



# 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 восхитился 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 удастся 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

<b>ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ</b> .....	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

<b>ЗАКОН КУЛОНА, ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ПОТЕНЦИАЛ</b> .....	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

<b>ТЕОРЕМА ГАУССА, ПРОВОДНИК, ДИЭЛЕКТРИК</b> .....	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
Сопrotивление 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
Диамagnetики и магнитная левитация.....	177

## Глава 6

### ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ В ДВИЖЕНИИ И УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА.....

179	
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 изучение.....	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.....

229	
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

# ГЛАВА 1

# ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ





НА СОН ТЯНЕТ...

МЕНЯ ЗОВУТ  
АНДАО РЭН

ПЕРВЫЙ ГОД УЧУСЬ  
В УНИВЕРСИТЕТЕ ХАРУТО  
В "ХАРУ".

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

**БААМ**

ВСЮДУ ПРОВОДЯТСЯ  
САМЫЕ ПЕРЕДОВЫЕ  
НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ,

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



НО ДЛЯ МЕНЯ  
ЭТО ПРОСТО  
ПРОВИНЦИЯ,  
БЕЗ ВСЯКОГО  
РАЗВЛЕЧЕНИЯ.

А ВОТ И  
НЕ ТРАНСФОРМИРУЕТСЯ!

ЧТО ЭТО  
ОН?

НЕ  
ЗНАЮ.

**ТИ..ШИ..НА**

НУ, ЭТО БАЙКИ.



И ЕЩЁ ЧТО МЕНЯ  
БЕСПОКОИТ...

ТАК ТЕБЕ  
ПРИДЁТСЯ  
НА ВТОРОЙ ГОД  
ОСТАТЬСЯ.

НЕ НАВИЖУ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТИЗМ!

ЧТО Я ПРОВАЛИВАЮ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТИЗМ.

ЧТО  
ЭТО?

МОЛОДОСТЬ.

ШОП  
ШОП  
ШОП

ОЙ, ГДЕ ЖЕ ЭТО Я?

СОВСЕМ ДОРОГУ  
ПОТЕРЯЛ.

А ЭТО, ЧТО...?

ВУХ!

ААА

БАБАХ!





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?

ДА НЕТ,  
НЕОПАСНЫЙ.



САМЫЙ РЯДОВОЙ  
ЭКСПЕРИМЕНТ  
ПО ЭЛЕКТРО-  
МАГНЕТИЗМУ.

ТАК, ТЕБЯ ЗОВУТ  
АНДРО РЭН?



ОСТАВЬ В СЕКРЕТЕ,  
ЧТО ПРОИЗОШЛО,  
ЛАДНО?

А Я ТЕБЕ ЭТО  
ПОДАРЮ.

"ДЕТСКИЙ НАБОР  
МАГНИТОВ"



...А ЛУЧШЕ

ДАВАЙ СДЕЛКУ  
ЗАКЛЮЧИМ?



ОХ, КАКОУ ТЫ  
ДЕРЗКИЙ.

ЧТО У НЕЁ  
ЗА ФАНТАЗИИ?





ПРО ПРОИСШЕСТВИЕ  
Я БУДУ МОЛЧАТЬ.

А ТЫ БУДЕШЬ МНЕ  
ЗА ЭТО ПРЕПОДАВАТЬ  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ.

ОУ, КАК ЛЕНЬ...



ТОГДА ВСЕМ  
РАССКАЖУ.

**СПАСИБО  
ЗА ПОМОЩЬ**

ЛАДНО, ЛАДНО,

Я БУДУ ТЕБЯ УЧИТЬ.



МЕНЯ ЗОВУТ  
КУРЮ ШИЭРУ.

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ -  
ЭТО МОЯ СТИХИЯ!

**ШЁПОТ**

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

ТЫ ЧЕГО  
ГОВОРИШЬ?

НИЧЕГО  
ОСОБЕННОГО.

