАКУЮ ДЕМОНСТРАЦИЮ,
ЧТОБЫ ОБЪЯСНИТЬ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ
ЭКРАНИРОВАНИЕ.

НУ ФАРАДЕЙ...

ОТЧАЯННЫЙ
МУЖИК.



КСТАТИ, ПЛОХОЕ КАЧЕСТВО
СВЯЗИ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА
В ЛИФТАХ И ЗАДАНИЯХ -
ЭТО ТОЖЕ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ
ЭКРАНИРОВАНИЕ.

КАБИНА ЛИФТА -
ПРОВОДНИК,
А ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ - ЭТО ВИБРАЦИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, И ОНО
НЕ МОЖЕТ ПРОНИКНУТЬ ВНУТРЬ.



ОБРАТИ ВНИМАНИЕ
И НА СТЕКЛО
МИКРОВОЛНОВКИ,

ТАМ ЕСТЬ ЖЕЛЕЗНАЯ
РЕШЕТКА.

ЭТО ТОЖЕ
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ
ЭКРАНИРОВАНИЕ.

В ЭТОМ СЛУЧАЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
ЗАПИРАЕТСЯ ВНУТРИ.

3.6. ДИЭЛЕКТРИК

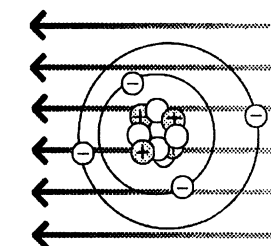
А ТЕПЕРЬ ИЗОЛЯТОР И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

ЕСЛИ ИДЁТ РЕЧЬ ОБ ИЗОЛЯТОРЕ ВНУТРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, МЫ ЭТО НАЗЫВАЕМ "ДИЭЛЕКТРИКОМ".

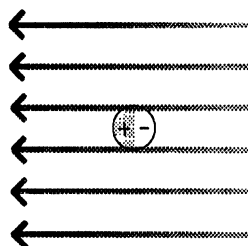
ЕСЛИ ВОЗДЕЙСТВОВАТЬ НА ДИЭЛЕКТРИК ИЗВНЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ, ТОК НЕ ВКЛЮЧАЕТСЯ, И ВМЕСТО ЭТОГО ВОЗНИКАЕТ "ПОЛЯРИЗАЦИЯ".

ЭЛЕКТРОНЫ ТЯНУТСЯ В ПРОТИВОПОЛОЖНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

ТОГДА ОБРАЗУЮТСЯ ПАРЫ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ И ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ



При воздействии на диэлектрик электрического поля возникает поляризация



Это можно моделировать «диполем»

Действие диэлектрика при воздействии электрического поля и электрический дипольный момент сближения

ЭТО И ЕСТЬ "ПОЛЯРИЗАЦИЯ".

ТОК ЧЕРЕЗ ДИЭЛЕКТРИК НЕ ТЕЧЁТ, НО ВНУТРИ ДИЭЛЕКТРИКА ПРОИСХОДИТ СМЕЩЕНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ В РАЗНЫЕ СТОРОНЫ

МЕН-МЕН

ОТКУДА ЭТО?



ПОПРОБУЕМ ВСТАВИТЬ
В ДИЭЛЕКТРИК ЗАРЯД.



СВОЙСТВО ДИПОЛИРОВАНИЯ
ДИЭЛЕКТРИКА ВОЗДЕЙСТВУЕТ
НА ЗАРЯД, ВСТАВЛЕННЫЙ
В ДИЭЛЕКТРИК.

ПРОЩЕ ГОВОРЯ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ,
ИСХОДЯЩЕЕ ИЗ ВЛОЖЕННОГО
В ДИЭЛЕКТРИК ЗАРЯДА,
СТАНОВИТСЯ МЕНЬШЕ,
ЧЕМ В ВАКУУМЕ.

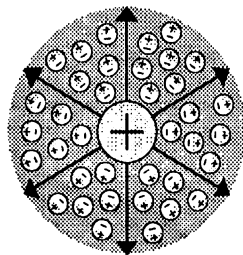
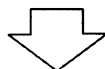


ЭТО ЗНАЧИТ,
ДИЭЛЕКТРИК
ЗАСЛОНЯЕТ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ПОЛЕ?

НЕТ!



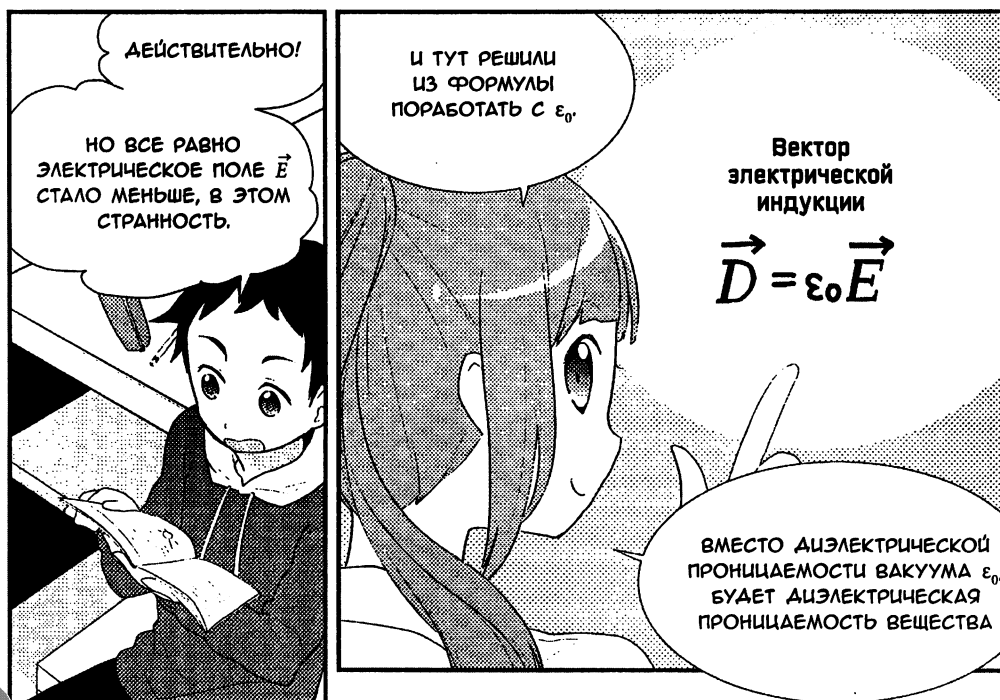
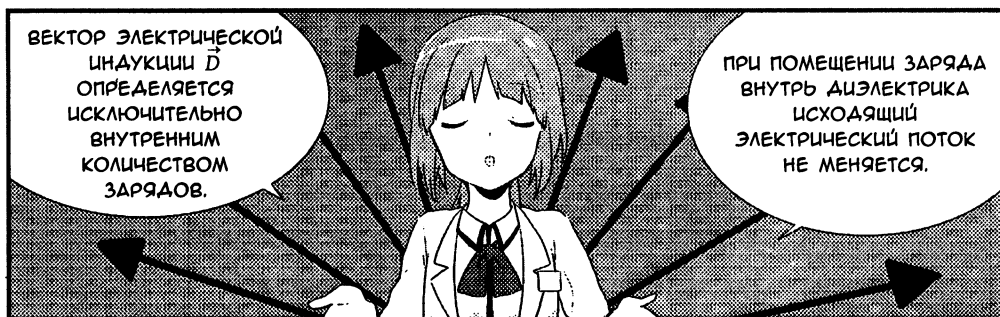
Положительный
заряд
и возникающие
электрические
силовые линии

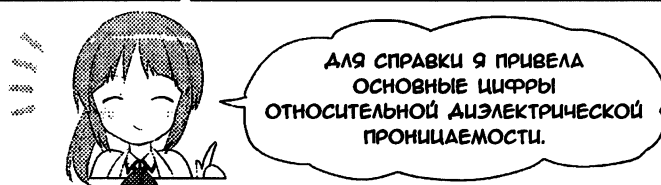
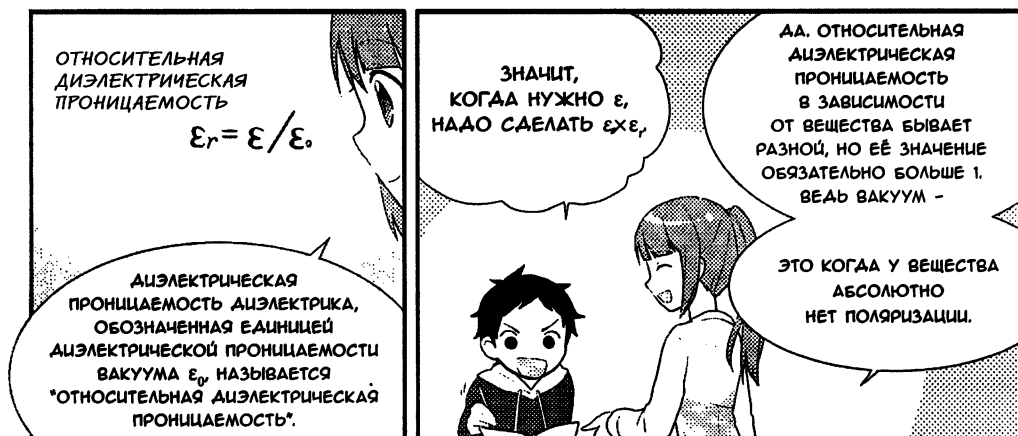
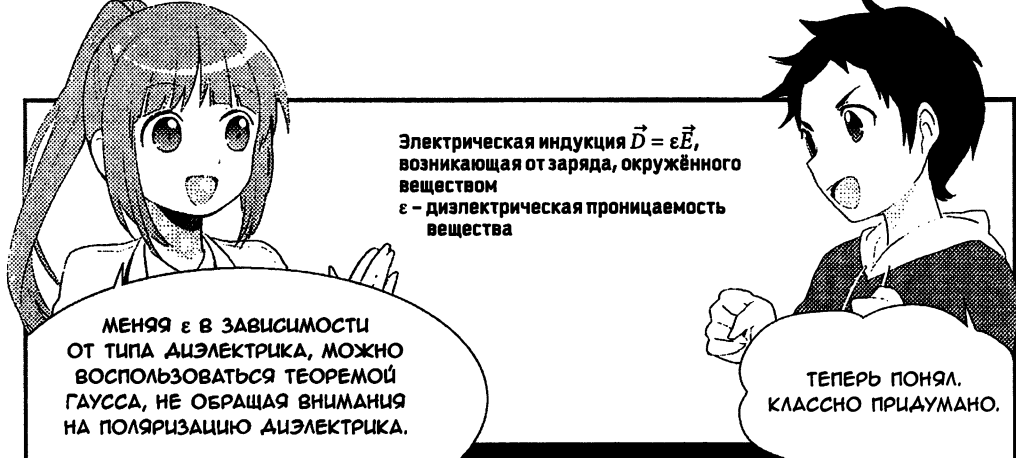


При окружении заряда диэлектриком
поляризованные заряды поглощают
часть электрических силовых линий

ЕСЛИ ТОЧНО,
ВЛОЖЕННЫЙ ЗАРЯД
ПОЛЯРИЗУЕТ
ДИЭЛЕКТРИК,

А ВОЗНИКШИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД
УСТРАНЯЕТ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СИЛОВЫХ ЛИНИЙ, ВОЗНИКШИХ
ОТ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО ЗАРЯДА.

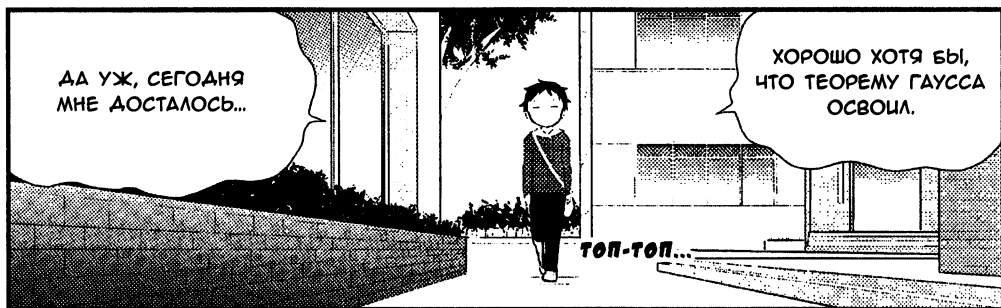




ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ОСНОВНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ*

Вещество	Относительная диэлектрическая проницаемость	Вещество	Относительная диэлектрическая проницаемость
Сухой воздух	1,00059	Бумага	3,7
Бакелит	4,9	Вода	80
Термостойкое стекло	5,6	Силиконовое масло	2,5
Тефлон	2,1	Оксид тантала	25
Неопрен	6,7	Титанат бария	~5,000

* Источник: Serway R. Физика для учёных и технологов.





ЗАПУСК!

...?

БАБААААХ!



А ТЕПЕРЬ ПОДРОБНЕЕ

Попробуем применить теорему Гаусса

Теорема Гаусса – это важнейший закон, касающийся сущности электромагнетизма. Можно сказать, что теорема Гаусса верна потому, что верен закон Кулона; поскольку силовые линии, которые испускает заряд, подчиняются теореме Гаусса, сила взаимодействия зарядов подчиняется закону Кулона (закону обратных квадратов). Но мы не будем говорить об этих фундаментальных свойствах, а посмотрим, как можно применить закон Гаусса на практике.

Когда заряды разлетаются, как облака, расчёт электрического поля в определённом месте – это огромный труд. Ведь для этого нужно поместить маленький заряд (пробный заряд) в ту точку, где мы хотим узнать электрическое поле, и посчитать силу, которую мы получаем от каждого из этих разлетающихся зарядов. Конечно, можно решить «уравнение Пуассона», о котором говорилось в главе 2. Но при симметричном распределении зарядов можно моментально рассчитать электрическое поле с помощью закона Гаусса. Например, есть такая задача.

Задача: возьмём сферу с радиусом a , заполненную зарядами с равномерной плотностью, как показано на рис. 3.1. Плотность зарядов равна ρ (Кл/м³). Рассчитайте электрическое поле в точке, отстоящей от центра сферы на расстояние радиуса r .

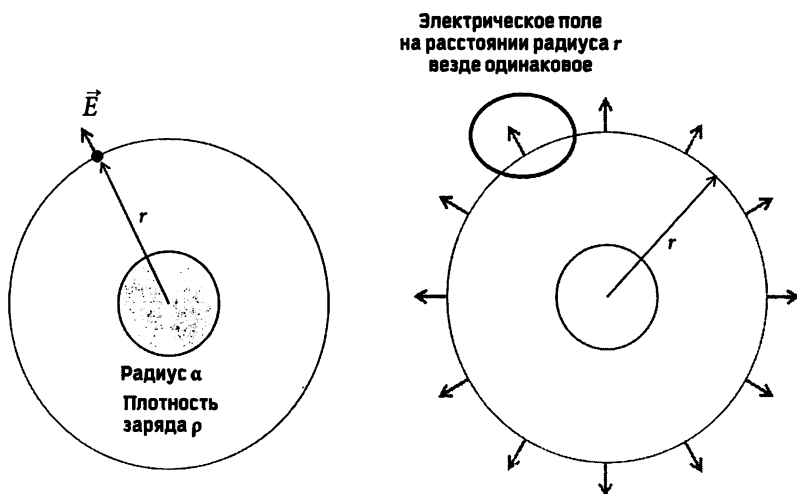


Рис. 3.1. Попробуем рассчитать поле заряженной сферической поверхности с помощью закона Гаусса

Плотность электрического заряда – это количество заряда, приходящееся на единицу объёма, при равномерной плотности равна величине заряда, поделённой на объём. Для обозначения плотности часто используется буква греческого алфавита ρ (ро). Итак, для решения этой задачи с помощью закона Гаусса мы воспользуемся очевидно правильным, с точки зрения физики, фактом. Это свойство «симметрии». Если есть шар, имеющий только один заряд в пустом пространстве, электрическое поле на поверхности шара, находящееся в радиусе r от центра, обязательно будет радиально ориентировано, и его величину можно считать постоянной. Дело в том, что определённое место на поверхности шара неотличимо от другого места, и если электрическое поле подчиняется закону Кулона, то нет причин, по которым поле в одном месте на поверхности шара отличалось бы от поля в другом месте. Если так, предположим, что величина электрического поля равна E . Направление, исходя из свойства симметрии, может быть ориентировано только по радиусу сферы.

Представим, что шар с радиусом r – это замкнутая поверхность, и попробуем применить закон Гаусса. Если электрическое поле пронизывает поверхность по наклонной линии, поток напряжённости электрического поля считать трудно, но, поскольку сейчас оно перпендикулярно, достаточно просто умножить площадь поверхности на величину поля.

Ответ: $4\epsilon_0\pi r^2 E$. Находящийся внутри заряд выразим как объём сферы, умноженный на плотность заряда: $\frac{4}{3}\pi r^3 \rho$ – и обозначим как Q . Вот как это связывается с теоремой Гаусса:

$$4\epsilon_0\pi r^2 E = Q.$$

Чтобы вычислить неизвестное E , используем формулу: напряжённость электрического поля $E = \frac{Q}{4\epsilon_0\pi r^2}$. Мы вычислим его моментально. Если выразить заряд Q как

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho, \text{ то } E = \frac{\rho r^3}{3\epsilon_0 r^2}.$$

Интересно, что шарообразный заряд с равномерной плотностью, если посмотреть на него снаружи, образует такое же электрическое поле, как если бы в центре был точечный заряд величины Q . Есть интересная история, связанная с этим. Все знают, что Ньютон открыл закон всемирного тяготения, увидев, как падает яблоко, но сила, которая притягивала в этот момент яблоко к земле, полностью соответствовала величине, предполагающей, что вся масса Земли сосредоточена в середине. Ньютон не понимал этой причины и объявил об открытии закона всемирного тяготения с опозданием на 20 лет. Сила гравитации, как и кулоновская сила, подчиняется закону обратных квадратов, поэтому задача, которую решал Ньютон, совершенно такая же, как эта задача. Если бы Ньютон знал закон Гаусса, ему бы, наверное, не пришлось так мучиться (конечно, закон Гаусса был открыт более чем на 100 лет позже). Как же Ньютону удалось решить эту задачу? Он сам создал метод математического анализа, который позволил рассчитать влияние всей массы Земли на яблоко.

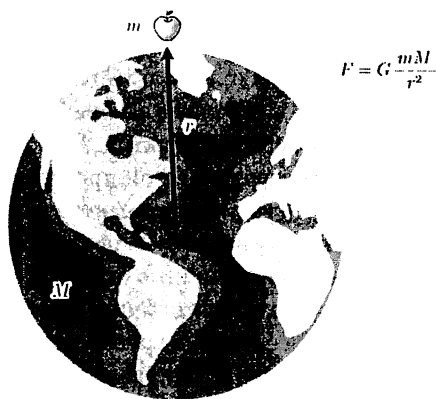


Рис. 3.2. Закон всемирного тяготения

Еще один пример: электрическое поле с распределением линейного заряда бесконечной длины. Предположим, что плотность заряда на 1 м длины равна q (Кл). На рис. 3.3 показаны заряд и силовые линии вокруг него. Благодаря симметрии силовые линии обязательно будут перпендикулярны заряду, они расходятся лучами. Если взять окружности с радиусом r , электрическое поле над ней наверняка будет одинаковым везде. Рассмотрим поверхность цилиндра с радиусом r и длиной L как замкнутую поверхность. Замкнутая поверхность, определяемая для расчёта теоремы Гаусса, называется «гауссова поверхность». Чтобы узнать электрическое поле на основании закона Гаусса, принципиально важно найти «подходящую для расчета гауссо-

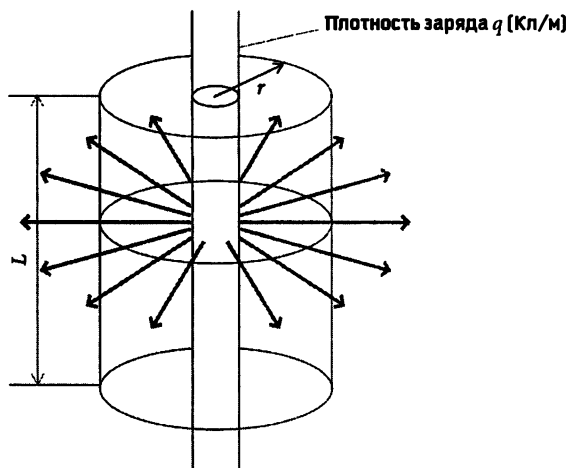


Рис. 3.3. Рассчитываем электрическое поле, создаваемое бесконечным зарядом, с помощью закона Гаусса

ву поверхность». В этом случае на верхней и нижней плоскостях цилиндра потока напряжённости нет, поэтому их можно игнорировать, а считать только поток, исходящий из боковых поверхностей. Если принять напряжённость электрического поля за E , поверхность и поле будут перпендикулярны, и поток будет $2\varepsilon_0 E \pi r L$. Заключённый внутри заряд составляет qL , из закона Гаусса ясно, что

$$2\varepsilon_0 E \pi r L = qL;$$

$$E = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 r}.$$

Таким образом, с помощью закона Гаусса можно легко высчитать электрическое поле с пространственным распределением зарядов, но нужно иметь в виду, что этот метод можно использовать только для подходящих для расчёта гауссовых поверхностей с использованием «свойств симметрии». При сложном распределении зарядов, где теория симметрии неприменима, придется делать числовые расчёты на компьютере, и главная проблема заключается в том, что практически все задачи бывают именно такими трудными.

Скалярное произведение векторов потока напряжённости электрического поля

Поток напряжённости электрического поля – это сумма всей плотности электрических векторов, пронизывающих определённую поверхность. При наличии симметрии, когда испускаемый точечным зарядом поток напряжённости должен быть сферической поверхностью, вектор пронизывает гауссову поверхность перпендикулярно. В этом случае поток напряжённости вычисляется по формуле (плотность потока) × (площадь). А как же можно вычислить поток в обычном случае, когда поверхность не сферическая, а заряд не точечный? В науке электромагнетизма для этого используют интегралы. Представим, что у нас есть некая искривлённая поверхность, и попробуем поделить её на мелкие ячейки с помощью решётки. В таком случае можно поверхность каждой из них считать ровной, поэтому можно представить себе, что есть перпендикуляр, или нормаль, к поверхности. Назовём вектор, направленный по нормали и равный по величине площади плоскости ΔA , «вектором площади» $\vec{\Delta A}$. Таким образом, поток напряжённости, проходящий через эту микроповерхность, можно выразить как внутреннее произведение $\vec{\Delta A}$ и плотности потока \vec{D} (см. приложение «Векторы и скаляры»):

$$\Delta\Phi_e = \vec{D} \cdot \vec{\Delta A}.$$

Для расчёта потока, проходящего через всю поверхность, можно сложить все $\Delta\Phi_e$. Но для корректного подсчёта следует сделать все ΔA бесконечно малыми. Производимое в этом случае математическое действие даёт интеграл от поверхности. Оно выражается следующими символами:

$$\Phi_e = \iint_A \vec{D} \cdot d\vec{A}.$$

Будем считать, что символ \iint_A обозначает интеграл от всей поверхности A , при бесконечно малой площади $\Delta \vec{A}$ вектора записывается как $d\vec{A}$.

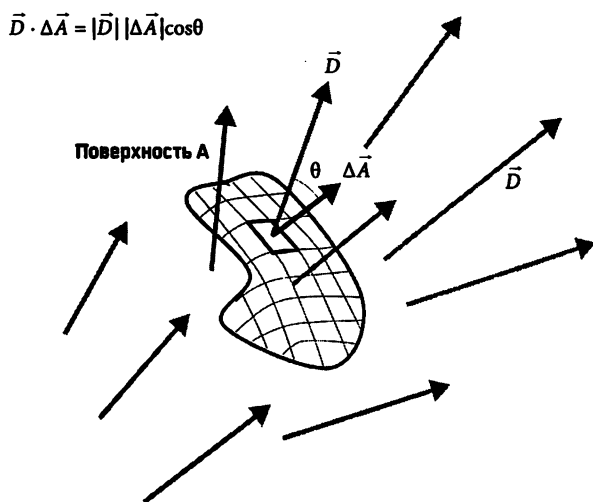


Рис. 3.4. Используем скалярное произведение и интеграл от поверхности для расчета потока напряжённости

Диэлектрики и конденсаторы

Конденсатор (C), сопротивление (R) и индуктивность (L) – это три важнейших элемента, образующих электрическую цепь. При этом конденсатор связан с электростатическим равновесием (см. данную главу), сопротивление связано с электрическим током (см. главу 4), а индуктивность связана с электромагнитной индукцией (см. главу 6). Здесь мы расскажем о принципе работы конденсатора и эффекте вставки диэлектрика.

На рис. 3.5 показан принцип работы диэлектрика в упрощённом виде. Конденсатор представляет собой две пластины проводника, расположенные на близком расстоянии. Два проводника называются «поляризованными пластинами». Позже мы объясним, почему чаще всего между обкладками конденсатора вставляются диэлектрики. Поскольку длинный и тонкий элемент было бы трудно разместить, из них делают закруглённые блоки. Именно так выглядит цилиндрический конденсатор.

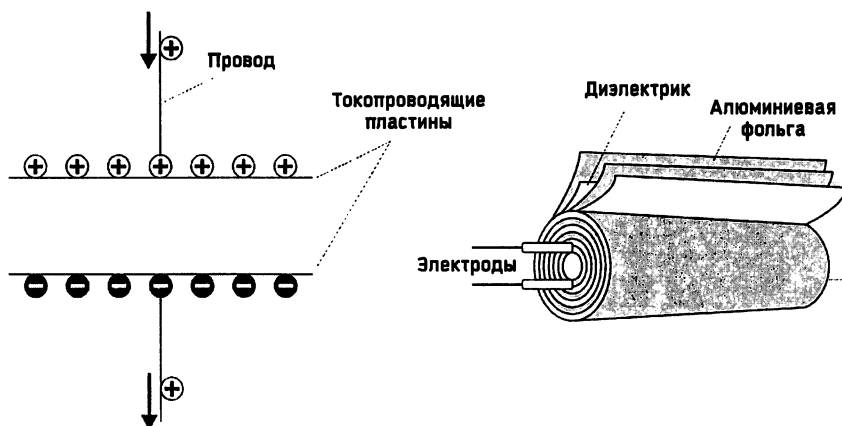


Рис. 3.5. Общий вид конденсатора

К поляризованным пластинам подключают электрические провода, так чтобы заряд легко проходил. Попробуем подать положительный заряд на провод с одной стороны. Достигший пластины заряд выводит положительный заряд с пластины на противоположной стороне. При этом можно создать состояние, когда положительный и отрицательный заряды на пластинах обращены друг к другу. Это называется «зарядка конденсатора». При этом между зарядами на пластинах существует взаимная связь, поэтому они не двигаются. Иначе говоря, конденсатор может накапливать заряд. А если два провода будут касаться друг друга, положительный и отрицательный заряды будут взаимодействовать в противоположном направлении, они будут нейтрализоваться, отделяясь от пластины. Это называется «разрядка конденсатора».

Таким образом будет удобно накапливать заряд в конденсаторе и при необходимости забирать его. Когда заряд копится в конденсаторе, на поляризованных пластинах с обеих сторон образуется разность потенциалов. Накопленный заряд Q , делённый на разность потенциалов V , называется «ёмкостью» конденсатора. Единица его измерения определяется как $(\text{Кл}/\text{В}) = (\text{Ф})$ (фарад). Понятно, что это название связано с Майклом Фарадеем, который внёс большой вклад в учение электромагнетизма.

Поскольку конденсатор – это устройство для накопления заряда, было бы лучше накопить в нём как можно больше заряда. Как же можно увеличить ёмкость конденсатора? Самый простой способ – это увеличение площади пластин, но их нельзя увеличивать до бесконечности. На самом деле, если вставить в пространство между поляризованными пластинами диэлектрик, ёмкость конденсатора увеличится. Сейчас мы расскажем об этом явлении.

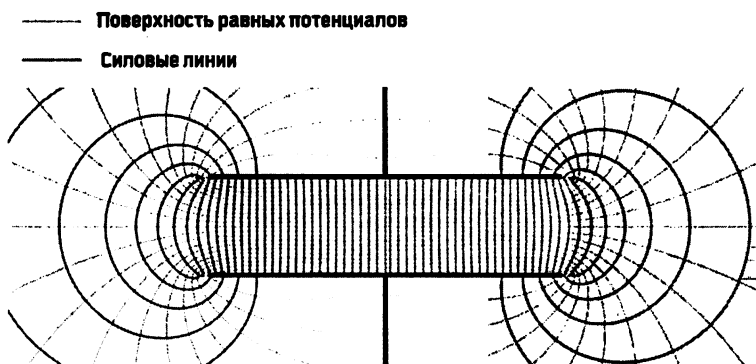


Рис. 3.6. Электрическое поле внутри конденсатора и поверхность равных потенциалов

На рис. 3.6 показано электрическое поле внутри конденсатора. Можно приблизительно считать, что между пластинами образуется однородное электрическое поле, перпендикулярное по отношению к ним. Умножив расстояние между пластинами d на электрическое поле E , получим разность потенциалов между пластинами:

$$V = Ed.$$

Попробуем заполнить пространство между пластинами диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r . Диэлектрик обладает эффектом подавления электрического поля, поэтому электрическое поле между пластинами уменьшится:

$$E' = \frac{E}{\epsilon_r}.$$

При этом разность потенциалов уменьшается в несколько раз, по сравнению с изначальной:

$$V' = \frac{E}{\varepsilon_r} d.$$

Поэтому при одинаковом напряжении можно накопить в несколько раз больше заряда. Если использовать для заполнения титанат бария, ёмкость конденсатора увеличится в 5000 раз. На рис. 3.7 вы видите объяснение этого явления с использованием поляризации диэлектрика. При заполнении диэлектриком силовые линии, исходящие от поляризованных пластин, нейтрализуются на краях диэлектрика, и видно, как электрическое поле уменьшается. Кроме относительной диэлектрической проницаемости, можно подобрать другое слово и выразить это явление функцией «в какой пропорции уменьшается электрическое поле между поляризованными пластинами при вставке диэлектрика в конденсатор». На рисунке показана относительная диэлектрическая проницаемость при заполнении диэлектриком.

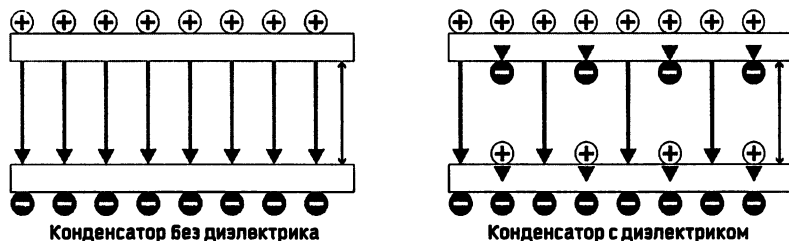


Рис. 3.7. Конденсатор с установленным диэлектриком

Вы ведь пробовали притягивать волосы, потерев салфетку, как в главе 2? Можно объяснить, почему это происходит, на примере отношения диэлектрика и ёмкости. Заряд Q накапливается, в конденсатор с ёмкостью C без диэлектрика сбоку вставляют диэлектрик. Ёмкость конденсатора со вставленным диэлектриком увеличивается, при постоянном заряде напряжение между поляризованными пластинами уменьшается, что ясно из отношения $Q = CV$. Так же ведёт себя вода в сосуде: если его расширить, уровень воды снизится. Энергия, накопленная в конденсаторе, пропорциональна произведению напряжения между пластинами и накопленного заряда. Иначе говоря, если вставить заряженный диэлектрик, энергия, накопленная в конденсаторе, уменьшится.

Свойства природы таковы, что она предпочитает состояния с низкой энергией. Например, если на наклонную дорогу положить мяч, он естественным образом покажется вниз. В конденсаторе тоже работает сила, которая старается снизить энергию,

притянув диэлектрик, если он находится рядом и может свободно входить и выходить. Понятно? Салфетка – это пластина конденсатора, волосы – это диэлектрик. Можно сказать, что энергия конденсатора стремится вниз, а волосы из-за этого притягиваются.

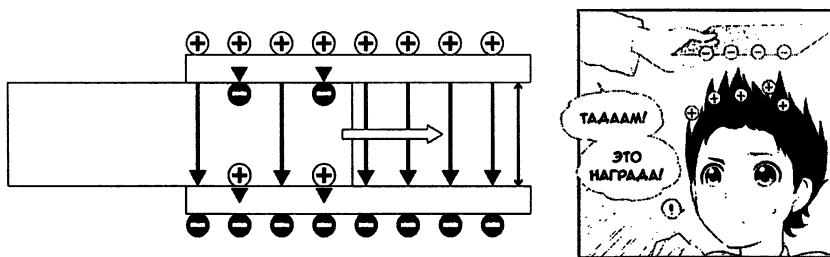


Рис. 3.8. Сила, действующая на диэлектрик, который заполняет конденсатор

ШАГ ВПЕРЁД

⊕ Алгебраическое выражение дивергенции векторного поля

Если есть векторное поле, всегда можно говорить о его дивергенции. Это равнозначно теореме Гаусса: «если в электрическом поле есть дивергенция, в этой точке есть плотность заряда». Как же мы можем рассчитать дивергенцию векторного поля? Для точного расчёта векторного поля обозначают компоненты векторов и производят алгебраическое вычисление одинаковых компонент. Обозначение векторных компонент – см. приложение «Векторы и скаляры».

Попробуем выразить векторное поле \vec{D} с помощью функции (x, y, z) .

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} D_x(x, y, z) \\ D_y(x, y, z) \\ D_z(x, y, z) \end{pmatrix}.$$

D_x, D_y, D_z – это компоненты направления векторов x, y, z . Для начала зафиксируем y и z и попробуем переместиться только в направлении x на Δx . При этом каждая компонента \vec{D}, D_x, D_y, D_z несколько изменится. Рассмотрим изменение D_x , разделив на Δx :

$$\frac{D_x(x + \Delta x, y, z) - D_x(x, y, z)}{\Delta x}.$$

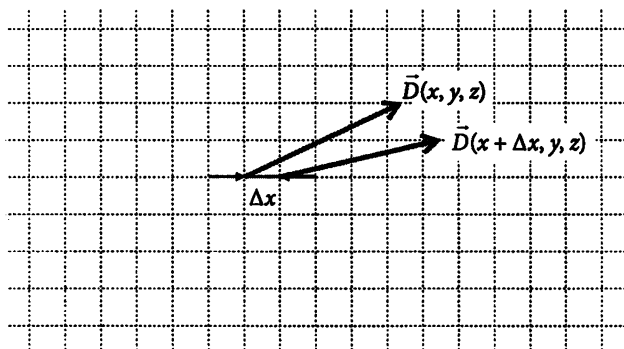


Рис. 3.9. Алгебраический расчет дивергенции векторов

Когда Δx становится бесконечно малым, это определяется неким значением. Это называется «дифференцировать по x компоненту $x\vec{D}$ », символически выражается:

$$\frac{\partial D_x}{\partial x}.$$

Есть три компоненты $\vec{D} - D_x, D_y, D_z$, и три дифференцируемых направления – x, y, z , поэтому можно считать, что трёхмерная векторная величина при дифференцировании состоит из 9 компонент.

Поэтому, как неудивительно, дивергенция вектора электрической индукции \vec{D} в некоторой точке (x, y, z) может быть рассчитана через сложение трёх элементов.

$$\text{div}\vec{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z}.$$

Объяснения, почему существует именно такая система, выходят за пределы этой книги, но мы должны быть благодарны математикам, которые открыли это явление. Однако соображения, изложенные дальше, убедят нас в том, что эта интуитивно понятная формула действительно описывает дивергенцию векторов \vec{D} . Предположим, что направление x , по которому течет вода, – это \vec{D} . В этом случае в \vec{D} есть только x -компонента D_x , тогда все просто. С увеличением x увеличивается и D_x , и $\frac{\partial D_x}{\partial x} > 0$.

Это значит, что мощность потока увеличивается с течением, но мощность потока не будет увеличиваться без причины, так что это доказывает, что вода в потоке бурлит.

Следовательно, можно понять, что $\text{div}\vec{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x}$.

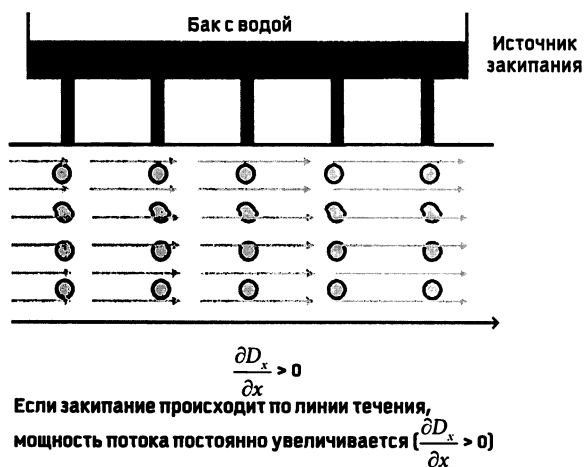


Рис. 3.10. Для интуитивного понимания формулы $\text{div}\vec{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x}$

+ Силловые линии и линии электрической индукции

До появления в этой главе «диэлектрика» электрическое поле \vec{E} и электрическая индукция \vec{D} различались просто для удобства. Первоначальные объяснения были такие: для получения единицы потока (Кл) умножаем на константу ϵ_0 . Но в электромагнитном поле, где есть диэлектрик, нужно чётко различать \vec{E} и \vec{D} .

Прежде всего ещё раз дадим определение «силовых электрических линий», которые в главе 2 были определены как линии, образующие электрическое поле \vec{E} . Дадим также определение соответствующим этому «линиям электрической индукции». Это линии, возникающие при образовании \vec{D} , они по своему характеру исходят из истинного заряда и заканчиваются на истинном заряде¹. В вакууме силовые линии и линии потока совершенно одинаковы (потому что отличается только коэффициент пропорциональности), а при наличии диэлектрика силовые линии обрываются на поляризованном заряде, а линии потока не обрываются, в этом проявляется их отличие.

Таблица 3.1. Силовые линии и линии потока напряжённости электрического поля

Силовые линии	Линии, связывающие \vec{E}	Выходят из заряда и заканчиваются на заряде
Линии электрической индукции	Линии, связывающие \vec{D}	Выходят из истинного заряда и заканчиваются на истинном заряде. Не зависят от поляризованного заряда

Количественное соотношение силовых линий и линий электрической индукции – ϵ , даже если есть диэлектрик, поскольку \vec{D} соединяется без разрыва на этой границе, внутри диэлектрика число силовых линий меньше, чем в вакууме.

Для того чтобы увидеть суть отличия силовых линий и линий электрической индукции, попробуем окружить точечный заряд сферой диэлектрика. Примем диэлектрическую проницаемость за 2. Изобразим силовые линии и линии электрической индукции в вакууме так, чтобы их количество было одинаковым.

Электрическое поле, образуемое точечным зарядом, в вакууме определяется так:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}.$$

Мы взяли такое пространство, в котором диэлектрическая проницаемость равна $2\epsilon_0$, поэтому электрическое поле в диэлектрике будет:

$$E = \frac{1}{4\pi(2\epsilon_0)} \frac{q}{r^2}.$$

¹ Поляризованный заряд – это не «фикция», но он примечателен тем, что его невозможно выделить из атома.

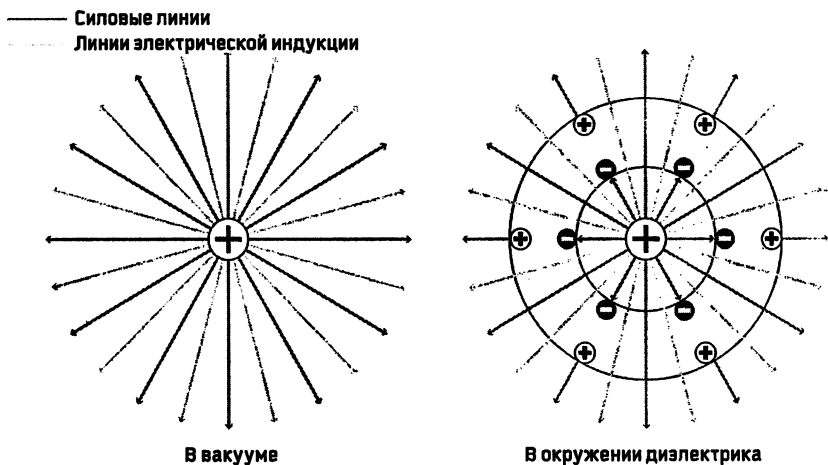


Рис. 3.11. Окружаем точечный заряд сферой из диэлектрика с относительной диэлектрической проницаемостью 2

Плотность потока напряжённости независимо от наличия или отсутствия диэлектрика можно выразить так:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{q}{r^2}.$$

Обратите внимание на силловые линии. Половина силовых линий, исходящих из точечного заряда, поглощается поляризованным зарядом внутри диэлектрика. Внутри диэлектрика меньше силовых линий, по сравнению с полостями его внутренней стороны. Но если взять пропорционально напряжённости электрического поля и электрической индукции внутри диэлектрика, она составит $E = \frac{D}{2\epsilon_0}$. Посмотрим от-

ношение на внешней стороне диэлектрика $E = \frac{D}{\epsilon_0}$, на самом деле половина силовых линий исходит из поляризованного заряда. Одни линии электрической индукции не имеют отношения к поляризованному заряду, поэтому они расходятся лучами от точечного заряда в центре.

Физика оперирует «физическими величинами». Так что же такое физическая величина? Её можно определить так: «свойство, которое можно выразить количественно, при наличии основы для сравнения». Например, «температура» – это физическая величина, а «холод» ею не является. Размер для каждой физической величины выражается в «единицах измерения». Для каждой физической величины существует несколько единиц измерения. Например, длину в Японии измеряют в «сяку» и «сун», в Англии в «ярдах» и «футах» и т. д. Задавая единицы измерения, люди всегда имели какой-то эталон, но мы сейчас не будем об этом говорить. Но если одна и та же физическая величина выражается в разных единицах, приходится переводить одни единицы в другие, что очень неудобно. Есть примеры, когда использование различных систем измерений (американская система с ярдами и футами и европейская метрическая система) во время совместных космических исследований привело к трагическим последствиям, когда исследовательский марсоход увяз в поверхности Марса. Поэтому сейчас, следуя призыву «для одной физической величины – одинаковые единицы измерения», развернулось движение по переходу на «международную систему единиц СИ»; в нем лидирует Франция, а Англия и Америка постепенно тоже переходят на эту систему.

Система единиц СИ была создана на основании разработанной в XVIII веке «метрической системы», длина в ней измеряется в метрах (м), время – в секундах (с), масса – в килограммах (кг). Мы видим переход на систему СИ и в знакомых нам областях. В последнее время калорийность продуктов указывается не в калориях, а в джоулях, а лошадиные силы машины превратились в киловатты. Да-да, единицы давления – теперь не миллибары, а гектопаскали. Может, и измерение пиццы и джинсов в дюймах скоро запретят 😊.

Рассмотрим теперь «производные единицы». Например, скорость – это расстояние, пройденное за единицу времени, так что её можно высчитать, поделив расстояние (м) на время (с). При этом для расчёта единицы измерения нужно также разделить единицу расстояния на единицу времени. Поэтому единица измерения скорости – это $(\text{м})/(\text{с}) = (\text{м}/\text{с})$. Таким образом, из совмещения основных единиц образуются «производные единицы». Часто производные единицы имеют свое название, например сила рассчитывается как $(\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2)$, но у этой единицы есть своё название – «ньютон». Что касается электромагнитных явлений, то, добавив к (м), (кг), (с) одну основную единицу из электромагнетизма, можно получить производные для всех физических величин из этой области. В системе СИ в качестве основной единицы для электромагнетизма используется «ампер» (А). Эта «система единиц МКСА» сейчас является стандартной для науки об электромагнитных явлениях.

Есть ещё очень важный момент – для различных физических величин есть только один способ создания производных единиц из основных для выражения их размера¹. Это называется «размерность». Приведем пример. В системе СИ энергия измеряется в джоулях (Дж), в изучаемой в динамике теореме живых сил энергия рассчитывается как «сила» (Н) × расстояние приложенного движения (м). И то, и другое – энергия, поэтому Дж и Н·м «имеют одинаковую размерность». Но Н – это тоже производная единица (кг·м/с²), поэтому Дж можно выразить как следующую производную единицу – кг·м²/с². Попробуем сравнить размерность энергии, полученной по совершенно другой формуле ($U = mgh$): гравитационная потенциальная энергия. Здесь m – это масса (кг), g – ускорение свободного падения, h – высота (м), поэтому размерность будет кг·м²/с². Любую энергию в мире всегда можно разложить на кг·м²/с², в этом и заключается смысл размерности физической величины. Все, наверное, знают знаменитую формулу Эйнштейна $E = mc^2$, правая часть уравнения тоже имеет размерность кг·м²/с², правда?

Существуют два важных правила, касающихся размерности. Вот они:

1. В обеих частях равенства должны быть физические величины с одинаковой размерностью.
2. Нельзя складывать и вычитать величины с разными размерностями.

Имейте в виду, мы не можем найти массу, равную 1 м, и не можем сложить 1 кг и 1 с. Давайте определим размерность диэлектрической проницаемости вакуума в системе МКСА, используя это правило.

По закону Кулона:

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

Исходя из того, что размерность левой части Н, размерность правой части тоже Н, поймём, что размерность ϵ_0 – Кл²/(Н·м²).

