Российская академия наук
Российская академия образования
Издательство «Просвещение»

Академический школьный учебник

СФЕРЫ

В.В. Белага
И.А. Ломаченков
Ю. А. Панебратцев

ФИЗИКА

Физика

9

ПРОСВЕЩЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Российская академия наук
Российская академия образования
Издательство «Просвещение»

АКАДЕМИЧЕСКИЙ ШКОЛЬНЫЙ УЧЕБНИК

СФЕРЫ

В.В. Белага
И.А. Ломаченков
Ю.А. Панебратцев

Физика

9 класс

Учебник
для общеобразовательных
учреждений

*Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации*

Москва
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
2011

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72
Б43

Серия «Академический школьный учебник» основана в 2005 году

Проект «Российская академия наук, Российская академия образования, издательство «Просвещение» — российской школе»

Руководители проекта:
вице-президент РАН акад. ***В. В. Козлов***, президент РАО акад. ***Н. Д. Никандров***, управляющий директор издательства «Просвещение» чл.-корр. РАО ***А. М. Кондаков***

Научные редакторы серии:
акад. РАО, д-р пед. наук ***А. А. Кузнецов***,
акад. РАО, д-р пед. наук ***М. В. Рыжаков***, д-р экон. наук ***С. В. Сидоренко***

Серия учебно-методических комплектов «Сферы» основана в 2003 году

Руководители проекта:
чл.-корр. РАО, д-р геогр. наук ***В. П. Дронов***,
чл.-корр. РАО, д-р. пед. наук ***А. М. Кондаков***

На учебник получены положительные заключения Российской академии наук (№ 10106-5215/73 от 29.10.10) и Российской академии образования (№ 01-5/7д-90 от 27.09.10)

Белага В. В.

Б43 Физика. 9 класс : учеб. для общеобразоват. учреждений / В. В. Белага, И. А. Ломаченков, Ю. А. Панебратцев; Рос. акад. наук, Рос. акад. образования, изд-во «Просвещение». — М. : Просвещение, 2011. — 176 с. : ил. —(Академический школьный учебник) (Сферы).
ISBN 978-5-09-019763-2.

Данный учебник продолжает линию учебно-методических комплектов «Сферы» по физике. Издание подготовлено в соответствии с новым образовательным стандартом и освещает вопросы курса физики для основной школы. Материал учебника направлен на формирование первых научных представлений о физических законах и явлениях и основывается на достижениях современной физики и техники. Главными особенностями данного учебника являются фиксированный в тематических разворотах формат, лаконичность и жёсткая структурированность текста, разнообразный иллюстративный ряд. Использование электронного приложения к учебнику позволит значительно расширить информацию (текстовую и визуальную) и научиться применять её при решении разнообразных физических задач и подготовке творческих работ.

УДК 373.167.1:53
ББК 22.3я72

ISBN 978-5-09-019763-2

© Издательство «Просвещение», 2011
Художественное оформление.
© Издательство «Просвещение», 2011
Все права защищены

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 5

I. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ГРАВИТАЦИЯ

1. Движение тела, брошенного вертикально вверх 8
2. Движение тела, брошенного горизонтально 10
3. Движение тела, брошенного под углом к горизонту 12
4. Движение тела по окружности 14
5. Период и частота 16
6. Закон всемирного тяготения 18
7. Движение искусственных спутников Земли 20
8. Гравитация и Вселенная 22

Подведём итоги 24

II. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

9. Механические колебания 26
10. Маятник. Характеристики колебательного движения 28
11. Период колебаний математического маятника 30
12. Гармонические колебания. Затухающие колебания 32
13. Вынужденные колебания. Резонанс 34
14. Волновые явления 36
15. Длина волны. Скорость распространения волны 38

Подведём итоги 40

III. ЗВУК

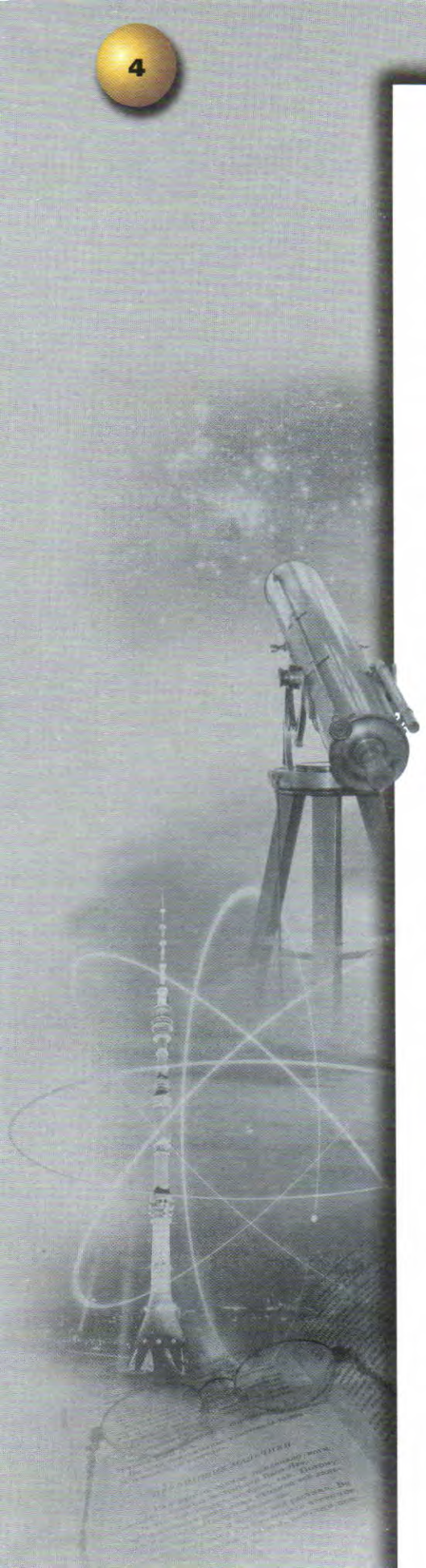
16. Звуковые колебания. Источники звука 42
17. Звуковые волны. Скорость звука 44
18. Громкость звука. Высота и тембр звука 46
19. Отражение звука. Эхо 48
20. Резонанс в акустике 50
21. Ультразвук и инфразвук в природе и технике 52

Подведём итоги 54

IV. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

22. Индукция магнитного поля 56
23. Однородное магнитное поле. Магнитный поток 58
24. Электромагнитная индукция 60
25. Переменный электрический ток 62
26. Электромагнитное поле 64
27. Электромагнитные колебания 66
28. Электромагнитные волны 68
29. Практическое применение электромагнетизма 70