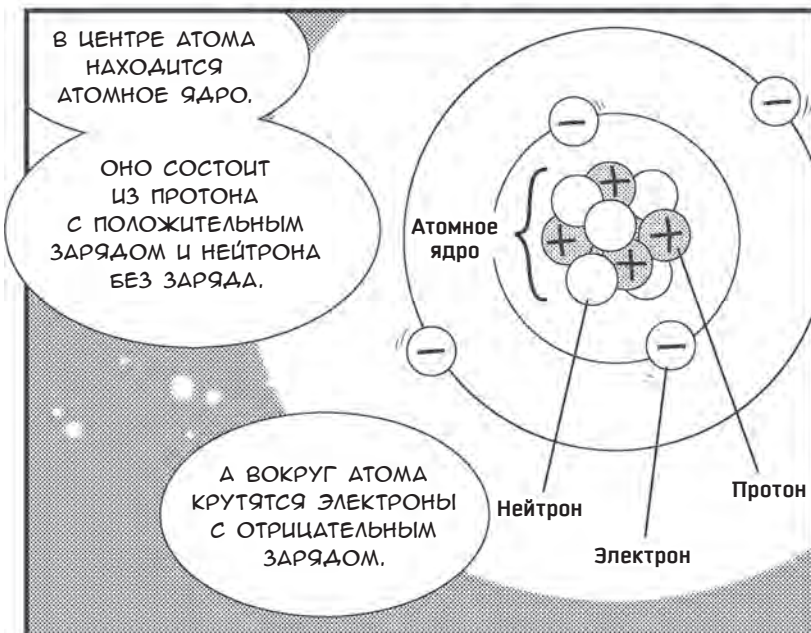
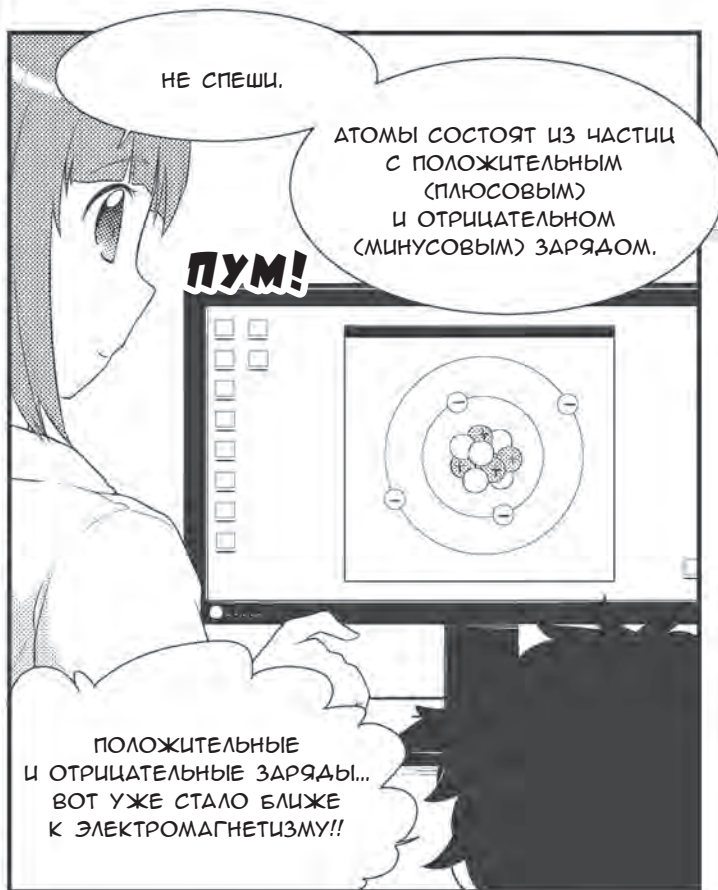
ВОТ ТАК Я НАЧАЛ УЧИТЬ  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ У НАУЧНОЙ  
СОТРУДНИЦЫ КУРЮ ШИЭРУ...



# 1.1. ЧТО ТАКОЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ?











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

Между одинаковыми  
зарядами - отталкивание



Между  
противоположными  
зарядами - притяжение



Между зарядами  
действует сила Кулона

ЭТУ СИЛУ НАЗЫВАЮТ  
СИЛА КУЛОНА, ЗАПОМНИ.

СИЛА КУЛОНА

ПРОПОРЦИОНАЛЬНА  
КОЛИЧЕСТВУ ЗАРЯДА  
И ОБРАТНО ПРОПОРЦИОНАЛЬНА  
КВАДРАТУ РАССТОЯНИЯ.

ТО ЕСТЬ...



ЧЕМ ЗАРЯД БОЛЬШЕ  
И РАССТОЯНИЕ БЛИЖЕ,  
ТЕМ СИЛА БОЛЬШЕ.

КАК ГРАВИТАЦИЯ,  
ДА?

ОДИН СЛОВОМ,  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ  
- ЭТО

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

**ВЗДРОГ!**

И ВСЁ-ТАКИ,  
ЧТО ТАКОЕ ЗАРЯД?