При этом 4 и π не имеют размерности, поэтому их можно игнорировать. Если это выразить в м, кг, с, А, то получим А²·с²/кг·м³, но это будет домашним заданием для читателей. Единицей для диэлектрической проницаемости вакуума будет Ф/м. Здесь Ф – это ёмкость конденсатора, о которой говорилось раньше, она имеет размерность Кл/В. Конечно, если раскрыть формулу Ф/м = Кл/В·м, то она будет выглядеть так: А²·с⁴/кг·м³.

В этой книге мы познакомились с теоремой Гаусса, которая гласит, что «заряд Q (Кл), окружённый некоторой замкнутой поверхностью, и поток напряжённости электрического поля Φ_e этой замкнутой поверхности равны». Из правила размерностей ясно, что поток напряжённости Φ_e должен иметь такую же размерность, как Кл.

¹ Есть следующие 7 основных единиц системы СИ: м, кг, с, А, К, кд, моль.

Электрическая индукция \vec{D} задана формулой $\epsilon_0 \vec{E}$, и поскольку поток – это электрическая индукция, умноженная на площадь A (м^2):

- в формуле $\vec{F} = q\vec{E}$ размерность \vec{E} будет Н/Кл;
- размерность $\epsilon_0 \vec{E} = (\text{Н/Кл}) \cdot (\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)) = (\text{Кл}/\text{м}^2)$;
- размерность $\Phi_e = \vec{D} \cdot \vec{A} = (\text{Кл}/\text{м}^2) \cdot (\text{м}^2) = (\text{Кл})$.

Понятно, что правило размерности соблюдено.

Анализ физических величин с точки зрения размерностей называется «анализ размерностей». Анализ размерностей – это важный инструмент, который нужен не только в науке об электромагнитных явлениях, но и в других областях физики. Приведём простой пример. Ниже приводится формула, описывающая периоды колебаний маятника.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{g}{l}},$$

где T – период колебаний маятника (с); l – длина маятника (м); g – ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$).

На самом деле эта формула ошибочна, и мы можем показать, почему она ошибочна, с помощью анализа размерностей. Посмотрим размерность в правой части. 2π

можно игнорировать, у нас получится $\sqrt{\frac{(\text{м}/\text{с}^2)}{(\text{м})}} = \frac{1}{(\text{с})}$. Размерность левой части (s), поэ-

тому получается, что размерности левой и правой частей не совпадают. Таким образом, используя анализ размерностей, можно значительно уменьшить количество ошибок в расчетах и получить из математических формул знания о новых законах. На Международной олимпиаде по физике (IPh007) предлагалось такое задание: используя анализ размерностей, описать черные дыры – «поверхности Шварцшильда» и «излучение Хокинга». Анализ размерностей позволяет превратить эти очень сложные вопросы теории относительности в задачи для старшеклассников.

Кстати, правильная формула для маятника выглядит так:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

На сегодняшний день нам известно примерно 110 химических элементов. Кстати, все элементы с атомным номером больше, чем у урана (атомный номер 92), созданы искусственно, так что никто не знает, сколько еще элементов добавится дальше. Атомный номер – это количество электронов в атоме. Вокруг атомного ядра есть несколько электронов, они вращаются по орбитам, которые расположены в несколько слоев, как кожа луковицы. Это называется «оболочка» атома. Чем больше электронов, тем больше оболочек у атома, но в любом случае на внешней оболочке не может быть больше 8 электронов (у водорода и гелия их 2). Все элементы собраны в таблицу, которая называется «Периодическая таблица химических элементов», в ней элементы, имеющие одинаковое количество электронов на внешней оболочке атома, расположены рядами (см. табл. 3.2). Атом находится в стабильном состоянии, когда количество электронов в его оболочке полное, а если это не так, оболочка активно стремится прийти в стабильное состояние. Это называется «химическая реакция».

Элементы, которые в химии классифицируются как «металлы», имеют 1 или 2 электрона на внешней оболочке, то есть мало. Когда с внешней оболочки испускается один электрон, следующая орбита внутри заполняется, и атому удобно жить. Поэтому, когда собирается много атомов металлов, электроны свободно передвигаются между атомами и связывают их, как клей. Это называется «металлическая связь». Материалы, где электроны не принадлежат определённому атому, а передвигаются между ними свободно, с точки зрения электромагнитной теории будут «проводниками».

Что же делают вещества, у которых только немного электронов не хватает до восьми? Самый простой способ такой: 2 атома создают пару, одалживают друг у друга 1 электрон, и в итоге получается 8. Это называется «ковалентная связь». У углерода, кремния и некоторых других элементов как раз 4 электрона на внешней оболочке.

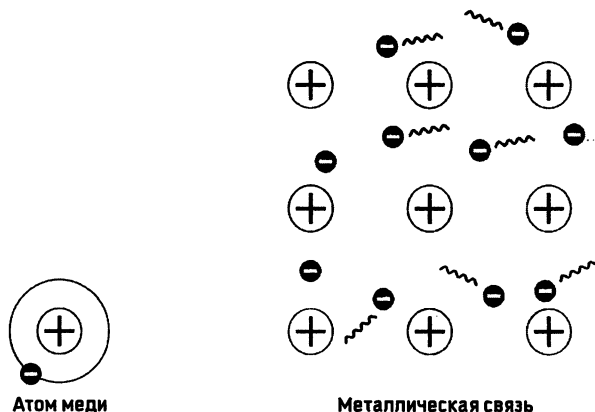


Рис. 3.12. Металлическая связь

Элементы, не принадлежащие ни к одной из этих групп, как раз поэтому могут образовывать различные связи. Вещества, образующие наше тело, могут преобразовывать углерод в костную ткань именно потому, что углерод может вступать в различные связи, таким образом, всего из нескольких видов материалов образуются самые разные вещества. Вещества, в которых атомы вступили в ковалентную связь, то есть не отпускают электрон на свободу, будут «изоляторами».

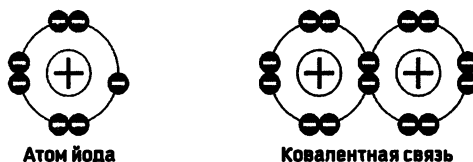


Рис. 3.13. Ковалентная связь

У элементов, расположенных в самой правой части периодической таблицы, атомы сами имеют на внешней оболочке 8 электронов (у гелия 2 электрона), поэтому они стабильны, даже не вступая в химическую связь. Наоборот, они не способны к химической реакции отдачи и приема, и их очень трудно собирать. Поэтому они называются «инертные газы».

Что будет, если встретятся элементы из самой левой части периодической таблицы (у них 1 лишний электрон) и элементы из второго столбца справа (у них не хватает 1 электрона)? Если левый отдаст правому 1 электрон, у него их будет 8, если правый получит 1 электрон, у него тоже их станет 8. Счастливая ситуация для обеих сторон. Кроме того, у элемента, отдавшего электрон, будет лишний положительный заряд, а у получившего электрон – лишний отрицательный заряд. Поскольку их притягивают друг к другу кулоновские силы, между ними возникнет сильная связь. Она называется «ионная связь». Вещества, образованные ионной связью, обычно называются «соли». Самая знаменитая из них – хлорид натрия.

Ионная связь обладает интересной особенностью: под воздействием жидкости (например, воды) связь разрывается, элемент с положительным зарядом и элемент с отрицательным зарядом разделяются. Иначе говоря, вещества с ионной связью растворяются в воде (некоторые растворяются с трудом). Что будет с солью при растворении в воде? Атом с положительным зарядом и атом с отрицательным зарядом смогут свободно передвигаться в такой среде, как вода. Они называются «положительный ион» и «отрицательный ион». Если к растворённым в воде ионам приложить внешнее электрическое поле, под воздействием кулоновских сил они станут двигаться в противоположном направлении. Иначе говоря, вода с растворёнными в ней ионами тоже является проводником. В батареях и аккумуляторах, то есть устройствах, которые вырабатывают ток путем химической реакции, эти ионы играют важную роль. В сухом гальваническом элементе (батарее) внутри тоже есть влага! Мы часто видим в кино, как люди получают поражения от электрического тока, когда в ванну опускают электроприбор; это происходит потому, что в ванне недистиллированная вода, в ней растворены соли. Очищенная вода практически не проводит электричество.

Таблица 3.2. Периодическая система химических элементов

Периоды	Г р у п п ы Э л е м е н т о в									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	а	
1	1 H водород 1,005								2 He гелий 4,003	а
2	3 Li литий 6,941	4 Be бериллий 9,012							10 Ne неон 20,179	а
3	11 Na натрий 22,99	12 Mg магний 24,312	13 Al алюминий 26,982	14 Si кремний 28,086	15 P фосфор 30,974	16 S сера 32,064	17 Cl хлор 35,453		18 Ar аргон 39,948	а
4	19 K калий 39,102	20 Ca кальций 40,08	21 Sc скандий 44,956	22 Ti титан 47,88	23 V ванадий 50,942	24 Cr хром 52,00	25 Mn марганец 54,938	26 Fe железо 55,845	27 Co кобальт 58,933	28 Ni никель 58,69
5	29 Cu медь 63,546	30 Zn цинк 65,37	31 Ga галлий 69,723	32 Ge германий 72,59	33 As мышьяк 74,922	34 Se селен 78,96	35 Br бром 79,904	36 Kr криптон 83,8		
6	37 Rb рубидий 85,468	38 Sr стронций 87,62	39 Y итрий 88,906	40 Zr цирконий 91,224	41 Nb ниобий 92,906	42 Mo молибден 95,94	43 Tc технеций 98	44 Ru рутений 101,07	45 Rh родий 102,905	46 Pd палладий 106,42
7	47 Ag серебро 107,868	48 Cd кадмий 112,411	49 In индий 114,818	50 Sn олово 118,710	51 Sb сурьма 121,757	52 Te теллур 127,6	53 I йод 126,905	54 Xe ксенон 131,3		
8	55 Cs цезий 132,905	56 Ba барий 137,327	57-71 лантаноиды	72 Hf гафний 178,49	73 Ta тантал 180,948	74 W вольфрам 183,84	75 Re рений 186,207	76 Os осмий 190,23	77 Ir иридий 192,22	78 Pt платина 195,08
9	79 Au золото 196,967	80 Hg ртуть 200,59	81 Tl таллий 204,37	82 Pb свинец 207,19	83 Bi висмут 208,98	84 Po полоний [210]	85 At астат [210]			
7 10	87 Fr франций [223]	88 Ra радий [226]	89-103 актиноиды	104 Rf резерфордий [261]	105 Db дубний [262]	106 Sg сборгий [263]	107 Bh борий [262]	108 Hs ханей [265]	109 Mt мейтнерий [266]	110 Ds дайерсгеймий [269]
Высшие оксиды		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇	RO ₄	
Летучие водородные соединения				RH ₄	RH ₃		H ₂ R	HR		

Л А Н Т А Н О И Д ы

57 La лантан 138,905	58 Ce церий 140,12	59 Pr прометий 140,908	60 Nd неодим 144,24	61 Pm прометий [145]	62 Sm самарий 150,4	63 Eu европий 151,96	64 Gd гадолий 157,25	65 Tb тербий 158,93	66 Dy диспрозий 162,5	67 Ho гольмий 164,93	68 Er эрбий 167,26	69 Tm тулий 168,934	70 Yb ytterбий 173,04	71 Lu лютеций 174,967
----------------------------	--------------------------	------------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------	-----------------------------	----------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------	-----------------------------

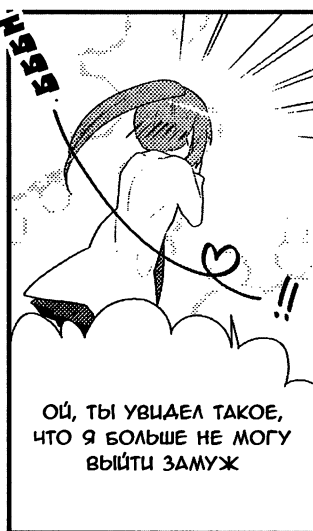
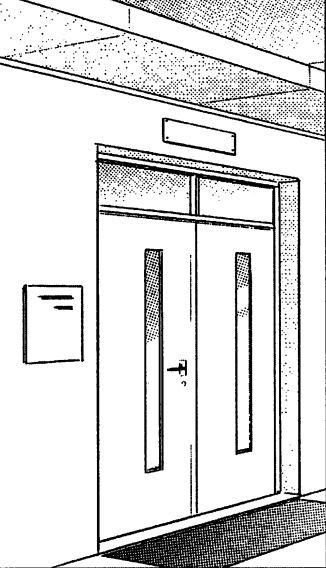
А К Т И Н О И Д ы

89 Ac актиний [227]	90 Th торий 232,038	91 Pa протактиний [231]	92 U уран 238,029	93 Np нептуний [237]	94 Pu плутоний [244]	95 Am амерций [243]	96 Cm курий [247]	97 Bk берклий [247]	98 Cf кальфорний [251]	99 Es эйзенштейний [252]	100 Fm фермий [257]	101 Md маркгеймий [258]	102 No нобеллий [259]	103 Lr лоуренсий [260]
---------------------------	---------------------------	-------------------------------	-------------------------	----------------------------	----------------------------	---------------------------	-------------------------	---------------------------	------------------------------	--------------------------------	---------------------------	-------------------------------	-----------------------------	------------------------------

ГЛАВА 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

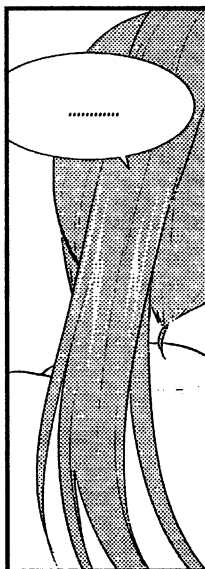






Я УВИДЕЛ
ТВОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.

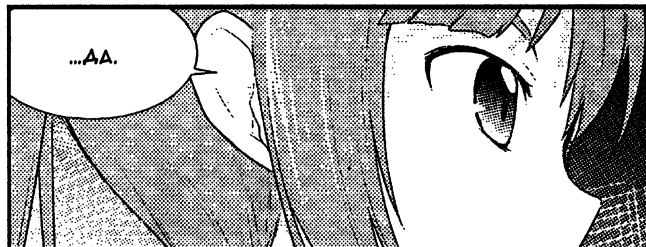
ЭТО БЫЛ
БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ...



.....



НЕУЖЕЛИ
ЭТО РАЗРАБОТКА
ОРУЖИЯ?



...АА.

ТЫ УВИДЕЛ РЕЛЬСОТРОН.

ЧТО...



НАША ЦЕЛЬ
ПРОТИВОПЛАНЕТНОЕ
ОРУЖИЕ!

И ЗАХВАТИМ МИР
В СВОИ РУКИ!

ЗВЕЗДА
СМЕРТИ?



ШУЧУ,
КОНЕЧНО.

Я!

А!

ГДЕ ПРАВДА!



4.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

НУ ЧТО Ж,
БУДУ СТРОГО УЧИТЬ!

СЕГОДНЯ ПРО ТОК
И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

о!

НАКОНЕЦ,
ТОК И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
ВМЕСТЕ ПОЯВИЛИСЬ.

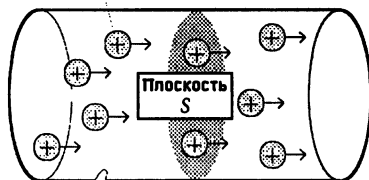
ВО ПЕРВЫХ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК -
ЭТО ТЕЧЕНИЕ ЗАРЯДА.

ЕДИНИЦА -
А (АМПЕР).

A
Ампер

ПОДСЧИТЫВАЕМ
КОЛИЧЕСТВО
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ЗАРЯДОВ,
ПРОХОДЯЩИХ
ЭТУ ПЛОСКОСТЬ,

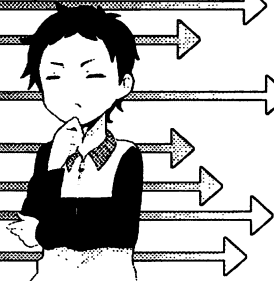
Движущиеся заряды



Определение
электрического тока

И КОГДА ЭТО БУДЕТ 1 КЛ
(КУЛОН) ЗА 1 СЕКУНДУ, ТОК,
ПРОТЕКАЮЩИЙ ПО ПРОВОДУ,
СОСТАВИТ 1 А (АМПЕР).

ЗНАЧИТ, БОЛЬШОЙ
ТОК - ЭТО КОГДА
АВИЖЕТСЯ
МНОЖЕСТВО
ЗАРЯДОВ.

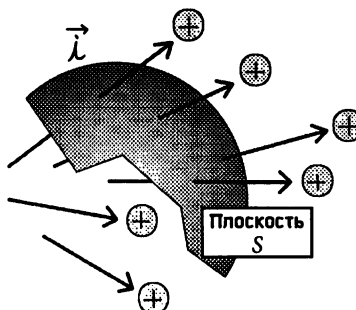


КЛИК

ТЕПЕРЬ ПОСМОТРИМ
НА БОЛЕЕ ОБЩИЙ
СЛУЧАЙ.

ПУМ

ТАК ЖЕ КАК ВЕКТОР
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИНДУКЦИИ \vec{D} ,
ПОДУМАЕМ НАД "ВЕКТОРОМ
ПЛОТНОСТИ ТОКА \vec{i} ".



Поле векторной
плотности тока

ЧТО-ТО
ОЧЕНЬ ПОХОЖЕ
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК.

ПРАВИЛЬНО
ТЫ ЗАМЕТИЛ.

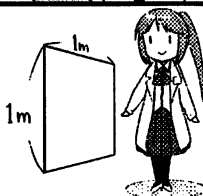
Электрический
поток Φ_e (Кл)
Электрический
ток I (А)

Электрическая
индукция \vec{D}
(Кл/м²)
Плотность тока
 \vec{i} (А/м²)

* См. раздел 3.1 «Электрическая индукция».

ЕДИНИЦА
ПЛОТНОСТИ ТОКА
(А/м²).

ЕДИНИЦА ГОВОРИТ О ТОМ,
СКОЛЬКО ТОКА ЕСТЬ
В ОДНОМ МЕСТЕ НА 1 м².



А ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК -
ЭТО СУММА ВЕКТОРА
ПЛОТНОСТИ ТОКА,

ПРОХОДЯЩЕГО
ЧЕРЕЗ ОДНУ
ПЛОСКОСТЬ

СОПОСТАВИВ,
МОЖНО ЛЕГЧЕ
ПОНЯТЬ.

ТЕПЕРЬ ЛЮБЫЕ
ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯДА
МОЖНО ОБОЗНАЧИТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ.



Представление тока, текущего по проводу

Текут электроны и движутся зигзагом.
Маленькие точки – атомные ядра,
которые являются препятствиями.

ТЫ ЗНАЕШЬ, ЧТО НАПРАВЛЕНИЕ
ТОКА И ТЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ
ПРОТИВОПОЛОЖНЫ?



НАСКОЛЬКО Я ЗНАЮ,
ЭТО ПОТОМУ, ЧТО ТОК – ЭТО
НАПРАВЛЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ
ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ
ЗАРЯДОВ,

А ЭЛЕКТРОНЫ –
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЗАРЯДЫ.

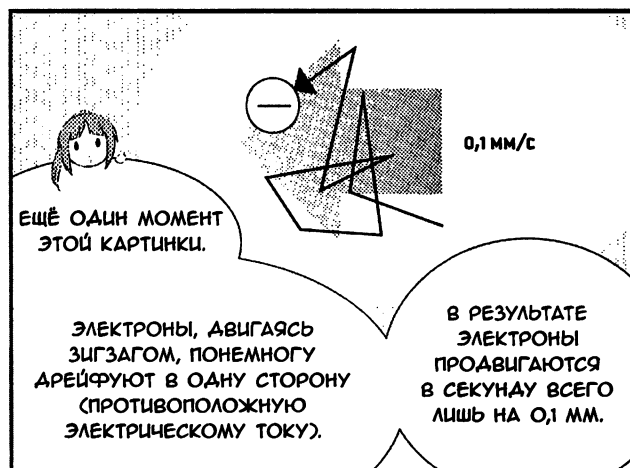


НЕТ, ЭТО НЕ ТАК.
ГОВОРЯТ, ЧТО НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА
РЕШИЛ БЕНАЖАМИН ФРАНКЛИН.

НО МЕНЯТЬ БЫЛО
УЖЕ ПОЗНАНО. ХОТЯ
ВЕРОЯТНОСТЬ БЫЛА $1/2$...

А ПОЗЖЕ ВЫЯСНИЛОСЬ,
ЧТО ЭТО ПРОТИВОПОЛОЖНОЕ
НАПРАВЛЕНИЕ ТЕЧЕНИЯ
ЭЛЕКТРОНОВ.

НЕ ПОВЕЗЛО
СО ЖРЕБИЕМ...



ЕЩЁ ОДИН МОМЕНТ
ЭТОЙ КАРТИНКИ.

0,1 мм/с

ЭЛЕКТРОНЫ, ДВИГАЯСЬ
ЗИГЗАГОМ, ПОНЕМНОГУ
АРЕЙФУЮТ В ОДНУ СТОРОНУ
(ПРОТИВОПОЛОЖНУЮ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ТОКУ).

В РЕЗУЛЬТАТЕ
ЭЛЕКТРОНЫ
ПРОДВИГАЮТСЯ
В СЕКУНДУ ВСЕГО
ЛИШЬ НА 0,1 мм.



Я-ТО ДУМАЛ, СКОРОСТЬ
СВЕТА, А ОКАЗЫВАЕТСЯ
АДОВОЛЬНО МЕДЛЕННО*.

* Если в конце проводника толкнуть электрон, сигнал о том, что «толкнули», передаётся от электрона к электрону, и начнётся движение на почти световой скорости.

4.2. ЗАКОН ОМА



Закон Ома

$$\vec{i} = \sigma \vec{E}$$

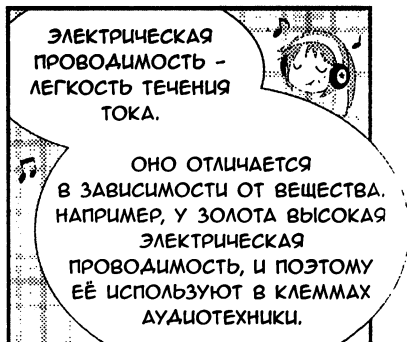
\vec{i} – плотность тока (А/м²)

σ – электрическая проводимость (См/м)

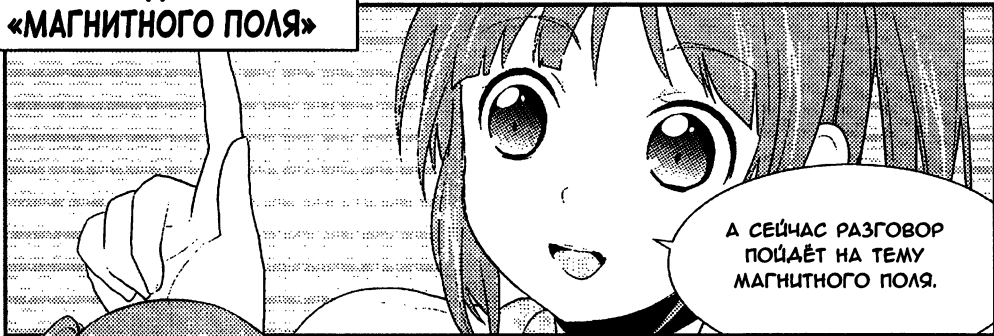
\vec{E} – напряженность электрического поля (В/м)

ЭТО ЗАКОН ОМА.

НЕМЕЦКИЙ ФИЗИК ГЕОРГ СИМОН ОМ ОБНАРУЖИЛ, ЧТО МЕЖДУ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ СОСТОИТ ТАКАЯ СВЯЗЬ.




4.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ «МАГНИТНОГО ПОЛЯ»




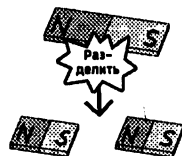
А СЕЙЧАС РАЗГОВОР
ПОДАЁТ НА ТЕМУ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Свойство магнита


- У магнита обязательно имеется северный и южный полюсы.
- Одноимённые полюса магнитов отталкиваются друг от друга (например, северные от северных, южные от южных), а разноимённые притягиваются друг к другу.
- Если поломать магнит, то получатся два магнита, каждый из которых будет иметь свои северный и южный полюсы. То есть отдельно заполучить северный или южный полюсы невозможно.
- Взаимодействующая сила магнитных полюсов, как и в законе Кулона, следует закону обратных квадратов.



СВОЙСТВО МАГНИТА
БЫЛО ИЗВЕСТНО
ЕЩЁ ДО НАШЕЙ ЭРЫ,
НО, ПОЧЕМУ ТАК ПРОИСХОДИТ,
ДОЛГО ОСТАВАЛОСЬ ЗАГАДКОЙ.




ХМ, МАГНИТНАЯ СИЛА
ПОХОЖА НА СИЛУ,
ВОЗНИКАЮЩУЮ МЕЖА
ЗАРЯДАМИ.



ПРАВДА, ОЧЕНЬ
ПОХОЖА
НА СИЛУ КУЛОНА?

ПОЭТОМУ ВСЕ ДУМАЛИ,
ЧТО ЕСТЬ СООТВЕТСТВУЮЩЕЕ
ЗАРЯДУ, ЧТО-ТО ВРОДЕ
"ПОЛЮСОВЫХ ЗАРЯДОВ".

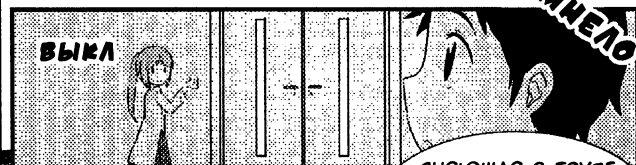
НО РАЗДЕЛИТЬ
СЕВЕРНЫЙ И ЮЖНЫЙ
ПОЛЮСЫ НИКАК
НЕ ПОЛУЧАЛОСЬ.



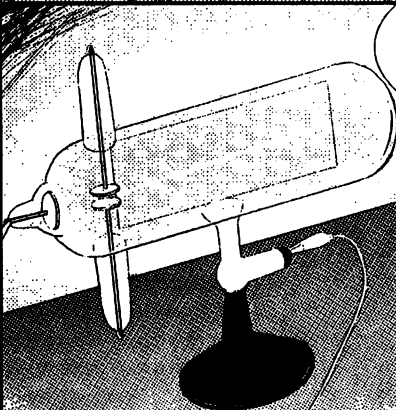
ВОТ В ЧЁМ
ГЛАВНАЯ
РАЗНИЦА.



НО В XIX ВЕКЕ
ВЫЯСНИЛОСЬ, ЧТО МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ, СОЗДАВАЕМОЕ
МАГНИТОМ, ВЛИЯЕТ НА ЗАРЯД.



ПОТЕМНЕЛО

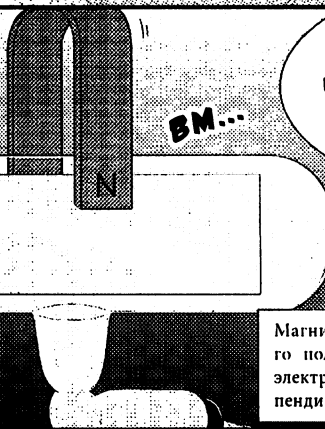


СЯЮЩАЯ В ТРУБЕ
КРУКСА ЛИНИЯ,
НАЗЫВАЕМАЯ
ЭЛЕКТРОННЫМ
ЛУЧЕМ, -

ЭТО ТЕЧЕНИЕ
ЭЛЕКТРОНОВ.



ОГО, СОГНУЛСЯ.



ЛУЧ СОГНУЛСЯ, ЗНАЧИТ, ОН
НАХОДИТСЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
СИЛА ЛОРЕНЦА*.

Магнитное поле направляется с северного полюса на южный, соответственно, электроны изменяют направление перпендикулярно магнитному полю.

Свойство магнитного поля

- Из магнитного полюса магнита исходит магнитное поле \vec{E} .
- Магнитное поле является векторной величиной, исходящей из северного полюса магнита и направляющейся в южный полюс.
- Частица с зарядом q , находящаяся в магнитном поле, получает влияние силы \vec{F} перпендикулярного направления.

* Хендрик Лоренц – голландский физик.

А КАК РЕШАЕТСЯ
СИЛА ЛОРЕНЦА \vec{F} ?

ПОДВЕРГАЕТСЯ
СИЛОЙ \vec{F}

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

\vec{F} – сила (Н)

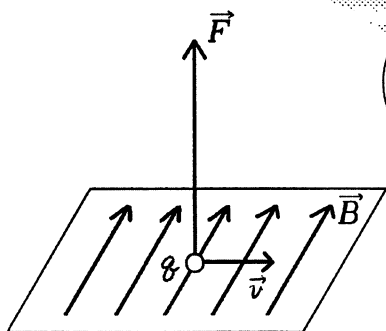
q – заряд (Кл)

\vec{v} – заряженная
частица (м/с)

\vec{B} – магнитное поле (тл)*

СООТНОШЕНИЕ СИЛЫ \vec{F} ,
КОТОРАЯ ВЛИЯЕТ
НА ЗАРЯЖЕННУЮ ЧАСТИЦУ,
МАГНИТНОГО ПОЛЯ \vec{B}
И СКОРОСТИ \vec{v} ТАКОВА.

ЗДЕСЬ "ВЕКТОРНОЕ
ПРОИЗВЕДЕНИЕ"
(СМ. ПРИЛОЖЕНИЕ), ТАК ЧТО
СИЛА И К МАГНИТНОМУ ПОЛЮ,
И К НАПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЯ
ПЕРПЕНДИКУЛЯРНА.



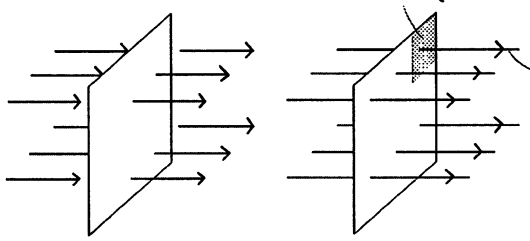
ЕСЛИ СКОРОСТЬ
НУЛЕВАЯ, ЭТО ЗНАЧИТ,
ЧТО НА ЗАРЯД
НЕ ВЛИЯЕТ МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ.

ЭТО И СТАЛО
ОДНИМ ИЗ ПОВОДОВ,
РАЗГАДКИ ТАЙНЫ
МАГНИТНОЙ СИЛЫ.

ПОНЯЛ...

* Единица магнитного поля \vec{B} – тл (тесла). Но поскольку у магнитного потока единица Вб (вебер), может писаться Вб/м².

Количество на $1 \text{ м}^2 \text{ В}$ (тл или Вб/м²)



Площадь A Площадь A

Линии магнитного потока

МАГНИТНЫЕ ЛИНИИ, ПРОНИКАЮЩИЕ ЧЕРЕЗ ПОВЕРХНОСТЬ, - BA (Вб)

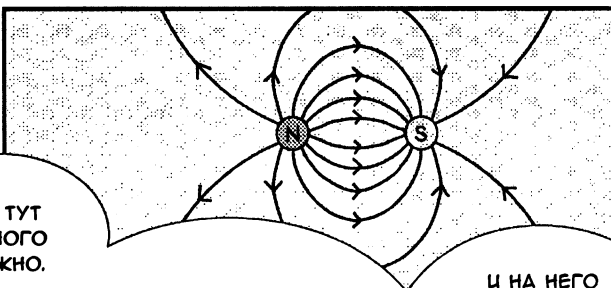
ОПРЕДЕЛИМСЯ ПРО "МАГНИТНЫЙ ПОТОК", ЭТО ПОТОМ ПОНАДОБИТСЯ.

ВЕКТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО-ИНОМУ НАЗЫВАЕТСЯ **МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ**.

ТО ЕСТЬ, КАК И ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ, СЧИТАЕТСЯ ВЕКТОРНЫМ ПОЛЕМ ПРОЕКЦИИ МАГНИТНОГО ПОТОКА НА ЕДИНИЦУ ПЛОЩАДИ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК - ЭТО ПОДСЧЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ. А ТЕПЕРЬ ЧТО ПОДСЧИТЫВАЕТСЯ?

ВОТ ТУТ НЕМНОГО СЛОЖНО.



ПОКА НЕ ВЫЯСНИЛИ ЗАГАДКУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, СЧИТАЛОСЬ ЧТО ЕСТЬ ВЕКТОР \vec{F} , ИСХОДЯЩИЙ ИЗ МАГНИТНЫХ ЗАРЯДОВ ПОЛЮСОВ,

И НА НЕГО УМНОЖАЛИ ВАКУУМНУЮ МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ μ_0 , ПОЛУЧАЯ МАГНИТНУЮ ИНДУКЦИЮ \vec{B} .

НО ПОЗЖЕ ВЫЯСНИЛОСЬ, ЧТО МАГНИТНЫХ ЗАРЯДОВ НЕ СУЩЕСТВУЕТ. СЛЕДОВАТЕЛЬНО, ВЕКТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ НЕ \vec{H} , А \vec{B} .

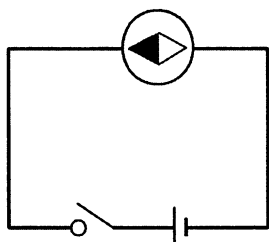
НО, ИЗМЕНИВ ОПРЕДЕЛЕНИЕ, МОЖЕТ ВОЗНИКНУТЬ БЕСПОРЯДОК, ТАК ЧТО НАЗВАНИЕ ОСТАВИЛИ.

Напряжённость электрического поля \vec{E} (В/м)	Электрическая индукция $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ (Кл/м ²)
Напряжённость магнитного поля \vec{H} (А/м)	Магнитная индукция $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ (Вб/м ²)

РАССТАВИВ, КАЖЕТСЯ, ЧТО E И H , D И B СООТВЕТСТВУЮТ ДРУГ ДРУГУ.

* Про \vec{H} см. на стр. 143.

4.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



Опыт Эрстеда

По тогдашним знаниям и «спорам симметрии», сложно было предположить, что в этой ситуации компас может покачнуться.

ПРИ ТЕЧЕНИИ ТОКА
КОМПАС КРУТИТСЯ.

ТО ЕСТЬ ТОК, КАК
И МАГНИТ, СОЗДАЁТ
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

КРУТЬ

ЭТО ОБНАРУЖИЛ
В 1820 ГОДУ
ДАТСКИЙ ФИЗИК
ХАНС КРИСТИАН ЭРСТЕД.

ПРИНЦИП
ЭЛЕКТРОМАГНИТА.

ДА. ПРЕЖДЕ НАУКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И МАГНИТИЗМА
РАЗВИВАЛИСЬ ОТДЕЛЬНО,

НО ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК
СОЕДИНИЛ
ЭТИ ДВА НАПРАВЛЕНИЯ

Электри-
чество

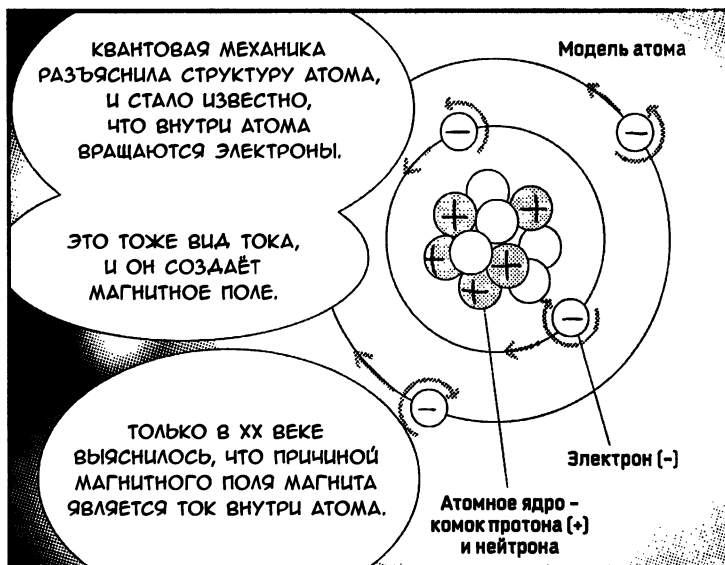
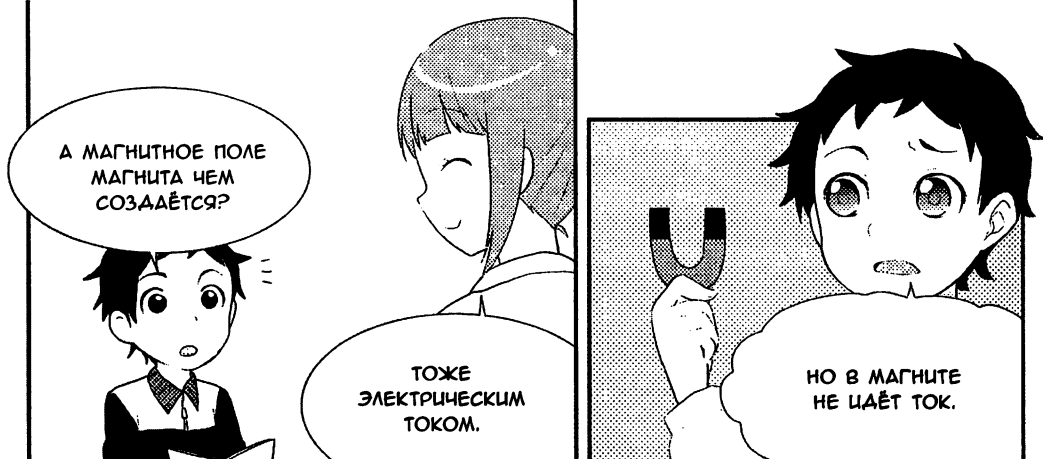
Магнетизм

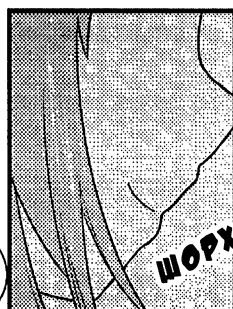
Я УЖЕ ОБЪЯСНЯЛА,
ЧТО ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК -
ЭТО ТЕЧЕНИЕ
ЭЛЕКТРОНОВ.

АГА.

ТО ЕСТЬ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
РОЖДАЕТСЯ ОТ ТЕЧЕНИЯ
ЗАРЯДОВ.

СТАЛО ЯСНО,
ЧТО МАГНИТНОЕ ПОЛЕ -
ЭТО ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩАЯ
СИЛА ДВИЖУЩИХСЯ
ЗАРЯДОВ.





А ТЕПЕРЬ ПОДРОБНЕЕ



Дрейф электронов и электрический ток

Попробуем рассчитать, с какой скоростью течёт электрический ток внутри проводника. Чтобы легче представить себе это, будем считать, что сечение его составляет 1 м^2 . В проводнике есть свободные электроны с плотностью n (м^{-3}), средняя скорость дрейфа v_d (м/с). Если принять величину заряда за e ($-1,6 \times 10^{-19}$ Кл), то количество зарядов, проходящих каждую секунду через перпендикулярную току плоскость, можно рассчитать как $-nev_d$, как видно по рис. 4.1. Далее, если принять площадь сечения провода за A , значение тока, протекающего через A , можно получить так: (ток, проходящий через 1 м^2) \times (площадь сечения провода); если выразить ток через дрейф электронов и электронную плотность, получится:

$$I = -nev_d A.$$

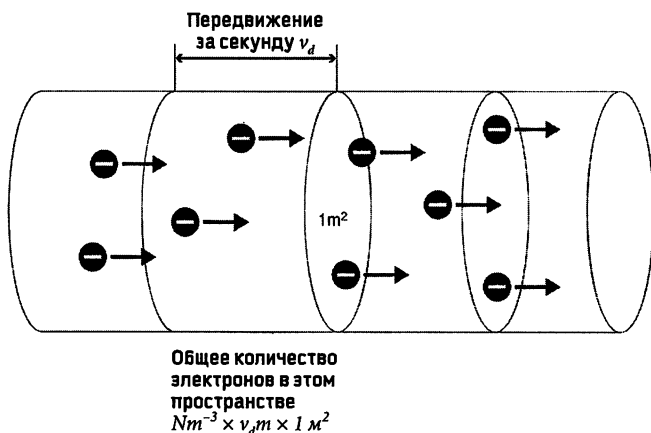


Рис. 4.1. Отношение заряда и тока, проходящего через провод сечением 1 м^2

Далее попробуем подставить конкретные числа. Предположим, что провод сделан из меди, его сечение 1 мм^2 . Какая будет скорость дрейфа электронов при пропускании тока в 1 А ? Электронная плотность меди примерно $8,5 \times 10^{28} \text{ м}^{-3}$. Подставим e и посчитаем: $v_d = 7,4 \times 10^{-5} \text{ м/с}$. Скорость меньше $0,1 \text{ мм/с}$ – такую величину можно сравнить с бактерией. Из расчета мы поняли, что скорость очень мала.

Обратите внимание, что сейчас мы рассчитали среднюю «скорость дрейфа» популяции электронов. Электроны внутри проводника движутся хаотично, они налетают на атомы и отталкиваются от них. Скорость электронов при этом называется «скоростью Ферми», и она довольно низка – несколько тысяч км/с. Это примерно 1% от скорости света. Она не достигает «скорости света», о которой говорит Андо в манге. Так что же такое «скорость света»?

Представим себе такую игру: кто-то ударяет длинное бревно с одной стороны, а человек с другой стороны бревна поднимает флаг, когда видит, что бревно сдвинулось. Стоит ли надеяться, что ваш партнер поднимет флаг в тот же момент, когда вы ударили по бревну? К сожалению, ответ – «нет». Как бы быстро вы ни ударяли, даже если вы стукнете по нему изо всех сил, результат не пройдет быстрее, чем скорость звука, проходящего через бревно. Обычно для твёрдых предметов она составляет примерно 1000 м/с.

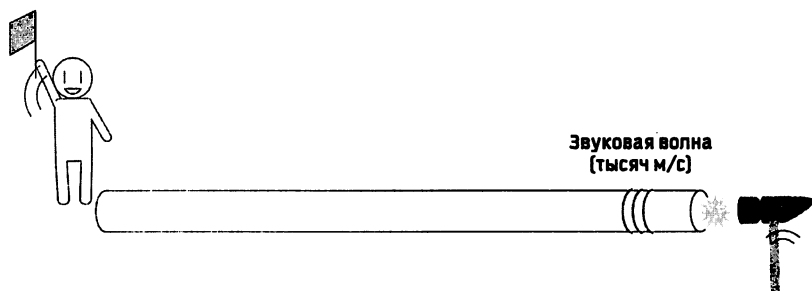


Рис. 4.2. Сигнал «удара» по бревну не пройдет быстрее скорости звука

Попробуем проделать то же самое с проводом и зарядами. Когда 1 электрон входит в проводник с одной стороны, с другой стороны вылетает 1 электрон. В это время электрон выталкивает соседние электроны один за другим, а скорость, с которой передается результат этого действия, – это скорость волн электрического поля, то есть электромагнитных волн. Мы объясним в конце этой книги, что скорость электромагнитных волн равна скорости света и составляет 300 000 000 м/с. Поэтому Андо говорит правильно.

Сопротивление резистора и закон Ома

Закон Ома, определяемый в этой книге, выглядит так:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

где \vec{j} – плотность тока (А/м²);

σ – удельная электропроводность (константа для каждого материала) (Кл/м);

\vec{E} – электрическое поле (В/м).

Он отличается от того, что вы изучали в школе. То, что на самом деле открыл Ом, выглядит именно так, а то, что изучают в школе, – это лишь пример его применения. В школе объясняют, что «если приложить к резистору с сопротивлением R разность потенциалов V , будет создано течение тока I ». Так как же связаны оригинальный закон Ома и его школьная версия?

Резистор изображен на рис. 4.3 – он сделан из материала с низкой электропроводностью, например спрессованного порошка графита, и с обеих сторон к нему присоединены клеммы проводника. Приложим к резистору с обеих сторон разность потенциалов V , и будет создано течение тока I . Они соотносятся друг с другом так:

$$V = IR,$$

где V – разность потенциалов между полюсами (В);

I – протекающий через резистор ток (А);

R – сопротивление (Ом).

Соотношение R между разностью потенциалов V (В) по сторонам резистора и током I (А) называется «сопротивление». Отношение В/А называется единицей Ом, так звучит закон Ома в школе. Теперь посмотрим на это с точки зрения удельной электропроводности σ , постоянной для каждого материала.

Возьмём резистор с сечением A и однородный проводник длиной L . Если приложить к обоим полюсам разность потенциалов, в резисторе образуется однородное электрическое поле и будет протекать однородный ток. Отношение электростатического потенциала V и напряжённости электрического поля E при однородном электрическом поле выглядит так: $E = V/L$. Плотность поля составляет $\vec{j} = I/A$. Ясно, что в обоих случаях ориентация направлена по оси сопротивления, поэтому она выражается скалярной величиной. Если выразить это через закон Ома $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, мы получим следующую формулу:

$$\frac{I}{A} = \sigma \frac{V}{L}.$$

Или в преобразованном виде:

$$V = \frac{L}{\sigma A} I.$$

Если подставить сюда $R = \frac{L}{\sigma A}$ (Ом), мы получим хорошо нам известную версию закона Ома.

Из анализа размерностей ясно, что размерность удельной электропроводности $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$. Число, обратное ом, называется сименс (См), а единица электропроводности выражается как См/м. Определение этой единицы $\text{См} = \text{Ом}^{-1}$ было дано сравнительно недавно (в 1971 г.), раньше её записывали $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$.

Удельная электропроводность σ часто измеряется в единицах удельного сопротивления ρ (обратное число). Число ρ также является константой для каждого вещества, оно показывает, насколько трудно току протекать. Формула соотношения:

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

Если выразить величину сопротивления с помощью удельного сопротивления, получим следующее:

$$R = \frac{\rho L}{A}.$$

Единица измерения удельного сопротивления – обратное число проводимости, поэтому выражается как Ом·м.