Подведём итоги 72



V. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

30. Свет. Источники света 74
31. Распространение света в однородной среде 76
32. Отражение света 78
33. Плоское зеркало 80
34. Преломление света 82
35. Линзы 84
36. Изображение, получаемое с помощью линзы 86
37. Глаз как оптическая система 88
38. Оптические приборы 92
Подведём итоги 96

VI. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

39. Скорость света. Методы определения скорости света 98
40. Разложение белого света на цвета. Дисперсия света 100
41. Интерференция волн 102
42. Интерференция и волновые свойства света 104
43. Дифракция волн. Дифракция света 106
44. Поперечность световых волн. Электромагнитная природа света 108
Подведём итоги 110

VII. КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

45. Опыты с катодными лучами. Открытие электрона 112
46. Излучение и спектры. Квантовая гипотеза Планка 114
47. Атом Бора 118
48. Радиоактивность 120
49. Состав атомного ядра 122
50. Ядерные силы и ядерные реакции 124
51. Деление и синтез ядер 126
52. Атомная энергетика 128
Подведём итоги 130

VIII. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

53. Структура Вселенной 132
54. Физическая природа Солнца и звёзд 134
55. Спектр электромагнитного излучения 136
56. Рождение и эволюция Вселенной 138
57. Современные методы исследования Вселенной 140
Подведём итоги 144

Векторы в физике 145
Использование векторов для решения физических задач 153
Имена в истории физики 161
Заключение 170
Предметно-тематический указатель 172

ВВЕДЕНИЕ

Дорогие ребята! В этом учебном году изучение физики вы начнёте с раздела, в котором рассматривается движение тел вблизи поверхности Земли и гравитация.

Изучение механики вы продолжите, познакомившись с материалом второго раздела «Механические колебания и волны». Усвоив знания о колебательном движении и волнах, вы приступите к изучению звуковых явлений, речь о которых будет идти в третьем разделе «Звук».

Изучение электрических и магнитных явлений вы продолжите, познакомившись с четвёртым разделом «Электромагнитные колебания и волны».

В следующих двух разделах учебника изучаются оптические явления. Основы геометрической оптики излагаются в разделе «Геометрическая оптика», а волновая природа света рассматривается в разделе «Электромагнитная природа света».

При изучении раздела «Квантовые явления» вы познакомитесь со строением атома и некоторыми фундаментальными понятиями физики микромира.

Последний раздел «Строение и эволюция Вселенной» является заключительным разделом всего курса физики 7–9 классов. Здесь в доступной для вас форме формулируется современная картина мира с точки зрения как физики, так и астрономии. При этом большое внимание уделяется вопросам строения и эволюции Вселенной, а также современному состоянию физики микромира.

Завершают учебник три приложения: «Векторы в физике», «Использование векторов для решения физических задач» и «Имена в истории физики». Материал первых двух приложений может быть использован в случаях, когда необходимо вспомнить изучаемые на уроках математические понятия или когда надо решить задачи повышенного уровня сложности.

Физика и её законы являются ядром естествознания, поэтому, изучая физику, мы стараемся ответить на самые разнообразные вопросы об окружающем нас мире.

Великий физик первой половины XX в. Альберт Эйнштейн писал: «Самое непостижимое в мире — то, что он постижим». Конечно, понять всё невозможно, но хотелось бы, чтобы, заканчивая изучение физики в 9 классе, вы проявили настоящий интерес к дальнейшему изучению этой науки в старших классах и пришли к более глубокому пониманию законов окружающего мира.

Усвоить физический материал, содержащийся в учебнике, вам помогут тетрадь-практикум, тетрадь-тренажёр, тетрадь-экзаменатор, задачник, а также электронное приложение, которые составляют единый комплект.

Желаем вам успехов на пути получения новых знаний!

Физический блокнот

МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ФОКУСЕ

Физический калейдоскоп

ВНИМАНИЕ!

РАБОТАЕМ С УЧЕБНИКОМ

Материал учебника включает девять тем, каждая из которых разделена на параграфы. Перед каждой темой в рубрике «Коротко о главном...» приводится высказывание одного из великих учёных, которое отражает суть содержания темы.

Параграф начинается с вводных рубрик «Вы узнаете...», «Вспомните...». Рубрика «Вы узнаете...» познакомит вас с основными вопросами, которые изучаются в параграфе. Рубрика «Вспомните...» подскажет, что необходимо вспомнить из ранее изученного материала, для того чтобы усвоить новый.

Основной текст параграфа сопровождают рубрики, которые помогут вам глубже понять наиболее важный материал.

Рубрика «Мои физические исследования» поможет вам научиться проводить физические опыты, иллюстрирующие физические законы.

В рубрике «Физический блокнот» содержатся интересные сведения и дополнительная информация к основному тексту параграфа.

Рубрика «В фокусе» отражает основную информацию, содержащуюся в параграфе.

Рубрика «Физический калейдоскоп» иллюстрирует текст параграфа примерами из жизни и техники.

Физические законы и формулы параграфа выделены в рубрике «Внимание».

Информация о традиционном эксперименте, на основе которого строится объяснение материала параграфа, отделена от основного текста знаком «Демонстрационный опыт».

Графический элемент в виде лупы акцентирует ваше внимание на внутреннем содержании рисунка, детализирует изображение физического явления или процесса.

В темах, в которых необходимо более подробно рассмотреть решение физических задач, содержится раздел «Решение задач».

В параграфе также даны ссылки в виде стрелок. Они показывают, что изучение данного материала невозможно без использования задачника или тетради-практикума.

На последней странице каждой главы содержатся рубрики «Подведём итоги», «Вопросы для обсуждения» и обобщающие схемы, позволяющие представить материал главы в единстве и взаимосвязи в лаконичной схематичной форме.

В рубрике «Подведём итоги» приводятся основные выводы и идеи, содержащиеся в главе.

Вопросы, содержащиеся в рубрике «Вопросы для обсуждения», носят проблемный характер и могут стать интересной темой для дискуссии.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И ГРАВИТАЦИЯ

- ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ
- ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО
- ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ
- ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПО ОКРУЖНОСТИ
- ПЕРИОД И ЧАСТОТА
- ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ
- ДВИЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ
- ГРАВИТАЦИЯ И ВСЕЛЕННАЯ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

До сих пор мы называли ту силу, которой небесные тела удерживаются на своих орбитах, центростремительной, но так как теперь показано, что это есть тяготение, то ниже мы будем её так называть, ибо причина той центростремительной силы, которой Луна удерживается на своей орбите, должна быть распространена на все прочие планеты.