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  
ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ  
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

$\text{div}\vec{D} = \rho$  [теорема Гаусса] для электростатического поля

$\text{div}\vec{B} = 0$  [теорема Гаусса для магнитной индукции]

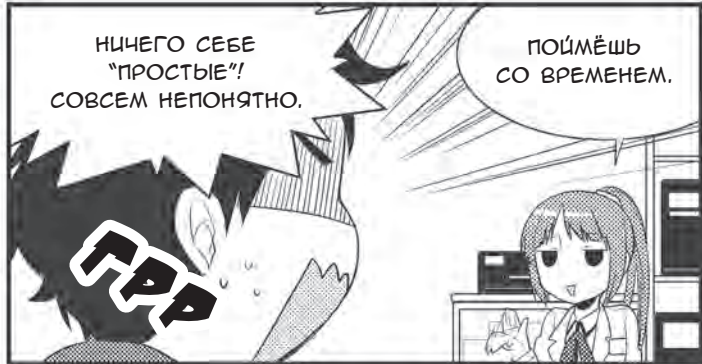
$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$  [Закон электромагнитной индукции Фарадея]

$\text{rot}\vec{H} = \vec{i} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t}$  [закон Ампера–Максвелла]



ВОТ ЭТИ ПРОСТЫЕ Ч ФОРМУЛЫ ВМЕСТЕ

НАЗЫВАЮТСЯ "УРАВНЕНИЕ МАКСВЕЛЛА."



НИЧЕГО СЕБЕ "ПРОСТЫЕ"! СОВСЕМ НЕПОНЯТНО.

ПОЙМЁШЬ СО ВРЕМЕНЕМ.

ГЛАВ



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 некой 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 °С), 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.

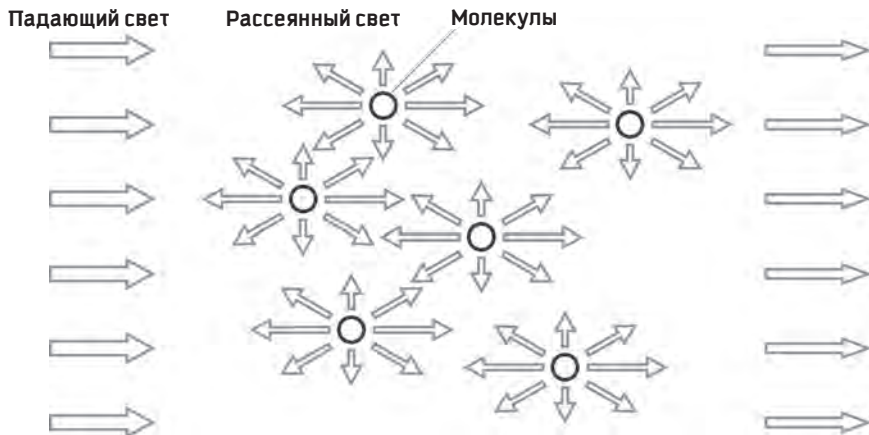


Рис. 1.1. Рэлеевское рассеяние

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.

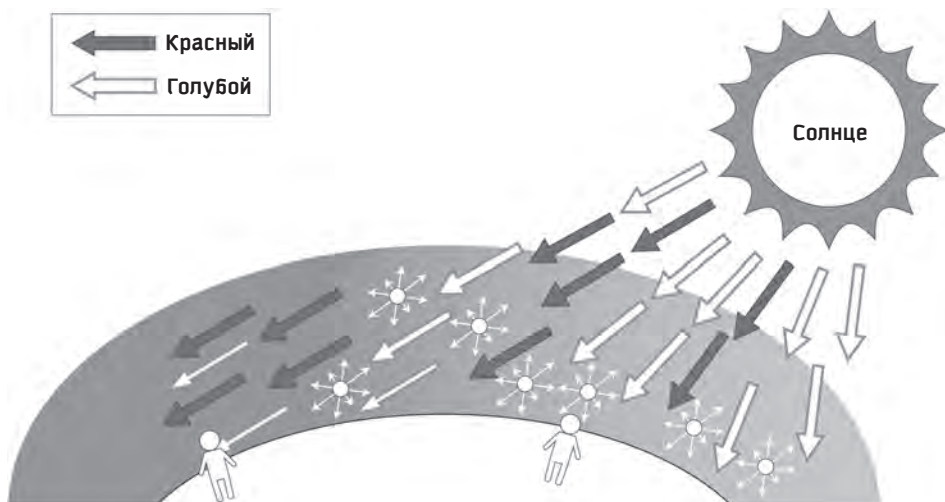


Рис. 1.2. Механизм рассеяния Рэля – голубое небо, красный закат

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  $\nu$  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 физике<sup>1</sup>.

---

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