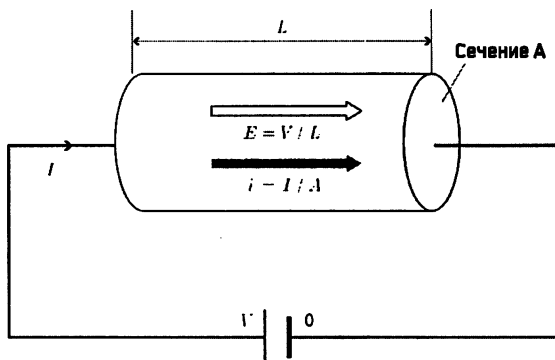


Рис. 4.3. Резистор,
используемый в электрической цепи

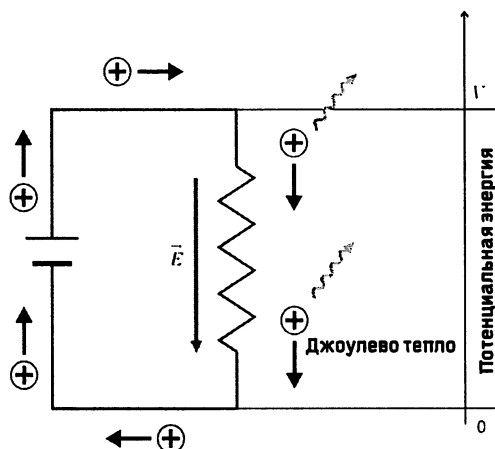


Рис. 4.4. Отношение между работой электрического поля в резисторе, энергией и джоулевым теплом

Что же происходит, когда электрический ток проходит через проводник, обладающий некоторым сопротивлением? Каждый заряд движется вдоль линии поля. То есть работа поля – это приведение зарядов в движение. Для того чтобы сдвинуть заряд, нужно проделать работу, потому что есть сопротивление, то есть трение. Куда же уходит механическая энергия, которая утрачивается при этой работе? Для простоты понимания представьте себе, что вы передвигаете что-то тяжёлое по поверхности с трением. Да, работа превращается в тепло. Повторим ещё раз. Когда электрический ток проходит через проводник с сопротивлением, образуется тепло. Оно называется «джоулево тепло».

Далее рассмотрим отношение напряжения, тока и джоулева тепла. Представим, что ток I проходит через сопротивление с разностью потенциалов V . За время Δt в сопротивление входит заряд $\Delta Q = I\Delta t$ (Кл). Согласно определению единицы измерения разности потенциалов (В), «разность потенциалов, при которой для переноса заряда в 1 Кл требуется работа электрического поля в 1 Дж, составляет 1 В». Поэтому работа ΔW , произведённая электрическим полем за Δt , исходя из определения разности потенциалов V , составит

$$\Delta W = \Delta QV.$$

Если пересчитать это на секунды, получим:

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} V = IV.$$

Иначе говоря, энергия, которая каждую секунду превращается в тепло, равна произведению напряжения V и тока I . Это называется «потребляемая мощность» сопротивления. Потребляемая мощность, называемая в механике силой, равна работе, производимой за одну секунду, она измеряется в ваттах (Вт). Вы ведь хорошо знакомы с ваттами, правда? На любом электроприборе, который продаётся в магазине, указана его потребляемая мощность.

Существует несколько способов расчёта потребляемой мощности с использованием закона Ома, они показывают связь силы тока, напряжения и сопротивления. Напишем формулу.

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2 R,$$

где V – разность потенциалов между полюсами (В);

I – сила тока, проходящего через резистор (А);

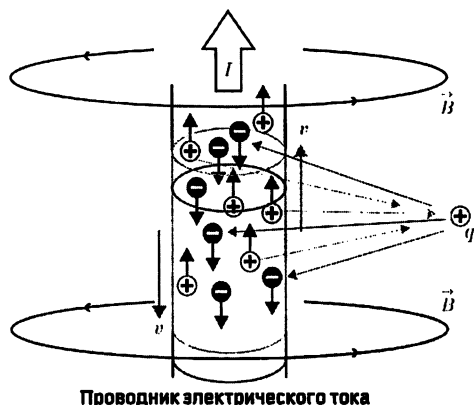
R – величина сопротивления (Ом).

В обычной жизни мы часто сталкиваемся с другой единицей измерения, по смыслу похожей на единицу мощности. Это киловатт-час (кВт·ч). Это тоже называют «мощностью», и из-за этого возникает путаница (строго говоря, это «количество электроэнергии», поэтому здесь есть неточность в употреблении слова). У величин «ватт» и «киловатт-час» разная размерность, кВт·ч имеет размерность энергии. 1 кВт·ч – это электроэнергия, потреблённая прибором с потребляемой мощностью в 1 кВт за 1 час, при расчете это будет 3,6 МДж. Мы иногда слышим по телевизору такое выражение: «сколько-то ватт за день», и здесь вообще не понятно, о чем речь. Правильно было бы говорить так: «2,4 кВт·ч электроэнергии при использовании мощности в 100 Вт за целый день».

ШАГ ВПЕРЁД

⊕_e Сущность магнитного поля

В этой книге мы описали сущность магнитного поля так: «это сила, с которой один электрический ток воздействует на другой электрический ток». Можно ли с этим согласиться? Почему один электрический ток оказывает воздействие на другой? Во многих учебниках по электромагнетизму пишут, что это «что-то похожее» на кулоновскую силу. Давайте возьмём на себя смелость продвинуться ещё на один шаг.



Проводник электрического тока

На заряды в состоянии покоя
силы электрического провода
не действуют
→ Потому что на них воздействует
сила одинаковой величины
и противоположной
направленности
от положительных
и отрицательных зарядов

Рис. 4.5. Заряженная частица помещена рядом с электрическим током.
Силы электрического провода не действуют на неё

Как показано на рис. 4.5, рядом с проводом, по которому проходит ток, помещён один положительный заряд. Для простоты объяснений будем считать, что в проводе находится одинаковое количество положительных и отрицательных зарядов, они перемещаются в противоположных направлениях со скоростью v . По определению, ток проходит в направлении снизу чертежа вверх. Все заряды в проводнике составляют электрическое поле, но поскольку количество положительных и отрицательных зарядов одинаковое, их взаимодействие приводит к тому, что поле снаружи провода будет нулевым. Следовательно, на заряд снаружи воздействие не оказывается.

Попробуем задать заряду движение, параллельное скорости тока. Поскольку снаружи провода есть магнитное поле, созданное электрическим током, на заряд оказывает воздействие сила притяжения тока $\vec{F} (= q\vec{v}_0 \times \vec{B})$. Это наблюдаемый факт. Далее, передвигаясь с той же скоростью, посмотрим, что будет происходить с движущимся зарядом.

Тот факт, что заряд воспринимает воздействие электрического тока, не должен измениться только лишь из-за того, что изменилась точка наблюдения. Но сейчас заряд с точки зрения наблюдателя стоит. Почему же в этом случае есть воздействие тока на заряд?

В физике есть понятие, называемое «принцип относительности». Он говорит о том, что «все физические явления выглядят одинаково, независимо от позиции наблюдателя». В нашем случае и человек в состоянии покоя, и движущийся человек наблюдают явление «притяжения заряженной частицы электрическим током». Но тогда не получится объяснить причину этого явления тому, кто движется вместе с зарядом. Похоже, в теории электромагнетизма есть какой-то изъян.

Альберт Эйнштейн, работая в Бюро патентов в Берне, глубоко изучил эту проблему и обратил внимание на один факт. В 1905 г. он издал труд со скромным названием «К электродинамике движущихся тел». В дальнейшем он был назван «специальной теорией относительности». Это новая теория кардинально изменила мир, в котором мы живем. Неправильным было наше осознание того, что значит «стоять» и «двигаться».

Специальная теория относительности исходит из предпосылки, что «скорость света в вакууме является неизменной, независимо от того, кто её наблюдает». Даже если догнать свет, скорость исчезающего света не изменится – в это интуитивно трудно поверить, но это факт. Если признать это, то нужно будет признать и то, что с точки зрения наблюдателя движущиеся относительно него предметы будут зрительно уменьшаться в направлении их движения. Это называется «лоренцево сокращение»¹. Конечно, в повседневной жизни нам негде увидеть лоренцево сокращение. Этот эффект проявляется при скоростях движения, близких к скорости света.

Давайте более глубоко рассмотрим вопрос о движущемся заряде с точки зрения теории относительности. Наблюдатель, сидящий на движущемся заряде, смотрит на токопроводящий провод. При этом он заметит, что отрицательные заряды в проводнике движутся быстрее, а положительные медленнее. Лоренцево сжатие тем сильнее, чем выше относительная скорость. Формула выглядит так.

Для положительного заряда:

$$L'_+ = L \sqrt{1 - \left(\frac{v - v_0}{c} \right)^2}.$$

Для отрицательного заряда:

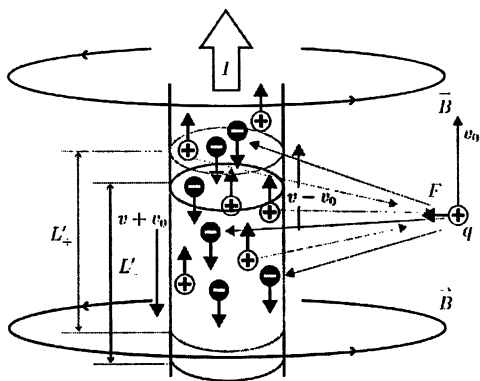
$$L'_- = L \sqrt{1 - \left(\frac{v + v_0}{c} \right)^2},$$

где c – скорость света в вакууме ($3,0 \times 10^8$ м/с).

Когда заряд начинает движение, заряженные частицы электрического тока сжимаются. Степень сжатия отрицательных зарядов больше, в результате движущиеся заряды чувствуют силу притяжения.

По сравнению с величиной c , величина $v \pm v_0$ очень мала, но она не равна нулю. Число зарядов не меняется, поэтому наблюдателю кажется, что количество зарядов на единицу объема увеличивается. Иначе говоря, наблюдателю, который передвига-

¹ Изучите тему, почему, если специальная теория относительности верна, возникает лоренцево сокращение, по книге «Теория относительности в комиксах» (Ямамото Масаси, под редакцией Нитта Хидэо), Ohmsha (2009).



Когда заряд начинает движение, заряженные частицы электрического тока сжимаются. Степень сжатия отрицательных зарядов больше, в результате движущиеся заряды чувствуют силу притяжения

Рис. 4.6. Плотность зарядов в проводнике, наблюдаемая с точки зрения движущихся зарядов.
Лоренцево сжатие для положительных и отрицательных зарядов различно

ется по направлению электрического тока, кажется, что отрицательных зарядов в нём больше, чем положительных. Поэтому окажется, что среди силовых линий, исходящих от всех зарядов, больше линий, выходящих из отрицательных зарядов, и меньше линий, выходящих из положительных. Таким образом, здесь наблюдается электрическое поле, ориентированное по направлению тока. Если точно рассчитать это электрическое поле, мы увидим, что его величина будет равна величине того, что мы называем «магнитным полем», то есть $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$.

Итак, специальная теория относительности помогла нам понять, что собой представляет явление, называемое «магнитным полем»; оказывается, это электрическое поле, существующее в нашем удивительном мире. Как говорилось в начале книги, теория электромагнетизма основана лишь на идее о том, что заряды притягиваются и отталкиваются, но если её приправить специальной теорией относительности, мы сможем объяснить существование магнитного поля, исходя из электрического поля. И наоборот, если не доказывать справедливость специальной теории относительности, то и не нужно перемещаться со скоростью, близкой к скорости света. Было бы достаточно измерить лоренцево сжатие просто на движущемся заряде. Я помню, когда я узнал об этом в университете на занятиях, мир для меня, можно сказать, изменился.

Как мы уже говорили вначале (см. стр. 112), скорость электронов в проводнике менее 1 мм/с. Будет ли действовать теория относительности при любой, даже низкой скорости? Из расчета ясно, что порядок величины лоренцева сжатия – $1/10^{24}$, это ещё меньше, чем соотношение размера атома водорода и Солнечной системы. Даже при таких незначительных изменениях разница в плотности положительных и отрицательных зарядов в проводнике чувствуется потому, что зарядов в проводнике огромное количество. Давайте ещё раз вернемся к главе 2 и проверим, сколько зарядов содержится в 1 см³ меди и какова сила взаимодействия между зарядами в 1 кулон на расстоянии 1 м.

ГЛАВА 5

ТЕОРЕМА АМПЕРА, МАГНЕТИКИ



РУКОВОДСТВО ПО ЭКСПЕРИМЕНТУ

- ВРЕМЯ: СУББОТА, УТРО
- МЕСТО: У ВОРОТ УНИВЕРСА
- ВЗЯТЬ С СОБОЙ: КУПАЛЬНИК, ДЕНЬГИ (ВАЖНО!)

НУ, ВСЁ ВЗЯЛ...

НО ЗАЧЕМ?

ДОБРОЕ УТРО!

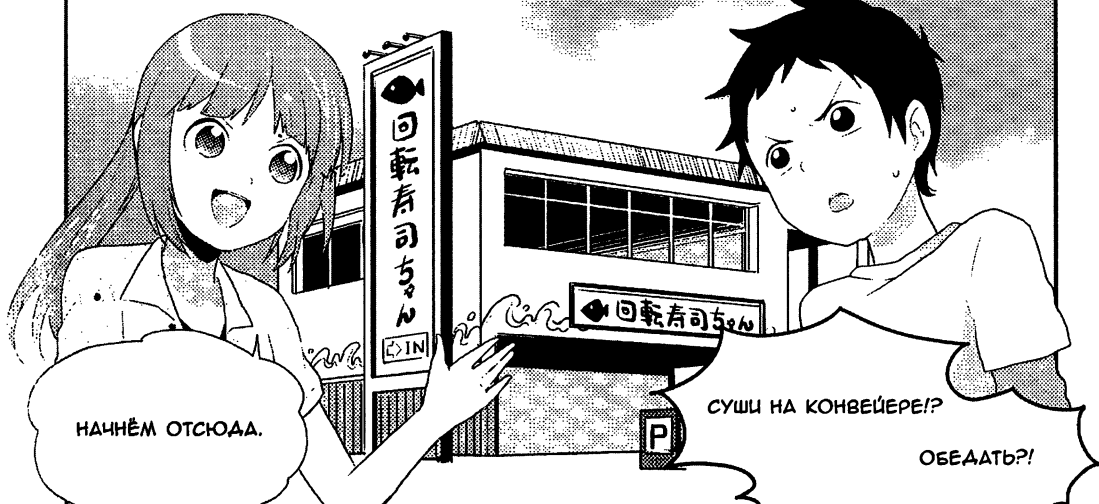
ОНА ЧТО, НА КУРОРТ!?

НУ, ПОШЛИ!

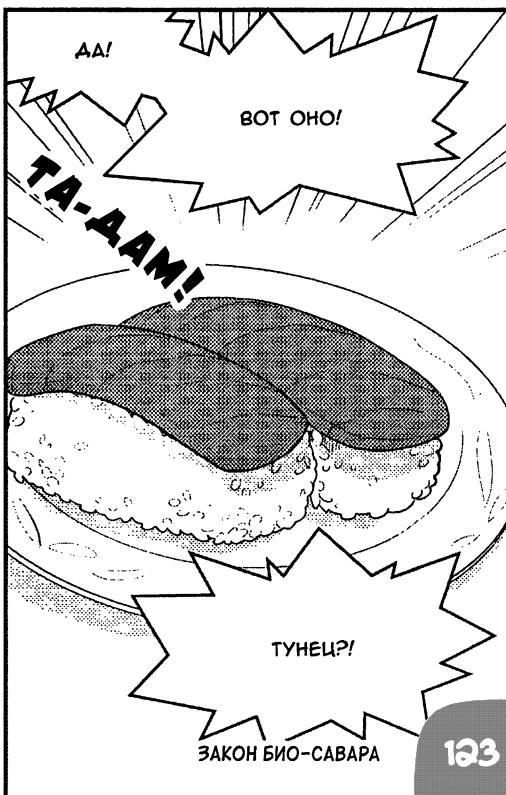
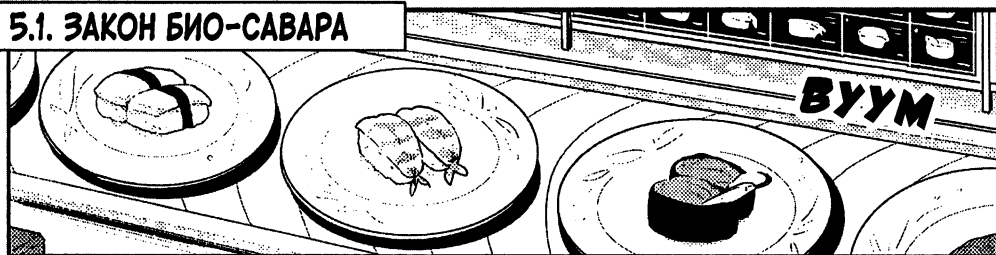
ХВАТЬ

ЭЙ, А НЕ
В ЛАБОРАТОРИЮ?

ДЛЯ НАЧАЛА ЕСТЬ
ДРУГИЕ ДЕЛА.



5.1. ЗАКОН БИО-САВАРА





НЕТ, ТАРЕЛКА.



ЕСЛИ ТЕКУЩИЕ
ПО КОНВЕЙЕРУ СУШИ –
ЭТО ТОК,

ТО ТАРЕЛКИ –
ЭТО ЧАСТИЦЫ ТОКА.

ЗНАЧИТ, КАК ВСЕГДА,
ВНИМАНИЕ ОБРАЩАЕМ

НА МАЛЕНЬКИЕ
КУСКИ ТОКА.

ВЕРНО.

РАССУЖДАТЬ ПРО ВЕСЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК
СЛОЖНО, ТАК ЧТО
ПОНАДОБИЛАСЬ
МИНИМАЛЬНАЯ ЕДИНИЦА,
НАПОДОБЕЕ ТОЧЕЧНЫХ
ЗАРЯДОВ.

И РЕШИЛИ ТОК
РАЗРЕЗАТЬ НА ДЛИНУ ds
И ОБОЗНАЧАТЬ КАК $Id\vec{s}$.*

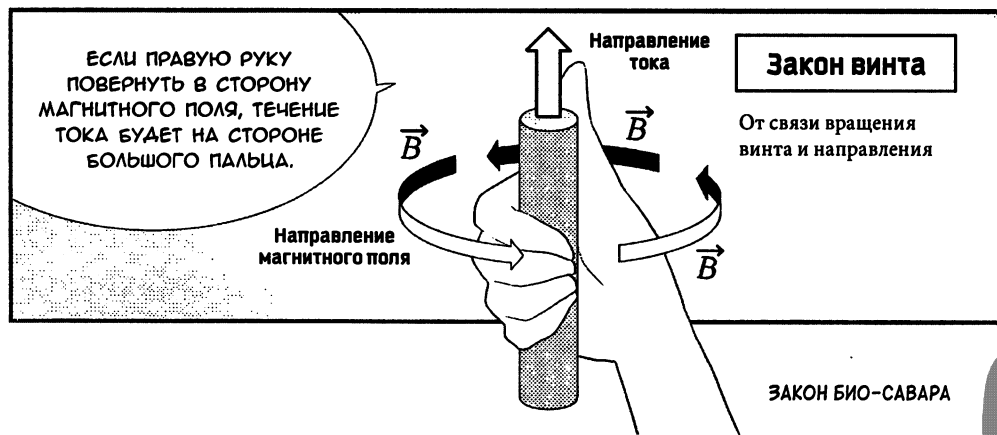
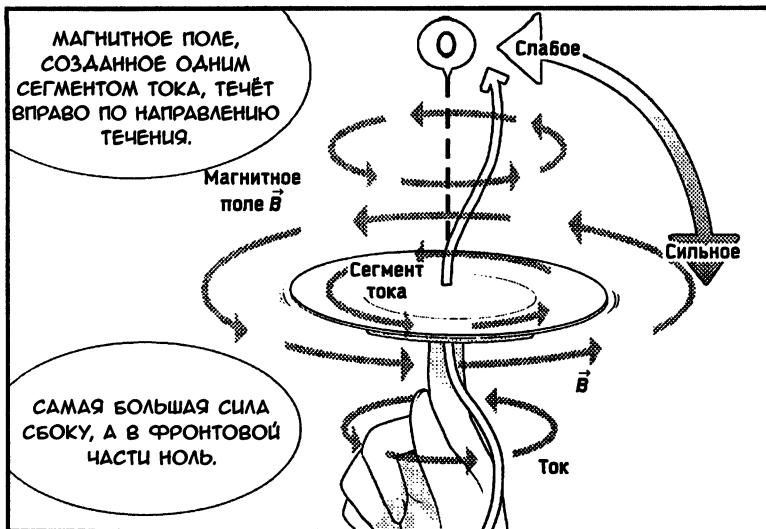
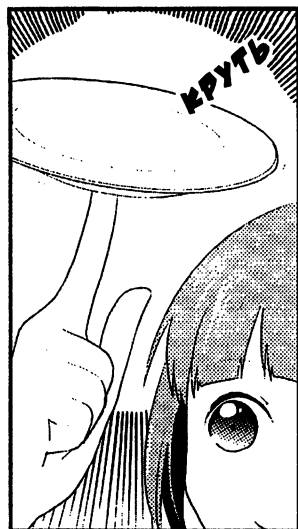
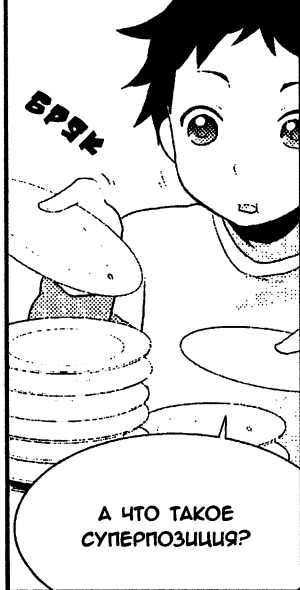
$Id\vec{s}$ – сегмент тока (Ам)

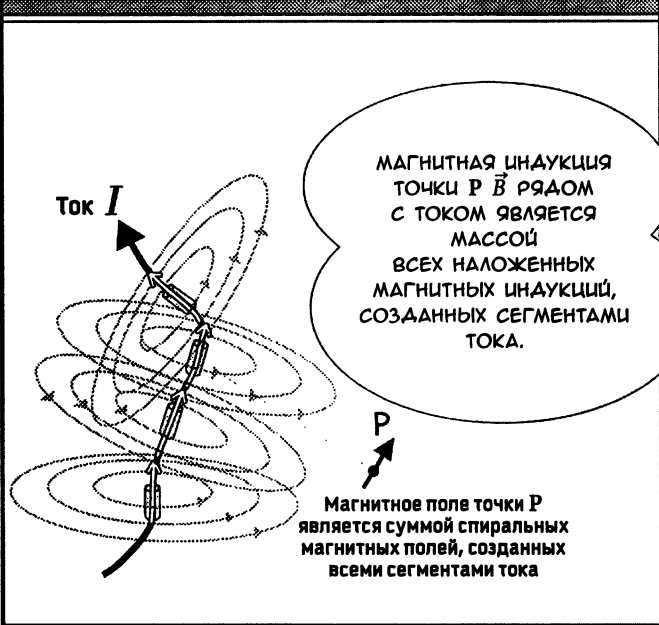
I – электрический ток (А)

$d\vec{s}$ – короткая длина (м)

d – ЭТО ТА ЖЕ
 d ДИФФЕРЕНЦИАЛА
И ОЗНАЧАЕТ "КРАЙНЕ
МАЛЕНЬКИЙ".

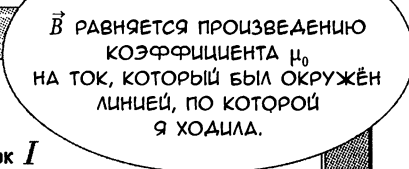
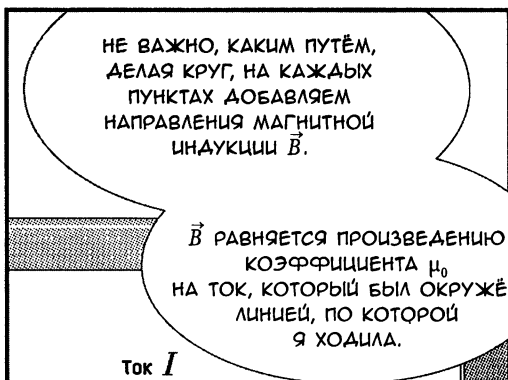
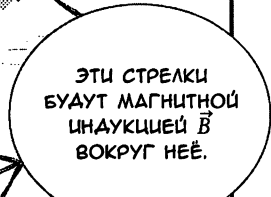
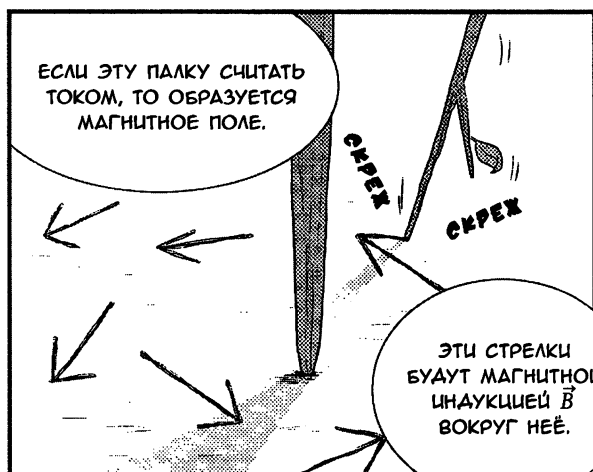
* $Id\vec{s}$ равен qv , означающему физическую величину движущейся заряженной частицы. Является минимальной единицей электрического тока, подробнее в тексте.



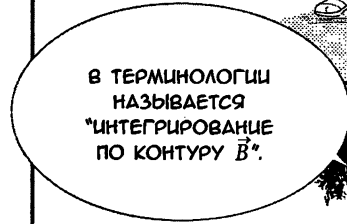


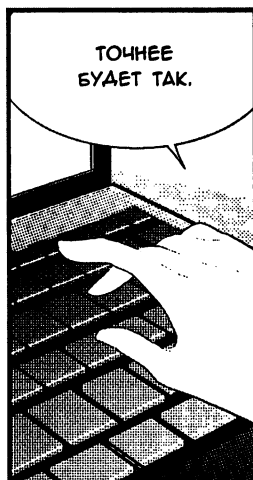
5.2. ТЕОРЕМА АМПЕРА





Условная схема закона Ампера. На схеме окружёнными интегрированными по контуру токами являются только I_1 и I_2 . Магнитное поле, созданное I_3 , влияния не имеет.





Теорема Ампера

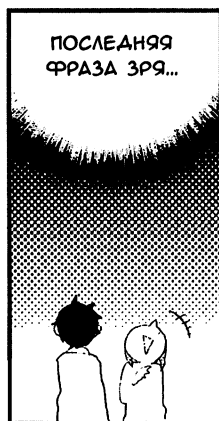
В замкнутом контуре любой конфигурации магнитное поле определяется током в контуре, умноженном на магнитную проницаемость μ_0 . При этом ток в течение времени не меняется.

* Почему в тереме Ампера есть условие «ток в течение времени не меняется», разъяснено в разделе 6.4 «Электрический поток и расширение теоремы Ампера».

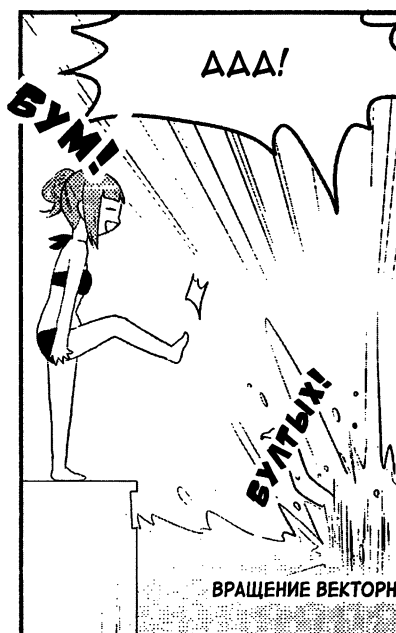
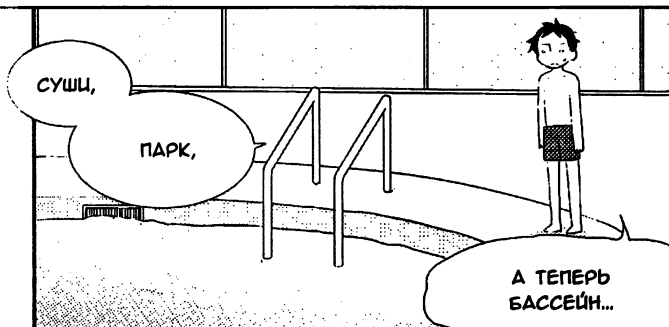
НУ, ТАК СРАЗУ,
ВЗГЛЯНУВ НА ЭТО,
НИЧЕГО НЕ ПОЙМЁШЬ.

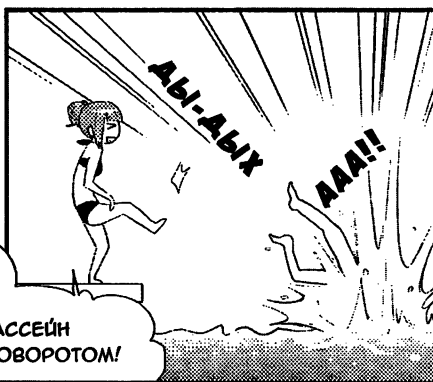
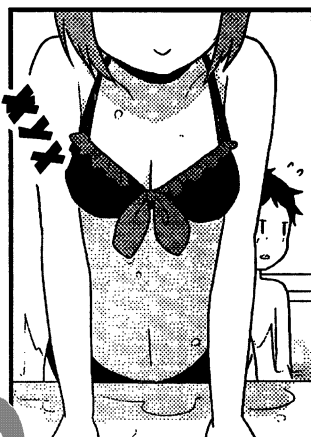
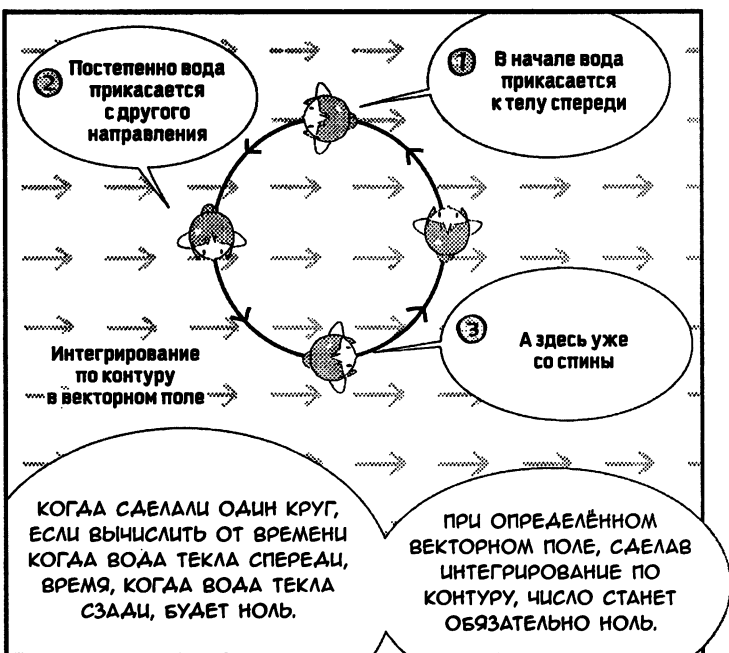
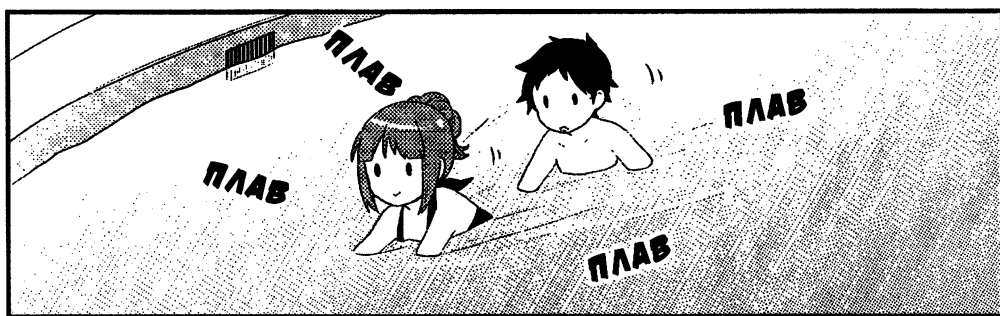


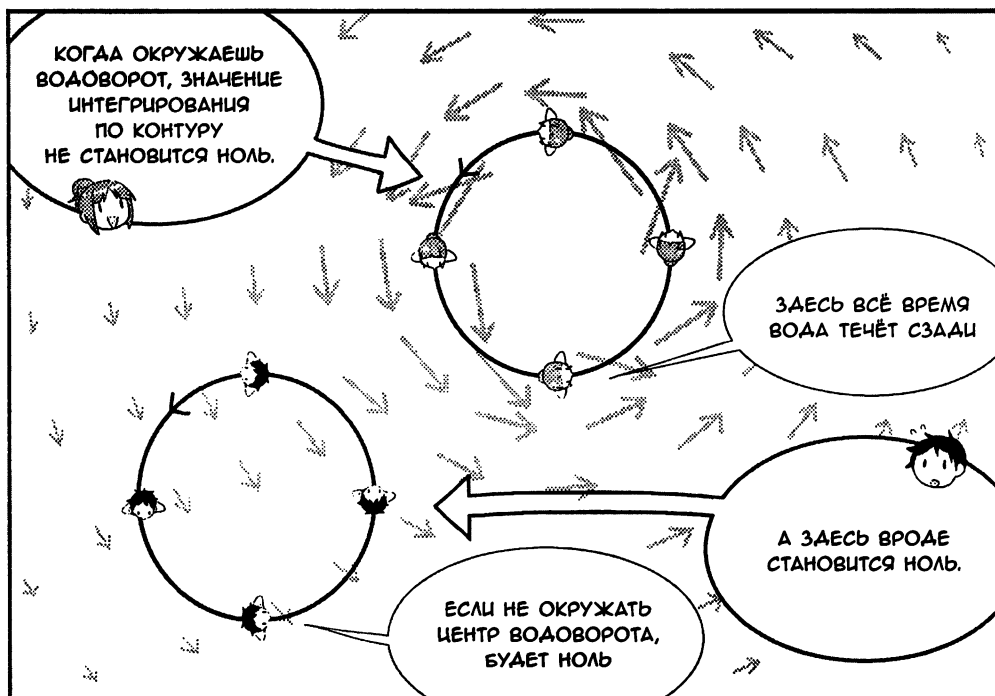
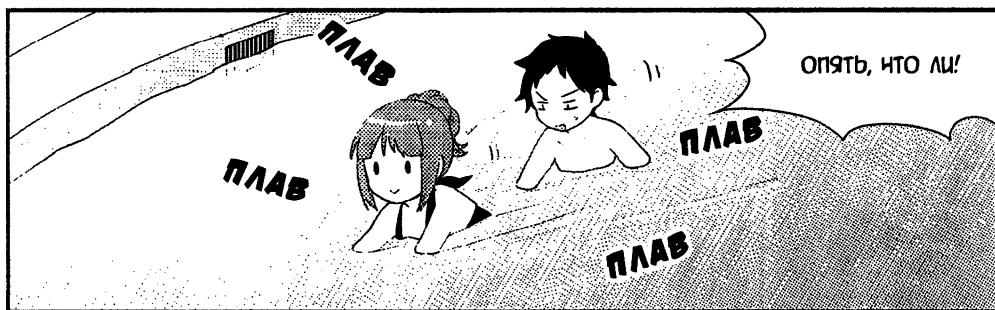
* Доказательства в тексте.



5.3. ВРАЩЕНИЕ ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ФОРМА ТЕОРЕМЫ АМПЕРА







* Точнее, поделённое окруженной площадью.



Ой, я забыл,
что такое
плотность тока.

СО СПИРАЛЬЮ ВЕКТОРНОГО
ПОЛЯ РАЗОБРАЛИСЬ, ТЕПЕРЬ
ПОСМОТРИМ НА ОТНОШЕНИЕ
С ТЕОРЕМОЙ АМПЕРА.

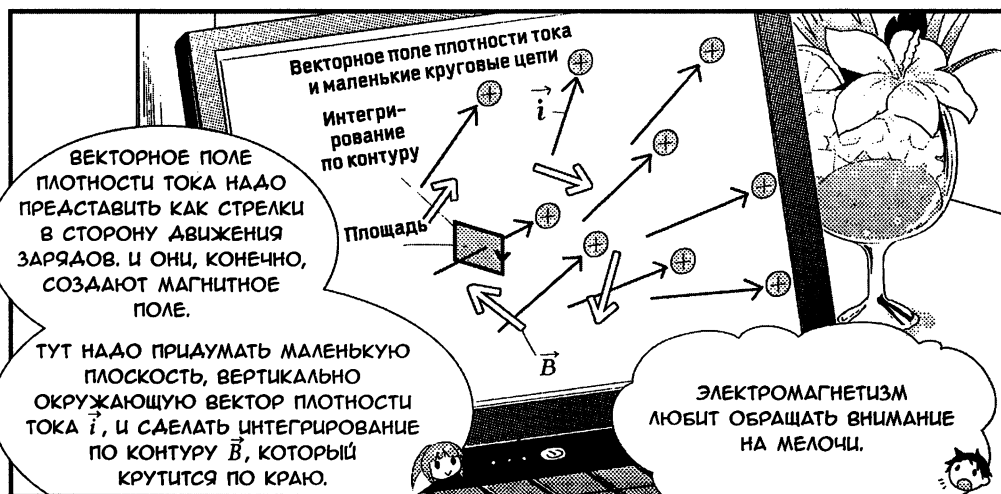
СНАЧАЛА
ПРО ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ
ПЛОТНОСТИ ТОКА...

МЫ ЖЕ ЭТО ПРОХОДИЛИ
(СМ. РАЗДЕЛ 4.1).

ПЛОТНОСТЬ ТОКА (A/m^2) -
ЭТО ТОК ПОДЕЛИТЬ
НА ПЛОЩАДЬ ПЛОСКОСТИ!

АХ, ДА, ВСПОМНИЛ!

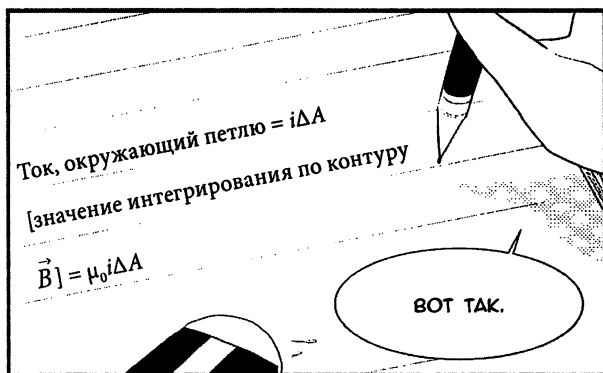
КАК ЖЕ
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ
ЛЮБИТ ВСЯКУЮ
ПЛОТНОСТЬ.



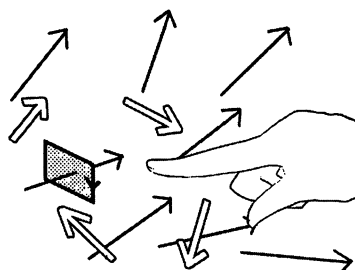
ВЕКТОРНОЕ ПОЛЕ
ПЛОТНОСТИ ТОКА НАДО
ПРЕДСТАВИТЬ КАК СТЕЛКИ
В СТОРОНУ ДВИЖЕНИЯ
ЗАРЯДОВ. И ОНИ, КОНЕЧНО,
СОЗДАЮТ МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ.

ТУТ НАДО ПРИДУМАТЬ МАЛЕНЬКУЮ
ПЛОСКОСТЬ, ВЕРТИКАЛЬНО
ОКРУЖАЮЩУЮ ВЕКТОР ПЛОТНОСТИ
ТОКА \vec{j} , И СДЕЛАТЬ ИНТЕГРИРОВАНИЕ
ПО КОНТУРУ \vec{B} , КОТОРЫЙ
КРУТИТСЯ ПО КРАЮ.

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ
ЛЮБИТ ОБРАЩАТЬ ВНИМАНИЕ
НА МЕЛОЧКИ.



И ПРЕДСТАВЬ,
ЧТО ЭТА ПЛОЩАДЬ ΔA
ПОСТЕПЕННО
УМЕНЬШАЕТСЯ.



КАК В ТЕОРЕМЕ
ГАУССА.

АА.
ТОГДА НАДО БЫЛО УЗНАТЬ
ВОЗНИКАЮЩИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК,

НО НА ЭТОТ РАЗ,
УЗНАЁМ СПИРАЛЬ
МАГНИТНОГО ПОТОКА.

$$\frac{[\text{значение интегрирования по контуру } \vec{B}]}{dA} = \mu_0 i$$

ЕСЛИ ПЛОЩАДЬ
УМЕНЬШАТЬ
ДО БЕСКОНЕЧНОСТИ,
ЗНАЧЕНИЕ ИНТЕГРИ-
РОВАНИЯ ПО КОНТУРУ
ТОЖЕ СТАНОВИТСЯ
МЕНЬШЕ, ВЕРНО?

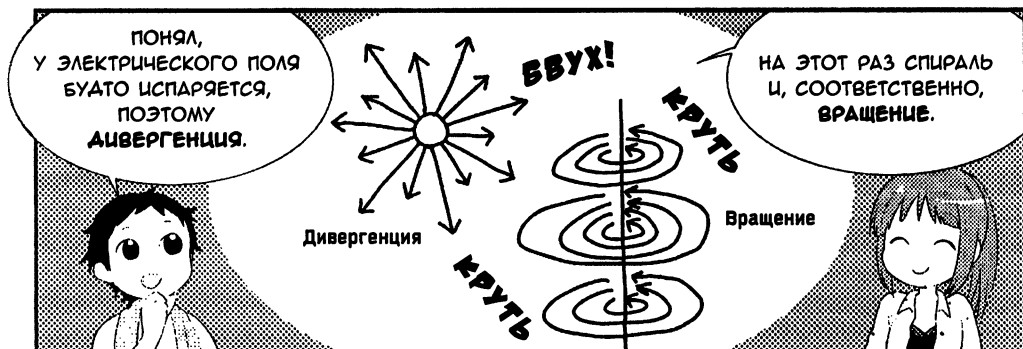
ОБРАТИ ВНИМАНИЕ
И НА ПРАВУЮ СТОРОНУ.

$$\frac{[\text{значение интегрирования по контуру } \vec{B}]}{\Delta A} = \mu_0 i$$

$$\frac{[\text{значение интегрирования по контуру } \vec{B}]}{dA} = \mu_0 i$$

СПРАВА ПЛОТНОСТЬ ТОКА
УМНОЖАЕТСЯ НА μ_0 ...

...КАКОЙ БЫ НИ БЫЛА
МАЛЕНЬКАЯ ПЛОЩАДЬ
ПЕТА, ЗНАЧЕНИЕ БУДЕТ
НЕИЗМЕННЫМ.





ВРАЩЕНИЕ \vec{B}
СИМВОЛАМИ
ПИШЕТСЯ ТАК.

ЧИТАЕТСЯ КАК
РОТОР \vec{B} .

$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$$

* rotation \vec{B} – нормаль плоскости, вектор-
ная величина, перпендикулярная току.



ЭТО ТОЖЕ
ТЕОРЕМА АМПЕРА?

Закон Био-Савара»

Вектор магнитной индукции \vec{B} является вектор-
ной суммой всех наложенных магнитных индук-
ций $d\vec{B}$, созданных сегментами тока.

Теорема Ампера (интегральная)

При интегрировании по контуру вектора магнит-
ной индукции \vec{B} он равняется произведению окру-
жённого тока на μ_0 .

Теорема Ампера (дифференциальная)

Вращение вектора магнитной индукции \vec{B} равня-
ется произведению плотности тока на μ_0 в конк-
ретной точке.

АА. ПЕРВОЕ – ЭТО
ИНТЕГРАЛЬНЫЙ, А ДРУГОЙ –
ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ.
ЭТИ 3 МАТЕМАТИЧЕСКИ ЗНАЧАТ
АБСОЛЮТНО ОДНО И ТО ЖЕ.

5.4. МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ И «НАМАГНИЧЕННОСТЬ» ВЕЩЕСТВ



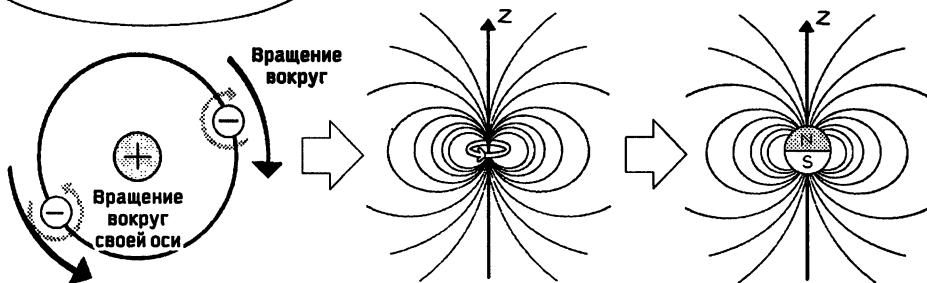
ПОСЛЕ ПЛАВАНИЯ
ТАК СЛАДКОГО
ХОЧЕТСЯ.