Исаак Ньютон

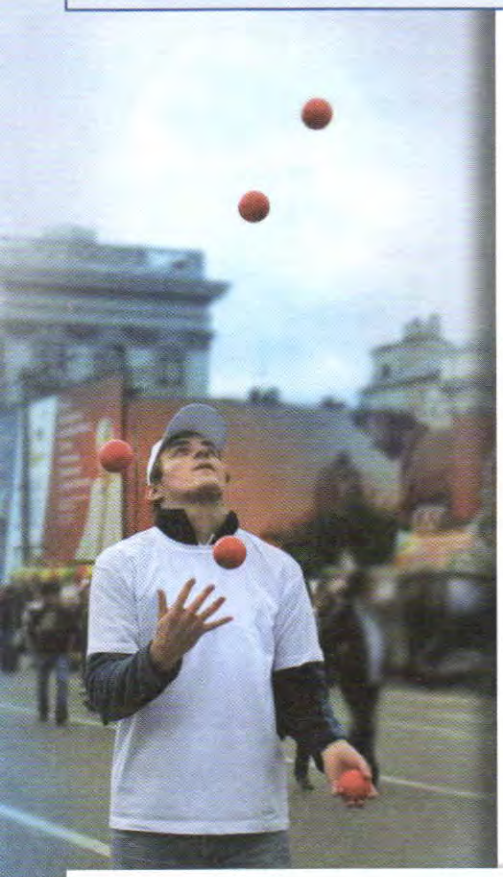
1 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Уравнение движения тела, брошенного вертикально вверх.
- На какую максимальную высоту может подняться тело, брошенное вертикально вверх.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое равнопеременное движение?
- Как вычислить скорость и перемещение прямолинейного равнопеременного движения?
- Что такое свободное падение и ускорение свободного падения?



Завершая изучение физики в 8 классе, вы рассмотрели задачу о свободном падении тела и научились решать её тремя различными способами: с использованием уравнения движения (кинематика), с использованием второго закона Ньютона (динамика) и с использованием закона сохранения энергии. Теперь рассмотрим движение тела, брошенного вертикально вверх.

СКОРОСТЬ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ Что можно сказать о характере движения брошенного вертикально вверх тела? Какие силы действуют на тело в течение времени его движения?

Для того чтобы тело начало своё движение вверх, на него в течение короткого промежутка времени действуют с некоторой силой и сообщают ему начальную скорость $\vec{v}_0$. После этого тело движется вверх, постепенно замедляя своё движение, затем на мгновение останавливается, достигнув наибольшей высоты, и, наконец, начинает падать вниз. Если пренебречь сопротивлением воздуха, то можно сказать, что на тело в течение всего времени его движения действует только сила тяжести.

Поскольку на тело действует постоянная сила тяжести, то согласно второму закону Ньютона движение тела будет равнопеременным. При этом ускорение свободного падения и является тем коэффициентом пропорциональности, который связывает силу тяжести и массу тела:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{тяж}}{m}.$$

Так как направление начальной скорости $\vec{v}_0$ тела противоположно направлению ускорения свободного падения, то модуль скорости тела при его движении вверх уменьшается, т. е. тело движется равнозамедленно. При этом скорость $\vec{v}$ тела в момент времени t равна:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t. \qquad (1)$$

Направим ось OY вертикально вверх. Так как направление оси совпадает с направлением начальной скорости $\vec{v}_0$, то проекция v_{0y} положительна и равна модулю начальной скорости:

$$v_{0y} = v_0.$$

Направление ускорения свободного падения противоположно направлению оси Y, поэтому проекция g_y отрицательна:

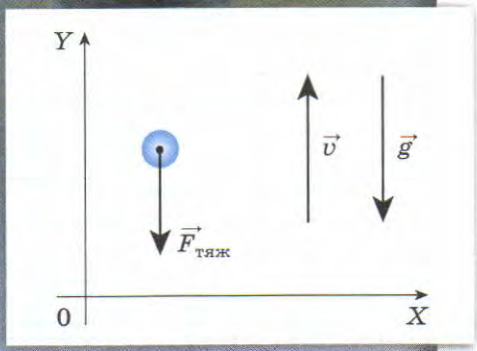
$$g_y = -g = -9{,}8 \text{ м/с}^2.$$

Запишем уравнение (1) для проекции скорости v_y:

$$v_y = v_0 + g_y t,$$

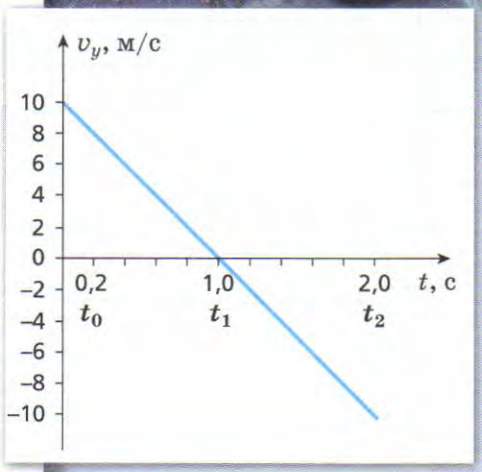
или

$$v_y = v_0 - gt. \qquad (2)$$



Графиком зависимости проекции скорости от времени (2) является прямая линия. Видно, что с течением времени модуль скорости движения тела уменьшается и в момент времени t_1 его скорость становится равной нулю. Тело останавливается, достигнув наибольшей высоты.

После этого под действием силы тяжести тело начинает своё движение вниз. Это движение является равноускоренным, поэтому модуль скорости будет увеличиваться. При этом направление скорости и направление оси OY противоположны, поэтому проекция скорости v_y для времени $t > t_1$ отрицательна.



УРАВНЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ Так как движение тела, брошенного вертикально вверх, является равнопеременным, зависимость проекции его перемещения от времени описывается формулой

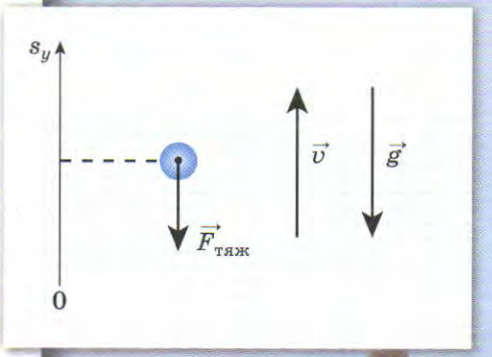
$$s_y = v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Так как ускорение свободного падения и ось направлены противоположно, проекция ускорения свободного падения отрицательна и можно записать:

$$s_y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \qquad (3)$$

Зависимость координаты тела от времени, т. е. его уравнение движения, в этом случае

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}. \qquad (4)$$



МАКСИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ПОДЪЁМА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ Жизненный опыт показывает, что, чем большую начальную скорость мы сообщим телу, бросаемому вертикально вверх, тем на большую высоту оно поднимется. Теперь определим, чему же равна максимальная высота подъёма h.