АА И В ОБНОВЛЁННОЙ
ОБСТАНОВКЕ УЧИТЬСЯ
ПРИЯТНЕЕ!

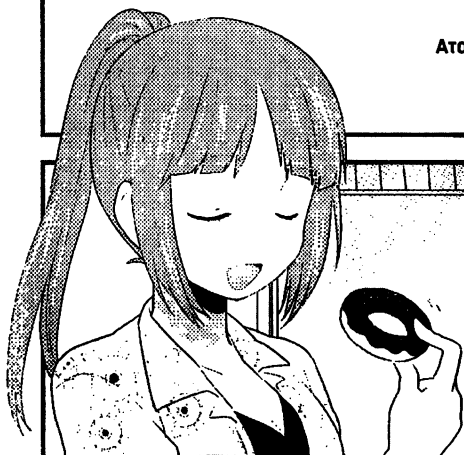
СИЛЬНО
ИЗМЕНИЛАСЬ
ОБСТАНОВКА.



ТЕПЕРЬ ПРО МАГНИТ.



Модель токовой петли атома
Атом можно считать одним микроскопическим магнитом



ИСТОЧНИКОМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
МАГНИТА ЯВЛЯЕТСЯ ТОК ВНУТРИ
АТОМА (СМ. РАЗДЕЛ 4.4).

ПРЕДСТАВЬ МАЛЕНЬКУЮ
ТОКОВУЮ ПЕТЛЮ.
В ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМЕ
ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ МАГНИТНЫЙ
МОМЕНТ.

А ЧТО ЖЕ БУДЕТ,
ЕСЛИ НА МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ
ИЗНЕ ВОЗДЕЙСТВУЕТ
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ?

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, СОЗДААННОЕ
ТАКОВОЙ ПЕТЛЕЙ, И МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ, СОЗДААННОЕ МАЛЕНЬКИМ
МАГНИТОМ, - ОДИНАКОВЫЕ.

СЧИТАЙ МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ
МАЛЕНЬКИМ МАГНИТОМ...

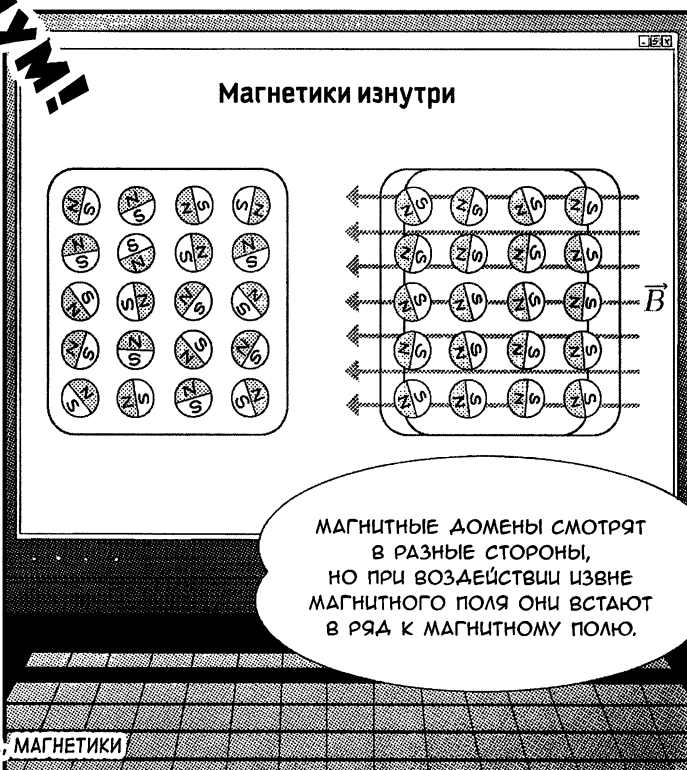


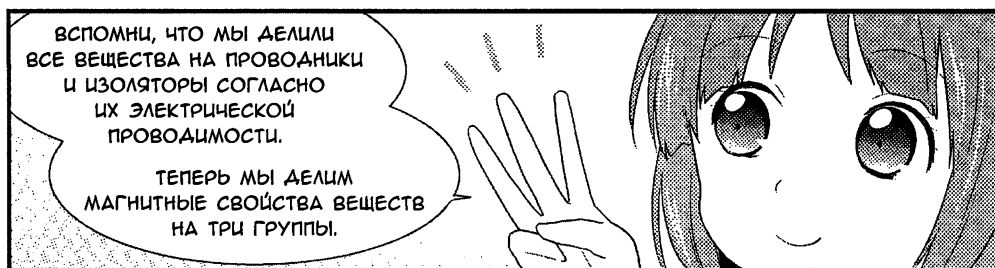
АА.

НО ПОЧТИ ВСЕ АТОМЫ
ОБРАТНЫМ ВРАЩЕНИЕМ ТОКА
ТЕРЯЮТ СИЛУ, И ЭФФЕКТ
КРАЙНЕ СЛАБЫЙ.

ЗНАЧИТ,
ИЗ-ЗА ЭТОГО
МАЛО ВЕЩЕСТВ,
ПРИСАСЫВАЮЩИХСЯ
К МАГНИТУ?

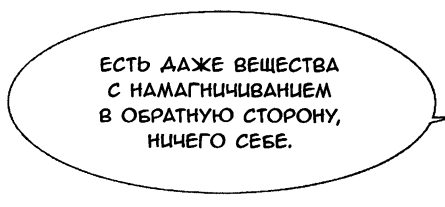
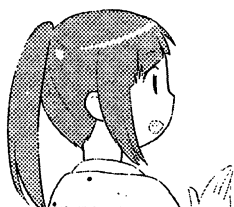
БУДЕТ ВРАЩАТЬСЯ
КАК КОМПАС?





Классификация веществ по магнитным свойствам

Парамагнетики	Намагничивание происходит пропорционально внешнему магнитному полю. Намагничивание слабое, обычно не наблюдается таких очевидных магнитных свойств, как присасывание к магниту
Ферромагнетики	Особенно сильное намагничивание. У некоторых наблюдаются особые свойства, как «Гистерезис» (см. стр. 149)
Диамагнетики	Намагничивание происходит в обратную сторону внешнему магнитному полю. Как и парамагнетики, не показывает явных магнитных свойств, но наблюдается сопротивление мощным магнитным полям



ДАЛЕЕ, ИЗУЧИМ ТОК,
ВЛОЖЕННЫЙ В МАГНЕТИК.

ПРЕЖДЕ МЫ ИЗУЧАЛИ ЗАРЯДЫ,
ЗАЛОЖЕННЫЕ В ДИЭЛЕКТРИКИ
(СМ. РАЗДЕЛ 3.6)

АГА, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ,
ВОЗНИКАЮЩЕЕ ИЗ ЗАРЯДОВ,
СЛАБЕЕ, ЧЕМ В ВАКУУМЕ.

ЗНАЧИТ, С МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ
В ОКРУЖЕНИИ МАГНЕТИКОВ
ПРОИСХОДИТ ТО ЖЕ САМОЕ?

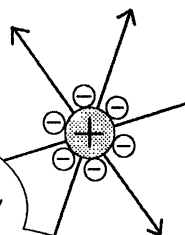
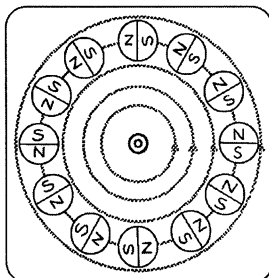
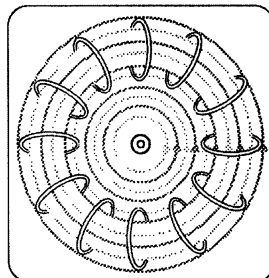


Схема тока, текущего внутри парамагнетика сверху



Модель магнитного полюса



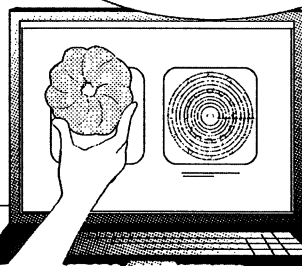
Модель тока

В СОЗДАННОМ ТОКОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ МАГНЕТИКИ
В НАМАГНИЧЕННОМ СОСТОЯНИИ
СТОЯТ В РЯД, КАК МАГНИТЫ.

МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ
ИЗНАЧАЛЬНО БЫЛ ТОКОМ.

Магнитное поле,
созданное магнетиком
Магнитное поле,
созданное током

ТО ЖЕ, ЧТО
НА ПОВЕРХНОСТИ ПОНЧИКА
СТОИТ В РЯДУ ТОКОВАЯ
ПЕТЛЯ.




ТОКОВАЯ ПЕТЛЯ,
КАК И ЭЛЕКТРОМАГНИТ,
СОЗДАЁТ ЛИНИЮ
МАГНИТНОГО ПОТОКА,
НЫРЯЮЩЕГО
ВО ВНУТРЕНнюю
СТОРОНУ.

ЗНАЧИТ, ЛИНИИ
МАГНИТНОГО
ПОТОКА СТАНОВИТСЯ
БОЛЬШЕ?

М-М-М

АА.


$$\vec{B} = \vec{B}(\text{ток}) + \vec{B}(\text{Намагниченность})$$

К ЛИНИЯМ МАГНИТНОГО ПОТОКА,
СОЗДАННЫМ ТОКОМ,
ДОБАВЛЯЮТСЯ ЛИНИИ,
СОЗДАННЫЕ НАМАГНИЧЕННОСТЬЮ.

НО ПРИ ЭТОМ

ВОЗНИКАЕТ ПРОБЛЕМА.

ТЕОРЕМА АМПЕРА
 $\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$
УЖЕ НЕ СОСТОИТСЯ.

ЗАЙМЁМСЯ
ЭТОЙ ПРОБЛЕМОЙ.

Сила (напряжённость) магнитного поля

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}(\text{ток})}{\mu_0}$$

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума

СНАЧАЛА ДАДИМ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАКОГО
ВЕКТОРА,
КАК НАПРЯЖЁННОСТЬ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ,
СОЗДАННОЕ ТОКОМ,
ДЕЛИМ НА μ_0

“СИЛА МАГНИТНОГО
ПОЛЯ”? СТРАННО
ЗВУЧИТ.

ХММ?

Напряжённость
магнитного поля $\vec{H} = \frac{\vec{B} \text{ (ток)}}{\mu_0}$

μ_0 – магнитная проницаемость
вакуума

МНЕ ТОЖЕ
ЭТО НАЗВАНИЕ
НЕ ПО ДУШЕ...

НО ИСТОРИЧЕСКИ
ТАК СЛОЖИЛОСЬ.

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ
ВАКУУМА
ОБОЗНАЧАЕТСЯ ТАК:

В вакууме $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

В МАГНЕТИКАХ
ДОБАВЛЯЕТСЯ МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ \vec{B} (НАМАГНИЧЕН-
НОСТЬ), СОЗДАННОЕ
НАМАГНИЧИВАНИЕМ,
И ПОЛУЧАЕТСЯ
ВОТ ТАК.

В магнетиках $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B} \text{ (ток)}$

$\Delta \vec{B}$

(НАМАГНИЧЕННОСТЬ)
ВОТ ТАК ПОЛОЖИМ
В "КОШЕЛЕК".

ТОГДА
МАГНЕТИКОМ МОЖНО СЧИТАТЬ
"ВЕЩЕСТВО, КОТОРОЕ,
В ОТЛИЧИЕ ОТ ВАКУУМА,
ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ

\vec{B} (намагниченность) =
= $\mu_0 \chi_m \vec{H}$, если
 $\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}$
 $\mu_0 (1 + \chi_m) = \mu$ – магнитная
проницаемость вещества
 $\vec{B} = \mu \vec{H}$

МАГНИТНОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ
 μ^* .

* Подробнее см. на стр. 165.

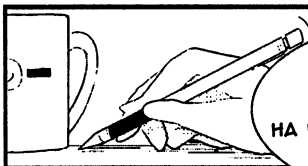


Электрическое поле, возникающее от заряда, окружённого диэлектриками $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, где ϵ – диэлектрическая проницаемость
Магнитное поле, созданное током, проходящим внутри магнетиков, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, где μ – магнитная проницаемость вещества

ЭТО ПОХОЖЕ НА
ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ИНДУКЦИЮ \vec{D}

ТЫ НА РЕАКОСТЬ
ХОРОШО СООБРАЖАЕШЬ.

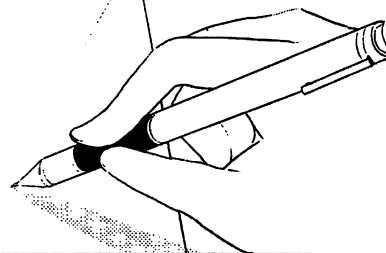
У ДИЭЛЕКТРИКОВ
И МАГНЕТИКОВ
ЕСТЬ СИММЕТРИЧЕСКОЕ
ОТНОШЕНИЕ.



В СВЯЗИ
С НАПРЯЖЁННОСТЬЮ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ \vec{H}
НА НАМАГНИЧЕННОСТЬ НЕ НАДО
ОБРАЩАТЬ ВНИМАНИЯ.

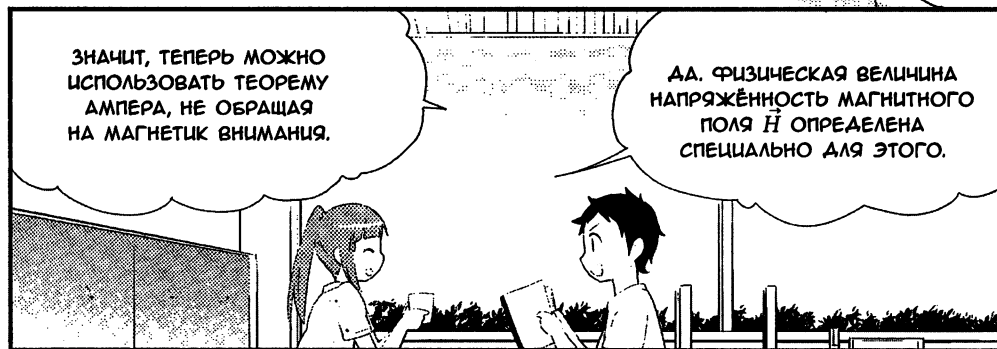
СООТВЕТСТВЕННО,
ТЕОРЕМУ АМПЕРА
КАК ВНУТРИ МАГНЕТИКА
ТАК И ВНЕ МОЖНО
НАПИСАТЬ ТАК.

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$
$$\downarrow$$
$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j}$$



ЗНАЧИТ, ТЕПЕРЬ МОЖНО
ИСПОЛЬЗОВАТЬ ТЕОРЕМУ
АМПЕРА, НЕ ОБРАЩАЯ
НА МАГНЕТИК ВНИМАНИЯ.

АА. ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА
НАПРЯЖЁННОСТЬ МАГНИТНОГО
ПОЛЯ \vec{H} ОПРЕДЕЛЕНА
СПЕЦИАЛЬНО ДЛЯ ЭТОГО.



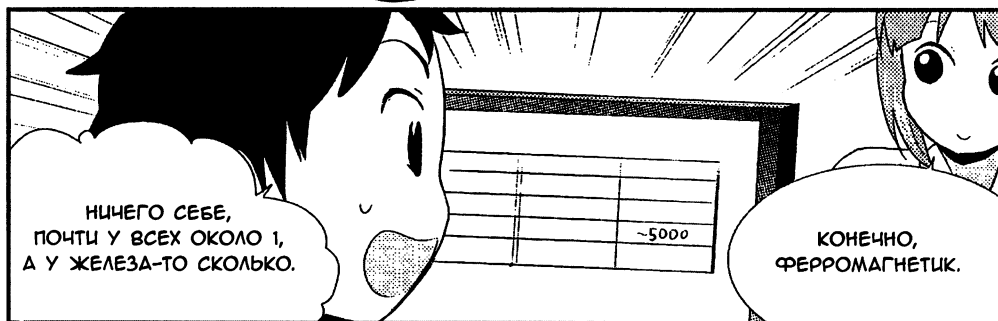


Относительная магнитная проницаемость основных диэлектриков¹

Вещество	Относительная магнитная проницаемость	Вещество	Относительная магнитная проницаемость
Алюминий	1,00002	Кислород	1,00002
Воздух	1,0000003	Никель	250 ²
Висмут	0,99983	Чистое железо	~5000 ²
Вода	0,999991	Пермаллой	~100 000 ²

¹ Источник: Эндо и др. Электромагнетизм для старшей школы и университета.

² Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков приведена для справки.



5.5. ФЕРРОМАГНЕТИК И ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ

ЖЕЛЕЗО СТАНОВИТСЯ ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ, ПОТОМУ ЧТО ОН ФЕРРОМАГНЕТИК?

ХОРОШИЙ ВОПРОС.

ТЫ ЗНАЕШЬ, КАК СДЕЛАТЬ ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ?

ТЕРЕТЬ ЖЕЛЕЗОМ?

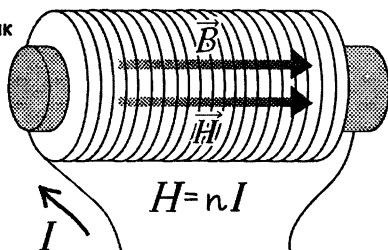
ШИРК ШИРК ШИРК

МОЖНО, НО ЛЕГЧЕ ЗАСУНУТЬ В ЭЛЕКТРОМАГНИТ ФЕРРОМАГНЕТИК И ПОДАТЬ ТОК.

Положить ферромагнетик в соленоид и подвергнуть магнитному полю

Скатывание на 1м:п (1/м)

Ферромагнетик



$$H = nI$$

НАПРЯЖЁННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ \vec{H} , СОЗДАННАЯ ТОКОМ, УВЕЛИЧИВАЕТСЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО ТОКУ,

НО МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ \vec{B} ВДОИЗМЕНЯЕТСЯ ЧУТЬ ОСОБО.

ВОТ ТАКАЯ СХЕМА.

Стрелка показывает направление магнитных доменов магнетика

ВСПОМНИ.

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ МАГНЕТИКОВ БЫЛА СУММОЙ \vec{B} (ТОК) И \vec{B} (НАМАГНИЧЕННОСТЬ). \vec{B} (ТОК) ПРОПОРЦИОНАЛЕН \vec{H} , НО \vec{B} (НАМАГНИЧЕННОСТЬ) НЕТ.

ЗНАЧИТ, \vec{B} НЕ ТАК УЖ ПРОСТО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.

МАГНЕТИК СНАЧАЛА ОТКАЗЫВАЕТСЯ НАМАГНИЧИВАТЬСЯ,

АНУ-КА! АНУ-КА! АНУ-КА!

ГР!

ПРОБУЖДАЕТСЯ...

БА - БАМ!!

НАМАГНИЧИВАНИЕ!

НО ЧЕРЕЗ НЕКОТОРОЕ ВРЕМЯ ПРОБУЖДАЕТСЯ И БЫСТРО НАЧИНАЕТ НАМАГНИЧИВАТЬСЯ.

НЕЕТ!

НА ПУНКТЕ С ВСЕ МАГНИТНЫЕ АТОМЫ ФЕРРОМАГНЕТИКА ПОВЕРНУЛИСЬ В СТОРОНУ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

ПРИ ТАКОЙ ОБСТАНОВКЕ УЖЕ НЕКУДА НАМАГНИЧИВАТЬСЯ.

НАСЫЩЕНИЕ

ДА.

НАСКОЛЬКО БЫ НИ ВОЗРОСЛО
ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ \vec{H} ,
 \vec{B} (НАМАГНИЧЕННОСТЬ)
ВНУТРИ МАГНИТИКА
УЖЕ НЕ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.

ЭТО НАЗЫВАЕТСЯ
НАСЫЩЕНИЕ.

ДАЛЕЕ,
СОКРАЩАЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ \vec{H} ,
МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ \vec{B}
ВНУТРИ МАГНИТИКА С ПУНКТА С
ПЕРЕХОДИТ В ПУНКТ D.

Напряжённость магнитного поля
 \vec{H} с 0 постепенно усиливаем
(A \rightarrow B \rightarrow C), далее уменьшаем
(C \rightarrow D \rightarrow E).

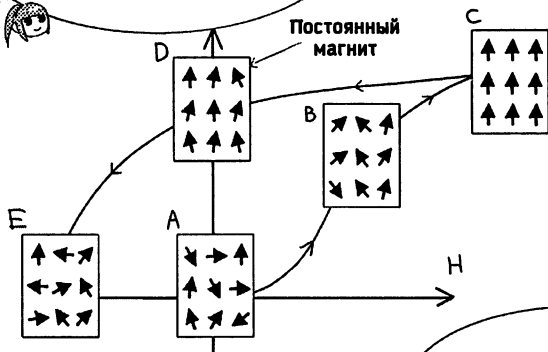


Схема ферромагнитного гистерезиса

ЗНАЧИТ, НЕ ПРОСТО ТАК
ОБРАТНО ПРОЦЕСС ИДЁТ.

ОУР У D МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ \vec{H} СТАЛО 0,

НО МАГНИТНАЯ
ИНДУКЦИЯ \vec{B}
ОСТАЁТСЯ?

ВОТ ИМЕННО!

НЕ ПОДАВАЯ ТОКА,
ОН СТАЛ ИСПУСКАТЬ
МАГНИТНЫЙ ПОТОК.
ТО ЕСТЬ ОН СТАЛ
ПОСТОЯННЫМ
МАГНИТОМ.

БУМ!

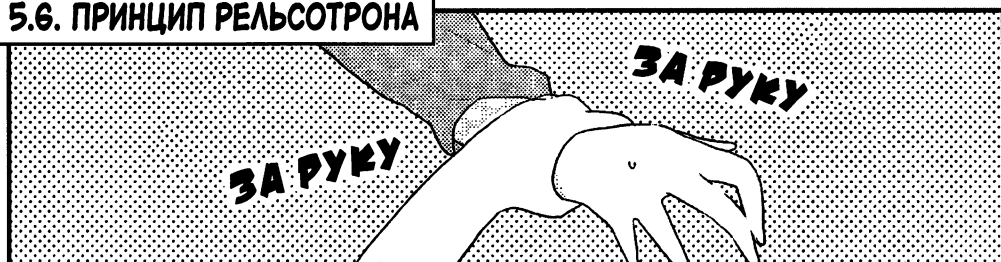
ВОТ ТАК ДЕЛАЕТСЯ
ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ.

ПОДОБНУЮ
МЕТАМОРФОЗУ
НАМАГНИЧИВАНИЯ
НАЗЫВАЮТ ГИСТЕРЕЗИС.
ТО ЕСТЬ ПОСЛЕ ОДНОЙ
МЕТАМОРФОЗЫ НИКАК
В ОБРАТНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ
НЕ ВОЗВРАЩАЕТСЯ.

ЗА ЧТО...



5.6. ПРИНЦИП РЕЛЬСОТРОНА



НЕУЖЕЛИ

МЫ ИДЕМ...

ПОСЛЕ СЕГОДНЯШНЕЙ
ЛЕКЦИИ У ТЕБЯ ДОЛЖНО
БЫТЬ ДОСТАТОЧНО ЗНАНИЙ,
ЧТОБЫ ПОНЯТЬ ЭТОТ
ЭКСПЕРИМЕНТ.

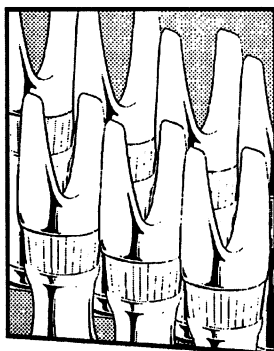
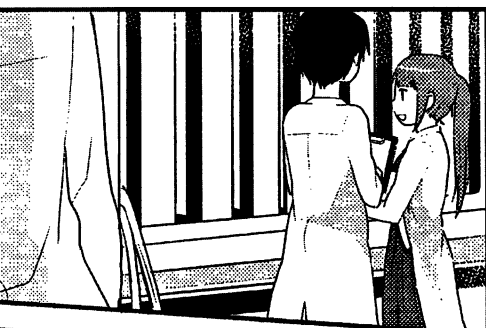
ВОТ НАША
ЛАБОРАТОРИЯ.

ВОТ ЭТО ДА.

ШОК

И ВОТ

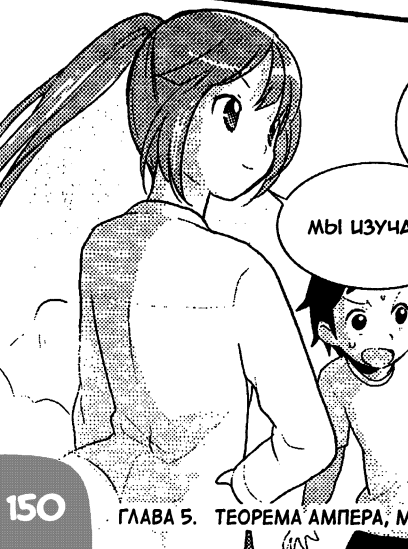
ЧТО У НАС
ЗА ИССЛЕДОВАНИЕ.



ПУСК!

БААМ!!

ААА?!



МЫ ИЗУЧАЕМ

РЕЛЬСОТРОН



РЕЛЬСОТРОН...

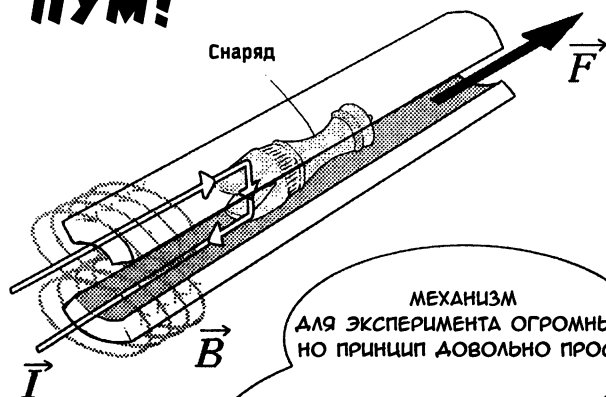
РЕЛЬСОТРОН.

ИЛИ RAILGUN.

ПНП

ПРИБОР,
КОТОРЫЙ БЛАГОДАРЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИЛЕ
УСКОРЯЕТ СНАРЯД
ДО СВЕРХВЫСОКОЙ СКОРОСТИ.

ПУМ!



МЕХАНИЗМ
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ОГРОМНЫЙ,
НО ПРИНЦИП ДОВОЛЬНО ПРОСТ.

РЕЛЬСОТРОН
СОСТОИТ ИЗ ИСТОЧНИКА
С ВЫСОКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИЕЙ, ДВУХ РЕЛЬСОВ
И КОНДУКТИВНОГО СНАРЯДА.

ТАК ВОТ ПОЧЕМУ
НАЗЫВАЕТСЯ
РЕЛЬСОТРОН...

ЕСЛИ ПОДАТЬ ТОК, ИДУЩИЙ
ПО РЕЛЬСАМ, ТУДА И ОБРАТНО,
ПО ПРАВИЛУ БУРАВИЧКА
СОЗДАЁТСЯ МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ.

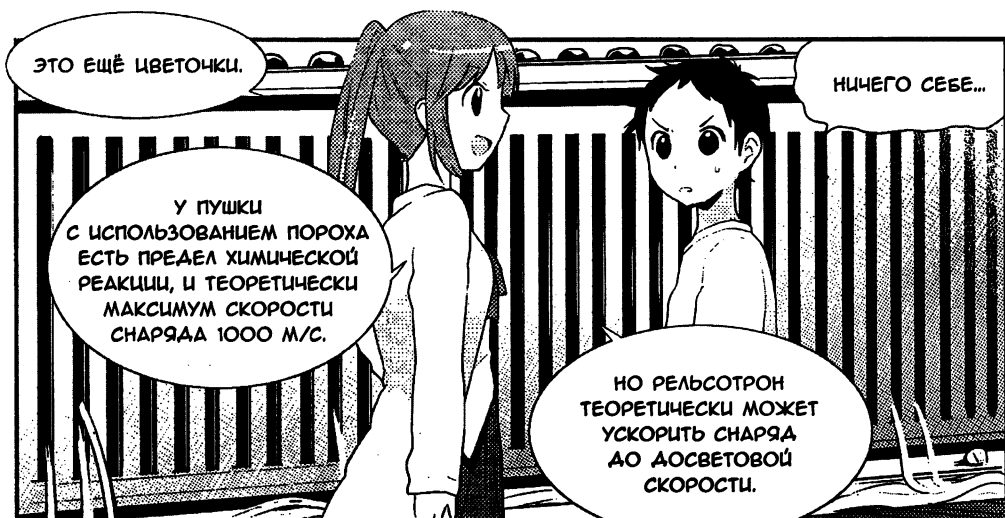
ПРИ ЭТОМ СНАРЯД,
ПО СРАВНЕНИЮ
С РЕЛЬСАМИ, МАЛ,
И ЕГО МОЖНО СЧИТАТЬ
СЕГМЕНТОМ ТОКА.

ВСПОМНИ СИЛУ ЛОРЕНЦА
(СМ. РАЗДЕЛ 4.3).

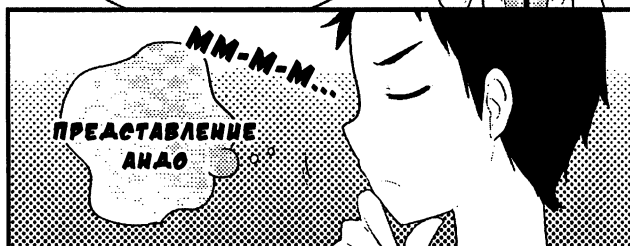
Заряженная частица заряда q
подвергается силе Лоренца \vec{F}
перпендикулярно направлению
движения

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$





Представление Шиэру





ВСЁ

НА ЭТОМ
СЕГОДНЯШНЯЯ ЛЕКЦИЯ
ОКОНЧЕНА.

НО ВЕДЬ НА САМОМ ДЕЛЕ
ЭТО НЕ ОРУЖИЕ, ПРАВАА?

ПРАВАА ИЛИ НЕТ,
ЭТО БУДЕТ
ДОМАШНИМ
ЗАДАНИЕМ.

Я СЕРЬЁЗНО
СПРАШИВАЮ!

Я ТОЖЕ СЕРЬЁЗНО.

ПОМЕРЕНЬКОСТЬ?

А...

НУ ХОРОШО!

ПРИНЦИП РЕАЛЬСОТРОНА

А ТЕПЕРЬ ПОДРОБНЕЕ

⊕ Единицы измерения электрического тока ⊖ (элементарный участок тока) и закон Био-Савара

Для демонстрации закона Кулона мы представляли себе самый простой пример – «точечный заряд», не имеющий размера. Таким же образом и закон Био-Савара даёт определение силы взаимодействия между участками токов, почти не имеющими величины. Мы говорим «почти», потому что элементарный участок тока определяется как «минимальная длина, взятая в направлении прохождения тока». Давайте подумаем, как мы сможем определить минимальную единицу тока.

Представим один точечный заряд как q . Когда заряд q движется в магнитном поле со скоростью \vec{v} , сила Лоренца пропорциональна $q\vec{v}$. Величину заряда q можно выразить как «силу, которую получает заряд от электрического поля», поэтому $q\vec{v}$ выражает «силу, которую заряд получает от магнитного поля», и определяется как «элементарный участок тока». Точечный заряд в состоянии покоя имеет физическую величину q , а когда он начинает двигаться, его величина становится $q\vec{v}$. Поскольку точечный заряд – это базовая форма заряда, то и такую форму тока тоже можно назвать базовой. Направление движения заряда – векторная величина, поэтому элементарный участок тока – тоже векторная величина. На данном этапе мы пока не представляем «длину» элементарного участка тока.

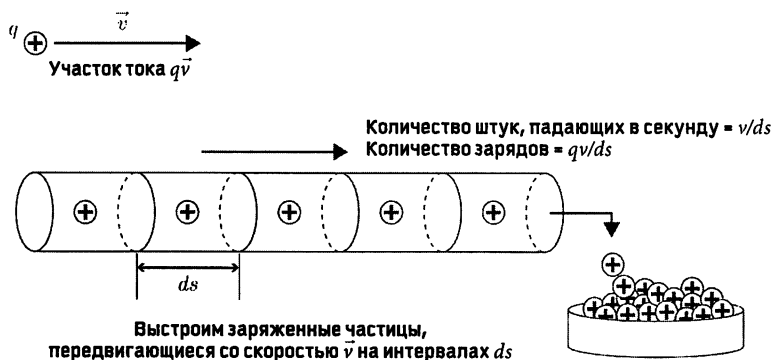


Рис. 5.1. Связь движущихся зарядов и элементарных участков тока

Далее текущий по проводнику ток разделим на элементарные участки и покажем, как выражается $I d\vec{s}$. Заряженные частицы q выстроены в проводнике с очень маленькими интервалами ds и движутся рядом со скоростью \vec{v} . Количество зарядов, проходящих через определённое сечение проводника в единицу времени, можно посчитать по простой формуле: $\frac{qv}{ds}$. Поскольку это и есть определение электрического тока,

$I = \frac{qv}{ds}$. Теперь представим себе векторную величину $I d\vec{s}$ в токе, поделённом на фрагменты длиной ds . $d\vec{s}$ – это векторная величина, показывающая направление тока (то есть такое же направление, как \vec{v}) на длине ds . Если сделать перестановку в уравнении $I = \frac{qv}{ds}$, получим:

$$I ds = qv.$$

То есть можно увидеть, что векторная величина $I d\vec{s}$ (электрический ток) \times (минимальную длину в направлении тока) равна $q\vec{v}$. Если ds достаточно мала, её пространство можно заменить точкой, и станет понятно, что $I d\vec{s}$ – это та же физическая величина, что и движущийся заряд. То есть так же, как на $q\vec{v}$ воздействует кулоновская сила магнитного поля, на $I d\vec{s}$ тоже воздействует сила магнитного поля.

Закон, открытый Био и Саваром, описывает магнитное поле, создаваемое элементарным участком тока $I d\vec{s}$ вокруг себя. Он выражается следующей формулой:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{s}}{r^2} \vec{e}_r,$$

где $d\vec{B}$ – магнитное поле, создаваемое элементарным участком тока вокруг себя (Тл);

$I d\vec{s}$ – элементарный участок тока (Ам);

r – расстояние от элементарного участка тока (м);

\vec{e}_r – единичный вектор направления r ;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума Гн/м.

Магнитное поле – это векторное поле, в котором участок тока вращается по направлению правого винта, оно ослабляется обратно пропорционально квадрату расстояния. Внешнее произведение $I d\vec{s}$ и \vec{e}_r сбоку участка тока будет максимальным, а спереди – равным нулю. Шиэру показала магнитное поле, которое создаёт участок тока, с помощью крутящейся тарелки, а более точно оно изображено на рис. 5.2.

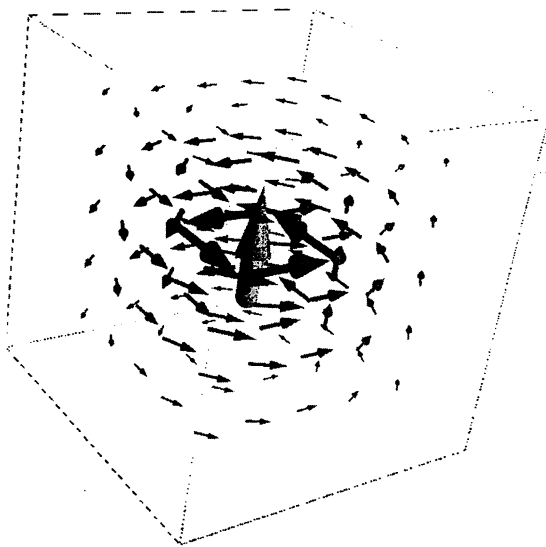


Рис. 5.2. Магнитное поле, создаваемое участком тока

Закон Био–Савара эквивалентен теореме Ампера, поэтому его действие ограничено только стационарным состоянием. Поэтому, когда мы думаем о законе Био–Савара, мы должны помнить, что речь идет об «элементарных участках внутри стационарного электрического тока». На рис. 5.3 показан 1 участок, выбранный из бесконечно длинного линейного тока. Как мы говорили раньше, можно считать его одним движущимся зарядом. Если поместить рядом с участком тока заряженную частицу, имеющую заряд q и движущуюся со скоростью \vec{v} , на заряженную частицу будет действовать сила Лоренца от этого участка:

$$d\vec{F} = q\vec{v} \times d\vec{B}.$$

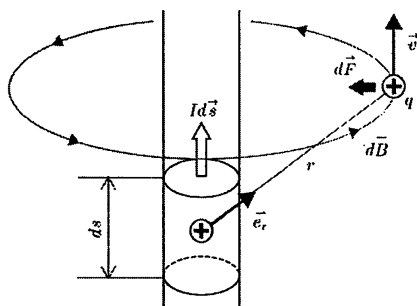


Рис. 5.3. Магнитное поле, создаваемое одним участком тока, и сила, действующая на движущуюся заряженную частицу

Поэтому можно сказать, что закон, открытый Био и Саваром, – это «фундаментальный закон о движущихся зарядах и о силах, возникающих между этими зарядами». Но в то время ещё не было известно, что электрический ток – это поток заряженных частиц, а магнитное поле создаётся движущимися зарядами, до открытий Лоренца было ещё далеко. Био и Савар выдвинули гипотезу о том, что силы взаимодействия между токами подчиняются закону обратных квадратов, и на основании этого предположения разделили ток на мелкие участки, применили к ним закон обратных квадратов и увидели, что эта теория подтверждается экспериментами.

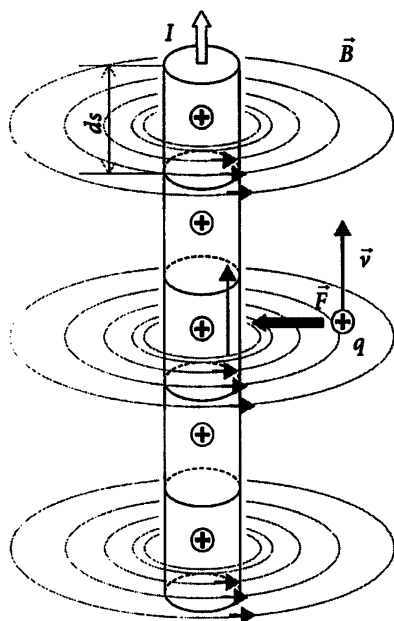


Рис. 5.4. Магнитное поле, создаваемое несколькими участками тока, и силы, действующие на движущиеся заряженные частицы

Рассмотрим магнитное поле, которое создаёт весь ток в месте нахождения q . Сумму \vec{B} всех магнитных полей, создаваемых всеми участками тока в точке q , можно получить, проинтегрировав по направлению тока закон Био–Савара и узнав ориентацию и величину этой суммы. Конкретный расчёт будет показан дальше, но говоря в общем, \vec{B} – это векторное поле, в котором ряд участков тока вращается по направлению правой резьбы. А силу, которая воздействует на расположенный там заряд q , движущийся со скоростью \vec{v} , можно рассчитать по формуле:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}.$$

Силы взаимодействия между линейными токами

С помощью теоремы Ампера и теории «симметрии» можно рассчитать магнитное поле вокруг бесконечно длинного линейного тока и силу, действующую между двумя токами, расположенными параллельно. Закон Био–Савара показывает, что магнитное поле вращается вокруг тока. С помощью теории «симметрии» можно понять следующее:

1. Вектор магнитного поля \vec{B} направлен по кругу с током в центре.
2. Величина \vec{B} на радиусе r постоянна.

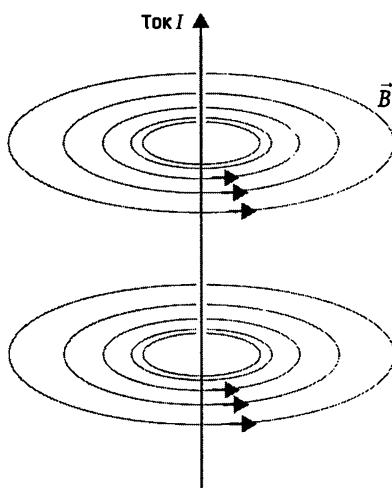


Рис. 5.5. Магнитное поле
вокруг бесконечно длинного линейного тока

Попробуем применить закон Ампера к окружности радиуса r с электрическим током в центре. Путь вращения и ориентация магнитного поля совпадают, поэтому криволинейный интеграл – это «величина магнитного поля» \times «длину окружности». Если представить величину магнитного поля как B , закон Ампера будет выглядеть так:

$$2\pi r B = \mu_0 I.$$

Вычислив здесь B , можно понять, что магнитное поле вокруг бесконечно длинного линейного тока составляет:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Далее рассчитаем, какая сила действует на единицу длины электрического тока I , расположенного перпендикулярно магнитному полю $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Здесь можно использовать формулу $\vec{F} = Id\vec{s} \times \vec{B}$, описывающую силу воздействия магнитного поля на участок тока. Магнитное поле в месте тока имеет постоянную величину, магнитное поле и ток пересекаются под прямым углом, поэтому значение силы на единицу ds будет $F = IdsB$. Проинтегрировав эту величину до 0–1 м на 1 м, мы поймем, что значение силы составляет $F = IB$.

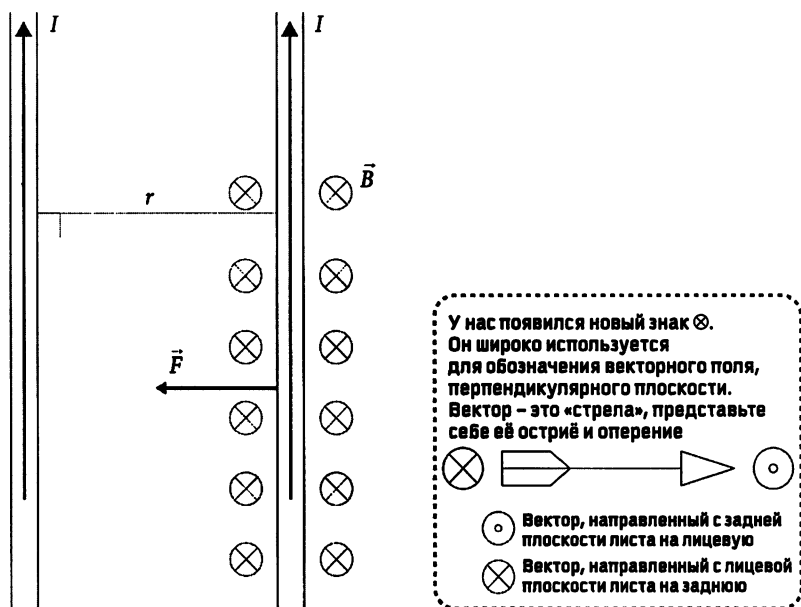


Рис. 5.6. Силы взаимодействия между двумя бесконечно длинными токами

Итак, сейчас мы можем дать ответ на вопрос, который был задан ещё в главе 2 и до сих пор оставался неразрешимым. Как же можно определить единицу измерения тока А?

Определение Ампера:

Ампер (А) есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины, расположенным на расстоянии 1 метр один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную 2×10^{-7} Ньютона.

Это значит, что мы можем получить ток в 1 А, для этого нужно взять 2 проводника бесконечной длины, расположить их на расстоянии 1 м друг от друга и отрегулировать ток, чтобы сила взаимодействия на 1 м равнялась 2×10^{-7} Ньютона. Но поскольку в реальной жизни мы не можем сделать проводник бесконечной длины, используются различные другие способы – например, «ампер-весы» с проводником в виде катушки. В этом случае величина заряда Кл определяется как «количество зарядов, возникающих при прохождении тока в 1 А за 1 с». Почему же определение электрического тока было дано раньше, чем определение электрического заряда? Одна из причин заключается в том, что «трудно создать точное постоянное количество зарядов в состоянии покоя». В то же время создать точную постоянную величину тока относительно легко, и можно точно измерить с помощью пружины или чего-то подобного силу, возникающую между токами; это позволяет связать единицу измерения Н, взятую из механики, с явлениями электромагнетизма. Таким образом, когда в науке об электромагнитных явлениях определилась одна единица измерения, от неё по цепочке произошли все остальные – Кл, В, Ф, Тл.

Когда ток был таким образом определён на основании механики, оказалось, что значение диэлектрической проницаемости вакуума μ_0 равно $4\pi \times 10^{-7}$. Из определения 1 А следует, что магнитное поле, находящееся на расстоянии 1 м от бесконечно длинного проводника, равно 2×10^{-7} Тл, поэтому, подставив соответствующее значение в формулу $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$, мы поймём, что значение константы μ_0 должно быть равно $4\pi \times 10^{-7}$. Размерность величины относительной диэлектрической проницаемости вакуума выражается как Тл·м/А, но обычно её записывают как Гн/м. Гн (Генри) – это единица измерения индуктивности (см. стр. 168). Если сравнить относительную диэлектрическую проницаемость и магнитную проницаемость, можно понять их взаимосвязь.

Таблица 5.1. Взаимосвязь магнитного и электрического полей

	Электрическое поле	Магнитное поле
Константа вакуума	Диэлектрическая проницаемость	Магнитная проницаемость
Единицы измерения вакуумных констант	Ф/м	Гн/м
Поток	Электрический поток Φ_e (Кл)	Магнитный поток Φ_m (Вб) = (Тл·м ²).
Плотность потока	Электрическая индукция D (Кл/м ²)	Магнитная индукция B (Вб/м ²) = (Тл)
Элемент цепи	Конденсатор	Катушка
Связанные физические величины	Ёмкость (Ф)	Индуктивность (Гн)
Значение	(Ф) = коэффициент пропорциональности накопленных зарядов (Кл) и электрического потенциала (В)	(Гн) = коэффициент пропорциональности магнитного потока на катушке (Вб) и силы тока (А)
Формула	$\Phi = Кл/В$	$Гн = Вб/А = Тл \cdot м^2/А$



В и H и магнитная проницаемость вещества

Расскажем подробнее о напряжённости магнитного поля \vec{H} , плотности магнитного потока \vec{B} и магнитной проницаемости μ . Почему есть две физические величины для выражения магнитного поля? Все вещества в нашем мире в большей или меньшей степени ведут себя как магнетики. Если поместить вещество в создаваемое электрическим током магнитное поле, векторное поле плотности магнитного потока изменится. Можно считать, что «магнитная проницаемость изменилась с μ_0 на μ только в том месте, где расположен магнетик», так будет проще рассматривать явления электромагнетизма, связанные с веществами, используя понятие напряжённости магнитного поля \vec{H} . Кстати, многие выдающиеся ученые, исследователи электромагнетизма, были категорически против использования термина \vec{H} . Они приводили такие доводы: « \vec{H} – это величина, вводимая для удобства, а не закон физики». Пожалуй, это излишнее упрямство с их стороны.

Итак, почему же мы можем признать, что в том месте, где находится магнетик, магнитная проницаемость пространства меняется с μ_0 на μ ? Прежде всего определим взаимоотношение \vec{H} и \vec{B} в вакууме.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}.$$

При этом размерность \vec{H} будет А/м. Можно провести анализ размерностей $\frac{\vec{B}}{\mu_0}$, но проще всего, опираясь на то, что «криволинейный интеграл от \vec{H} дает силу тока»¹, вывести $\text{А/м} \times \text{м} = \text{А}$.

Магнитное поле внутри тела представляет собой синтез магнитных полей: это создаваемое электрическим током магнитное поле и намагниченность самого тела. Для многих веществ характерно, что их величина намагниченности \vec{B} пропорциональна внешнему магнитному полю, то есть электрическому току \vec{B} , а их ориентация совпадает, так что примем χ_m за константу пропорциональности \vec{B} (ток) и \vec{B} (намагниченность). Эта константа не имеет размерности и называется «относительная намагниченность». В вакууме \vec{B} (ток) = $\mu_0 \vec{H}$, поэтому в результате подстановки получаем \vec{B} (намагниченность) = $\mu_0 \chi_m \vec{H}$. Напишем формулу магнитного поля

$$\vec{B} = \vec{B} \text{ (ток)} + \vec{B} \text{ (намагниченность)}$$

иначе, используя \vec{H} :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi_m \vec{H}.$$

Таким образом, отношение \vec{B} и \vec{H} внутри тела будет:

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H}.$$

¹ Поскольку криволинейный интеграл от \vec{B} дает $\mu_0 I$, поделив обе части на μ_0 , мы получим именно такой результат.

При этом константа пропорциональности \vec{B} и \vec{H} равна $\mu_0(1 + \chi_m)$, поэтому будем считать, что «магнитная проницаемость вещества» μ . Закон Ампера для плотности магнитного потока в веществе с магнитной проницаемостью μ можно выразить так:

$$\text{rot} \vec{B} = \mu \vec{i}.$$

Но будет проще использовать формулу, подходящую для любых случаев, не включающую магнитную проницаемость μ :

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{i}.$$

Таким образом, мы получаем формулу для выражения закона Ампера, справедливую независимо от того, есть ли магнетик. Эта формула выражает магнитное поле внутри тела и соответствует $\text{div} \vec{D} = \vec{\rho}$ для электрического поля.

Магнитное поле внутри соленоида и индуктивность

Вы когда-нибудь делали электромагнит, наматывая проводник? Свернутый в катушку проводник, по которому течёт ток, называется «соленоид». Давайте рассчитаем магнитное поле внутри соленоида, используя закон Ампера. Если соленоид достаточно длинный, а проводник намотан плотно, можно, исходя из соображений симметрии, предположить следующее.

- Плотность магнитного потока \vec{B} внутри соленоида представляет собой вектор, направленный вдоль оси. \vec{B} симметрично относительно оси, и величина при движении вдоль оси не меняется.
- Линии магнитного потока, выходящие из соленоида, стремятся отдалиться от него, поэтому они вращаются и соединяются в самом отдаленном от него месте.

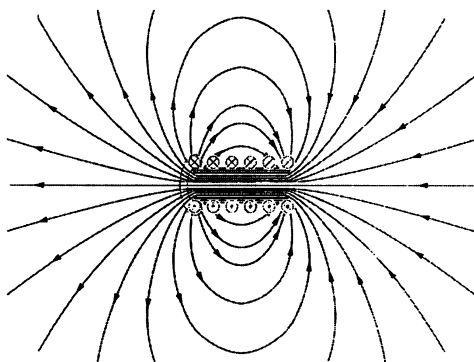


Рис. 5.7. Магнитное поле, образуемое соленоидом

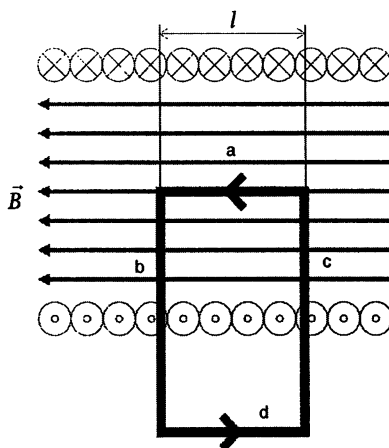


Рис. 5.8. Расчёт магнитного поля внутри соленоида

Эти явления показаны на рис. 5.7, попробуем применить к ним закон Ампера. Контур интегрирования, как показано на рис. 5.8, представляется собой прямоугольник. При таком пути интегрирования численное значение всех сторон, кроме a , будет равно нулю. На сторонах b и c магнитное поле пересекается с путем интегрирования под прямым углом, поэтому это число не прибавляется, плотность магнитного потока снаружи соленоида очень мала, поэтому её можно игнорировать. Магнитное поле внутри соленоида направлено вдоль оси, поэтому значение криволинейного интеграла будет Bl .

Если количество витков катушки на 1 м равно n , ток в контуре в виде прямоугольника длины l будет равен lnI . При любом параллельном переносе пути интегрирования заключённый в контуре ток будет постоянно lnI . Поэтому понятно, что внутри соленоида существует магнитное поле постоянной величины. И плотность магнитного потока внутри соленоида, согласно закону Ампера, составляет:

$$\begin{aligned}\mu_0 n l I &= Bl; \\ B &= \mu_0 n I.\end{aligned}$$

Силу магнитного поля \vec{H} можно вычислить, разделив обе стороны уравнения на μ_0 : $H = nI$.

Что же произойдет, если поместить внутрь соленоида магнитное тело с относительной магнитной проницаемостью μ_r ? \vec{H} не изменится, потому что определяется только силой тока. В то же время $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$, поэтому плотность магнитного потока \vec{B} увеличивается в μ_r раз. Вспомните, как вы на лабораторных работах делали магнит, – вы наматывали проводник на сердечник из феррита или гвоздь. Зачем нужен сердечник? Он позволяет получить магнитный поток с большей плотностью при такой же силе тока.

Когда есть токопроводящий контур, «пропорция магнитного потока Φ_m , через контур и проходящего тока» будет называться «индуктивностью» этого контура. Она выражается знаком L . Ниже приведем формулу:

$$L = \frac{\Phi_m}{I}.$$

Проще говоря, показатель, насколько эффективно электрический ток испускает магнитный поток, соответствует ёмкости конденсатора (Кл). Единица измерения генри (Гн) была названа в честь американского физика Джозефа Генри, который почти одновременно с Фарадеем открыл явление электромагнитной индукции. Согласно закону электромагнитной индукции (глава 6), при прохождении изменяющегося тока по токопроводящему контуру возникает электродвижущая сила индукции V . Формула приводится ниже:

$$V = -L \frac{dI}{dt}.$$

Поскольку конденсатор накапливает заряд, это эквивалентно интегрированию тока, а здесь мы видим функцию, подобную дифференцированию. Поэтому если соединить конденсатор и противостоящий ему токопроводящий контур (катушку), можно будет обрабатывать довольно сложные электрические сигналы. Катушку, которую используют для таких целей, называют «индуктором». Самый производительный индуктор – это катушка соленоида, о которой говорилось ранее, для расчета индуктивности соленоида с N витков применяется формула ниже с умножением на N , потому что магнитный поток проходит через электрический ток N раз.

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} = \mu_0 n^2 l S,$$

где l – длина катушки (м);

n – количество витков на 1 м (л/м);

S – сечение катушки (м²).

ШАГ ВПЕРЁД

⊕ Эквивалентность закона Био–Савара и закона Ампера

Для того чтобы доказать эквивалентность закона Био–Савара и закона Ампера для общих случаев, требуется довольно сложный расчёт. Поэтому в этой книге мы остановимся только на линейных токах в проводниках бесконечной длины и на этом примере постараемся убедить вас в эквивалентности этих законов. Нам будет очень просто рассчитать магнитное поле, образуемое линейным током в проводниках бесконечной длины, вот по такой формуле: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$. Сможем ли мы получить такой же ответ, произведя расчёт по закону Био–Савара?

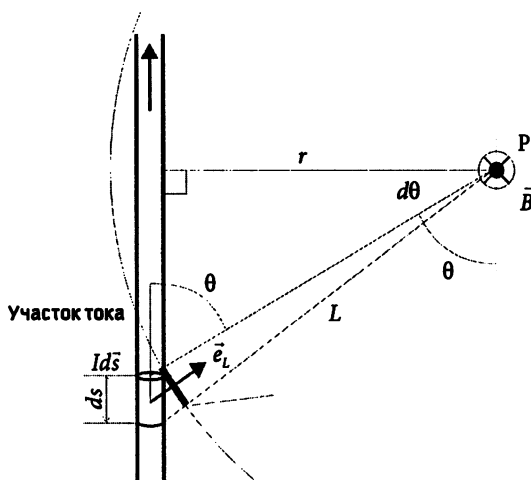


Рис. 5.9. Вычисление магнитного поля в точке P, расположенной на расстоянии r от участка электрического тока

Рассмотрим магнитное поле, создаваемое электрическим током в точке P, отдалённой от него на расстояние r, как показано на рис. 5.9. Так выглядит формула расчёта магнитного поля, создаваемого отрезком тока, показанным на рисунке, в точке P:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{s} \times \vec{e}_L}{L^2},$$

где \vec{e}_L – единичный вектор направления L.

По правилам векторного произведения, если точка P находится внутри поверхности листа, то магнитное поле будет направлено от лицевой части поверхности к задней. Если ток прямолинейный, все $d\vec{B}$, создаваемые участком тока в точке P , будут иметь одинаковую ориентацию, поэтому можно произвести скалярное вычисление. Величина произведения векторов $Id\vec{s} \times \vec{e}_L$ будет $Id s \sin \theta$ (см. раздел «Векторы и скаляры»), а величина магнитного поля:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id s \sin \theta}{L^2}.$$

Магнитное поле в точке P – это интеграл от этой величины, взятый в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. Выразим L и ds через константу r и угол θ .

По рисунку понятно отношение:

$$L d\theta = ds \sin \theta \rightarrow \frac{ds}{L} = \frac{d\theta}{\sin \theta};$$

$$L \sin \theta = r \rightarrow \frac{l}{L} = \frac{\sin \theta}{r}.$$

$L d\theta$ – это дуга угла $d\theta$ (rad) окружности радиуса L , и хотя она не совпадает полностью с $ds \sin \theta$, при достаточно малом $d\theta$ их можно считать одинаковыми.

Произведя подстановки, мы можем вывести следующую формулу:

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \sin \theta d\theta.$$

Теперь легко будет проинтегрировать в пределах от произвольного θ_1 до θ_2 и получить ответ:

$$B = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \sin \theta d\theta$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2).$$

Поскольку мы считаем проводник бесконечно длинным, $\theta_1 = 0$, $\theta_2 = \pi$.

Поэтому понятно, что магнитное поле вокруг бесконечно длинного проводника будет

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.$$

Итак, мы получили такой же ответ, как в законе Ампера, то есть эквивалентность доказана.

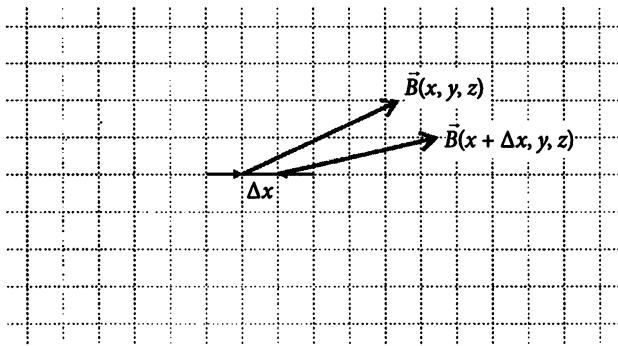


Рис. 5.10. Алгебраический расчёт векторного вращения

Если есть векторное поле, всегда можно говорить о его циркуляции (вращении). Это равнозначно тому, что говорится в законе Ампера: «если в магнитном поле есть вращение, в этой точке есть плотность электрического тока». Как же мы можем рассчитать вращение векторного поля? Как мы рассказывали в главе 3, для точного расчёта векторного поля необходимо обозначить компоненты векторов и произвести алгебраическое вычисление сходных векторов.

Попробуем выразить векторное поле \vec{B} с помощью функции (x, y, z) .

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_x(x, y, z) \\ B_y(x, y, z) \\ B_z(x, y, z) \end{pmatrix},$$

где B_x, B_y, B_z – это компоненты направления x, y, z вектора \vec{B} . Для начала закрепим y и z и попробуем переместиться только в направлении x на Δx . При этом результат дифференцирования изменения B_x по оси x можно представить как

$$\frac{B_x(x + \Delta x, y, z) - B_x(x, y, z)}{\Delta x}.$$

Бесконечно малое $\Delta x = \frac{\partial B_x}{\partial x}$.

Теперь вспомним, что при определении частной производной было 9 компонент (см. стр. 88).

При этом, как ни странно, вращение вектора плотности магнитного потока \vec{B} в некоторой точке (x, y, z) можно рассчитать, используя 6 из них.

$$(\text{rot } \vec{B})_x = \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z};$$

$$(\text{rot } \vec{B})_y = \frac{\partial B_x}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial x};$$

$$(\text{rot } \vec{B})_z = \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y},$$

где $\text{rot } \vec{B}$ – это векторная величина, так что нужно обратить внимание на то, что необходим расчёт для трех компонент x, y, z . Это описано в базовом курсе векторного анализа, так что, если нужно, вы можете этот вопрос изучить. Интересно, что остальные 6 компонент, не использованных в div , все используются в rot . В этом выражается функция взаимного дополнения div и rot при операциях. Зная это, можно понять, что можно описать с помощью уравнения Максвелла все электромагнитные явления: «дивергенция электрического поля», «дивергенция магнитного поля», «циркуляция электрического поля», «циркуляция магнитного поля».

Циркуляцию, в отличие от дивергенции, трудно выразить не только формулой, но и графически. Представим себе, например, что на плоскости $(x - y)$ есть поток воды, который вращается над истоком. Ось z – это глубина, поэтому поток состоит только из компонент x и y ($B_z = 0$), более того, по оси z изменений нет $\left(\frac{\partial}{\partial z} = 0\right)$. А если так,

значения компонент x и y $\text{rot } \vec{B}$ будут равны нулю. Компонента z – это результат вычитания «скорости изменения направления y функции B_x из скорости изменения направления x функции B_y ». Как видно по рисунку, вблизи от центра векторного поля водоворота B_y изменяется по оси x от минуса к плюсу, а B_x изменяется по оси y от плюса к минусу. Следовательно, значение $(\text{rot } \vec{B})_z$ будет максимальным вблизи центра водоворота. Вращение этого потока будет максимальным в исходной точке, а его направление – это направление по оси z .

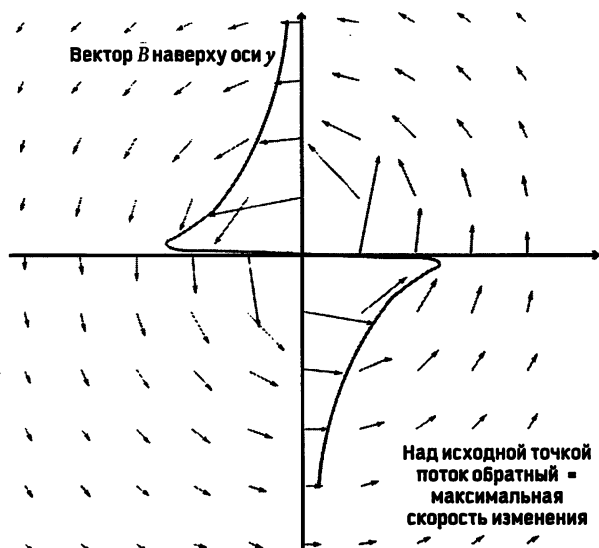


Рис. 5.11. Вращение потока вокруг исходной точки

+ e **Магнитные силовые линии и линии магнитной индукции**

В электрическом поле существуют «электрические силовые линии» и «линии электрической индукции», а в магнитном поле существуют «магнитные силовые линии» и «линии магнитной индукции». Мы не приводили подробных обоснований, почему можно говорить о «линиях магнитной индукции», но, поскольку сила взаимодействия участков электрического тока подчиняется закону обратных квадратов, может быть, можно предположить это по аналогии? Два этих феномена похожи, поэтому постараемся разобраться, сравнив их.

Таблица 5.2. Сравнение силовых линий электрического и магнитного полей

Электрические силовые линии	Линии соединения \vec{E}	Выходят из электрического заряда и заканчиваются на электрическом заряде
Линии электрической индукции	Линии соединения D	Выходят из истинного электрического заряда и заканчиваются на истинном электрическом заряде. Не находятся под влиянием поляризованных зарядов
Магнитные силовые линии	Линии соединения \vec{H}	Выходят из истинного магнитного заряда и заканчиваются на магнитном заряде
Линии магнитной индукции	Линии соединения B	Выходят из истинного магнитного заряда и заканчиваются на истинном магнитном заряде. Поскольку такого предмета не существует, линии потока магнитной индукции B всегда представляют собой контур, не имеющий начальной и конечной точек

Все магнитные поля порождаются электрическим током, поэтому «магнитного заряда» не существует – такова точка зрения науки об электромагнетизме сейчас, но наблюдение о том, что под воздействием магнитного поля вещества намагничиваются, позволяет предположить, что на двух краях магнитного тела есть магнитные заряды N и S. Это соответствует представлению о том, что по краям диэлектрика находятся поляризованные заряды.

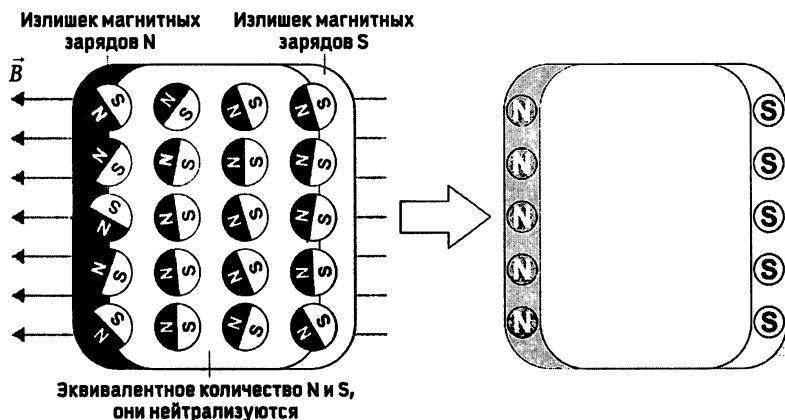


Рис. 5.12. Изображение намагничивания магнитного тела виртуальными магнитными зарядами

И в электрических, и в магнитных поляризованных зарядах на их границах неразрывно связаны \vec{D} и \vec{E} , а \vec{B} и \vec{H} заканчиваются на их краях, если там есть поляризованные электрические или магнитные заряды. У магнитных силовых линий и линий потока магнитной индукции так же, как и электрических силовых линий, есть определенные свойства.

- У них нет промежуточных разрывов и соединений.
- Соседние магнитные силовые линии и линии потока магнитной индукции имеют тенденцию к отдалению друг от друга.
- Единичная магнитная силовая линия и линия магнитной индукции имеет тенденцию к сокращению.

Эти свойства магнитных силовых линий и линий магнитной индукции так же, как и свойства электрических силовых линий, можно объяснить с помощью «тензора натяжений Максвелла» (см. стр. 45).

С помощью электрических силовых линий и линий напряженности электрического поля можно легко решить задачу конденсатора с диэлектриком, а используя магнитные силовые линии и линии магнитной индукции, можно также легко решить задачу катушки с магнитным телом. Как показано на рис. 5.13, нужно создать контур из ферромагнита с относительной магнитной проницаемостью μ_r и в одном месте сделать узкий зазор.

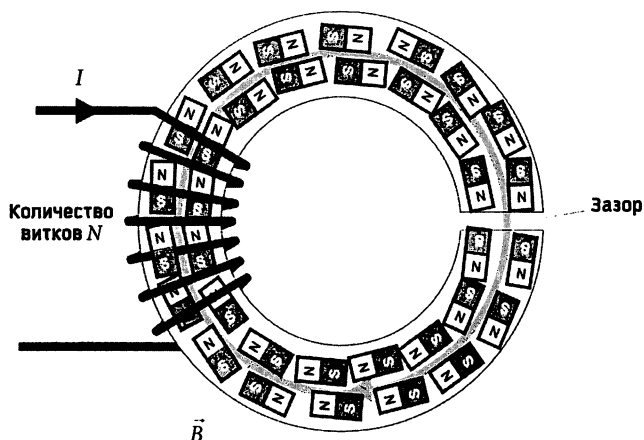


Рис. 5.13. Катушка соленоида из ферромагнита с зазором

Давайте рассмотрим, что происходит с линиями потока магнитной индукции \vec{B} , созданными соленоидом, за его пределами. Линии, выходящие из соленоида, возвращаются в него, нигде не прерываясь, и это можно приблизительно уподобить тому, что все они проходят через магнитное тело. Это трудно выразить математической формулой, но вам будет, наверное, понятнее такое интуитивное объяснение: ферромагнит – это «собранные воедино мелкие магниты, которые свободно могут вращаться». Магнитные домены, принудительно ориентированные соленоидом в определённом направлении, с помощью магнитного поля, которое они сами генерируют, выстраивают микромагниты снаружи соленоида. Поскольку при этом линии потока магнитной индукции стремятся отдалиться друг от друга, значение \vec{B} приблизительно одинаково на любом разрезе магнитного тела.

А что же происходит в месте зазора? Поскольку линии электромагнитной индукции стремятся соединиться по кратчайшему пути, они пронизывают зазор вертикально. Плотность магнитного потока везде непрерывна, поэтому можно считать, что \vec{B} такая же, как внутри магнетика. В то же время вектор напряжённости магнитного поля \vec{H} на торцах магнетика разрывается. Причина в том, что на торцах магнетика образовались полюса N и S и вектор \vec{H} идёт от полюса N к S. Примем напряжённость магнитного поля снаружи магнетика за H_{ext} , а внутреннее магнитное поле за H_{int} . При этом длина линии вокруг магнетика будет l , ширина зазора d . Тогда силу магнитного поля можно вычислить с помощью закона Ампера по такой формуле:

$$NI = H_{\text{int}}(l - d) + H_{\text{ext}}d.$$

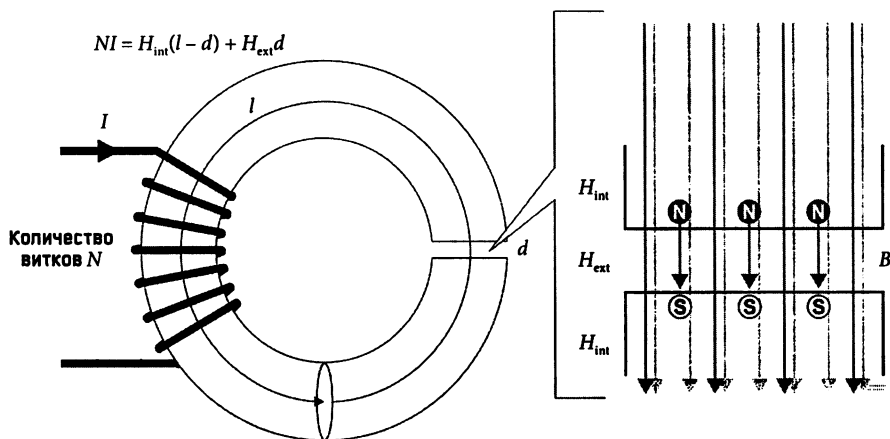


Рис. 5.14. Магнит в виде кольца с частичной обмоткой проводником

Отношение B и H :

$$B = \mu_0 \mu_r H_{int};$$

$$B = \mu_0 H_{ext}.$$

Если мы выразим H_{int} через H_{ext} , закон Ампера преобразуется следующим образом:

$$NI = \frac{H_{ext}}{\mu_r} (l - d) = H_{ext} d.$$

Представим, что μ_r – это очень большая величина, от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч.

Когда такое большое число оказывается в знаменателе, левая сторона уравнения становится близкой к нулю:

$$H_{ext} = \frac{NI}{d};$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{d}.$$

Мы говорим о том, что магнитное поле в зазоре магнитного тела равно очень мощному магнитному полю соленоида с плотностью обмотки N/d . Можно сказать по-другому: вся обмотка соленоида на противоположной стороне оказывается втянутой в зазор шириной d .

На самом деле такой способ используется, когда нужно создать мощное магнитное поле в небольшом пространстве. В качестве примера можно привести записывающую головку, которая записывает информацию на видеокассетах или жестких дисках.

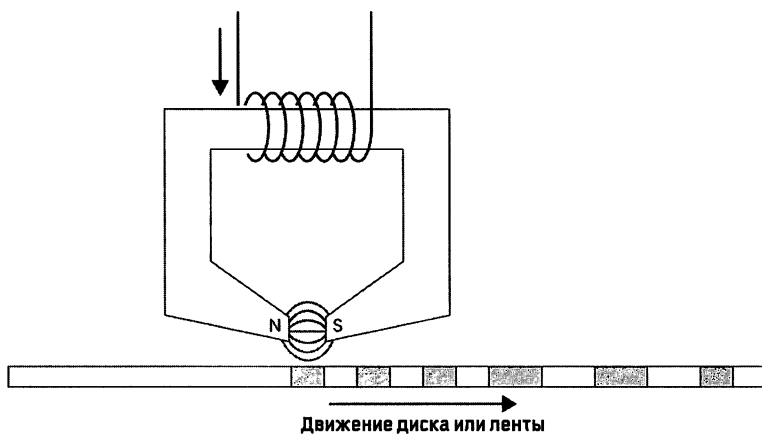


Рис. 5.15. Принцип работы магнитного запоминающего устройства

Магниты были открыты задолго до нашей эры, но только в XIX веке было обнаружено, что электрический ток порождает магнитное поле. Наблюдения над магнитным полем привели ученых к выводу о том, что существует некий «магнитный заряд», соответствующий электрическому заряду. На основании опытов они поняли, что закон Кулона можно применить и к магнитным зарядам:

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{q_{m1}q_{m2}}{r^2},$$

где $q_{m1}q_{m2}$ – магнитный заряд (Вб).

Единицы измерения были изменены на современные. Единица измерения магнитного заряда (Вб) = (Тл·м²) имеет такую же размерность, как у магнитной индукции, аналогично тому, что электрический заряд и напряжённости электрического поля имеют одинаковую размерность. Векторное поле \vec{H} , выражающее силу воздействия на единицу магнитного заряда, определяется так:

$$\vec{F} = q_m \vec{H}.$$

Такое учение об электромагнетизме называют «электромагнетизм отношения Е-Н». Электромагнетизм отношения Е-Н берёт свое начало от следующего: магнетизм считается феномен поляризации атомов на положительный и отрицательный магнитные заряды (магнитная поляризация), вводится понятие магнитной плотности \vec{B} для простоты записи теоремы Гаусса в условиях существования магнитного тела. До настоящего времени существовала теория \vec{H} по отношению к \vec{E} , \vec{B} по отношению к \vec{D} , она была красивая и ясная, поэтому и сейчас есть определённое количество сторонников электромагнетизма отношения Е-Н. Это особенно характерно для науки о магнетизме, которая занимается магнитами, потому что, если считать магнит источником магнитного поля, можно очень понятно объяснить его свойства; поэтому здесь отношение Е-Н остаётся главным.

Но, в отличие от электрических зарядов, магнитные заряды никак не могут разделиться на N и S. Дело в том, что магнитный заряд существует только виртуально, а все магнитные поля, в которых есть магнит, создаются электрическим током. Поэтому слабость электромагнетизма отношения Е-Н заключается в том, что он не может логически объяснить, почему электрический ток порождает магнитное поле так же, как и магнит.

В то же время сейчас известно, что все магнитные поля имеют электрическое происхождение, поэтому в школьных учебниках по электромагнетизму в основном объясняют, что магнитное поле порождается электрическим током. Этот подход называется «отношение Е-В». Но и электромагнетизм отношения Е-В имеет определённые недостатки, об этом говорилось и в манге: «откуда появилась физическая величина \vec{H} ?» Очень трудно объяснить её необходимость. Но если запомнить, что есть электромагнетизм «отношения Е-Н», то смысл существования \vec{H} станет понятен.

Диамагнетики и магнитная левитация

Диамагнетик – это удивительное вещество, в котором под воздействием внешнего магнитного поля атомные магниты выстраиваются так, что оказывают противодействие внешнему магнитному полю. Таким образом, как показано на рис. 5.16, если приложить магнитное поле к диамагнетику, то образуются магнитные полюса, противостоящие внешнему магнитному полю.

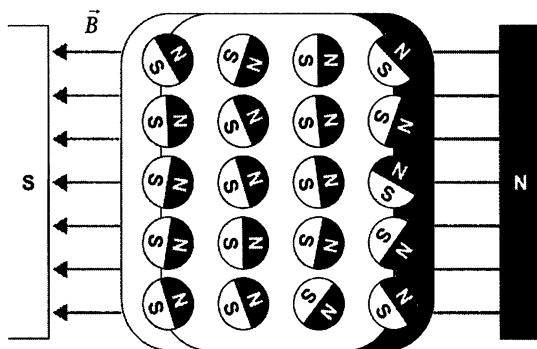


Рис. 5.16. Поведение диамагнетика при воздействии магнитного поля

Причину появления диамагнетика невозможно объяснить на модели микромагнитов, которые просто вращаются. Попробуем рассказать проще. Факторы образования диамагнетика – это орбитальное вращение электронов и их спин (вращение вокруг своей оси), но при этом некоторые из этих элементов составляют пары, которые, вращаясь в противоположном направлении, полностью взаимно балансируются. Это означает, что их атомы не являются магнитами без приложения внешнего магнитного поля. Орбитальное вращение электронов не постоянно, оно изменяется под воздействием даже слабого магнитного поля. Движение парных электронов направлено противоположно внешнему магнитному полю, поэтому под воздействием внешнего магнитного поля баланс нарушается, и в этот момент появляется направленность против этого поля. Это источник диамагнитных свойств атомов. Таким образом, все атомы обладают диамагнитными свойствами, но в очень слабой степени, поэтому большинство веществ проявляет свойства парамагнетиков, обусловленные спином электронов.

На рис. 5.16 видно, что, если поднести магнит к диамагнетику, начинает действовать сила отталкивания, но поскольку диамагнитные свойства очень слабы, мы не можем это непосредственно наблюдать. Сейчас у нас есть возможность увидеть некоторые интересные явления, используя мощные магниты, например неодимовые. Во-

да – это диамагнетик, и, если поднести к струе воды, текущей из крана, мощный магнит, она будет отступать от него. Вы думаете, что это неудивительно, потому что одинаковые полюса магнита отталкиваются?

Давайте попробуем. Если к микромагнитам в свободном движении поднести другой магнит, они обязательно начнут вращаться и притянутся друг к другу, это похоже на феномен «отталкивания одинаковых полюсов магнита», но это не он. Другие вещества, легко проявляющие свойства диамагнетиков, – это углеграфит и висмут.

Один из самых заметных эффектов проявления свойств диамагнетизма – это «магнитная левитация». Если над мощным магнитом поместить диамагнетик, линии магнитной индукции будут разделяться, огибая его. Эти линии стремятся расшириться и отодвинуться друг от друга, поэтому на диамагнетик сбоку и снизу воздействует сила, нажимающая на него. Таким образом, диамагнетик приходит в состояние покоя, паря над магнитом. Постоянный магнит, даже если под ним будет противоположный магнитный полюс, будет вращаться и в конце концов притянется, а диамагнетик может в естественном состоянии парить над магнитом.

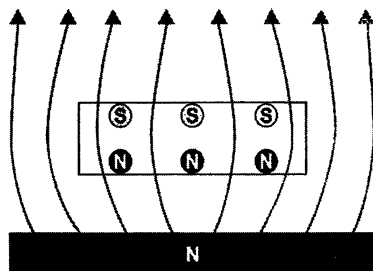


Рис. 5.17. Диамагнетик парит над магнитом

Наверное, вы видели по телевизору, как сверхпроводники парят над магнитами. Сверхпроводники обладают абсолютными диамагнитными свойствами, они демонстрируют очень сильный диамагнитный эффект. Сверхпроводники пропускают электрический ток совершенно без сопротивления, и когда магнитный поток стремится проникнуть внутрь, за счёт магнитной индукции (глава 6) внутрь проникает электрический ток как раз такой величины, чтобы подавить это, поэтому магнитный поток не может войти внутрь. Это называется эффектом Мейснера, над сверхпроводником возникает такая мощная сила отталкивания, что она может выдержать вес человека.

ГЛАВА 6

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ В ДВИЖЕНИИ И УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

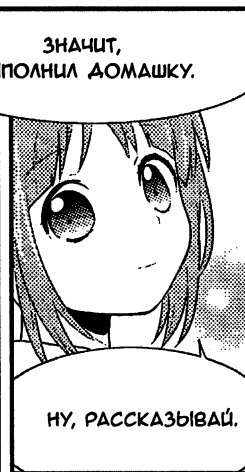




БА-БАХ!

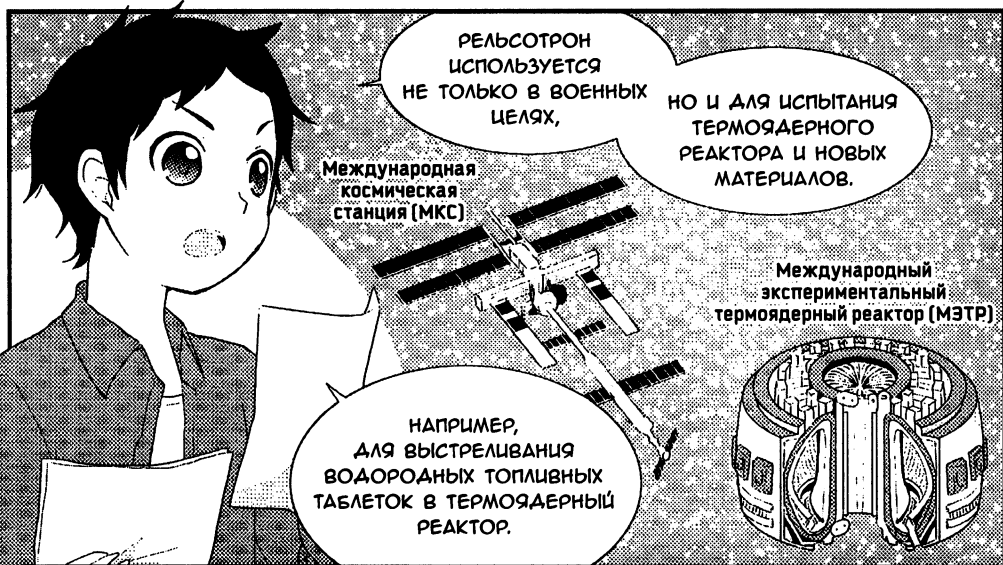


Я ИЗУЧИЛ
ПРИМЕНЕНИЕ
РЕЛЬСОТРОНА.



ЗНАЧИТ,
ВЫПОЛНИЛ ДОМАШКУ.

НУ, РАССКАЗЫВАЙ.



РЕЛЬСОТРОН
ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
НЕ ТОЛЬКО В ВОЕННЫХ
ЦЕЛЯХ,

НО И ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
ТЕРМОЯДЕРНОГО
РЕАКТОРА И НОВЫХ
МАТЕРИАЛОВ.

Международная
космическая
станция (МКС)

Международный
экспериментальный
термоядерный реактор (МЭТР)

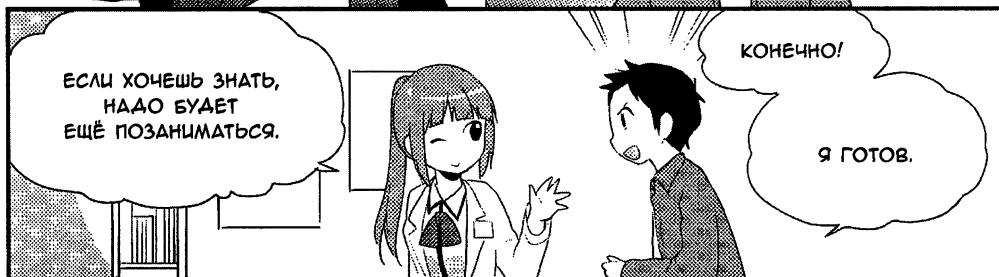
НАПРИМЕР,
ДЛЯ ВЫСТРЕЛИВАНИЯ
ВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВНЫХ
ТАБЛЕТОК В ТЕРМОЯДЕРНЫЙ
РЕАКТОР.

ИЛИ ДЛЯ ИМИТАЦИИ
СТОЛКНОВЕНИЯ
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА,
КРУЖИВШЕГО ВОКРУГ
ОРБИТЫ.

СТОЛКНОВЕНИЕ
КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА
ПРОИСХОДИТ СО СКОРОСТЬЮ
БОЛЬШЕ 10 000 М/С.

НА ЭТО СПОСОБЕН
ТОЛЬКО РЕЛЬСОТРОН.

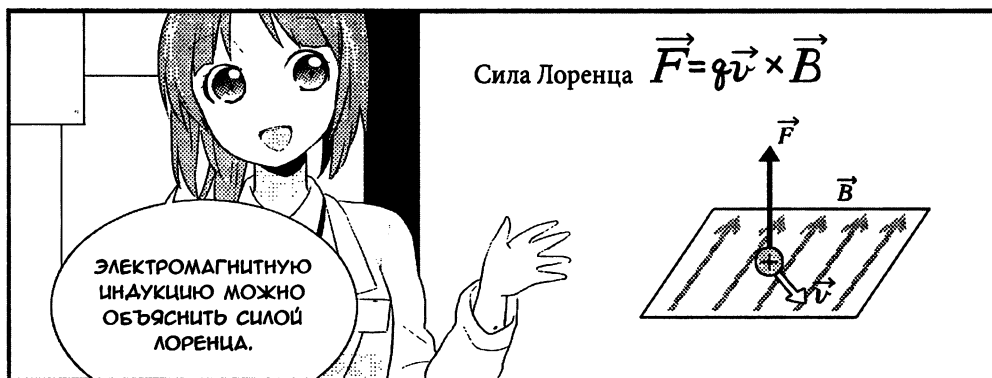




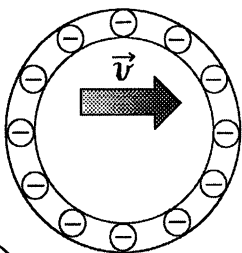
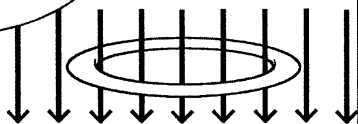
6.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ



* 1820 г., Эрстед (см. стр. 109).



САВИМ
ПЕТЛЕОБРАЗНЫЙ
ПРОВОДНИК
В ВЕРТИКАЛЬНОМ
МАГНИТНОМ ПОЛЕ.



КАКАЯ БУДЕТ
СИЛА ЛОРЕНЦА,
ВОЗДЕЙСТВУЮЩАЯ
НА ЭЛЕКТРОН В ПРОВОДНИКЕ?

ТАК, У ЭЛЕКТРОНА
ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ЗАРЯД,
ВЕЛИЧИНА.

СИЛА ЛОРЕНЦА
ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ

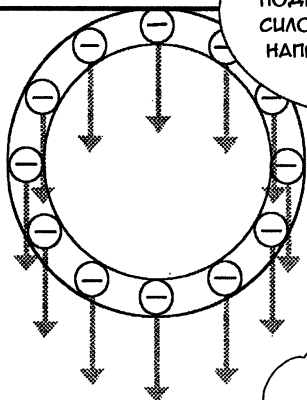
$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}$$

и...

ПРАВИЛА
ВЕКТОРНОГО
ПЕРЕМНОЖЕНИЯ...

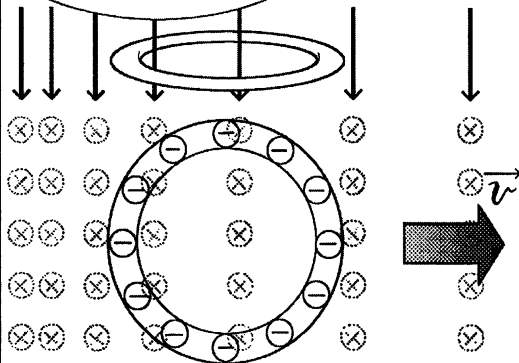
ПРАВИЛО
БУРАВЧИКА...

ЗНАЧИТ,
ПОАВЕРГАЕТСЯ
СИЛОЙ В ЭТОМ
НАПРАВЛЕНИИ.



ВЕРНО.

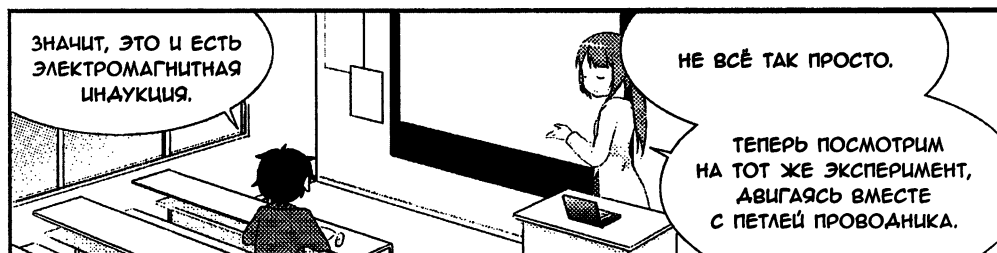
ТЕПЕРЬ ПРЕДПОЛОЖИМ,
ЧТО ЭТО МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
СЛЕВА НАПРАВО
ПОСТЕПЕННО
УМЕНЬШАЕТСЯ.



Вектор \vec{B} , вид сверху

ПРИ ЭТОМ ЧТО БУДЕТ
С СИЛОЙ ПРАВОЙ И ЛЕВОЙ
СТОРОН ПЕТЛИ,

КОТОРОЙ ПОАВЕРГАЕТСЯ
ЭЛЕКТРОН В ПРОВОДНИКЕ?



А ЕСЛИ УБРАТЬ МАГНИТ?

Хм...

ЕСЛИ НЕПОДВИЖНЫЙ
ЭЛЕКТРОН ПОДВЕРГАЕТСЯ
СИЛЕ, ЗНАЧИТ, ТАМ ЕСТЬ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

ВСПОМНИ ЗАКОН ОМА.

КОГДА СО ВРЕМЕНЕМ
МЕНЯЕТСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ,
ТАМ ЕСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

ЭТО НЕ ОБМАН?

ДЕЙСТВИТЕЛЬНО,
ЭТО ОЧЕНЬ
ГЛУБОКИЙ ВОПРОС.

НА СУТЬ ЭТОГО ВОПРОСА
ПЕРВЫМ ОБРАТИЛ ВНИМАНИЕ
ЭЙНШТЕЙН.

СТАТЬЯ О "СПЕЦИАЛЬНОЙ
ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ"
НАЧИНАЕТСЯ С РАЗМЫШЛЕНИЯ
ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
ПРОВОДА И МАГНИТА.

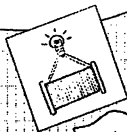
ДЛЯ ТОЛКОВАНИЯ
ЭТОЙ ЗАГАДКИ
НАДО ЗНАТЬ ТЕОРИЮ
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ,

НО ПОКА
ПРОСТО ЗАПОМНИ.

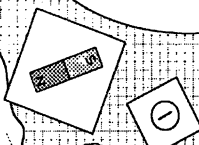
6.2. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ

СУТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ИНДУКЦИИ ОБНАРУЖИЛ
ФАРАДЕЙ.

ЕСЛИ ПОЛОЖИТЬ ПРОВОД
В МЕНЯЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ
ПОЛЕ, НАЧНЁТ ТЕЧЬ ТОК.



А ЧТО, ЕСЛИ УБРАТЬ
ПРОВОД И ПОЛОЖИТЬ
ОДИН ЭЛЕКТРОН?



ЭЛЕКТРОНЫ

НАЧНУТ
ДВИГАТЬСЯ?



АА. СПОСОБА РАЗЛИЧИТЬ
ЭТОТ ЭЛЕКТРОН
С ЭЛЕКТРОНОМ ВНУТРИ
ПРОВОДА НЕТ, ЗНАЧИТ,
ВСЁ РАВНО ЭЛЕКТРОН
ПОДВЕРГАЕТСЯ СИЛЕ.

СУТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ИНДУКЦИИ - "МЕНЯЮЩЕЕСЯ
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЗДАЁТ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ".

ИНДУКЦИОННЫЙ ТОК
ВСЕГО ЛИШЬ
НАБЛЮДАЕТСЯ
КАК ИТОГ.