Очевидно, эта высота соответствует моменту остановки тела, т. е. времени t_1. Тогда по формуле (2)

$$0 = v_0 - gt_1, \text{ или } t_1 = \frac{v_0}{g}.$$

Максимальную высоту подъёма тела можно определить из уравнения движения (4), подставив в него найденное значение t_1. Учитывая, что нас интересует, на какую высоту поднялось тело по сравнению с его начальным положением, значение y_0 можно считать равным нулю:

$$h = v_0 t_1 - \frac{g t_1^2}{2} = \frac{v_0^2}{g} - \frac{v_0^2}{2g} = \frac{v_0^2}{2g}. \qquad (5)$$

Таким образом, максимальная высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, пропорциональна квадрату его начальной скорости.

Согласно уравнению (5) наибольшая высота подъёма тела, брошенного вертикально вверх, зависит только от его начальной скорости и не зависит от его массы и от его формы. Важно понимать, что это справедливо только в случае, когда мы не учитываем сопротивления воздуха. В реальных условиях из-за сопротивления воздуха максимальная высота подъёма тела будет меньше значения, полученного из формулы (5).

ВОПРОСЫ:

- С каким ускорением движется тело, брошенное вертикально вверх?
- Как записывается уравнение движения?
- Как найти максимальную высоту подъёма тела, брошенного вертикально вверх?

2 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как движется тело, брошенное горизонтально.
- Как найти дальность и высоту полёта тела, брошенного горизонтально.
- Как найти модуль скорости тела, брошенного горизонтально.

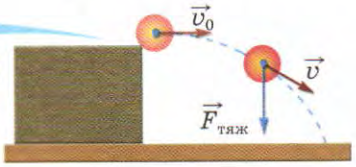
ВСПОМНИТЕ:

- Что такое траектория и перемещение?
- Что такое равномерное и неравномерное движение?
- Что такое мгновенная скорость?
- Уравнение движения тела, брошенного вертикально вверх.

Мы рассмотрели самые простые случаи движения тела под действием силы тяжести: свободное падение и движение тела, брошенного вертикально вверх. Теперь рассмотрим случай, когда тело, движущееся под действием силы тяжести, имеет начальную скорость, направленную горизонтально. Примерами такого движения могут быть: движение мяча, брошенного горизонтально; движение стрелы, выпущенной из лука горизонтально, и т. п.

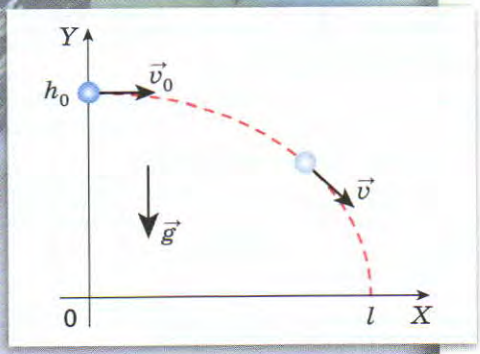
ПРИНЦИП СЛОЖЕНИЯ ДВИЖЕНИЙ До сих пор мы рассматривали только прямолинейное движение, для описания которого было достаточно одной координатной оси. При этом сила тяжести, действующая на тело, была параллельна этой оси.

Пусть шарик движется без трения по горизонтальной поверхности со скоростью $\vec{v}_0$. Согласно первому закону Ньютона в горизонтальном направлении никакие силы на шарик не действуют (он движется равномерно). При движении по плоскости сила тяжести, действующая на шарик, компенсируется силой реакции опоры, т. е. равнодействующая этих сил равна нулю. В момент, когда шарик достигает края горизонтальной поверхности, сила реакции опоры исчезает. При этом в горизонтальном направлении шарик продолжает своё движение по инерции с той же скоростью $\vec{v}_0$. А в вертикальном направлении на него теперь действует только сила тяжести (силой сопротивления воздуха мы пренебрегаем), поэтому он начинает равноускоренное движение вниз с ускорением свободного падения $\vec{g}$.



Таким образом, движение шарика можно представить как сложение двух независимых движений: движения вдоль горизонтальной оси OX и движения вдоль вертикальной оси OY.

Изучением движения тел, брошенных горизонтально, занимался Галилей. В своих трудах этот вид движения он описал как сумму двух движений: по горизонтали и по вертикали, введя тем самым в механику *принцип сложения движений*.



ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО

Рассмотрим движение тела, брошенного с высоты h_0 и имеющего начальную скорость $\vec{v}_0$. Для описания этого движения направим координатную ось OX горизонтально, а ось OY направим вертикально вверх. Траектория этого движения имеет вид плавной кривой, называемой *параболой*. Движение, при котором траектория не является прямой линией, называют *криволинейным*.

ДВИЖЕНИЕ ВДОЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСИ Проекция ускорения свободного падения на ось OY отрицательна и равна $g_y = -g$. Направление начальной скорости $\vec{v}_0$ совпадает с направлением оси OX, поэтому $v_{0y} = 0$.

Поскольку скорость тела, движущегося равноускоренно, в момент времени t можно найти по формуле $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$, то

$$v_y = -gt. \quad (1)$$

Найдём высоту h, на которой находится тело в момент времени t. Для этого воспользуемся уравнением движения тела:

$$y = y_0 + v_{0y}t - \frac{gt^2}{2}.$$

Обозначим начальную высоту y_0 как h_0. Получим

$$h = h_0 - \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ВДОЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ Проекция ускорения тела на ось OX равна $g_x = 0$. Так как проекция скорости движения в этом направлении не изменяется, то проекция скорости на горизонтальное направление

$$v_x = v_0. \quad (3)$$

Тогда в момент времени t координату x можно найти по формуле

$$x = v_0 t. \quad (4)$$

СКОРОСТЬ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ГОРИЗОНТАЛЬНО Мы уже знаем, что движение тела, брошенного горизонтально, можно рассматривать как сложение движений вдоль горизонтальной и вертикальной осей. В каждый момент времени такое тело имеет мгновенную скорость $\vec{v}$, проекции которой можно найти по формулам (1) и (3).

Если обозначить скорость движения тела вдоль оси OX через $\vec{v}_x$, а его скорость вдоль оси OY через $\vec{v}_y$, то можно записать:

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y,$$

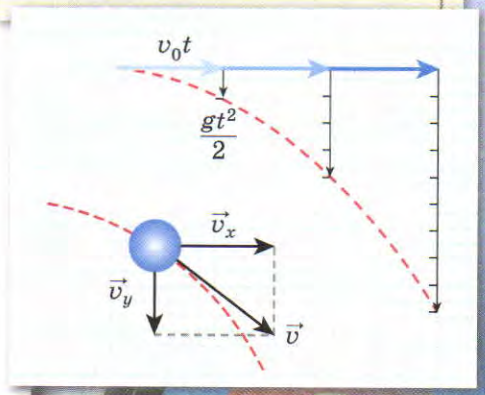
т. е. вектор скорости тела можно найти как сумму векторов скоростей тела вдоль осей.

Для того чтобы изобразить вектор, являющийся суммой двух векторов, используют *правило параллелограмма*: для векторов с общим началом их сумма изображается диагональю параллелограмма, построенного на этих векторах.

В нашем случае векторы $\vec{v}_x$ и $\vec{v}_y$ перпендикулярны друг другу, поэтому их сумма — диагональ прямоугольника. Значение (модуль) скорости тела в любой момент времени можно найти по теореме Пифагора:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}. \quad (5)$$

Проведём на листе клетчатой бумаги вертикальную и горизонтальную линии. Так как движения в горизонтальном и вертикальном направлениях происходят независимо друг от друга, то через время t с тело переместится на отрезок v_0t вправо и на отрезок $gt^2/2$ вниз. Если отложить по горизонтали отрезок v_0t, а из его конца вертикальный отрезок $gt^2/2$, то получится точка, в которой тело окажется через t с. Сделав подобное построение для нескольких промежутков времени и соединив эти точки плавной линией, получим ветвь параболы.



Время t, за которое тело, брошенное горизонтально, достигнет поверхности земли ($y = 0$), можно найти при помощи формулы (2):

$$h_0 = \frac{gt^2}{2}, \text{ откуда } t = \sqrt{\frac{2h_0}{g}}.$$

Дальность полёта при этом составит

$$l = v_0 t, \text{ или } l = v_0\sqrt{\frac{2h_0}{g}}.$$

ВОПРОСЫ:

- Как найти координаты тела, брошенного горизонтально, в момент времени t?
- Как найти модуль скорости тела, брошенного горизонтально?

3 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как движется тело, брошенное под углом к горизонту.
- Как найти дальность и наибольшую высоту подъёма тела, брошенного под углом к горизонту.

ВСПОМНИТЕ:

- Как движется тело, брошенное горизонтально?
- Как найти дальность и высоту подъёма тела, брошенного горизонтально?
- Как найти модуль скорости тела, брошенного горизонтально?

Теперь рассмотрим случай, когда тело, движущееся под действием силы тяжести, имеет начальную скорость, направленную под некоторым углом к горизонту. Примерами такого движения могут служить: движение мяча, брошенного под различными углами к горизонту; движение снаряда, выпущенного из пушки; движение лыжника при прыжке с трамплина; движение воды из шланга и т. п.

ТРАЕКТОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ Движение тела, брошенного под углом к горизонту, можно разбить на два этапа.

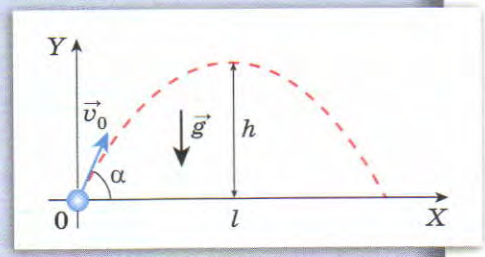
На первом этапе при движении от начала траектории до точки, соответствующей наибольшей высоте подъёма, скорость тела уменьшается. На втором этапе тело будет двигаться вниз, аналогично движению тела, брошенного горизонтально.

Внимание учёных к такому виду движения начиная с XVI в. объяснялось необходимостью развития баллистики — науки о движении снарядов, выпущенных из огнестрельного оружия, и в частности развития теории полёта пушечных ядер. Итальянский математик Н. Тарталья в своих сочинениях впервые утверждает, что траектория пушечного ядра является кривой линией, тогда как его предшественники считали, что она состоит из двух прямых, соединённых кривой линией.

Никколо Тарталья
(1500—1557)
В первом из своих сочинений «*Nuova scienza*» («Новая наука», 1537 г.) он впервые рассматривает вопрос о траектории выпущенного снаряда.

Точную форму траектории тела, брошенного под углом к горизонту, установил великий Галилей спустя почти сто лет после Тартальи. Именно он доказал, что траектории снарядов, если пренебречь сопротивлением воздуха, представляют собой параболы.

Рассмотрим движение тела, брошенного под углом α к горизонту. Пусть при этом точка бросания тела и точка его падения лежат на горизонтальной прямой. Сопротивлением воздуха пренебрегаем. Это движение также можно представить как сумму двух движений, протекающих независимо друг от друга: равномерного движения вдоль оси OX и движения под действием силы тяжести вдоль оси OY.



Введём следующие обозначения: $\vec{v}_0$ — начальная скорость, h — максимальная высота подъёма тела, l — дальность полёта.

Обозначим проекцию начальной скорости $\vec{v}_0$ на ось OX через v_{0x} и на ось OY через v_{0y}. Поскольку движение вдоль оси OX является равномерным, то проекция скорости на эту ось остаётся неизменной: $v_{0x} = v_x$.

ВЫСОТА ПОДЪЁМА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ Поднимаясь вверх, тело движется равнозамедленно, и его скорость в момент времени t можно найти по формуле $\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{g}t$. Рассмотрим движение тела вдоль оси OY. Получаем, что

$$v_y = v_{0y} - gt. \quad (1)$$

Обозначим максимальную высоту подъёма тела как h, а момент времени, в который тело достигло наибольшей высоты, через $t_{под}$. Поскольку в наивысшей точке траектории $v_y = 0$, то

$$t_{под} = \frac{v_{0y}}{g}. \quad (2)$$

Воспользовавшись уравнением движения тела, получим

$$h = v_{0y}t_{под} - \frac{g t_{под}^2}{2}. \quad (3)$$

Подставив выражение (2) в выражение (3), получим

$$h = \frac{v_{0y}^2}{2g}.$$

При отсутствии сопротивления воздуха время $t_{под}$, затраченное телом на подъём, составляет половину всего времени движения тела, т. е. оно равно времени от момента, когда тело достигает максимальной высоты, до момента падения тела (см. Приложение 2).

ДАЛЬНОСТЬ ПОЛЁТА ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ Учитывая, что движение вдоль горизонтальной оси равномерное, дальность полёта l можно найти по формуле

$$l = v_x t = v_{0x} t, \quad (4)$$

где t — время полёта тела.

С учётом формулы (3) можно записать:

$$t = 2t_{под} = \frac{2v_{0y}}{g}. \quad (5)$$

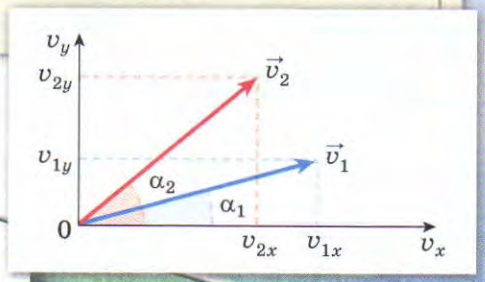
Подставив выражение (5) в формулу (4), получим

$$l = \frac{2v_{0x}v_{0y}}{g}. \quad (6)$$

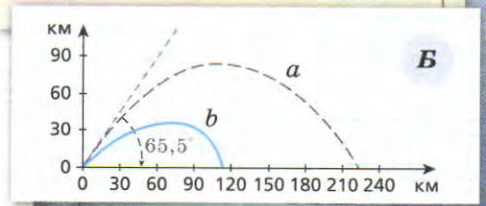
Полученное выражение свидетельствует о том, что при одном и том же значении начальной скорости дальность полёта зависит от значений проекций v_x и v_{0x} и, следовательно, от величины угла α. В геометрии доказывается, что максимальное значение l достигается для угла $\alpha = 45^\circ$ (см. Приложение 1 и 2).