ЗНАЧИТ, И БЕЗ ПРОВОДА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
МОЖЕТ ВОЗНИКНУТЬ.



МОЛОДЕЦ,
ЧТО ОБРАТИЛ
НА ЭТО ВНИМАНИЕ.

ФАРАДЕЙ ОБНАРУЖИЛ
ЗАКОНОМЕРНОСТЬ МЕЖДУ
ИЗМЕНЕНИЕМ В МАГНИТНОМ
ТОКЕ И ВОЗНИКАЮЩИМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ.

**Закон электромагнитной
индукции Фарадея**

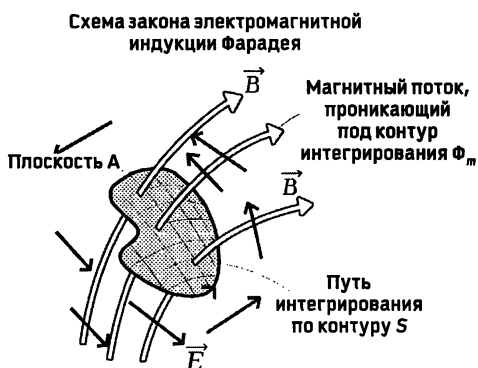
$$V = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

V – индуцированная электродвижущая
сила, возникающая в закрытой петле (V)
 Φ_m – магнитный поток, пронизывающий
данный контур



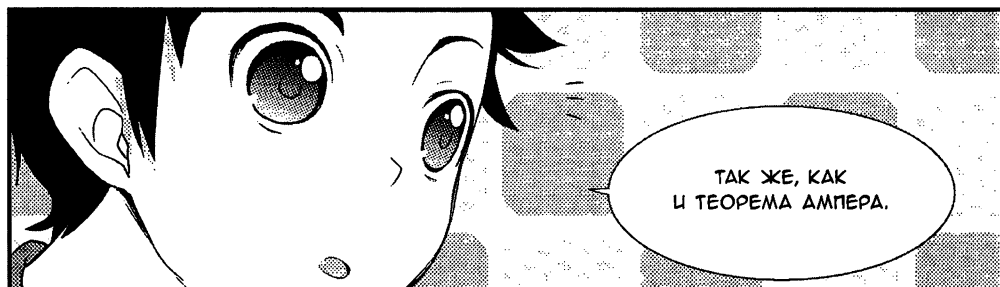
ИНАУЦИРОВАННАЯ
ЭЛЕКТРОАВИЖУЩАЯ
СИЛА...

ЧТО-ТО НОВОЕ.



НЕ ВАЖНО, КАКИМ ПУТЁМ,
ДЕЛАЕМ ИНТЕГРИРОВАНИЕ
ПО КОНТУРУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ ВОДЛЬ ЗАКРЫТОЙ ПЕТАИ.

ТАКОВО ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ИНАУЦИРОВАННОЙ
ЭЛЕКТРОАВИЖУЩЕЙ
СИЛЫ.



ТАК ЖЕ, КАК
И ТЕОРЕМА АМПЕРА.



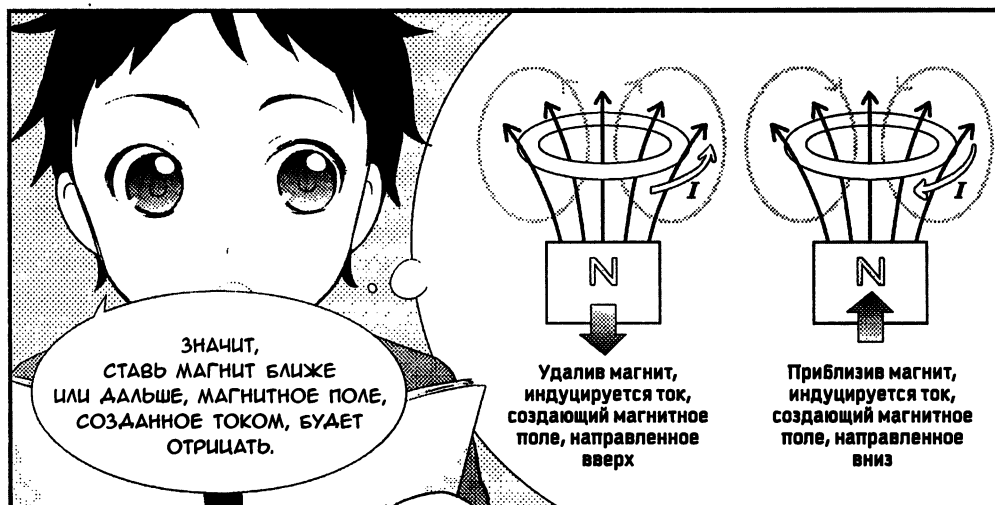
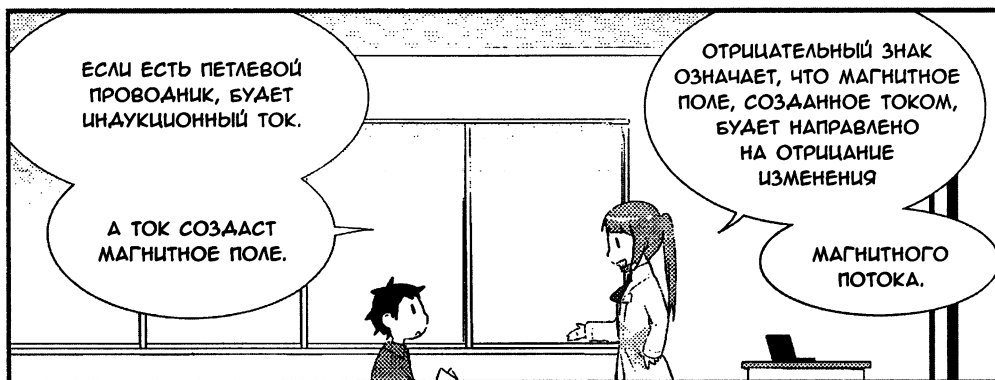
ДА.

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ
ИНАУКИ ГОВОРИТ О ТОМ,
ЧТО "В ЗАКРЫТОЙ СПИРАЛИ
ИНАУЦИРОВАННАЯ
ЭЛЕКТРОАВИЖУЩАЯ СИЛА
РАВНА КОЭФФИЦИЕНТУ
ИЗМЕНЕНИЯ

МАГНИТНОГО ПОТОКА
ВНУТРИ".

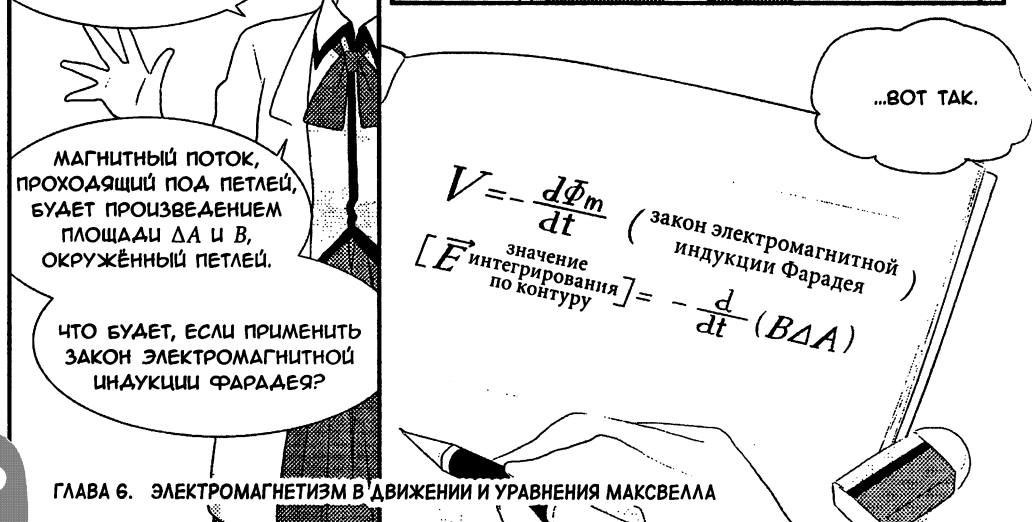
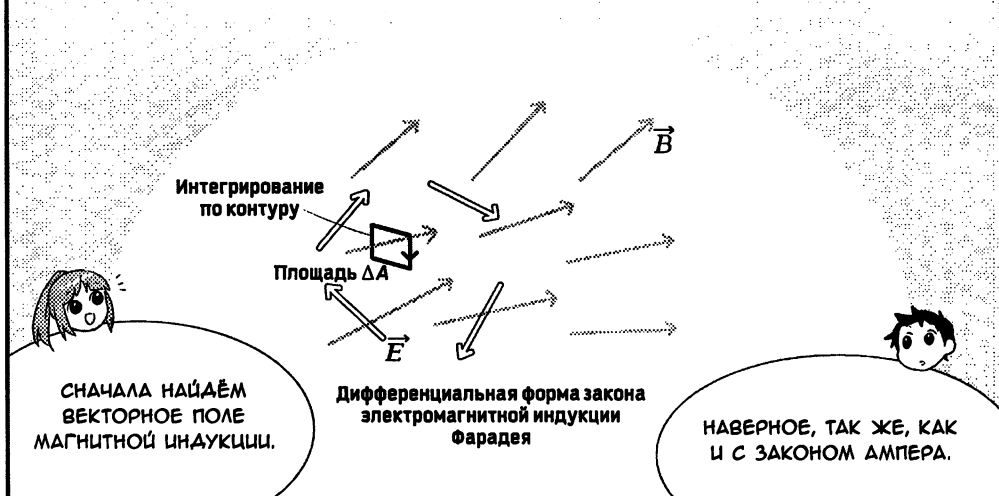


А ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНОМ
ЗНАКЕ?



6.3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ФОРМА ЗАКОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ФАРАДЕЯ





ПРАВИЛЬНО.

ТЕПЕРЬ, КАК
И ПРИ ЗАКОНЕ АМПЕРА,
МЕНЯЕМ ФОРМУ.

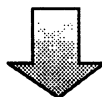
ΔА ПЕРЕНОСИМ В ЛЕВУЮ
СТОРОНУ И УМЕНЬШАЕМ...

КЛИК-
КЛИК

$$\left[\vec{E}^{\text{интегрирования по контуру}} \right] = - \frac{d}{dt} (B \Delta A)$$

ПОЛУЧАЕТСЯ ТАК.

$$\left[\vec{E}^{\text{значение интегрирования по контуру}} \right] = - \frac{d}{dt} (B \Delta A)$$



$$\frac{\left[\vec{E}^{\text{значение интегрирования по контуру}} \right]}{\Delta A} = - \frac{dB}{dt}$$

ЛЕВАЯ СТОРОНА
ТА ЖЕ, ЧТО БЫЛА
ПРИ ЗАКОНЕ АМПЕРА
 $\text{rot} \vec{E}$ (ROTATION E).

ПРАВАЯ СТОРОНА -
ЭТО КОЭФФИЦИЕНТ ИЗМЕНЕНИЯ
МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ B

ФОРМУЛУ
ПЕРЕПИШЕМ ТАК.

ЭТО ЗНАЧИТ "СПИРАЛЬ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ РАВНА
ВРЕМЕННЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ".

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

ПОГОДИ.

∂

А ЧТО ЗА ЗНАК
ДИФФЕРЕНЦИАЛА
С ПРАВОЙ СТОРОНЫ?

ЭТО ЗНАК ЧАСТНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ.

x, y, z
 t

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ \vec{B} ЯВЛЯЕТСЯ ФУНКЦИЕЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ (x, y, z) И ВРЕМЕНИ t .

$d \Rightarrow \partial$

ОФИЦИАЛЬНО ВМЕСТО d ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ∂ .

ЗАПОМНИ.

И ЭТО ВТОРОЕ В УРАВНЕНИИ МАКСВЕЛЛА.

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

ПОСЛЕ ТЕОРЕМЫ ГАУССА ДАВНЕНЬКО НЕ ВИДЕЛ.

6.4. ТОК СМЕЩЕНИЯ И РАСШИРЕНИЕ ТЕОРЕМЫ АМПЕРА

Схема конденсатора

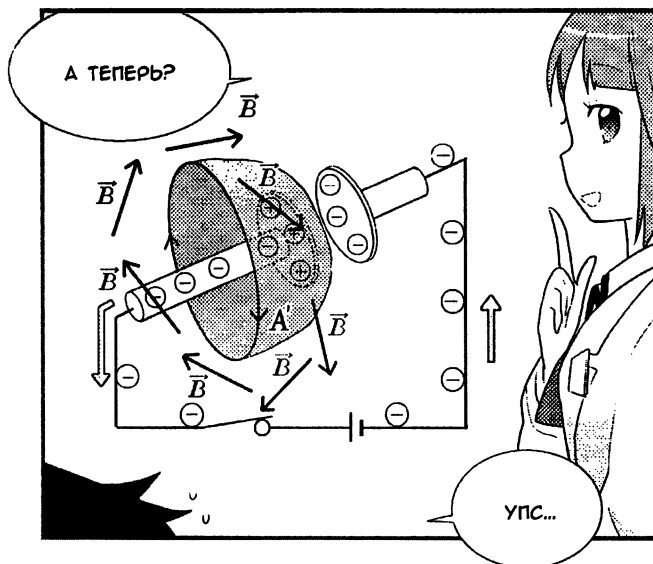
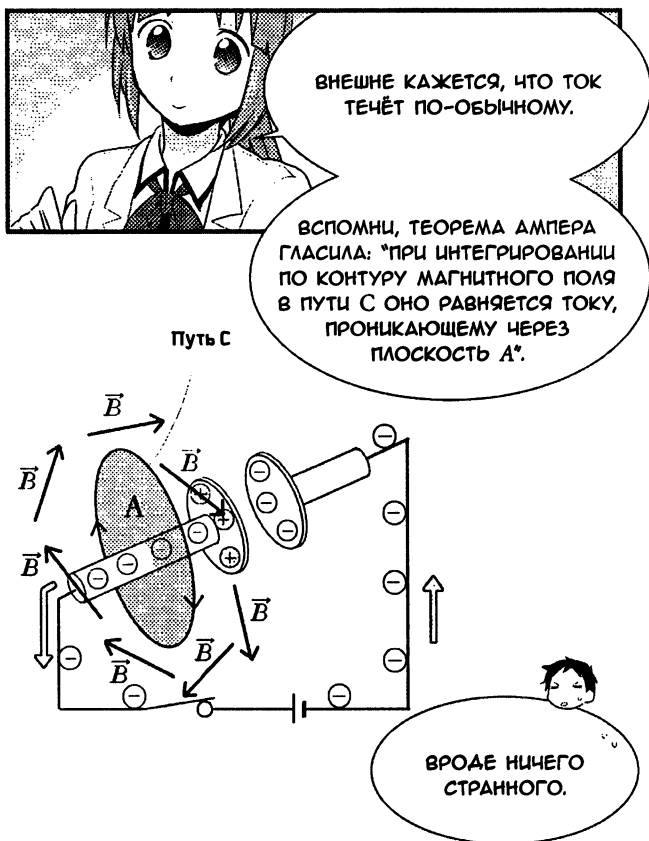
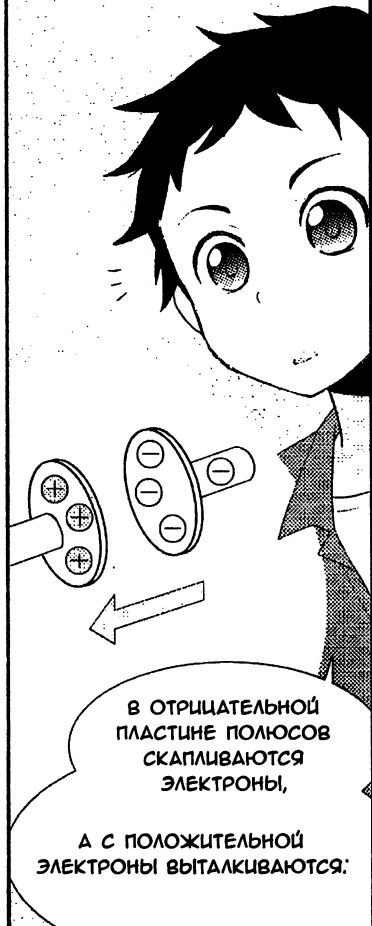
ПОМНИШЬ, ЧТО У ТЕОРЕМЫ АМПЕРА БЫЛО УСЛОВИЕ, ЧТО "СОСТОИТ ТОЛЬКО ПРИ ТОКЕ, НЕ ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ ВРЕМЕНЕМ"?

Конденсатор (см. стр. 63) и цепь источника

Пластины полюсов

ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ В КОНДЕНСАТОР ПОПОЛНЯЮТСЯ ЗАРЯДЫ.

ON



НА ТО И "ЗАКОН",
ЧТОБЫ СОСТОЯТЬ
В ЛЮБОЙ СИТУАЦИИ.

ТАК ЧТО
НА ЭТОЙ СХЕМЕ
ЗАКОН АМПЕРА НЕ СОСТОИТ.

НО! АНГЛИЙСКИЙ ФИЗИК
АЖЕЙМС КЛЕРК МАКСВЕЛ
ДОДУМАЛСЯ,
ЧТО "НЕЧТО" ПРОНЗАЕТ
ПЛОСКОСТЬ А'!

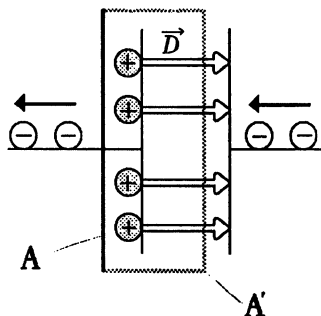
И ЧТО ЖЕ ТЕЧЁТ?

МАКСВЕЛ ОБРАТИЛ ВНИМАНИЕ,
ЧТО ПРОНИКАЮЩИЙ ЧЕРЕЗ ПЛОСКОСТЬ А'
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТОК Φ_e
ПОСТЕПЕННО УВЕЛИЧИВАЕТСЯ.

И ОБНАРУЖИЛ,
ЧТО ЕСЛИ ВРЕМЕННО
ДИФФЕРЕНЦИРОВАТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ
ПОТОК, ОН БУДЕТ РАВЕН ТОКУ,
ТЕКУЩЕМУ ПО ЦЕПИ.

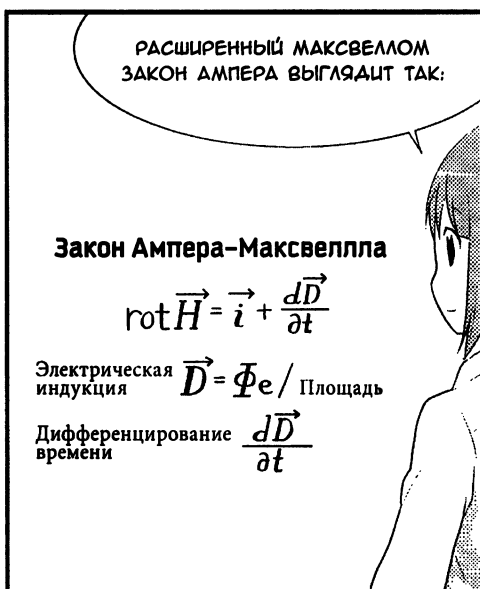
И НАЗВАЛ ЭТО
ТОКОМ СМЕЩЕНИЯ
(СИЛ АБСОРБЦИОННЫМ
ТОКОМ).

Ток смещения $\frac{d\Phi_e}{dt}$



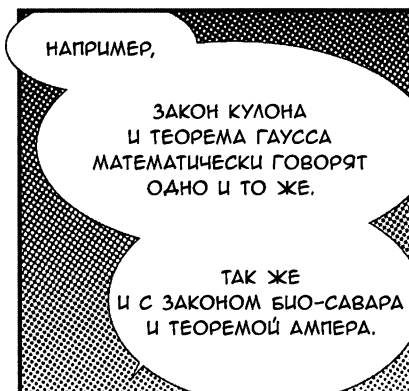
А МЕЖАУ ПЛАСТИНАМИ
ПОЛЮСОВ КОНДЕНСАТОРА
ТОЖЕ ТЕЧЁТ ТОК?

АА.
МАКСВЕЛ ИСТОЛКОВАЛ,
ЧТО ТОК СМЕЩЕНИЯ - ДРУГОЙ
ТИП ТОКА, ОТЛИЧАВШИЙСЯ
ОТ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
ЗАРЯДОВ.



* Про измерение см. стр. 91.

6.5. УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА



СООТВЕТСТВУЕТ

ЗАКОН
АМПЕРА-МАКСВЕЛЛА.

Закон
электромагнитной
индукции Фарадея

$$\operatorname{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

СООТВЕТСТВИЕ

Закон
Ампера-Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$



СООТВЕТСТВИЕ

Теорема Гаусса

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

ЗНАЧИТ,
И У ТЕОРЕМЫ
ГАУССА



ТОЖЕ ДОЛЖЕН БЫТЬ
СООТВЕТСТВУЮЩИЙ
ЗАКОН МАГНИТНОГО
ПОЛЯ.

ПРЕДСТАВИМ
ТЕОРЕМУ ГАУССА
В ВАРИАНТЕ
МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

ТОГДА ДОЛЖНО БЫТЬ:
"МАГНИТНЫЙ ПОТОК,
ПРОНИКАЮЩИЙ СКВОЗЬ
ЗАМКНУТУЮ ПОВЕРХНОСТЬ,
РАВЕН МАГНИТНОМУ
ЗАРЯДУ ВНУТРИ".



ВЕРНО. ПОЭТОМУ,
ПРАВАЯ СТОРОНА
ОБЯЗАТЕЛЬНО
БУДЕТ 0.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

"У МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ
НЕТ ДИВЕРГЕНЦИИ".

МАКСВЕЛЛ ТАКЖЕ ОБНАРУЖИЛ,
ЧТО И ЭТО ОДИН ИЗ ОСНОВНЫХ
ЗАКОНОВ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА.

НО ВЕДЬ
МАГНИТНОГО ЗАРЯДА
НЕ СУЩЕСТВУЕТ.



ИТАК, ЗАКАНЧИВАЕМ
УРАВНЕНИЕ МАКСВЕЛЛА.

ЭТО ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА,
ОПУБЛИКОВАННЫЕ МАКСВЕЛЛОМ
В 1865 ГОДУ.

Уравнение Максвелла

1. Теорема Гаусса $\text{div} \vec{D} = \rho$.
Электрический заряд производит дивергенцию электрической индукции.
2. Теорема Гаусса в отношении магнетизма $\text{div} \vec{B} = 0$.
Магнитного заряда не существует. Соответственно, у магнитной индукции нет дивергенции.

3. Закон электромагнитной индукции Фарадея

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$

Ротор электрического поля равен временному изменению магнитной индукции.

4. Закон Ампера–Максвелла

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

Ротор магнитного поля равен сумме плотности тока и плотности тока смещения (коэффициентом временного изменения тока смещения)

ТОЧНЕЕ, ИЗ ПРЕДСТАВЛЕННОЙ
МАКСВЕЛЛОМ ФОРМЫ
ХЕВИСАЙДА И ГЕРЦ ИЗЪЯЛИ
ЛИШНИЕ ФОРМЫ, И ЭТИ 4
И НАЗЫВАЮТСЯ НЫНЧЕ
УРАВНЕНИЕМ МАКСВЕЛЛА.

НУ КАК? СМОТРИ, КАКУЮ
КРАСИВЕЙШУЮ СИММЕТРИЮ
ОБРАЗУЮТ ЗАКОН ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ,
ДИВЕРГЕНЦИЯ И ВРАЩЕНИЕ.

ОСНОВАТЕЛЬ
СТАТИСТИЧЕСКОЙ
МЕХАНИКИ БОЛЬЦМАН,
УВИДЕВ ЭТО, СКАЗАЛ:
"ЭТО БОГОМ СОЗДААННОЕ
ИСКУССТВО".



6.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ





НЕ НАПРЯГАЙСЯ.
ЗВУК – ЭТО ВИБРАЦИЯ
ВОЗДУХА.

ЭТО ЗНАЧИТ,
ЧТО ДАВЛЕНИЕ ВОЗДУХА
ДОНОСИТСЯ В ВИДЕ ВОЛНЫ.

хлоп



Электромагнитное
излучение

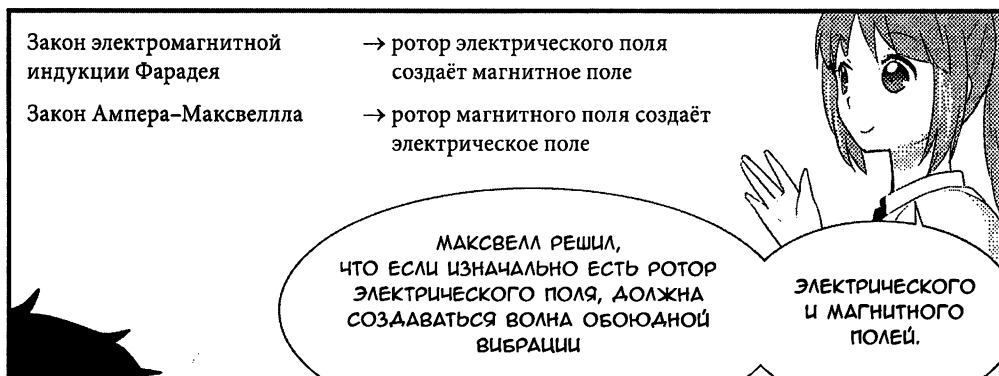
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
И МАГНИТНОЕ ПОЛЯ
СПОСОБНЫ
ПЕРЕДАВАТЬСЯ
В ВОЗДУХЕ В ВИДЕ
ВОЛН.

ЭТА ВОЛНА И ЕСТЬ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ.



О ГИПОТЕЗЕ ТОКА
СМЕЩЕНИЯ МЫ УЖЕ
ГОВОРИЛИ.

ПРО ЭТО ТОЖЕ МОЖНО СКАЗАТЬ
КАК "РОТОР МАГНИТНОГО ПОЛЯ
СОЗДАЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ".



Закон электромагнитной
индукции Фарадея

Закон Ампера–Максвелла

→ ротор электрического поля
создаёт магнитное поле

→ ротор магнитного поля создаёт
электрическое поле

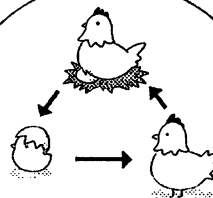
МАКСВЕЛЛ РЕШИЛ,
ЧТО ЕСЛИ ИЗНАЧАЛЬНО ЕСТЬ РОТОР
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ДОЛЖНА
СОЗДАВАТЬСЯ ВОЛНА ОБОЮДОЙ
ВИБРАЦИИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
И МАГНИТНОГО
ПОЛЕЙ.

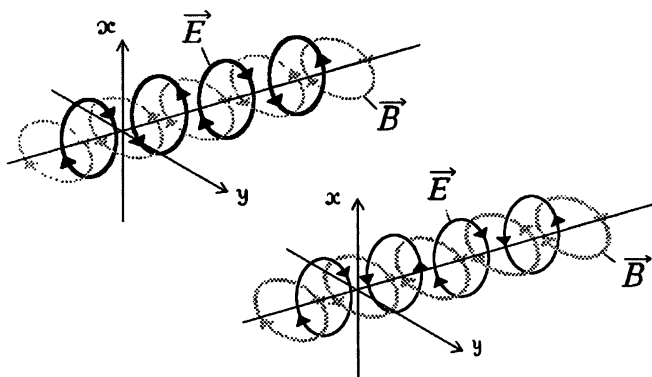


МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
СОЗДАЁТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ,
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
СОЗДАЁТ МАГНИТНОЕ...

ПОХОЖЕ
НА ДИСКУССИЮ
"ЧТО ВНАЧАЛЕ, КУРИЦА
ИЛИ ЯЙЦО?"



НА КАРТИНКЕ
БУДЕТ ВЫГЛЯДЕТЬ
ТАК.



На схеме представлено, как меняющееся электрическое поле создаёт магнитное поле, а магнитное поле создаёт электрическое поле. Внимание на то, что электрическое поле, созданное магнитным полем, созданным электрическим полем, направлено в противоположную сторону первому электрическому полю. Значит, эта система, по существу, способна на вибрацию.

ПРЕДСТАВИМ, ЧТО МАГНИТНЫЕ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ
В ВИДЕ КОЛЬЦА.

ЗДЕСЬ ЕСТЬ РОТОР
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
 $\text{rot} \vec{E}$

СЛЕДУЯ ЗАКОНУ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ
ФАРАДЕЯ, ЕСТЬ $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

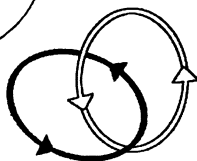
ЗНАЧИТ,
ЗДЕСЬ СОЗДАЁТСЯ
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

АА. ПОЯВИВШЕЕСЯ
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ БУДЕТ
ПРОХОДИТЬ ЧЕРЕЗ КОЛЬЦО
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.

СООТВЕТ-
СТВЕННО,

У МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ЕСТЬ РОТОР $\text{rot} \vec{H}$,
СЛЕДУЯ ЗАКОНУ
АМПЕРА-МАКСВЕЛЛА,

СУЩЕСТВУЕТ $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$



ЗНАЧИТ, ТЕПЕРЬ
ПОЯВЛЯЕТСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ
ПОЛЕ, НАПРАВЛЕННОЕ
ПРОТИВОПОЛОЖНО
ПРЕЖНЕМУ.





ого.

ИНТЕРЕСНОЕ
РАЗВИТИЕ.



ГЕРЦ, ЧЬИМ ИМЕНЕМ
НАЗВАНА ЕДИНИЦА ЧАСТОТЫ,
В 1888 ГОДУ УСПЕШНО
ПРОВЁЛ ЭКСПЕРИМЕНТ
И СУМЕЛ СОЗДАТЬ И ЗАСЕЧЬ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ.

К СОЖАЛЕНИЮ,
МАКСВЕЛЛ ПРИ ЖИЗНИ НЕ СМОГ
УЗНАТЬ ЭТУ НОВОСТЬ.



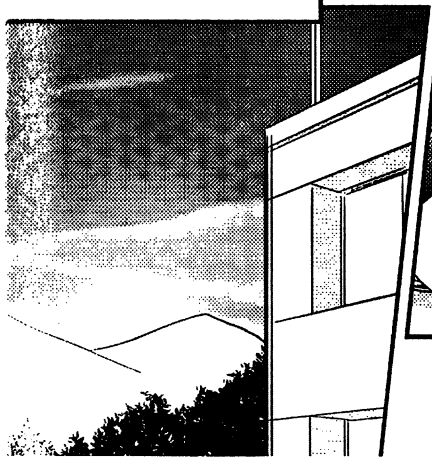
АХ...

ЖАЛЬ...

НО, НАВЕРНОЕ,
МАКСВЕЛЛ ЗНАЛ,

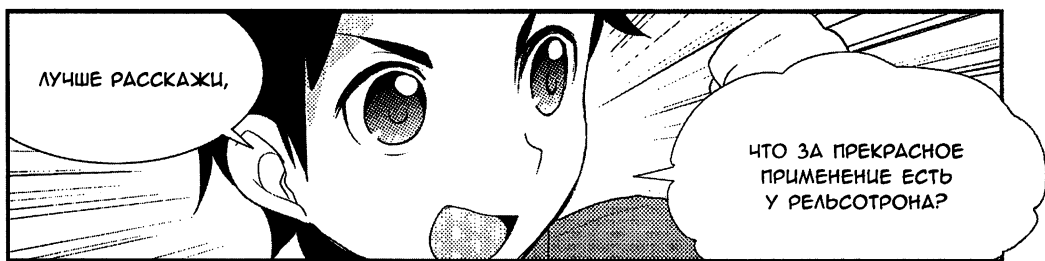
ЧТО ЕГО ОТКРЫТИЕ
ПРАВИЛЬНОЕ.

ВЕДЬ БОГ ЛЮБИТ
КРАСИВЫЕ ЗАКОНЫ.



НУ ЧТО Ж,
МОЯ ЛЕКЦИЯ
ЗАВЕРШЕНА.

И ТЫ, ДАНО,
БОЛЬШЕ МОЖЕШЬ
НЕ ВОЛНОВАТЬСЯ НА СЧЁТ
ВТОРОГОДНИЧЕСТВА.



А ТЕПЕРЬ ПОДРОБНЕЕ

⊕ Доказательство закона электромагнитной индукции

Закон электромагнитной индукции, открытый Фарадеем, – это необычный закон, ставящий знак равенства между двумя физическими величинами, на первый взгляд не имеющими ничего общего: криволинейным интегралом по произвольному замкнутому контуру от электрического поля и изменением по времени магнитного потока, проходящего сквозь этот контур. С помощью высшей математики можно доказать, что закон электромагнитной индукции Фарадея справедлив во всех случаях. Однако расчёты достаточно сложны. Поэтому давайте убедимся, что закон действительно верен, используя простые примеры.

На рис. 6.1 показано, как прямоугольный проводящий контур перемещается внутри магнитного поля. Левая и правая части контура находятся в разных магнитных полях. Предположим, что вектор магнитного поля направлен на читателя, величина обозначена: для левой части – B_1 , для правой части – B_2 .

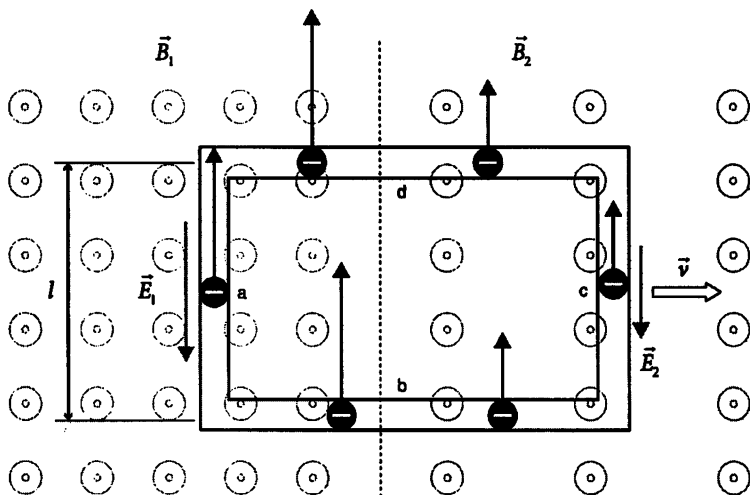


Рис. 6.1. Доказательство закона электромагнитной индукции Фарадея

Предположим, что контур движется в правую часть рисунка с определённой скоростью \vec{v} . Тогда на электроны внутри контура будет действовать сила Лоренца, создавая электрический ток. Если обозначить четыре стороны контура a, b, c, d , то сторо-

ны b и d не будут участвовать в создании электрического тока, так как сила Лоренца приложена перпендикулярно проводнику.

Что касается сторон a и c , сила Лоренца, действующая на электроны в них, будет вычисляться по формулам $\vec{F}_a = -e\vec{v} \times B_1$, $\vec{F}_c = -e\vec{v} \times B_2$ соответственно. Вектор движения тока направлен вдоль проводника.

Однако, с точки зрения человека, перемещающегося вместе с контуром, это выглядит как электрическое поле. Как мы уже указывали в комиксе, силу, воздействующую на электроны, одни люди посчитают силой Лоренца, другие – электрическим полем, появившимся в результате электромагнитной индукции. Тем не менее в конечном итоге сила воздействия на электроны окажется одинаковой. Так как связь силы, воздействующей на заряженные частицы, и электрического поля выражается формулами $\vec{F}_a = -eE_1$, $\vec{F}_c = -eE_2$, величину значений E_1 , E_2 можно рассчитать из величины силы Лоренца по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\text{сторона } a: -e\vec{v} \times \vec{B}_1 &= -e\vec{E}_1 \rightarrow E_1 = vB_1; \\ \text{сторона } c: -e\vec{v} \times \vec{B}_2 &= -e\vec{E}_2 \rightarrow E_2 = vB_2.\end{aligned}$$

Иными словами, величина электрического поля, приводящего в движение электроны на сторонах a и c , выражается величинами vB_1 , vB_2 .

Теперь давайте вычислим циркуляцию электрического поля против часовой стрелки вдоль проводника.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = E_1 l - E_2 l = vl(B_1 - B_2).$$

В левой части уравнения $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$ – криволинейный интеграл второго порядка, с помощью которого вычисляется внутреннее произведение вектора $d\vec{s}$ и электрического поля \vec{E} и суммируются значения вдоль всего контура. Так как внутреннее произведение электрического поля \vec{E} и $d\vec{s}$ имеет значения только на параллельных сторонах a и c , ответ будет $E_1 l - E_2 l$.

Если переписать эти данные для магнитного поля и упорядочить, получим

$$vl(B_1 - B_2).$$

Теперь обратим внимание на изменение по времени магнитного потока, окружённого контуром. Так как контур движется вправо со скоростью \vec{v} , каждую секунду он покрывает часть магнитного потока B_2 с правой стороны величиной vlB_2 , а с левой стороны высвобождает часть магнитного потока B_1 величиной vlB_1 . Следовательно, путем вычитания получаем изменение в секунду, равное $vl(B_2 - B_1)$. Оно будет совпадать со значением криволинейного интеграла электрического поля со знаком минус. Таким образом, закон электромагнитной индукции Фарадея может считаться доказанным.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_m}{dt}.$$

Кстати, в этом доказательстве заложена подсказка, позволяющая интуитивно понять закон электромагнитной индукции Фарадея. ЭДС индукции Eds на бесконечно

малом участке ds на промежутках a , c равна произведению площади nds , которую данный участок покрывает в секунду, на магнитное поле B .

Стоит посмотреть на это уравнение под другим углом, и мы легко сможем вычислить, сколько магнитных линий пересекает данный участок в секунду.

Если взять интеграл вдоль проводника, станет понятно, сколько силовых линий покрывается контуром и сколько высвобождается из него в секунду. Так как данное значение можно назвать значением криволинейного интеграла электрического поля \vec{E} , взятого по контуру витка, если связать эти два значения знаком равенства, мы действительно получим закон электромагнитной индукции Фарадея.

Доказательство закона Ампера-Максвелла

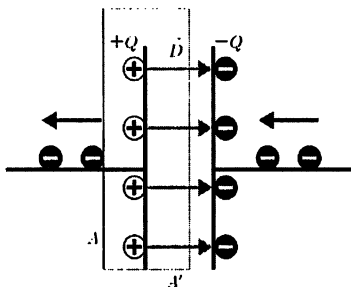


Рис. 6.2. Конденсатор во время зарядки.
Вид сбоку

В манге мы не использовали формул. Однако теперь давайте подробно разберём, почему закон Ампера-Максвелла верен, когда речь идёт о зарядке конденсатора. Процесс зарядки конденсатора в боковом разрезе изображён на рис. 6.2. Поверхность A – плоскость, пересекающая электроток. Поверхность A' охватывает конденсатор по бокам и параллельно пересекает пластины. Предположим, что в определённый момент количество заряда, скопившегося на пластинах, равно $\pm Q$. Теперь давайте применим закон Гаусса, где замкнутая поверхность, образованная плоскостями A и A' , будет являться гауссовой поверхностью. В случае с конденсатором можно сказать, что все электрические силовые линии, образованные зарядом на пластинах, будут проходить через поверхность A' , в то время как через поверхность A не будет проходить ни одна линия. Следовательно,

$$(\text{поверхность } A') = Q.$$

Как вы помните, поток напряжённости электрического поля, проходящий сквозь замкнутую поверхность, равен заряду, находящемуся в пределах этой поверхности. Если взять производную по времени от обеих частей уравнения и выразить левую часть как производную потока напряжённости по времени, то получим:

$$\frac{d}{dt} \Phi_e (\text{поверхность } A') = \frac{dQ}{dt}.$$

Левая часть уравнения выражает изменения по времени потока напряжённости электрического поля через поверхность A' , правая (dQ/dt) – увеличение электрического заряда, скапливающегося в конденсаторе. Так как положительный заряд, скапливающийся на левой пластине, равен объёму электронов, протекающих через поверхность A , dQ/dt равно току, проходящему через поверхность A . Таким образом, показано, что производная по времени потока напряжённости электрического поля через поверхность A' равна току, проходящему через поверхность A .

Принцип появления электромагнитных волн

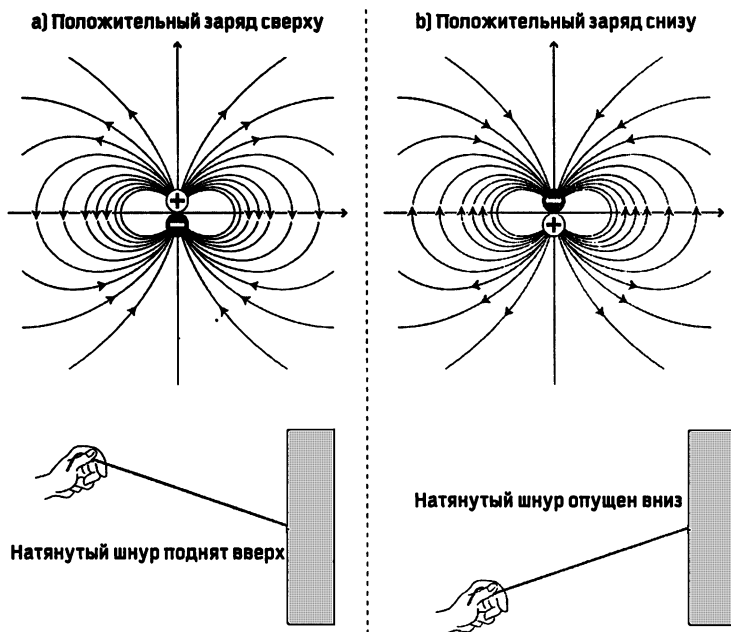


Рис. 6.3. Электрические поля, создаваемые электрическим диполем, и соответствующие им аналогии со шнуром

Классическая теория электромагнетизма окончательно сформировалась, когда Герц доказал существование электромагнитных волн, предсказанное Максвеллом. В действительности, если решить уравнение Максвелла, загадка о том, как электрические и магнитные поля передаются сквозь вакуум, будет разгадана. Однако анализ формулы потребует значительных математических навыков. Поэтому в этой книге мы попытаемся объяснить механизм возникновения электромагнитных волн образ-

но, без использования математических формул. В качестве исходного условия примем факт, известный из специальной теории относительности: ни одно воздействие не может передаваться со скоростью, превышающей скорость света.

Разместим отрицательный и положительный заряды в исходной точке рядом друг с другом, как показано на рис. 6.3. Такое положение называется электрическим диполем. Как мы уже объяснили в главе 3, атомы со смещёнными электронами являются одной из разновидностей электрических диполей. Если рассчитать электрические силовые линии, которые испускает вокруг себя электрический диполь, мы получим картину, как в части «а» рисунка. Если посмотреть сбоку, это будет выглядеть как ∞ , где силовые линии исходят из положительного заряда и поглощаются отрицательным.

Важный момент: положительный и отрицательный заряды немного сдвинуты относительно друг друга. Если они будут полностью накладываться, электрические силовые линии не появятся.

Если поменять положительный и отрицательный заряды местами, форма останется прежней, при этом поменяется направление электрических силовых линий. Можно уподобить их шнуру, привязанному к стене, как на нижнем рисунке. Почему именно, вы поймёте чуть позже.

Дальше давайте представим электрический диполь в виде груза с прикрепленной пружиной. Посмотрите на рис. 6.4. Если сначала натянуть, а потом отпустить пружину, груз будет вибрировать, прежде всего в точке равновесия. С точки зрения модели электрического диполя, это действие приведёт к поочередной смене положительного и отрицательного полюсов. Называться это явление будет дипольными колебаниями. Самый простой способ вызвать дипольные колебания – столкнуть между собой атомы. Так как «температура» показывает скорость неконтролируемого передвижения атомов, «горячие» атомы будут чаще сталкиваться друг с другом. Тогда электроны собираются в одном месте, в результате чего возникают дипольные колебания. Как мы говорили уже в разделе «А теперь подробнее» в главе 1, вещества с высокой температурой за счет колебаний атомов испускают электромагнитные волны видимого спектра. Это и есть дипольные колебания, о которых мы сейчас говорим.

Таким образом, электрические силовые линии, берущие начало в колеблющихся диполях, попеременно принимают позиции, как на рис. 6.3а и 6.3б. Представим себе наблюдателя, который находится на некотором расстоянии от диполя. Сможет ли он в тот же момент почувствовать, как поменялось

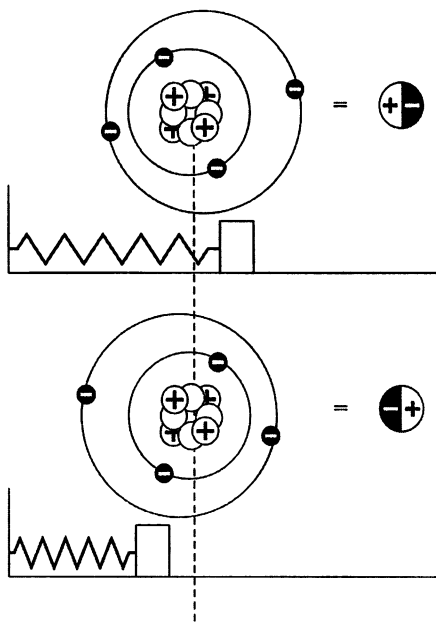


Рис. 6.4. Электрический диполь и аналогия с грузом на пружине

электрическое поле диполя? С точки зрения специальной теории относительности, изменение электрических силовых линий не является исключением и обладает определённой предельной скоростью. Электрические полюса, находящиеся в исходной точке, раз за разом меняются местами и испускают электрические силовые линии. Это воздействие не распространяется на все пространство мгновенно: заряд перемещается к отдалённым участкам с запозданием. В результате силовые линии как бы отрываются от заряда в момент, когда полюса меняются местами. Если бы это было неверно, выходило бы, что правила образования электрических силовых линий (глава 2) не выполняются. Оторвавшиеся силовые линии принимают форму круга и отдаляются от полюсов.