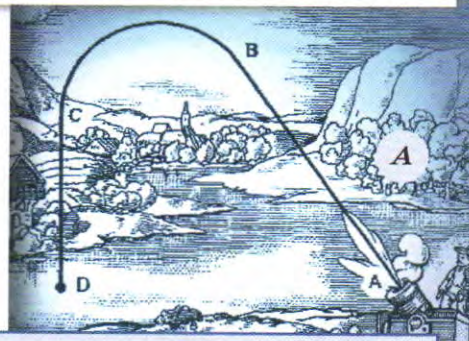
Именно Н. Тарталья впервые установил, что наибольшая дальность полёта тела, брошенного под углом к горизонту, достигается под углом 45°. Этот результат он получил, пытаясь ответить на вопрос своего друга-артиллериста, под каким углом необходимо устанавливать ствол пушки для наибольшей дальности полёта ядра.

При одном и том же значении начальной скорости величина проекции v_y будет тем больше, чем больше угол α. При этом с увеличением угла α величина проекции v_x уменьшается.



Траекторию движения снарядов на старинных гравюрах изображали так, как показано на рисунке **А**. До работ Тартальи её считали состоящей из двух прямолинейных участков и одного криволинейного участка. Это неудивительно, так как в реальной жизни с учётом сопротивления воздуха траектория такого движения уже не является параболой, а выглядит так, как изображено на рисунке **Б** сплошной линией.





ВОПРОС:

Как найти максимальную высоту полёта тела, брошенного под углом к горизонту?

4 ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА ПО ОКРУЖНОСТИ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Куда направлена мгновенная скорость тела при его движении по окружности.
- Куда направлено ускорение тела при его движении по окружности и как вычислить его значение.

ВСПОМНИТЕ:

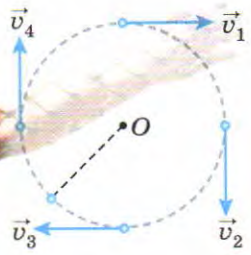
- Что такое касательная к окружности?
- Что такое равномерное и неравномерное движение?
- Как найти скорость, ускорение и перемещение при равнопеременном движении?

Одним из простейших видов криволинейного движения является движение тела по окружности. Рассмотрим такое движение при постоянной по модулю скорости.

НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА МГНОВЕННОЙ СКОРОСТИ При движении тела по окружности при неизменном модуле скорости в каждый момент времени скорость меняет своё направление. Как направлен вектор мгновенной скорости?

Для ответа на этот вопрос представим себе движение некоторого тела, закреплённого на верёвке и раскрученного в горизонтальной плоскости.

Если верёвка оборвётся, то тело начнёт двигаться по прямой. Эта прямая — касательная к окружности, являющейся траекторией движения тела. При этом направление движения тела совпадает с направлением скорости тела в момент разрыва верёвки.



Таким образом, мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке.

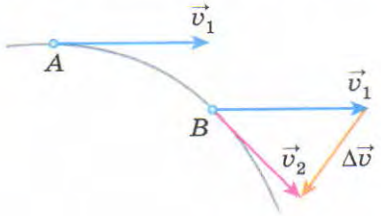
НАПРАВЛЕНИЕ ВЕКТОРА УСКОРЕНИЯ ТЕЛА, ДВИЖУЩЕГОСЯ ПО ОКРУЖНОСТИ При движении по окружности с постоянной по модулю скоростью в каждый момент времени направление скорости изменяется. Значит, такое движение является движением с ускорением. Рассмотрим движение тела по окружности радиуса R. Обозначим скорость тела в точке A через $\vec{v}_1$, а его скорость в точке B через $\vec{v}_2$. Тогда ускорение, с которым тело движется, можно найти по формуле

$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_1}{t}. \qquad (1)$$

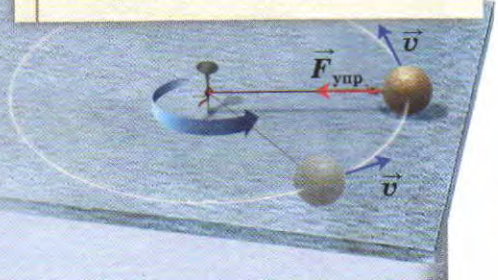
В числителе этой формулы стоит векторная физическая величина, а в знаменателе — скалярная. Поэтому направление вектора ускорения должно совпадать с направлением вектора, равного разности векторов скоростей:

$$\Delta\vec{v} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1.$$

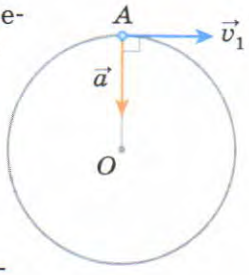
Для того чтобы изобразить вектор, являющийся разностью двух векторов, используют *правило треугольника*. Сначала векторы изображают исходящими из одной точки (при этом перемещать их можно только при помощи параллельного переноса). Затем проводят отрезок так, чтобы получился треугольник.



Согласно второму закону Ньютона направление ускорения совпадает с направлением равнодействующей всех сил, действующих на тело. Сообщим шарику, лежащему на столе и закреплённому на нити, начальную скорость в направлении, перпендикулярном нити. Он начнёт двигаться по окружности. Сила тяжести, действующая на него, уравновешивается силой упругости стола, а сила трения качения мала, и ею можно пренебречь. Получается, что сила, обусловливающая движение шарика по окружности, — сила упругости нити, направленная по радиусу окружности. Поэтому ускорение должно быть направлено так же, т. е.по радиусу окружности в направлении к центру.



В нашем случае направленный отрезок, соединяющий конец вычитаемого вектора $\vec{v}_1$ с концом уменьшаемого вектора $\vec{v}_2$, и будет их векторной разностью.

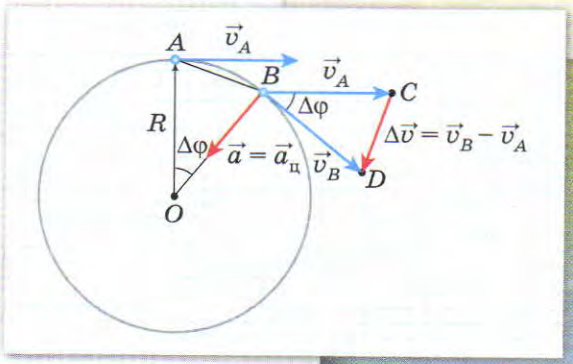


Из рисунка видно, что вектор $\Delta\vec{v}$ и, следовательно, вектор $\vec{a}$ направлены внутрь окружности. Для того чтобы понять, как направлено ускорение в определённой точке траектории, представим, что промежуток времени от момента нахождения тела в точке A до момента, когда тело стало находиться в точке B, становится всё меньше и меньше. Тогда точки A и B стягиваются в одну точку A. При этом направление вектора $\Delta\vec{v}$ приближается к направлению вектора $\vec{AO}$.

Получается, что ускорение тела, движущегося по окружности с постоянной по модулю скоростью, направлено по радиусу окружности к её центру. Именно поэтому оно называется *центростремительным* и обозначается $\vec{a}_ц$.

Так как касательная к окружности перпендикулярна радиусу, проведённому в точке касания, то векторы скорости $\vec{v}$ и центростремительного ускорения $\vec{a}_ц$ перпендикулярны друг другу.

$\vec{v}_A \perp OA$, $\vec{v}_B \perp OB \Rightarrow$
$\Rightarrow \angle AOB = \angle CBD = \Delta\varphi$.
$\Delta AOB \sim \Delta CBD$ как два равнобедренных треугольника с одинаковым углом при вершине.



МОДУЛЬ ЦЕНТРОСТРЕМИТЕЛЬНОГО УСКОРЕНИЯ ТЕЛА Для нахождения модуля центростремительного ускорения вновь обратимся к рисунку. Пусть тело за время t переместилось из точки A в точку B, при этом вектор $\vec{OA}$ займёт положение вектора $\vec{OB}$, повернувшись на угол $\Delta\varphi$. Треугольники AOB и DBC являются равнобедренными, так как $OA = OB = R$, а $CB = BD = v$. При этом $\angle AOB = \angle CBD = \Delta\varphi$ как углы, образованные взаимно перпендикулярными сторонами. Поэтому треугольники AOB и DBC подобны. Следовательно,

$$\frac{|\vec{v}_B - \vec{v}_A|}{AB} = \frac{|\vec{v}|}{R}. \qquad (2)$$

Так как AB — модуль перемещения тела, то его значение при малых t можно заменить длиной дуги $\smile AB$:

$$AB \approx \smile AB = |\vec{v}| \cdot t.$$

Подставив это выражение в выражение (2), получим

$$\frac{|\vec{v}_B - \vec{v}_A|}{|\vec{v}| \cdot t} = \frac{|\vec{v}|}{R}, \quad \text{или} \quad \frac{|\vec{v}_B - \vec{v}_A|}{t} = \frac{|\vec{v}|^2}{R}.$$

С учётом формулы (1) можно записать:

$$|\vec{a}| = \frac{|\vec{v}|^2}{R}, \quad \text{или} \quad a_ц = \frac{v^2}{R}.$$

Если обозначить величины: модуль скорости движения тела по окружности — v, радиус окружности — R, то модуль центростремительного ускорения можно рассчитать по формуле

$$a_ц = \frac{v^2}{R}.$$

ВОПРОСЫ:

- Куда направлена мгновенная скорость тела при его движении по окружности?
- Куда направлено ускорение тела при его движении по окружности?
- Как вычислить модуль центростремительного ускорения?

5 ПЕРИОД И ЧАСТОТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое период обращения.
- Что такое частота обращения.
- Как вычислить скорость и ускорение тела, движущегося по окружности, если известны его период и частота обращения.

ВСПОМНИТЕ:

- Куда направлена мгновенная скорость тела при его движении по окружности?
- Куда направлено ускорение тела при его движении по окружности и как вычислить его значение?

Измерить скорость тела, движущегося по окружности, не всегда просто. Однако её можно вычислить, используя такие понятия, как период и частота обращения.

ПЕРИОД Когда тело движется по окружности с постоянной по модулю скоростью, через определённые промежутки времени движение повторяется снова и снова. Примером этому может служить движение на обычной детской карусели.

Время, в течение которого тело совершает один полный оборот, называют **периодом обращения**. Период обращения принято обозначать буквой T. Единица этой физической величины в СИ — секунда.

С понятием периода обращения вы уже знакомились при изучении географии. Например, период обращения Земли вокруг своей оси составляет 23 ч 56 мин 4 с, а период обращения Земли вокруг Солнца — 1,00004 земных года. Самый короткий период обращения вокруг Солнца в нашей Солнечной системе имеет планета Меркурий. Её период обращения составляет 0,24085 земных лет. Интересно, что самая большая планета Солнечной системы — Юпитер — имеет самый короткий период обращения вокруг своей оси — всего 9 ч 50 мин. В 226 000 000 лет оценивается период обращения Солнечной системы вокруг ядра Галактики.

ЧАСТОТА Число оборотов в единицу времени, которое совершает тело при движении по окружности, называют **частотой обращения**. Частоту обращения обозначают греческой буквой ν.

Если, катаясь на карусели в парке, мы совершаем один оборот за 20 с, то период обращения в этом случае

$$T = 20 \text{ с}.$$

Как определить частоту обращения при этом движении? Сколько оборотов совершает карусель за 1 с?

Очевидно,

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{20}\ \frac{1}{\text{с}}.$$

т. е. за 1 с карусель совершает одну двадцатую часть своего полного оборота.

Таким образом, *частота обращения является величиной, обратной периоду обращения*:

$$\nu = \frac{1}{T}. \qquad (1)$$

Именно поэтому единица этой физической величины обратна секунде, т. е. 1/с, или с^{-1}.

Если обозначить величины: частота обращения — ν, период обращения — T, то связь между этими физическими величинами можно выразить так:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$

СВЯЗЬ МОДУЛЯ СКОРОСТИ С ПЕРИОДОМ И ЧАСТОТОЙ ОБРАЩЕНИЯ

Чтобы определить модуль скорости тела, движущегося по окружности, достаточно знать радиус окружности R и период или частоту обращения. Действительно, один полный оборот тело совершает за время, равное периоду обращения T. Путь, пройденный телом, в этом случае равен длине окружности:

$$l = 2\pi R.$$

Тогда можно записать:

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T}, \qquad (2)$$

или с учётом формулы (1):

$$\upsilon = 2\pi R\nu. \qquad (3)$$

С учётом формул (2) и (3) можно найти центростремительное ускорение тела, выразив скорость через период или частоту обращения:

$$a_ц = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 4\pi^2\nu^2 R. \qquad (4)$$

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

1 Найдём модуль скорости вращения ребёнка на карусели, если радиус окружности, по которой происходит движение, равен 2,3 м, а время, за которое карусель совершает один полный оборот, равно 20 с.