На рис. 6.5 показано, как выглядят сбоку электрические силовые линии, испускаемые быстро колеблющимся электрическим диполем. По подсчётам, скорость, с которой круги силовых линий отдаляются от диполя, будет совпадать со скоростью света в вакууме. Форма круга, которую принимают силовые линии, показывает, что линии не рассеиваются, то есть заряд существует только в начальной точке. Также форма круга означает присутствие $\text{rot}\vec{E}$, что говорит о возникновении магнитного поля $\left(-\frac{\delta\vec{B}}{\delta t}\right)$.

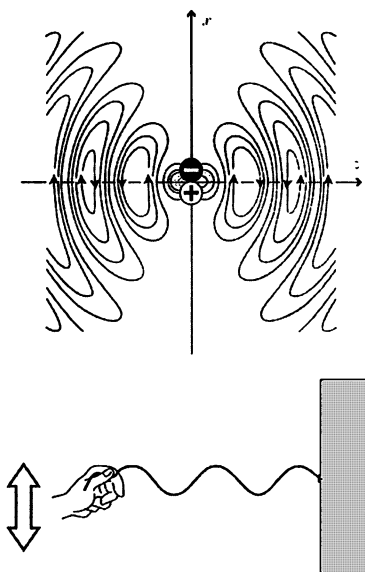


Рис. 6.5. Электрические силовые линии, образованные колебаниями электрического диполя, и колебания шнура

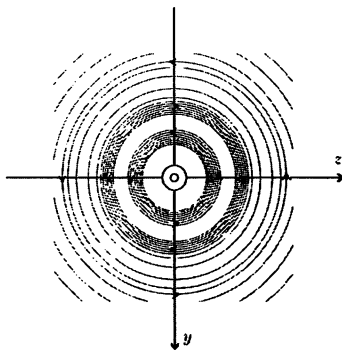


Рис. 6.6. Электрические силовые линии, образованные колебаниями электрического диполя

Теперь рассмотрим это же явление с точки зрения магнитного поля. Колебания диполя означают то, что заряд движется, а следовательно, возникает электрический ток. Если принять направление диполя за ось x , а направление тока – как направленное к оси x , можно расценивать заряд как элементарный участок электрического тока. Магнитное поле, образованное участками электрического тока, выражается законом Био–Савара. Если смотреть на участок электрического поля сверху (прямо со стороны оси x), направление движения магнитного поля в случае, когда ток направлен от поверхности бумаги наверх, будет против часовой стрелки, в случае, когда ток направлен сверху вниз к поверхности бумаги, – по часовой стрелке. Изменение магнитных силовых линий, возникших под влиянием тока, как и в случае с электрическими силовыми линиями, будет передаваться с некоторой предельной скоростью. В результате магнитное поле, возникшее благодаря колебаниям участков электрического тока, будет представлять собой разнонаправленные друг к другу концентрические витки, как показано на рис. 6.6. Наверное, вы уже поняли, что магнитные силовые линии проходят через витки электрических линий, изображённых на рис. 6.5.

Как понятно из разъяснения выше, колеблющийся диполь испускает колеблющиеся электрическое и магнитное поля, или, иными словами, электромагнитные волны. Интересной будет также аналогия с колебанием струны. Вернемся к рис. 6.3. Представим, что электрическое поле вокруг диполя – это натянутый шнур, который мы подняли. Когда поля меняются местами, шнур опускается вниз, при этом он остается натянутым. Если повторять это действие на большой скорости, то мы увидим волну, как на рис. 6.5. Свойство электрических силовых линий становится как можно короче похоже на натяжение шнура. Поэтому у этих двух явлений так похож механизм возникновения колебаний. В наше время дать такое объяснение просто, так как известно, что уравнения Максвелла и специальная теория относительности признаны верными. Однако додуматься до такого для ученого XIX века заслуживает большой похвалы.

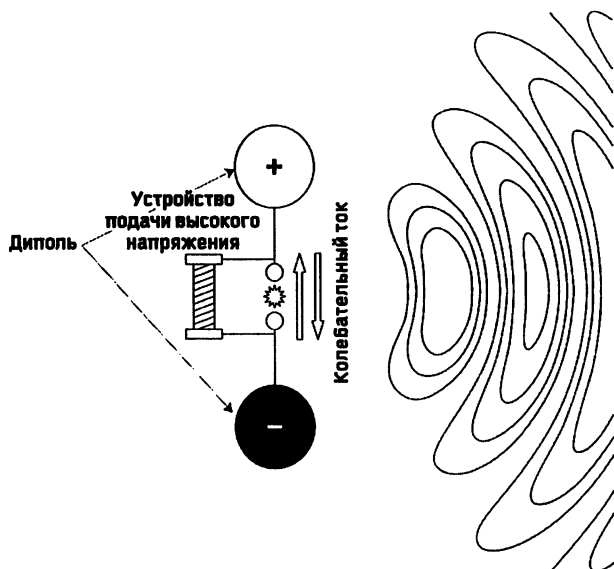


Рис. 6.7. Эксперимент Герца
(электрические силовые линии отображены неточно)

Здесь в качестве примера мы привели атом. Однако добиться появления электромагнитных волн можно и с помощью колебаний свободных электронов в проводниках. Герц впервые создал искусственную электромагнитную волну с помощью устройства, показанного на рис. 6.7. Контур, создающий переменный ток под высоким напряжением, связан с устройством из двух металлических шаров, показанным на рисунке. От шаров отходят провода, между которыми есть небольшие зазоры. Если подать колебательное напряжение, в этих зазорах образуется электрический разряд, и по проводам пойдет колебательный ток. Тогда в шарах попеременно будут накапливаться отрицательный и положительный заряды. Это и есть колебания диполя. Длина возникших электромагнитных волн будет несколько метров. Обнаруживаются они именно благодаря тому, что между витками проводника радиусом в несколько метров были оставлены небольшие зазоры. Когда колебания электромагнитных волн индуцировали в витках ток, учёный увидел в зазорах электрические разряды в виде искр.

В наше время известно множество проводников, способных эффективно испускать электромагнитные волны с помощью электрического диполя. Обычно мы называем их антеннами.

Электромагнитные волны называются по-разному в зависимости от частоты колебаний. Соответствие частоты колебаний и названий приведено на рис. 6.8. Частота колебаний электромагнитных волн определяется частотой колебаний заряда, который является их источником. Электромагнитные волны из спектра радиоволн длиннее инфракрасных образуются по большей части электрическим током, в то время

как источник видимых световых и ультрафиолетовых волн – колебание электронов, вращающихся вокруг ядер атомов. Так как скорость электромагнитных волн в вакууме, как будет разъяснено позже, всегда равна $3,0 \times 10^8$ м/с, длина волны будет вычисляться по формуле:

$$c = f\lambda,$$

где c – скорость света (м/с);

f – частота колебаний электромагнитной волны (колебаний/с);

λ – длина электромагнитной волны (м).

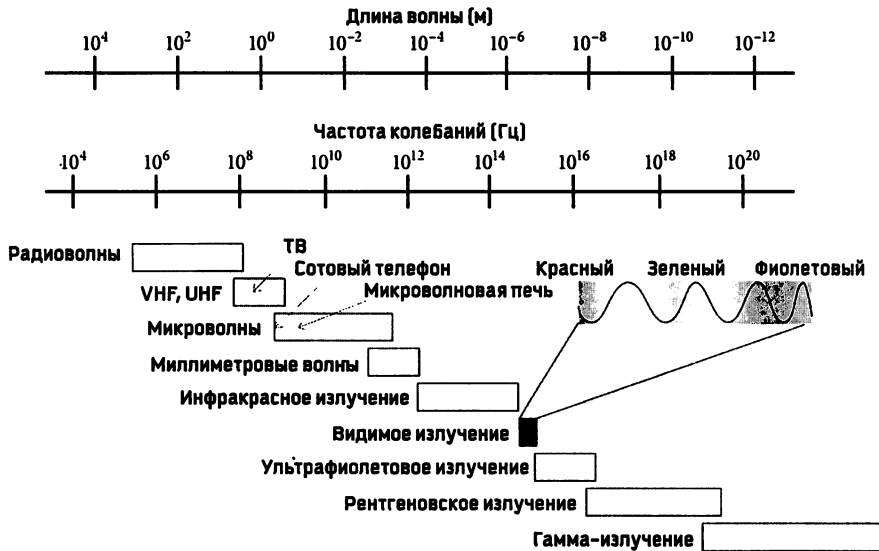


Рис. 6.8. Название волн в соответствии с длиной волны и частотой колебаний

ШАГ ВПЕРЁД

⊕_e Скорость электромагнитных волн и определение метра

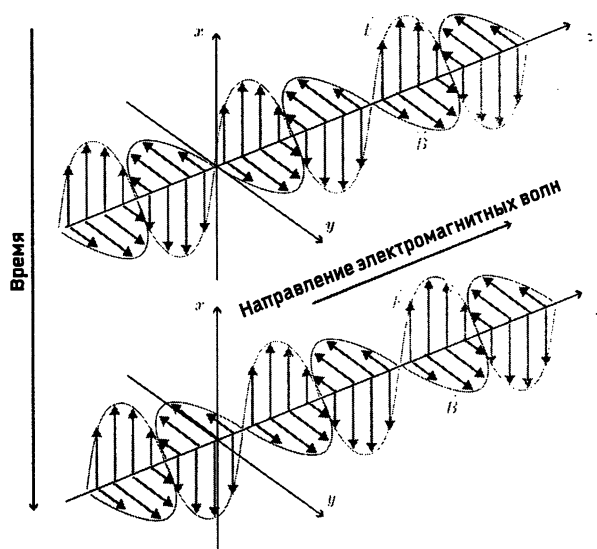


Рис. 6.9. Векторное отображение электрического и магнитного полей на оси z , по которому в направлении z передаются электромагнитные волны. С течением времени волны продолжают двигаться вдоль оси z , не меняя своей структуры

Когда электрическое и магнитное поля будут находиться достаточно далеко от электрического диполя (рис. 6.5), их изменения вдоль оси z будут такими, как показано на рис. 6.9. Электрическое поле вдоль оси x и магнитное поле вдоль оси y , образующие электромагнитные волны, распространяются в пространстве в форме синусоиды. Скорость распространения волн выводится из формулы Максвелла, в которой диэлектрическая проводимость обозначается ϵ , а магнитная проницаемость — μ :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

Раньше было загадкой, что на самом деле представляет собой свет, а измерение скорости света было темой передовых исследований физиков. Один из экспериментальных методов определения скорости света показан на рис. 6.10. Этот метод был

разработан Арманом Физо. В нём используются источник света, линза, зеркало и быстро вращающаяся шестерня.

Свет из источника проходит через линзу, становится лучом и после отражения в полупрозрачном зеркале через зубцы шестерни направляется к зеркалу, которое находится на расстоянии нескольких километров (l). Когда шестерня не движется, свет, отразившись в зеркале, снова проходит через зубцы шестерни и достигает наблюдателя, находящегося за полупрозрачным зеркалом.

Далее начинаем быстро вращать шестерню. В этом случае свет, сначала прошедший между зубцами шестерни, после отражения в зеркале не может снова пройти через зубцы из-за вращения шестерни. Время прохождения светом расстояния l в оба конца, когда наблюдаемый свет виден хуже всего, будет вычисляться по формуле:

$$\Delta t = \frac{1}{2Gr},$$

где G – количество зубцов;

r – количество оборотов (об/с).

Остается разделить $2l$ на Δt , и мы получим скорость света.

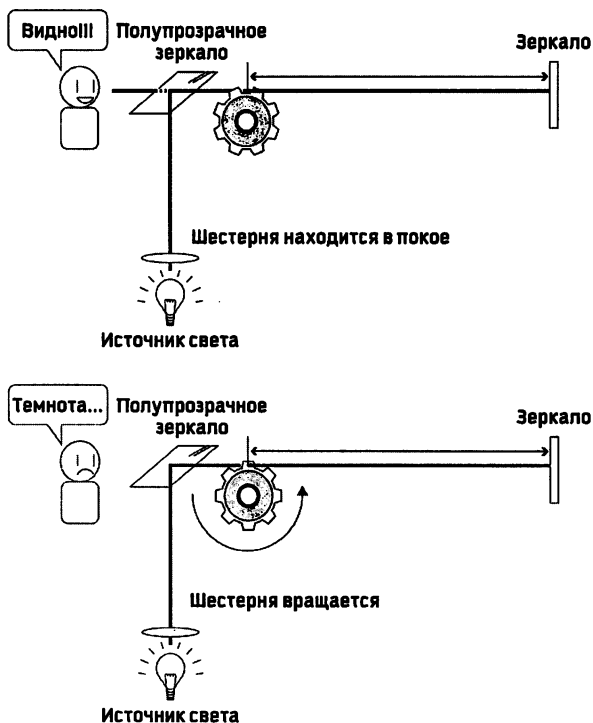


Рис. 6.10. Пример измерения скорости света (опыт Физо)

С помощью многочисленных постепенных экспериментов того времени удалось установить, что скорость света составляет $3,0 \times 10^8$ м/с. Так как результаты экспериментов с точностью совпали со скоростью света, выводимой из формул Максвелла, впервые стало понятно, что свет представляет собой разновидность электромагнитных волн.

Когда в роли среды выступает вакуум, мы обозначаем скорость света специальной константой c со значением «скорость света в вакууме». ϵ_0 , μ_0 – константы вакуума. Считается, что значение скорости света в вакууме универсально, то есть неизменно в любой момент времени и в любой точке вселенной. Если рассчитать его, мы получим 299 792 458 м/с.

Тщательные подсчеты скорости света продолжились и после того, как стало известно, что представляет собой свет. В 1980-е гг. удалось достигнуть точности в более чем 10 цифр после запятой, а в 1983 г. исследованиям был положен конец, так как было дано определение понятию «1 метр».

Определение понятия «1 метр»

1 метр – расстояние, которое проходит электромагнитная волна в вакууме за $1/299\,792\,458$ с.

С этим определением подсчёты скорости света потеряли смысл.

Использование скорости света для определения понятия «метр» объясняется тем, что она неизменна и зависит только от свойств вакуума, а также тем, что при соблюдении определённых условий эти значения может воспроизвести любой человек. В какой-то момент возникла дискуссия, уместно ли употреблять для определения универсального понятия другую единицу измерения «секунда». Однако пока что лучшего способа найти не удалось, да и вряд ли найдётся в будущем. В то же время мы достигли большего прогресса в определении понятия «секунда» благодаря использованию лазера: уже совсем скоро появятся атомные часы, определяющие время с точностью до 18-го порядка. Это означает, что мы сможем измерить время существования вселенной с точностью до долей секунды.

Принципы работы генератора и электродвигателя

На рис. 6.11 доступно показан принцип работы генератора. Генератор состоит из катушки, помещенной в магнитное поле, и токосъёмного кольца, снимающего с катушки электрический ток. К катушке подведён вращающий её привод. Когда катушка находится между положениями (1) и (2) (см. рисунок), магнитный поток, проходящий через катушку, возрастает с увеличением скорости её вращения.

Согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, возникает ток. Его направление показано стрелкой и противоположно вектору увеличения магнитного потока.

Так как токосъёмное кольцо соединено с лампочкой, если мы замкнем цепь, пойдёт ток, и лампочка загорится. Иными словами, энергия движения преобразуется

в электрическую энергию. Если не замкнуть цепь, ток не пойдёт, одновременно с этим не возникнет и сопротивления вращению генератора (за исключением потерь от трения). Думаю, вы заметили, что крутить педали становится тяжелее, если включить фонарик на велосипеде? Это хороший пример из повседневной жизни, что всякая энергия имеет свою цену.

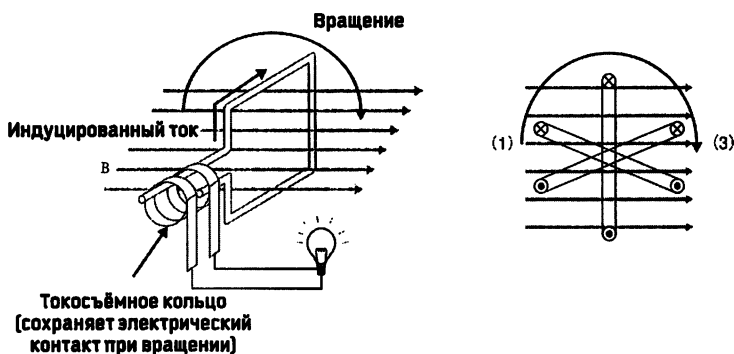


Рис. 6.11. Принцип работы генератора

Теперь представьте, что катушка вращается между перпендикулярными позициями (2) и (3). В этом случае магнитный поток ослабевает. Поэтому электродвижущая сила индукции идёт в обратном направлении. Показанный здесь прибор – генератор переменного тока, в котором ток идёт в направлении, противоположном вращению. Можно легко сконструировать генератор постоянного тока: стоит только изменить форму токосъёмного кольца. Однако, так как переменный ток позволяет легче менять напряжение с помощью трансформатора (другой прибор, использующий принцип электромагнитной индукции), такое свойство генератора будет даже на руку. Именно поэтому практически все современные источники питания, включая домашние, работают на переменном токе.

Теперь запустим ток по катушке, находящейся в покое. Тогда катушка будет испытывать воздействие магнитного поля, направление которого будет совпадать с направлением вращения оси. Взглянем на позицию (1) на рис. 6.11. Получается, что двигатель и генератор имеют абсолютно одинаковую конструкцию и являются преобразователями энергии с противоположной направленностью. Это очень полезное свойство было открыто совершенно случайно. На одной из выставок в 1873 г. была запланирована демонстрация генератора. Генератор начал вращаться после того, как его по ошибке подключили к питанию, – именно тогда выяснилось, что генератор может быть еще и двигателем. Гибридные автомобили, популярные в последнее время, для разгона используют двигатель, а при снижении скорости без торможения за счёт вращения колес в них вырабатывается электроэнергия, направляемая в аккумулятор. Всё это позволяет экономить энергию. Конечно же, в гибридных автомобилях не используется специальный генератор: его функции выполняет двигатель.



Индукционная плита и электромагнетизм

В наше время индукционную плиту можно увидеть на каждой кухне. Это необычный прибор: стоит поставить на плоскую стеклянную поверхность кастрюлю, и она начнёт разогреваться. Как видно из названия, кастрюля разогревается с помощью явления электромагнитной индукции, вызванной магнитным полем катушки внутри плиты. Пожалуй, такого объяснения хватило бы начинающим. Но мы с вами уже довольно неплохо разбираемся в электромагнетизме, поэтому давайте, используя закон электромагнетизма, разберём подробнее, как устроена индукционная плита.

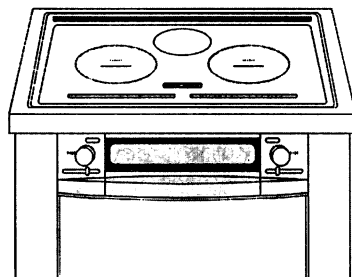


Рис. 6.12. Индукционная плита

Под стеклянным покрытием плиты находится катушка, как на рис. 6.13. Так как удельная магнитная проницаемость стекла почти равна 1, можно сказать, что для магнитного поля его практически не существует. Следовательно, фактически речь идет о магнитном поле, производимом катушкой, и металле (дно кастрюли), помещённом в это поле.

Вокруг катушки появляется магнитное поле, как показано на рис. 6.14. Следовательно, магнитный поток пересекает дно кастрюли радиально от его центра. Давайте вспомним, что чаще всего дно кастрюли железное. Сила магнитного поля зависит

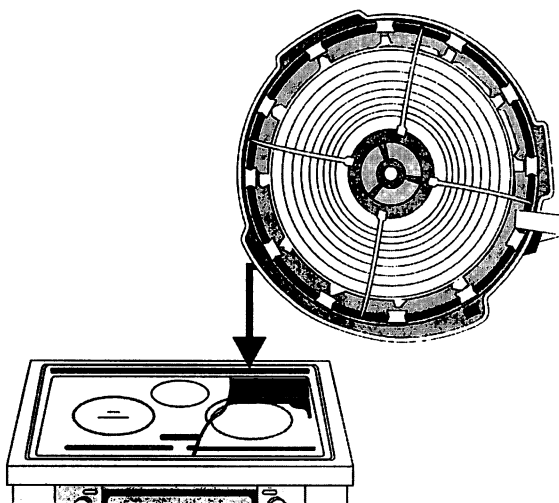


Рис. 6.13. Сразу под стеклянным покрытием находится катушка

только от тока, проходящего через катушку. Однако так как железо обладает большой удельной магнитной проницаемостью μ , магнитный поток, проходящий через него и вычисляющийся по формуле $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, в несколько раз сильнее, чем если бы поток проходил через вакуум или стекло.

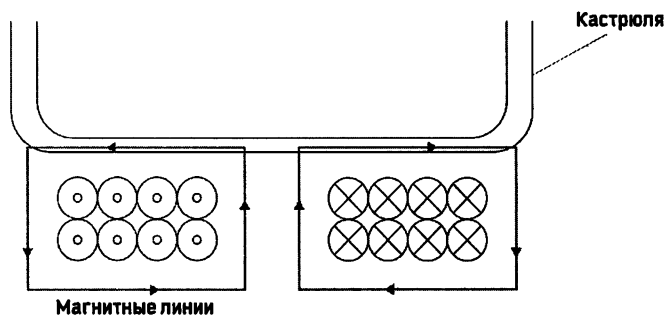


Рис. 6.14. Взаимодействие магнитных волн и дна посуды в индукционной плите

Ток, проходящий через катушку, – переменный и меняется в диапазоне частот в несколько десятков кГц. Это очень важный момент. Так как магнитный поток, проходящий через дно кастрюли, меняется во времени, согласно закону электромагнитной индукции Фарадея, возникает электрическое поле. Так как же распределяется это электрическое поле? Закон электромагнитной индукции Фарадея, выраженный в дифференциальной форме, гласит, что когда магнитная индукция меняет величину без изменения направления, вокруг линий магнитного потока образуется спиралевидное электрическое поле. Так как при взаимном пересечении соседние спирали исчезают, электрическое поле образуется как бы кругами по дну кастрюли, главным образом вдоль её поверхности.

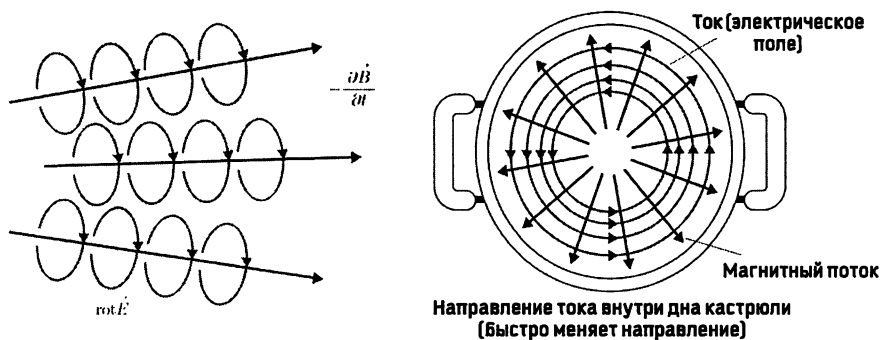


Рис. 6.15. Электрическое поле (светлые линии), обвивающее изменяющийся магнитный поток (темные линии). Пучок электрических силовых волн совершает круговое движение по дну кастрюли. Ток идёт вдоль электрического поля

В заключение давайте вспомним закон Ома: $\vec{i} = \sigma \vec{E}$. Когда в проводнике появляется электрическое поле, по нему начинает идти ток. Свободные электроны в металле, из которого состоит дно кастрюли, перемещаются под воздействием электрического поля и активно сталкиваются с атомами металла. Эта энергия превращается в Джоулево тепло, которое и нагревает кастрюлю. Если преобразовать формулу $P = IV$, Джоулево тепло на единицу объема для куба со стороной L будет равно:

$$\frac{P}{L^3} = \frac{I}{L^2} \times \frac{V}{L} = \vec{i} \cdot \vec{E} = \sigma |\vec{E}|^2.$$

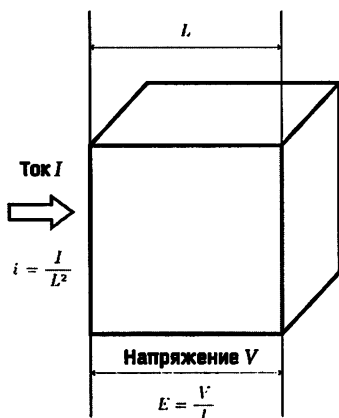


Рис. 6.16. Расчёт выделяемого тепла на единицу объема в кубе, через который проходит равномерный ток

Теперь понятно, что механизм разогрева индукционной плиты связан с разными законами электромагнетизма. А раз вы уже знаете принцип работы индукционной плиты, ответить на следующие вопросы для вас не составит труда.

Вопрос: почему для индукционной плиты нужна специальная посуда?

Ответ: для появления эффективной электромагнитной индукции лучше всего подходит материал с большой магнитной проницаемостью, который позволит силе магнитного поля H в катушке индуцировать большой ток смещения B . К примеру, ферромагнитное железо. Алюминий, бронза и другие металлы с удельной магнитной проницаемостью, близкой к 1,0, гораздо хуже подходят для проявления индукций. Тем не менее в последнее время разрабатываются индукционные плиты, с которыми за счёт изменений в частоте тока и конструкции катушки можно использовать алюминиевые кастрюли. Удельная магнитная проницаемость стекла и керамики тоже 1.

Однако, так как индуцированный ток не может проходить по этим материалам, разогреть их невозможно в принципе.

Вопрос: почему индукционные плиты считаются более экономичными, по сравнению с газовыми?

Ответ: источником тепла в индукционных плитах является индуцированный ток. Это значит, что разогревается только дно кастрюли. С точки зрения закона сохранения энергии, вся потребляемая катушкой электроэнергия, за исключением сопротивления катушки, идёт на разогрев дна кастрюли. Поэтому издержек использования энергии нет. В то же время газовая плита, кроме кастрюли, также разогревает саму плиту и окружающий воздух, что является издержками использования энергии.

Вопрос: у индукционной плиты есть недостатки?

Ответ: кроме невозможности использовать кастрюли из разных материалов, недостатком индукционных плит является то, что кастрюля должна соприкасаться с катушкой. Ток не будет индуцироваться, если дно кастрюли не находится в сильном магнитном поле; а сила магнитного поля обратно пропорциональна расстоянию до катушки. Поэтому круглая посуда вроде китайских котелков или, наоборот, посуда с поднятым дном будет нагреваться плохо. В конечном итоге с индукционной плитой лучше всего использовать специальную посуду. Не стоит также забывать, что во время готовки нельзя двигать посуду или использовать кулинарные техники: наклонять сковороду, перетряхивать её содержимое и т. д. Индукционные плиты в принципе пригодны для разогрева только специальной посуды, поэтому они не подходят, к примеру, для запекания. В связи с этим гриль для обжарки рыбы в индукционных плитах представляет собой обычную электропечь.

Что общего у «Гарри Поттера», «Дораэмона» и «Призрака в доспехах» (этот фантастический сериал известен не так широко)? Конечно же, плащ-невидимка, или, другими словами, оптическая маскировка. Есть ещё человек-невидимка. Только его существование никак научно не обосновано, в то время как оптическая маскировка – предмет серьёзных исследований.

С точки зрения света или электромагнитных волн, вещество определяется как нечто с диэлектрической и магнитной проницаемостью, отличной от вакуума. Почему мы видим предметы? Дело в том, что солнечный свет при контакте с предметами или, иными словами, поверхностью, чья диэлектрическая и магнитная проницаемость отличается от воздуха, отражается в разные стороны и тем самым сигнализирует о наличии предмета. Что же происходит, когда свет полностью поглощается? Так как свет не отражается, мы понимаем, что там находится чёрный предмет. Кстати, популярные в последнее время истребители с технологией стелс добиваются этого эффекта с помощью диапазона частот. А так как наш мир в диапазоне частот радара – абсолютно тёмный, отличить самолет, не отражающий радиоволн, от окружения невозможно.

Если ϵ и μ такие же, как окружение, предмет будет «прозрачным». Хороший пример – агар-агар в «мицуме».

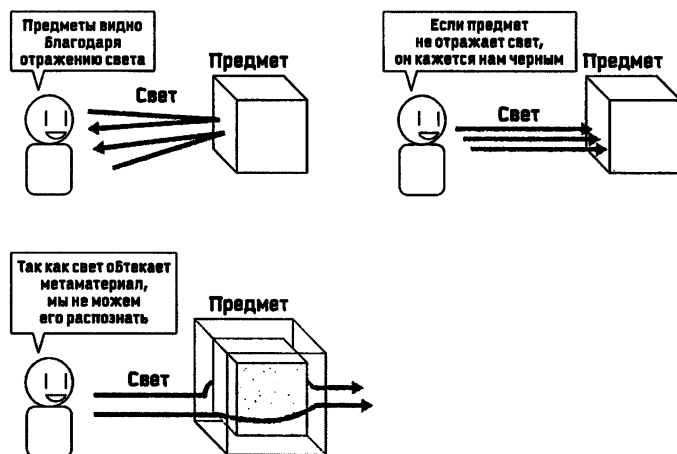


Рис. 6.17. Как сделать предмет невидимым

Тогда как же сделаться невидимым при солнечном свете? Для этого достаточно надеть такой плащ, вдоль поверхности которого свет будет искривляться. Так как свет, обтекая поверхность плаща, отразится от предметов сзади и вернется обратно, никто не заметит, что вы там. Но реальна ли такая магия в настоящей жизни? Оказывается, в последние десять лет наметился большой прогресс в исследовании особых материалов, которые называют метаматериалами, и теперь мы знаем, что такая «магия» принципиально осуществима.

Метаматериал (рис. 6.18) – это вещество с отрицательным коэффициентом преломления электромагнитного излучения и сложной структурой, которая создаётся искусственно на основе детальных расчётов. В основе теории метаматериалов лежит наша тема, то есть уравнения Максвелла, открытые 150 лет назад.

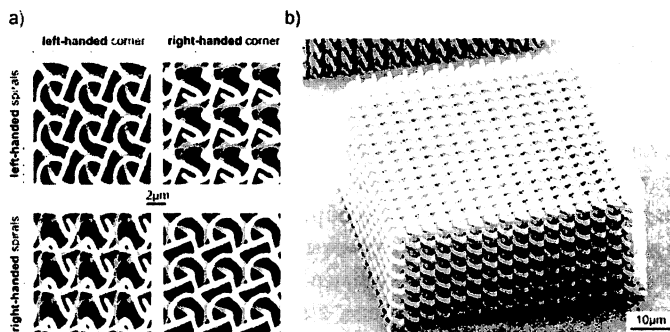


Рис. 6.18. Образец современного метаматериала

С точки зрения электромагнитных волн, вещества с микроскопической структурой, меньшей по размерам, чем длина волны, не отличаются от однородных веществ с определёнными диэлектрической и магнитной проницаемостью. Учёные открыли, что некоторые виды структур могут иметь отрицательную диэлектрическую и магнитную проницаемость. Вспомним формулу скорости электромагнитных волн. В вакууме она будет $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, в веществе $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$ (ϵ , μ означают диэлектрическую и электромагнитную проницаемость).

Так как у веществ с электропроводимостью, к примеру металлов, содержание квадратного корня будет отрицательными, можно прийти к выводу, что свет по ним передаваться не может. Теперь рассмотрим случай, когда и ϵ , и μ имеют отрицательное значение. Минус на минус дает плюс. Это значит, что, в принципе, свет может передаваться в подобных веществах. Интересно, что передаваться он будет диаметрально противоположным способом в сравнении с тем, к которому мы привыкли. Если говорить конкретнее, свет преломляется о поверхность с отличающимся коэффициентом рефракции, в то время как лучи света, падающие на поверхность метаматериала, преломляются в противоположном направлении.

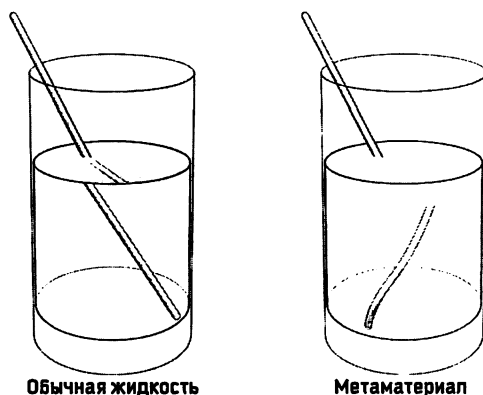



Рис. 6.19. Если бы существовал жидкий метаматериал, то свет в нем преломлялся бы так

Используя это свойство, принципиально возможно создать некую плёнку из вещества, поверхность которого свет будет как бы обтекать. Наибольшего прогресса в этой области добились США. Пентагон обратил внимание на военную ценность метаматериалов и вкладывает огромные суммы в стимулирование исследований в университетах. И свет, и микроволны – пример электромагнитного излучения. Так как длина микроволн большая – около 10 см, а структура метаматериалов может измеряться в миллиметрах, в технологическом плане данные исследования несложны. В 2006 году группа учёных из американского Университета Дьюка изготовила первый в мире плащ-невидимку в диапазоне микроволн, наделавший тогда много шума в мире.

Производство полупроводников, ставших основой компьютеров, и транзисторов было бы невозможно без квантовой механики, открытой в XX веке. Однако для понимания теории метаматериалов достаточно знания уравнений Максвелла. Получается, в основу магической технологии XXI века легла теория, обоснованная 150 лет назад. Кто знает, может быть, в фильме про Гарри Поттера использовались настоящие метаматериалы.

*«Любая достаточно развитая технология неотличима от магии»
(выдающийся фантаст XX века Артур Чарльз Кларк).*



САМАЯ БОЛЬШАЯ ПРОБЛЕМА
В ОСВОЕНИИ КОСМОСА -
ЭТО РАСХОДЫ.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ
КАТАПУЛЬТА?

НО ЕСЛИ БУДЕТ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ
КАТАПУЛЬТА, КОСМОС
СТАНЕТ ГОРАЗДО
БЛИЖЕ.

ПРОЩЕ ГОВОРЯ, ЭТО ПРИБОР,
КОТОРЫЙ РЕЛЬСОТРОНОМ
УСКОРЯЕТ ГРУЗ
И ВЫСТРЕЛИВАЕТ В КОСМОС.



КАКОЙ МОЩНЫЙ
ЗАМЫСЕЛ.

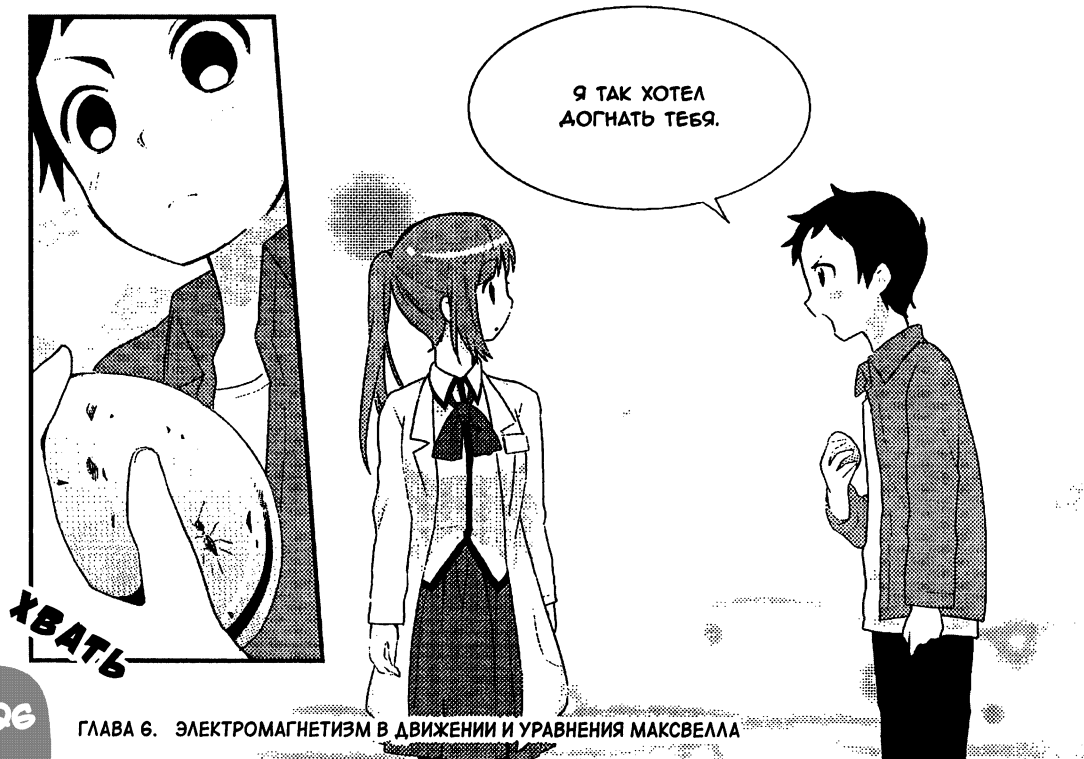
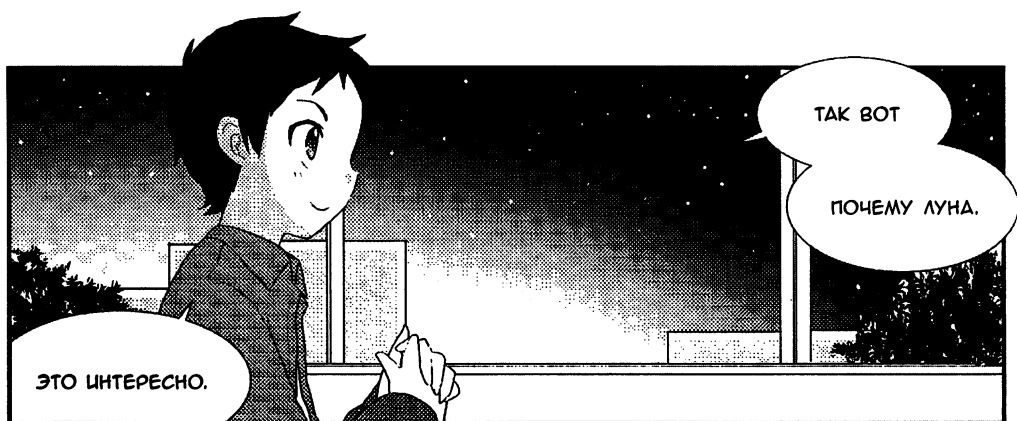
И ЭТО ТЫ ХОЧЕШЬ
РЕАЛИЗОВАТЬ?



ДА, НА ЛУНЕ.

НА ЛУНЕ, ГДЕ МАЛО
РЕСУРСОВ, ЗАПУСТИТЬ РАКЕТУ
ГОРАЗДО СЛОЖНЕЕ,
ЧЕМ НА ЗЕМЛЕ.

НО, ПОСТРОИВ ОДИН РАЗ
РЕЛЬСОТРОН, ТОЛЬКО
С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
МОЖНО ЗАПУСТИТЬ В КОСМОС
БОЛЬШОЕ КОЛИЧЕСТВО ГРУЗА.



- В НЕДАЛЁКОМ
БУДУЩЕМ

ЗАПУЩЕННЫЕ ОТСЮДА
МАТЕРИАЛЫ БУДУТ
ИСПОЛЬЗОВАНЫ
В ОСВОЕНИИ МАРСА.

А ПОТОМ
ОЧЕРЕДЬ
ЮПИТЕРА.

БЛАГОДАРЯ ТЕБЕ...

НУ, НА 18 ГДЕ-ТО.

НАЧАЛИ
С РЕЛЬСОТРОНА...

И СКОРО МЕНТА
СБУДЕТСЯ.

В НЕДАЛЁКОМ БУДУЩЕМ

ПРИЛОЖЕНИЕ

ВЕКТОРЫ И СКАЛЯРЫ





Что такое векторы?

Характеристиками объекта, с которыми имеет дело физика, являются «длина», «масса» и другие, но только «измеряемые величины». Они называются «физические величины». К сожалению, такие характеристики, как «интересный» или «красивый», не могут считаться физическими величинами. Кроме того, физические величины можно разделить на «векторные величины» и «скалярные величины».

Скалярная величина – это физическая величина, для характеристики которой достаточно её количественного значения. Например, каждая из трёх наиболее фундаментальных величин в физике – «длина», «масса», «время» – является скалярной величиной. Если говорить о том, что такое «векторная величина», то это «физическая величина, которая имеет величину и направление». Приведём конкретный пример. Ты стоишь на площадке на поле для игры гольф, при этом дует сильный ветер. Для того чтобы определить силу и направление ветра, ты срываешь травинку и выпускаешь её в воздух. Для того чтобы совершить меткий удар, тебе ведь нужно не только правильно оценить, насколько силен ветер, но и в каком направлении он дует. Таким образом, векторной величиной называется величина, которую нельзя определить только характеристиками величины.

Среди физических величин, с которыми имеет дело электромагнетизм, очень много векторных величин. Следовательно, для того чтобы понимать электромагнетизм, крайне необходимо понимать, что такое векторы. И это «понимать» означает не просто «формально запомнить», а суметь чётко представить в своей голове вектор. Однако физические величины, которыми оперирует электромагнетизм, сложно представить, поскольку они невидимы глазу. Так что в качестве начального упражнения представим себе, что вектор – это видимая величина. Физическая величина, которая учитывает не только скорость передвижения объекта, но и направление его движения, является «вектором скорости». Для того чтобы наглядно изобразить вектор, используют обозначение стрелки, как показано на рис. А.1. В данном случае направление стрелки обозначает направление движения, а длина стрелки – скорость движения. Критерии размеров определяются произвольно, здесь важно, чтобы «размер стрелки был пропорционален скорости движения». Теперь мы будем называть начало вектора «начальной точкой», а конец вектора – «конечной точкой».

Схематически вектор обозначается следующим образом: над буквенным обозначением вектора пишется стрелка: «вектор \vec{A} ». Здесь особо подчеркнём, что информа-



Рис. А.1. Вектор скорости

ция, которую несёт вектор, – это «направление» и «величина»; место, откуда он начинается, не оказывает никакого воздействия на векторную величину. Следовательно, вектор может свободно совершать параллельное перемещение.

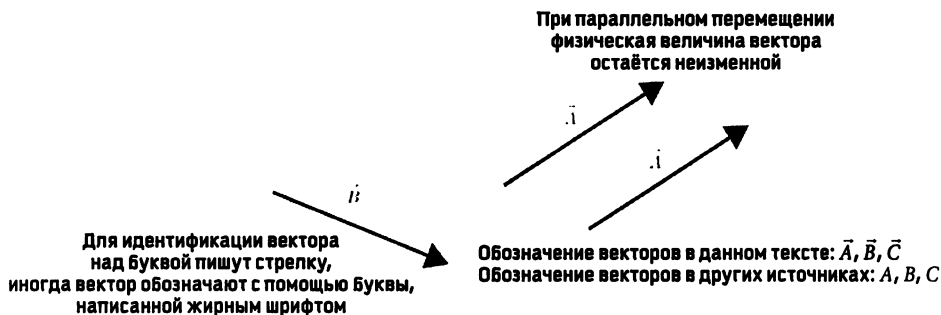


Рис. А.2. Символическое обозначение векторов

Положение точки в пространстве также является векторной величиной. Вектор точки A , за величину которого берётся расстояние от начальной точки вектора до точки A , а направление к точке A , если смотреть от начальной точки, называется «радиус-вектор», который изображается стрелкой, протянутой из точки координат к точке A на рис. А.3. Конечно, радиус-вектор, как и другие векторные величины, не изменяет своей сути при параллельном перемещении.

Возможно, прочитав это, люди, изучавшие краткий курс физики в старшей школе, подумают: «Вот ещё! Ведь при воздействии на физическое тело исходная точка будет отличаться в зависимости от места приложения воздействия». Здесь бы нам хотелось, чтобы вы вспомнили о том, что в школьном курсе физики вы рассматривали объект как точку, не имеющую размера. А именно только для удобства важно – нажали ли на кирпич или потянули его, но если рассматривать физический объект как точку, то если векторы силы одинаковы, то одинаковы и рождающиеся при этом результаты воздействия. Итак, если говорить о том, в какой момент становится важной точка приложения силы, то это момент, когда мы рассматриваем движение имеющего величину тела по «принципу рычага». В этом случае определяется радиус-вектор, указывающий на «место воздействия».

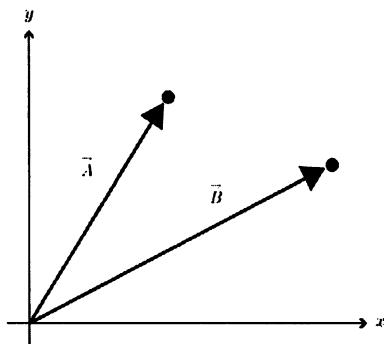


Рис. А.3. Понятие «радиус-вектора»

Тогда действие, прилагаемое к телу, будет являться «внешним произведением» «радиус-вектора» и «вектора силы» (это понятие будет подробно объясняться далее) и называться физической величиной «вращающий момент». Этим можно чётко объ-

яснить, что даже если сила будет одинаковой, результат может отличаться, и можно удовлетвориться правилом, что вектор, который называется «силой», при параллельном перемещении не меняет своих характеристик.

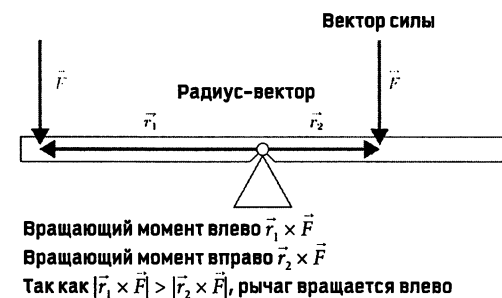


Рис. А.4. Радиус-вектор и вращающий момент

Векторные величины, так же как и скалярные величины, могут складываться и вычитаться. Однако это не простое сложение и вычитание, а действия по несколько сложным правилам. При сложении вектора \vec{A} и вектора \vec{B} , как показано на рис. А.5, соединятся конечная точка вектора \vec{A} и начальная точка вектора \vec{B} , при этом соединение начальной точки вектора \vec{A} и конечной точки вектора \vec{B} считается суммой векторов $\vec{A} + \vec{B}$.

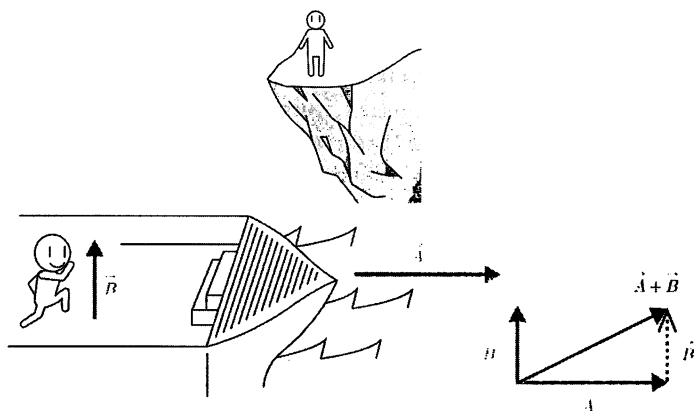


Рис. А.5. Сложение векторов

Подумаем, какому явлению в действительности соответствует такое действие сложения. На теплоходе, идущем со скоростью вектора \vec{A} , бежит человек со скоростью вектора \vec{B} . Если наблюдать за этим с берега, то будет казаться, что этот человек передвигается со скоростью векторов $\vec{A} + \vec{B}$. Таким образом, сложение векторов можно

определить как совпадение действий, обозначенных стрелками, иллюстрирующими то, что происходит в реальном мире при сложении двух векторных величин.

Если говорить о вычитании, то приходится вводить понятие «сложение с отрицательным вектором». Отрицательный вектор – это вектор одинаковой величины с каким-то воображаемым вектором, но который направлен в обратном направлении и обозначается $-\vec{A}$. Поэтому $\vec{A} - \vec{B}$ вычисляется, как показано на рис. А.6.

Можно представить себе векторную величину в два и три раза больше. Вектор одинакового направления с заданным вектором, но больше него в два раза, обозначается $2\vec{A}$, больше в три раза – $3\vec{A}$. 2 и 3 – скалярные величины, поэтому это явление называется «скалярное произведение векторов» (рис. А.7). На этом разрешите закончить объяснение основ вычисления векторных величин.

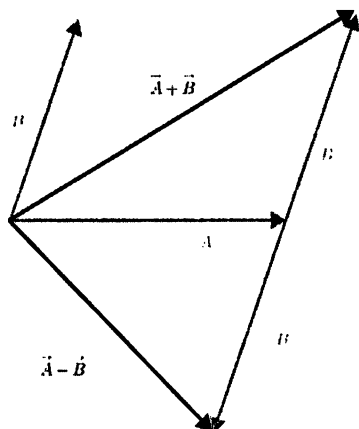


Рис. А.6. Сложение и вычитание векторов

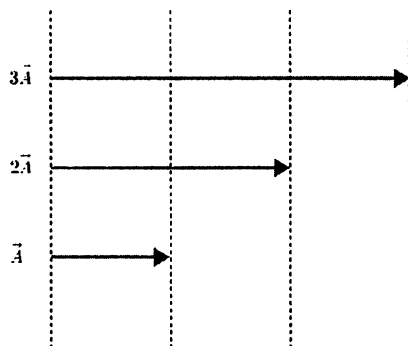


Рис. А.7. Скалярное произведение векторов

Еще одно понятие, необходимое для осмысления явления магнетизма, – это понятие «поля». Разобраться с ним несложно. Это понятие лучше тоже представить при помощи наглядного примера. Возьмём за векторы скорость ветра и направление ветра на поле для гольфа в месте, где ты находишься. Итак, что же нужно сделать для того, чтобы измерить состояние ветра в общем на первой лунке? Да, ещё через равные интервалы было бы хорошо поставить людей, чтобы они рвали и пускали по ветру траву. Таким образом, пространство (в данном случае поле для гольфа) в каждой своей точке может быть определено векторной величиной (здесь это направление и скорость ветра), которая называется «векторным полем». Физическая величина каждой точки в большинстве случаев не видна глазу, поэтому для наглядного изображения векторного поля чаще всего используется изображение векторных стрелочек, расположенных с равными интервалами между собой. Например, на рис. А.8 векторными стрелками изображается магнитное поле, образующееся вокруг двух расположенных параллельно электрических токов. Магнитное поле обладает свойствами образования вихревых потоков вокруг электрического тока. Как же будет распределяться магнитное поле, если отдалить электрический ток, текущий в противоположном направлении? Это явление можно выразить при помощи формулы, но более наглядно оно может изображено при помощи стрелок. Глядя на рисунок, можно ясно увидеть, что магнитное поле становится сильнее в пространстве, зажатом между двумя электрическими токами. На самом деле и электрическое поле, и магнитное поле являются векторными полями трёхмерного пространства, и здесь как раз хотелось бы сказать о трёхмерном измерении, однако бумага является двумерной, поэтому было бы сложно показать на ней трёхмерное пространство.

Если существует векторное поле, значит, существует и скалярное поле. Это пространство, с каждой точкой которого можно связать скалярную величину. Например, температура воздуха в комнате. Когда в комнате включается отопление, тёплый воздух поднимается вверх, и воздух под потолком нагревается, а воздух внизу у пола охлаждается. Но если отрегулировать отопительное оборудование, то можно и в пространстве непосредственно над полом организовать место для комфортного пребывания. Распределение температуры в комнате в данном случае будет являться примером скалярного поля. В качестве способа выражения скалярного поля часто используется цветовая кодировка, когда к его малым частям физических величин (в данном случае температуре) применим цвет.

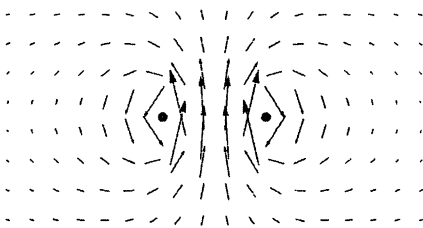


Рис. А.8. Магнитное векторное поле вокруг расположенных параллельно электрических токов

Вы знаете, что такое «тепловизор»? Это устройство, оснащённое датчиком для обнаружения инфракрасного излучения и компьютером, которое распознает инфракрасное излучение различной температуры, испускаемое физическими телами, и выражает его при помощи цветовых обозначений. Если взглянуть на температуру в комнате через тепловизор, то получится изображение, примерно как на рис. А.9, и станет понятным, как изменяется температурное поле помещения в зависимости от способа отопления. Кстати, поле, в котором покрывается льдом отпускающий дурацкие шуточки автор, является скалярным полем (☺).



Рис. А.9. Изменение температурного поля помещения в зависимости от способа отопления

Существуют и другие способы выражения скалярного поля. Самый распространённый из них – это контурные линии. Вспомним географические карты. В этом случае скалярная величина каждой географической точки, которая называется «высота», образует поле. Для того чтобы выразить это явление более наглядно, был разработан метод нанесения контурных линий. При соединении линией скалярных величин (высот) образовывается контурная линия. Если нарисовать несколько линий разных высот, то становится видимым состояние скалярного поля. Понятие контурных линий также находит своё применение и в электромагнетизме.

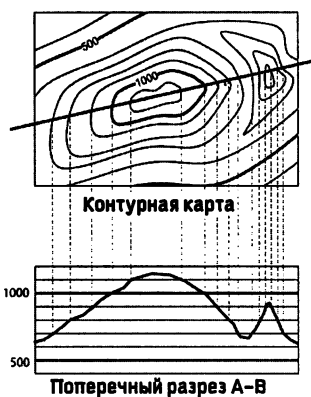


Рис. А.10. Скалярное поле (высот), выраженное при помощи контурных линий



Абсолютное значение вектора и единичный вектор

При наличии определённого вектора \vec{A} величина этого вектора выражается при помощи присваивания ему обозначения абсолютного значения $|\vec{A}|$. Естественно, $|\vec{A}|$ является скалярной величиной. Даже если физическая величина будет векторной величиной, например «движением вдоль оси x », и когда очевидно, что направление векторной величины будет неизменно, то физическая величина может рассматриваться как скаляр. В этом случае сложение, вычитание, умножение и деление, а также другие расчеты могут быть выполнены по отношению к абсолютному значению вектора.

Далее, если произвести деление \vec{A} на $|\vec{A}|$

$$\vec{e}_A = \frac{\vec{A}}{|\vec{A}|},$$

то обязательно получится «вектор величины 1, обращённый по направлению вектора \vec{A} ». Это называют «единичный вектор \vec{e}_A , направленный в направлении вектора \vec{A} ». Размерности \vec{A} и $|\vec{A}|$ одинаковы, поэтому у единичного вектора нет размерности¹. Можно, пожалуй, сказать, что единичный вектор – это вектор, из векторной величины которого взяли во внимание только информацию «направление». Так как абсолютное значение вектора – это изъятие из векторной величины информации «направление», это будет являться понятием, противоположным этому.

Понятие единичного вектора часто применяется в математике и физике, которые имеют дело с векторами. Самый распространённый пример – «обозначение векторных компонент», который разберём впоследствии, а здесь приведём пример закона Био–Савара, описывающего магнитное поле, которое создаёт вокруг себя каждый элемент тока.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{s}}{r^2} \vec{e}_r,$$

где $d\vec{B}$ – магнитное поле (Т), которое создаёт элемент тока в точке P ;

$Id\vec{s}$ – элемент тока (А);

r – расстояние между элементом тока и точкой P (м);

\vec{e}_r – единичный вектор направления r ;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума (Н/м).

Используется единичный вектор \vec{e}_r , направления радиус-вектора \vec{r} .

¹ См. статью о размерности (стр. 91).

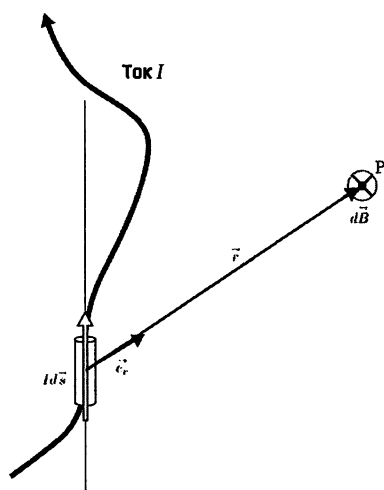


Рис. А.11. Связь определения закона Био–Савара и единичного вектора \vec{e}_r

Даже если написать так, не используя \vec{e}_r ,

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{s}}{r^3} \vec{r},$$

то получится абсолютно то же значение; есть учебники, в которых так написано, но если это так, то в подобной формулировке не виден важный смысл того, что «магнитное поле, создающееся элементом тока, по закону обратных квадратов пропорционально расстоянию r », поэтому мне не нравится эта формулировка учебников.

Если говорить о том, что означает знак \otimes , нарисованный в точке P на рис. А.11, то здесь это означает, что вектор $d\vec{B}$ напрямую пронзает бумагу с поверхности к обратной стороне. Хотелось бы, чтобы за подробным объяснением вы обратились к главе 5 (стр. 163).

Хотя авторы этого учебника старались не использовать математические уравнения, так как в этом не было особой необходимости, но в фундаментальном электромагнетизме становятся необходимы точные векторные расчеты электрических и магнитных полей. Однако, обозначая векторы стрелкой, скорее всего, невозможно производить точные расчёты. Если говорить о том, что следует делать в этом случае, то это – выразить вектор в компонентах и произвести алгебраические вычисления.

Объясним способ, как это делать. Прежде всего представим координаты с осями x и y . Такие координаты называются в честь их создателя «декартовыми координатами». Это основная система координат. Если говорить о том, какие ещё существуют системы координат, то это «полярная система координат» и «цилиндрическая система координат», каждая из которых используется в зависимости от симметрии задачи, подлежащей рассмотрению. Однако в этих системах координат сложно рассматривать единичные векторы, поэтому сейчас мы сосредоточимся на декартовой системе координат. Затем будем считать, что единичный вектор расположен в направлении оси координат. Двухмерная система координат состоит из координат x и y , поэтому вектор в направлении x величиной 1 берётся за \vec{i} , а вектор в направлении y величиной 1 берётся за \vec{j} .

Здесь, если использовать особенности суммы векторов и скалярного умножения, попытаемся показать, что любую векторную величину можно выразить с использованием векторов \vec{i} и \vec{j} . Например, возьмём определённый вектор скорости \vec{v} , как показано на рис. А.12, его скорость будет выражена суммой вектора скорости \vec{v}_x , направленного вдоль оси x , и вектора скорости \vec{v}_y , направленного вдоль оси y . Кроме этого, обратим внимание на то, что \vec{v}_x представляет собой «произведение скалярной величины $|v_x|$ и единичного вектора \vec{i} ». Если в настоящее время величина скорости направления x будет 3 м/с, а величина скорости направления y 2 м/с, то вектор скорости \vec{v} можно выразить сложением вектора \vec{i} , умноженным на 3 м/с, и вектора \vec{j} , умноженным на 2 м/с. В виде формулы это выглядит следующим образом:

$$\vec{v} = 3\vec{i} + 2\vec{j} \text{ [м/с]}.$$

После произведения этих действий становится понятно, что любая векторная величина на двумерной плоскости при использовании \vec{i} и \vec{j} может быть выражена сложением единичного вектора и скалярной величины.

Вектор, выраженный сложением \vec{i} , умноженного на число a , и \vec{j} , умноженного на число b :

$$\vec{A} = a\vec{i} + b\vec{j}.$$

Обычно обозначение вектора сокращают и обозначают только величиной, записывая: $\vec{A} = (a, b)$ или $\vec{A} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}$. Это называют «обозначение векторных компонент». Для

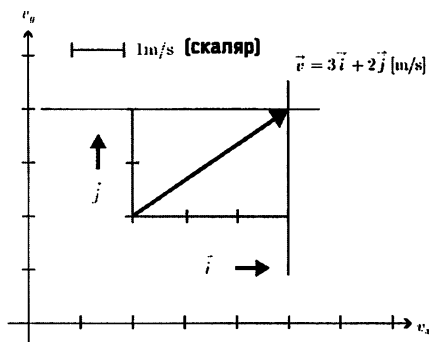


Рис. А.12. Выражение произвольного вектора с использованием единичного вектора

того чтобы было понятнее, мы объяснили это в двухмерной системе координат, но если речь пойдёт о трёхмерной системе, то будет использован вектор \vec{k} , который имеет направления оси z .

$\vec{A} = a\vec{i} + b\vec{j} + c\vec{k}$ обозначение векторных компонент:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}.$$

При выражении компонент вектора расчёт действий между векторами полностью изменяется на алгебраический расчёт компонент¹. Например, в качестве $\vec{A} = (1, 2)$, $\vec{B} = (3, 4)$ будем подразумевать $\vec{C} = (2\vec{A} + 3\vec{B})$. Прежде всего попробуем это выразить компонентами:

$$2\vec{A} + 3\vec{B} = 2 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + 3 \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}.$$

При умножении вектора на скаляр численное значение за скобками лучше писать внутри скобок.

$$2 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + 3 \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 9 \\ 12 \end{pmatrix}.$$

Сложение векторов становится сложением их компонент:

$$\begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 9 \\ 12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2+9 \\ 4+12 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 11 \\ 16 \end{pmatrix}.$$

Таким образом, и расчёт векторов может быть произведён без использования стрелок при помощи алгебраических вычислений.

¹ Однако необходимо обратить внимание на то, что представленный здесь способ вычисления может быть применим только в декартовых координатах.

+ e Скалярное и векторное произведения

Интересно, существует ли умножение на вектор? Если забежать немного вперёд, то можно ответить: существует. Однако произведение вектора на вектор бывает двух видов: «скалярное произведение» и «векторное произведение». И скалярное произведение, и векторное произведение – это математически определённые правила, но почему же они так хорошо сочетаются с физикой?

Прежде всего поразмышляем о скалярном произведении. Если давать математическое определение скалярному произведению, то это будет выглядеть, как показано ниже: «скалярное произведение вектора \vec{A} и вектора \vec{B} – это умножение величины \vec{A} и величины \vec{B} на косинус угла, который образуют \vec{A} и \vec{B} »:

$$C = |\vec{A}||\vec{B}|\cos\theta.$$

В виде формулы скалярное произведение вектора \vec{A} и вектора \vec{B} записывается следующим образом:

$$C = \vec{A} \cdot \vec{B}.$$

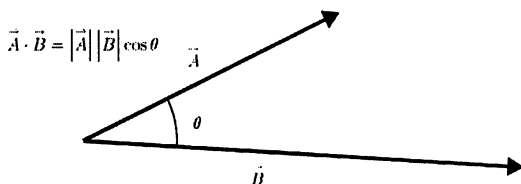


Рис. А.13. «Скалярное произведение» векторов

Итак, когда же может пригодиться знание о скалярном произведении? В качестве наиболее понятного примера приведём «механическую работу». Под «работой» понимается «нажатие путём приложения силы в определённом направлении»; если, прикладывая усилие F в направлении приложения силы, толкать только x , то будет произведена лишь механическая работа $W = Fx$. Впрочем, движение, которое производится в жизни, происходит не только в направлении нажатия. Рассмотрим случай, как показано на рис. А.14, когда осуществляется воздействие в горизонтальном направлении на блок, расположенный на наклонной поверхности. Даже в этом случае блок будет двигаться вдоль наклонной плоскости по направлению вверх. Что же можно подумать в таком случае о механической работе? Сила – векторная величина, поэтому напомним, что она может быть выражена суммой двух векторов. \vec{F} выражается суммой компоненты \vec{F}_x , направленной вдоль наклонной поверхности, и компоненты \vec{F}_y , расположенной перпендикулярно наклонной поверхности. \vec{F}_x расположена в направлении движения блока, поэтому из определения работы можно сказать, что $W = F_x x$. А что же с \vec{F}_y ? Блок не сдвинулся ни на 1 мм по направлению \vec{F}_y , поэтому эта

сила не производит работы. А теперь рассмотрим связь между \vec{F} и \vec{F}_x . Если \vec{F} горизонтально направлена, \vec{F}_x направлена вдоль наклонной поверхности, поэтому они связаны следующим образом:

$$F_x = F \cos \theta.$$

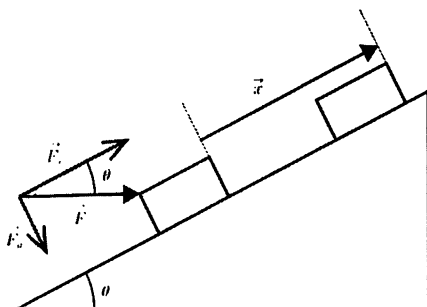


Рис. А.14. Продвижение блока толканием по наклонной поверхности

Поэтому возникают следующие отношения:

$$W = F_x x = F x \cos \theta.$$

А именно, даже если направление силы и направление движения не совпадают, при расчёте скалярного произведения

$$W = \vec{F} \cdot \vec{x}$$

сила может быть подсчитана совершённой механической работой. Кстати, исходя из закона сохранения энергии, хорошо известно, что при отсутствии трения, с какой бы стороны не была приложена сила, работа W , необходимая для того, чтобы поднять блок с нижней точки наклонной поверхности до её верхней точки, имеет постоянную величину.

Из определения скалярного произведения становится понятным, что его величина может изменяться не только в зависимости от величин двух векторов, но и в зависимости от величины угла, образованного этими векторами. Если рассчитать скалярное произведение ортогональных векторов, то ответом будет ноль. И что же это значит? Если объяснять это с точки зрения, например, механической работы, то получится:

$$\vec{F}_y \cdot \vec{x} = 0.$$

Иными словами, это соответствует утверждению, что если нет движения в направлении нажатия, то его сила не вносит вклада в механическую работу. В электромагнетизме вдоль определённой линии по «линейному интегралу» действует скалярное произведение векторного поля и вектора мельчайшего линейного элемента $d\vec{s}$, как видно на рис. А.15а. По «поверхностному интегралу» вдоль определенной поверхности, как показано на рис. А.15б, в векторном поле действует скалярное произведение векторного поля и минимального вектора $d\vec{s}$ площади $d\vec{F}$.

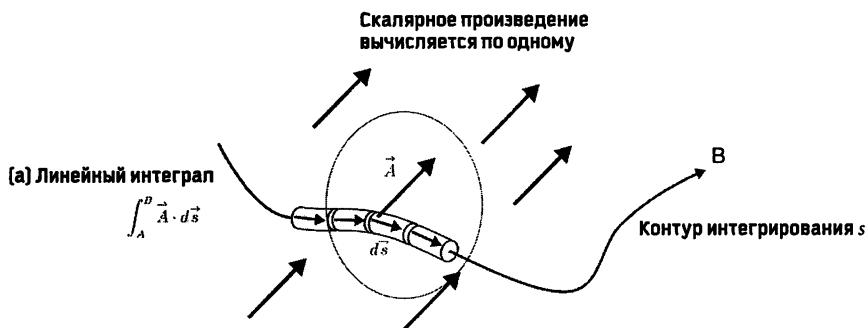


Иллюстрация линейного интегрирования векторного поля \vec{A} вдоль определённой линии от A до B .
Вдоль линии s продолжается выход скалярного произведения \vec{A} и $d\vec{s}$

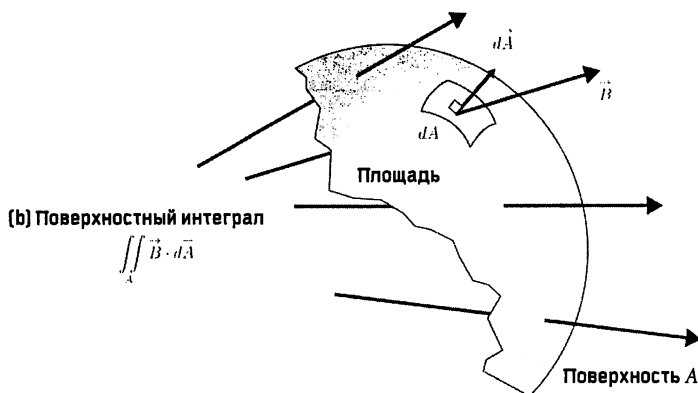


Иллюстрация поверхностного интегрирования векторного поля \vec{B} на поверхности A .
Поверхность A разделяется на элементы $d\vec{A}$, производится общее вычисление скалярного произведения с \vec{B}

Рис. А.15. Линейный интеграл и поверхностный интеграл

При вычислении скалярного произведения в системе обозначений векторных компонент декартовой системы координат придерживаемся следующего правила:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} = A_x B_x + A_y B_y.$$

С другой стороны, довольно утомительно производить вычисление векторного произведения. Потому что векторное произведение вектора \vec{A} и вектора \vec{B} является векторной величиной. Определение векторного произведения будет следующим: векторное произведение вектора \vec{A} на вектор \vec{B} образует вектор \vec{C} . Величина вектора \vec{C} определяется произведением величины вектора \vec{A} на величину вектора \vec{B} и умножением этого произведения на синус угла, который образуют \vec{A} и \vec{B} :

$$\vec{C} = |\vec{A}||\vec{B}|\sin\theta.$$

Направление вектора \vec{C} – это нормаль поверхности, включающей векторы \vec{A} и \vec{B} , которая имеет вращательное направление в правую сторону от \vec{A} к \vec{B} .

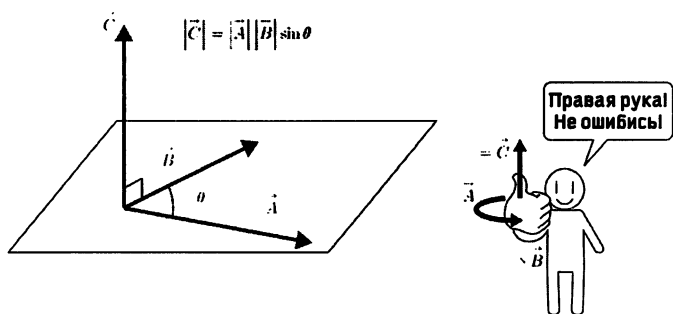


Рис. А.16. «Векторное произведение» векторов

Результат векторного произведения \vec{A} и \vec{B} имеет перпендикулярное им направление, поэтому в двумерном пространстве нет векторного произведения. «Направление правой резьбы» – это, как показано на рис. А.16, направление, на которое указывает большой палец, если сжать руку от вектора \vec{A} в направлении вектора \vec{B} . Векторное произведение при помощи формулы записывается так:

$$\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B}.$$

Итак, когда же может понадобиться знание о векторном произведении? В качестве наиболее наглядного примера рассмотрим вращающий момент из области механики. Вращающий момент – это величина, выражающая силу, прикладываемую к определённой оси, чтобы заставить её вращаться. Среди характеристик автомобиля есть «максимальный вращающий момент». Если эта величина большая, то, соответственно, будет большой и вращающая сила колес, поэтому автомобиль будет обладать большей грузоподъёмностью, сможет взбираться на крутые склоны, в связи с чем для полноприводных автомобилей и грузовиков более важной характеристикой является не мощность (количество лошадиных сил), а вращающий момент. Можно объяснить упоминавшийся вначале «принцип рычага», используя вращающий момент.

При намерении вращения оси к ней присоединяют диск, при повороте периферийной части которого небольшим усилием можно получить вращающий момент большой силы. В этом и заключается «принцип рычага». Таким образом, вращающий момент определяется как «произведение силы и расстояния от оси». Обычно при попытке вращения оси усилие прикладывается по касательному направлению диска, так как всем известно, что это самый эффективный способ вращения. Однако здесь мы рассмотрим не совсем соответствующий этому способу пример. Как показано на рис. А.17, рассмотрим вращающий момент, рождаемый силой \vec{F} , направленной не по касательной диска. Обратим внимание на то, что в этом случае вектор силы выражается суммой вектора \vec{F}_1 , направленного по касательной диска, и вектора \vec{F}_2 , направлен-

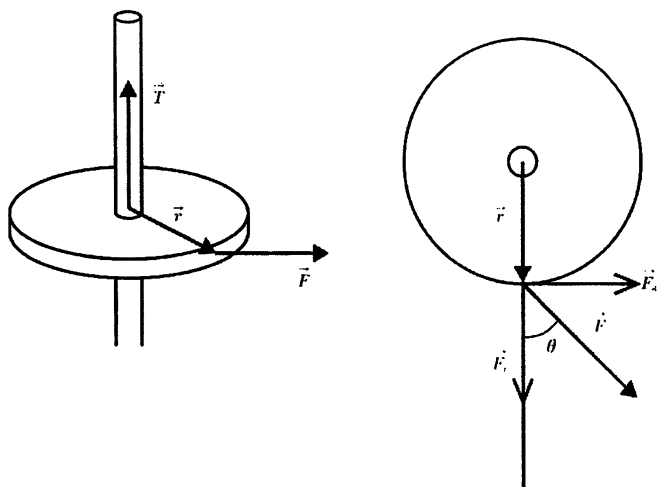


Рис. А.17. Векторное произведение и вращающий момент

ного в радиальном направлении. То есть, скорее всего, становится понятно, что свой вклад во вращение оси делает только \vec{F}_s , а \vec{F}_r просто притягивает ось. Таким образом, величина вращающего момента – это $T = rF_s$. Однако если радиус-вектор точки приложения силы, ставшей начальной точкой оси вращения, возьмём за \vec{r} , а величину угла, который образуют \vec{F} и \vec{r} , за θ , то станет понятным наличие следующей связи:

$$F_s = F \sin \theta.$$

Поэтому существует и эта связь:

$$T = rF_s = rF \sin \theta.$$

То есть даже в случае несовпадения направления силы и направления вращения после вычисления векторного произведения можно вычислить и величину вращающего момента, с которым собираются вращать ось. Здесь договоримся определить вращающий момент как «векторную величину \vec{T} , имеющую направление оси». И тогда если договориться, что направление вектора будет совпадать с направлением правой резьбы при вращении, то, исходя из определения векторного произведения, можно произвести это вычисление и рассчитать вращающий момент силы для вращения оси:

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F}.$$

Всё объяснение до этого момента было построено на предположении, что вектор силы находится в одной плоскости с диском, но теперь можно рассмотреть силу \vec{F} , которая будет тянуть диск по диагонали вверх. Если вычислить с использованием векторного произведения вращающий момент, то вращающий момент будет вектором, обращённым в направлении, отличающемся от осевого. Этот результат означает, что сила \vec{F} – это не только вращающий момент, который заставляет вращаться ось, но и то, что вращающий момент имеет функцию «вращающего момента для изменения направления оси».

Векторное произведение, в отличие от скалярного произведения, является самым большим, когда два вектора расположены ортогонально. Если представить это как отношения между силой и вращающим моментом, то это будет соответствовать следующему: для того чтобы вращать ось с наибольшей эффективностью при приложении силы в тангенциальном направлении к диску ($\theta = 90^\circ$), то если $\theta = 0^\circ$, будет только сила, тянущая ось, и совсем не будет усилий для вращения.

Действие векторного произведения по законам магнетизма – это определение силы, которую получает электрический ток из магнитного поля. При наличии «вектора магнитного поля» \vec{B} сила, которую получает из магнитного поля «вектор тока (сегмент тока)» $I d\vec{s}$, может быть выражена векторным произведением тока и магнитного поля:

$$\vec{F} = I d\vec{s} \times \vec{B}.$$

Если представить это наглядно, то получится примерно то, что изображено на рис. А.18. Как вы думаете, что, если принять «магнитное поле за вектор направления, по которому электрический ток получает силу»? Приходится считать, что, в отличие от кулоновской силы, магнитная сила – это сила, которая рождается из векторной величины, имеющей направление электрического тока. Так как сила, которую получает ток, обязательно направлена ортогонально, то удобнее всего магнитную силу определять внешним произведением.

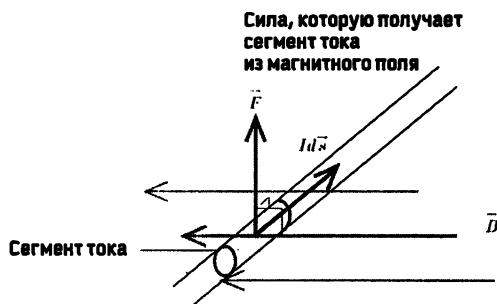


Рис. А.18. Взаимодействие тока, магнитного поля и магнитной силы

При вычислении векторного произведения в системе декартовых координат приходится следовать такому довольно громоздкому правилу:

$$\vec{A} \times \vec{B} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_y B_z - A_z B_y \\ A_z B_x - A_x B_z \\ A_x B_y - A_y B_x \end{pmatrix}.$$



Векторное поле как градиент скалярного поля

В качестве простого для понимания примера приведём скалярное поле, в котором примем высоту за скалярную величину. В зависимости от расположения высота над уровнем моря будет разной, и если положить на любое место такого поля мяч, то мяч покатится вниз. Иными словами, поле с разными высотами в каждом месте является склоном. Если считать его векторным полем, то можно назвать его «градиентом», или «наклоном», скалярного поля. Чтобы быть точным, векторное поле, которое является градиентом скалярного поля, обладает скоростью изменения скалярной величины в каждом месте, а обозначение стрелками определяет направление увеличения скалярной величины, то есть все стрелки направлены к вершине наклона. Очень важно отметить то, что в скалярном поле, которое выражается дифференцируемой гладкой функцией, обязательно присутствует градиент, и в определённой точке градиент всего один. Если в качестве примера привести карту, то когда мы осторожно кладем мяч в какое-то место, градиентом этого места будет направление, куда естественным образом покатится этот мяч. Ведь сложно представить, что каждый раз направление, в котором катится мяч, будет другим?

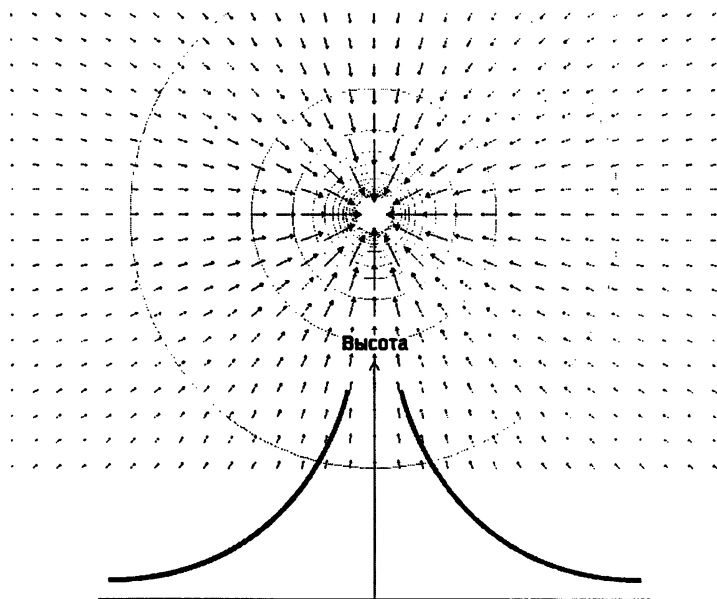


Рис. А.19. Контурная карта горы Фудзи и её «градиентное» векторное поле

Величина вектора градиента равна скорости изменения скалярной величины в данной точке, а именно – дифференциалу. Применительно к мячу это скорость изменения импульса движения скатывания вниз. Для примера возьмём одну гору со склонами с постепенно увеличивающейся крутизной, как у горы Фудзи. Если взять высоту этой горы за скалярную величину, то с помощью контурных линий мы получим то, что изображено на рис. А.19. А векторы градиента выразим стрелками. Контурные линии и векторы градиента имеют особенность всегда располагаться под прямым углом относительно друг друга. На занятиях в университете это доказывалось с использованием формул, но более наглядно показать это с помощью рисунка.

Сейчас для лёгкости восприятия мы рассмотрели пример двухмерного пространства, но хотелось бы, чтобы в уме ты смело попробовал представить «градиент-векторное пространство трёхмерного скалярного пространства». Например, ты превратился в пчелу и летаешь вокруг в поисках нектара. И в каком-то месте ты почувствовал приятный запах цветов рапса. Для того чтобы разыскать цветочную поляну, ты облетаешь окрестности и, скорее всего, продвигаешься в направлении, в котором запах становится сильнее. Это и будет направлением вектора градиента скалярного поля под названием «поле концентрации молекул запаха».

Если выразить эту связь при помощи формул, при том что векторное поле \vec{A} является градиентом скалярного поля F , то она будет записываться следующим образом:

$$\vec{A} = \text{grad}F,$$

где grad – это gradient (читается – градиент). При алгебраическом вычислении можно получить векторное поле $\text{grad}F$, тогда относительно всех точек трёхмерного пространства можно произвести следующее вычисление:

$$(\text{grad}F)_x = \frac{\partial F}{\partial x} \quad (\text{grad}F)_y = \frac{\partial F}{\partial y} \quad (\text{grad}F)_z = \frac{\partial F}{\partial z}.$$

Обозначение ∂ – это «символ дифференциала в частных производных», когда F является функцией (x, y, z) , $\frac{\partial F}{\partial x}$ имеет значение «определения скорости изменения $\frac{\partial F}{\partial x}$ при действии силы F в направлении, параллельном оси x » (см. стр. 87). Можно представить это следующим образом: для того чтобы узнать градиент наклонной поверхности, выясняем «градиент оси x » и «градиент оси y », складываем их в виде векторов и выясняем, в каком направлении и в какой степени наклонен склон.

В магнетизме скалярное поле, которое называется «электрический потенциал» V , и не изменяющееся во времени векторное поле «электростатическое поле» \vec{E} взаимосвязаны следующим образом:

$$\vec{E} = -\text{grad}V.$$

Смысл этого заключается в следующем: «Вектор электрического поля обращен в направлении снижения электрического потенциала; величина электрического поля равна скорости изменения электрического потенциала».

СПРАВОЧНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Учебники и справочники для студентов (сверху вниз в порядке возрастания трудности)

1. Эндо Масамори, Кусида Дзюнко, Китабаяси Теруюки, Фудзисиро Такехико. Теория электромагнетизма, связывающая школьные и университетские знания. Издательство Коданся, 2011.
2. Сервей Р. А. Физика для ученых и инженеров. III Электромагнетизм / пер. Мацумори Хироси. Издательство Гакудзюцу Тосё, 1995.
3. Хасимото Масахиро. Электромагнетизм в картинках. Издательство Омся, 1993.
4. Маэно Масахиро. Об электромагнетизме простым языком. Издательство Токио Тосё, 2010.
5. Гото Наохиса. Понятный электромагнетизм. Издательство Коданся, 1993.
6. Фейнман Р. П. Фейнмановские лекции по физике. III Электромагнетизм / пер. Миядзима Тацуоки. Издательство Иванами Сётэн, 1969.
7. Баргер В. Д., Ольссон М. Г. Электромагнетизм в современной перспективе I / пер. Кобяси Сумио, Тоса Тисако. Издательство Байфукан, 1991.
8. Баргер В. Д., Ольссон М. Г. Электромагнетизм в современной перспективе II / пер. Кобяси Сумио, Тоса Тисако. Издательство Байфукан, 1992.
9. Сунакава Сигэнобу. Электромагнетизм: тексты по физике 4. Издательство Иванами Сётэн, 1987.
10. Ота Коити. Основы электромагнетизма I. Издательство Спрингер Джапан, 2007.
11. Ота Коити. Основы электромагнетизма II. Издательство Спрингер Джапан, 2007.

Научно-популярная литература, издания для школьников

1. Флейш Д. Уравнение Максвелла / пер. Кавабе Тецудзи. Издательство Иванами Сётэн, 2009.
2. Исикава Синносукэ. Электромагнетизм в комиксах в стиле Токийского Университета. Издательство Коданся, 2008.
3. Симода Пикаити. Физические эксперименты, изменившие мир. Сер. «Паритибукс»). Издательство Марудзен, 1996.
4. Накамура Хироси. Азбука магнитов – от стрелки компаса до сверхпроводящих магнитов. Сер. «Паритибукс». Издательство Коданся, 1987.
5. Такэути Ацуси. Уравнение Максвелла, понятное из школьной математики. Сер. «Паритибукс». Издательство Коданся, 2002.
6. Торю Кадзухиро, Мацуда (художник), Тренд Про (издание). Электричество в комиксах. Издательство Омся, 2006.
7. Ямамото Масаси, Такакацу Кейта (художник), Тренд Про (издание). Теория относительности в комиксах. Издательство Омся, 2009.

Прочие справочные материалы

1. Национальная Астрономическая Обсерватория. Научные хроники. Издательство Марудзен, 2010.
2. Гото Наохиса. Изучаем электромагнетизм. Издательство Омся, 2010.
3. Кохата Сигео. Как были созданы единицы измерения электромагнетизма – развитие электромагнетизма и изменение системы единиц измерения. Издательство Когакуся.
4. Хиросэ Татинари. Один точка 10 в физике – Е и Н, D и В. Издательство Кёрицу, 1981.
5. Хосоно Тосио. Метаэлектромагнетизм. Издательство Морикита, 1999.
6. Имаи Исао. Математика в классической физике. Издательство Иванами Сётэн, 2003.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Символы

1 Ампер, определение, 161
1 метр, определение, 216
 Ω (Ом), 114
Div (дивергенция), 63
Grad (градиент), 47, 247

А

А (ампер), 101
Абсолютный диамagnetизм, 178
Абсорбционный ток, 194
Антенна, 212
Атом, 7
Атомный магнит, 138

Б

Био, 123
Больцман, 198

В

В (вольт), 115
Вакуумная магнитная
 проницаемость, 108, 157
Вектор площади, 81
Векторная величина, 26, 230
Векторное поле, 26, 246
Векторное произведение, 240
Векторное произведение векторов, 243
Водоворот, 131
Волновое решение, 199
Вращающий момент, 243
Вращение, 135
Вт (ватт), 117

Г

Гауссова поверхность, 80
Генератор, 216
Генри, 166, 183
Герц, 198, 212
Гипотеза световых квантов, 15
Гистерезис, 147
Гн (генри), 162, 166
Градиент, 246

Д

Декартова система координат, 238
Дж (джоуль), 92
Джоулево тепло, 116
Диамagnetик, 139, 177
Дивергенция, 62, 135
Диполь, 72, 209
Дипольное колебание, 209
Дифференциал, 33, 88, 195
Диэлектрик, 72
Диэлектрическая проницаемость
 вакуума, 23, 52
Дрейф, 103, 112

Е

Единичный вектор, 236

Ё

Ёмкость, 84

З

Закон Ампера–Максвелла, 198
Закон Био–Савара, 125, 156

Закон винта, 125
Закон всемирного тяготения, 25
Закон Кулона, 23
Закон Ома, 104, 114
Закон электромагнитной индукции
Фарадея, 187

И

Изолятор, 94
Индуктивность, 166
Индуктор, 166
Индукционная плита, 218
Индукционный нагрев, 218
Индукцированная ЭДС, 187
Интеграл от поверхности, 82, 242
Интегрирование по контуру, 129
Испускание, 63

К

Квантовая механика, 17
кВт/ч (киловатт-час), 117
Кл (кулон), 24
Кларк, 224
Клетка Фарадея, 66
Количество электроэнергии, 117
Конденсатор, 83
Контурная карта, 27, 235
Кулон, 23

Л

Линейный интеграл, 242
Линии магнитной индукции, 173
Лоренцево сокращение, 119

М

Магнетик, 138
Магнит, 105, 136
Магнитная индукция, 108
Магнитная проницаемость, 163
Магнитное записывающее
устройство, 175

Магнитное поле, 105
Магнитные силовые линии, 171
Магнитный заряд, 105, 198
Магнитный момент, 136
Магнитный поток, 108
Международная система единиц СИ, 91
Метаматериал, 222
Метрическая система, 39
Модель атома Резерфорда, 16
Мощность, 117

Н

Н (ньютон), 21, 92
Насыщение, 147
Нейтрон, 7
Ньютон, 79

О

Обозначение векторных компонент, 238
Ом, 104
Относительная диэлектрическая
проницаемость, 75
Относительная магнитная
проницаемость, 144

П

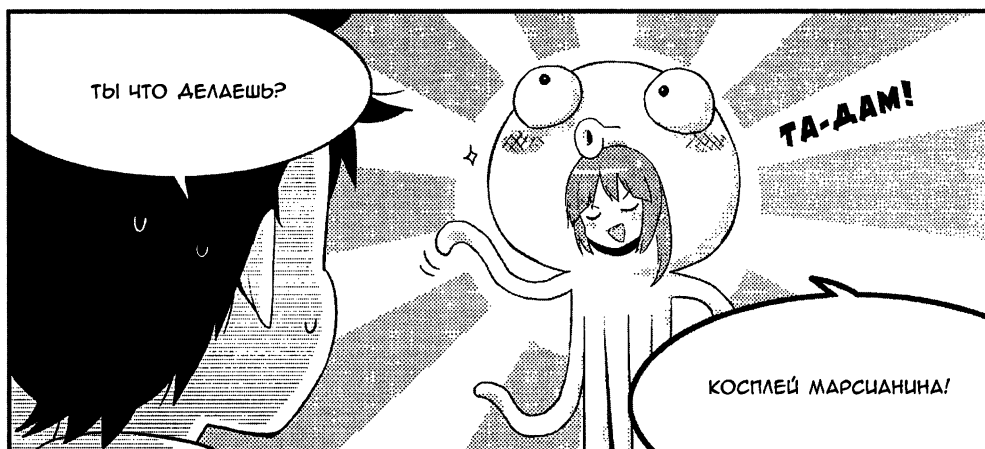
Парамагнетик, 139
Периодическая система элементов, 94
Плотность тока, 102
Поле, 26, 234
Поляризация, 72
Поляризованный заряд, 89
Постоянная Кулона, 46
Постоянная Планка, 15
Постоянный магнит, 145
Потребляемая мощность, 117
Принцип относительности, 119
Принцип рычага, 243
Принцип суперпозиции, 45
Проводник, 94
Протон, 7

ОБ АВТОРЕ

Эндо Масамори в 1993 году закончил Университет Кэйо (факультет научно-технических исследований и аспирантуру), доктор технических наук. В настоящее время профессор Университета Токай, инженерно-физический факультет. Специальность – химические лазеры, оптические резонаторы, высокоомощные лазеры и лазерная обработка.

Основные труды:

- Эндо и Вальтер Эд. Газовые лазеры. Издательство Маркель Деккер, 2006.
- Инженерные калькуляторы для технических специалистов. Издательство Тории Сёбо, 2009.
- Теория электромагнетизма, связывающая школьные и университетские знания / Коллектив авторов. Издательство Коданся, 2011.



Масамори Эндо (автор), Мари Маниси (художник)

Электромагнетизм. Манга

Главный редактор Д. А. Мовчан
dmkpress@gmail.com

Перевод с японского К. Исидзима, М. Яковлева

Научный редактор А. Н. Рабодзей

Верстальщик А. А. Чаннова

Корректор Г. И. Синяева

Формат 70×90 1/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. п. л. 24. Тираж 500 экз.

Веб-сайт издательства «ДМК Пресс»: www.dmk.ru