Дано:	Решение:
$R = 2{,}3$ м $T = 20$ с	Модуль скорости движения на карусели можно найти по формуле (2):
υ — ?	$\upsilon = \frac{2\pi R}{T}$, $\upsilon = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}3\text{ м}}{20\text{ с}} = \frac{14{,}444}{20} = 0{,}722$ м/с.

Ответ: $\upsilon = 0{,}722$ м/с.

2 Земля делает один оборот вокруг Солнца за 365 дней. Расстояние от Солнца до Земли составляет $149{,}6 \cdot 10^6$ км. Определим линейную скорость движения Земли вокруг Солнца, считая орбиту окружностью.

Дано:	СИ
$T = 365$ дн. $R = 149{,}6 \cdot 10^6$ км	$365 \cdot 24 \cdot 3600$ с $= 3{,}154 \cdot 10^7$ с $149{,}6 \cdot 10^9$ м
υ — ?	

Решение:

$$\upsilon = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 149{,}6 \cdot 10^9\text{ м}}{3{,}154 \cdot 10^7\text{ с}} = 297{,}9 \cdot 10^2\text{ м/с} \approx 30\text{ км/с}.$$

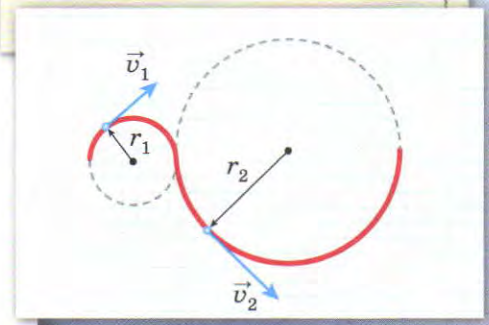
Ответ: $\upsilon \approx 30$ км/с.

Часто мгновенную скорость движения по окружности называют *линейной скоростью*.

Если обозначить величины: частота обращения — ν, период обращения — T, радиус окружности — R, то модуль скорости движения тела по окружности рассчитывается по формуле

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu.$$

Умение описывать движение тела по окружности чрезвычайно важно, так как движение по криволинейной траектории можно приближённо представить как движение по дугам окружностей различных радиусов.



ВОПРОСЫ:

- Что такое период обращения и каковы его единицы?
- Что такое частота обращения и каковы её единицы?
- Как вычислить скорость и ускорение тела, движущегося по окружности, если известны его период и частота обращения?

6 ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как формулируется закон всемирного тяготения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое всемирное тяготение?
- Что такое ускорение свободного падения?
- Куда направлено ускорение тела при его движении по окружности и как вычислить его значение?

Закон всемирного тяготения является одним из самых фундаментальных законов природы. Он является всеобщим, так как всё вещество во Вселенной подчиняется этому закону.

СИЛА, ДЕЙСТВУЮЩАЯ НА ДВИЖУЩЕЕСЯ ПО ОКРУЖНОСТИ ТЕЛО Согласно второму закону Ньютона причиной любого ускорения является сила, действующая на тело, при этом направление силы совпадает с направлением ускорения. Природа сил, действующих на тело при его движении по окружности с постоянной по модулю скоростью, может быть различна. Если тело, закреплённое на нити, движется по окружности, причиной центростремительного ускорения является сила упругости нити. В том случае, когда тело вращается на диске вокруг его оси, такой силой является сила трения. Если сила прекратит своё действие, тело начнёт двигаться по прямой, касательной к данной окружности. При равномерном движении по окружности сила направлена к центру окружности и согласно второму закону Ньютона равна:

$$F = ma_{ц} = \frac{mv^2}{R}.$$

где m — масса тела; $a_{ц}$ — центростремительное ускорение; R — радиус окружности; v — линейная скорость.

ОТКРЫТИЕ ЗАКОНА ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ Польский астроном Николай Коперник первым показал, что планеты вращаются вокруг Солнца, и предложил свою, гелиоцентрическую систему мира. После этого усилия многих учёных были направлены на поиски закономерностей, которым подчиняется движение планет относительно Солнца. В начале XVII в. немецкий астроном И. Кеплер на основе наблюдений датского астронома Тихо Браге установил закономерности движения планет вокруг Солнца. Сам Кеплер не нашёл причину, объясняющую эти закономерности, но его работы стали основой для открытия закона всемирного тяготения.

Существует легенда, согласно которой к идее существования всемирного тяготения И. Ньютон пришёл, отдыхая в саду и увидев падающее яблоко. Именно в это время Ньютон выдвинул гипотезу о том, что силы одной и той же природы заставляют и яблоко падать на землю, и Луну двигаться по своей околоземной орбите. Датируя в своих воспоминаниях это открытие 1666-м годом, лишь в 1687 г. учёный сформулировал, записал и опубликовал этот закон. И. Ньютон писал: «Силы, с которыми... планеты постоянно отклоняются от прямолинейного движения и удерживаются на своих орбитах, направлены к Солнцу и обратно пропорциональны квадратам расстояний до центра его... Тяготение существует ко всем телам вообще и пропорционально массе каждого из них».

Иоганн Кеплер
(1571—1630)
Немецкий астроном, один из творцов астрономии Нового времени. Открыл законы движения планет.

Таким образом, Ньютон сделал великое открытие, согласно которому *всякое тело во Вселенной притягивается к любому другому телу с тем большей силой, чем больше масса этих тел и чем меньше расстояние между ними*. Это также и та самая сила, которая заставляет тела падать на Землю.

ЗАКОН ВСЕМИРНОГО ТЯГОТЕНИЯ Окончательно этот закон формулируется следующим образом: два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

3

где G — универсальная константа, названная **гравитационной постоянной**.

Строго говоря, такая формулировка закона всемирного тяготения верна тогда, когда собственные размеры тел много меньше расстояния между ними. Например, радиус Земли составляет 6371 км, а расстояние от Земли до Солнца составляет 149 600 000 км. Однако путём сложных математических вычислений Ньютон доказал справедливость этого закона для шаров, плотность которых симметрично распределена относительно их центров. В этом случае R — расстояние между центрами шарообразных тел. В случае, когда одно из тел является шарообразным и его радиус существенно больше размеров тела, находящегося на его поверхности (или вблизи неё), в качестве расстояния между телами надо взять радиус шара. Именно так применяется формула тяготения для вычисления силы притяжения Землёй тела, находящегося на её поверхности, при этом за расстояние R принимают радиус Земли.

ГРАВИТАЦИОННАЯ ПОСТОЯННАЯ Коэффициент пропорциональности G в законе всемирного тяготения одинаков для всех тел в природе. Гравитационная постоянная численно равна силе притяжения двух тел массой по 1 кг, расположенных на расстоянии 1 м друг от друга:

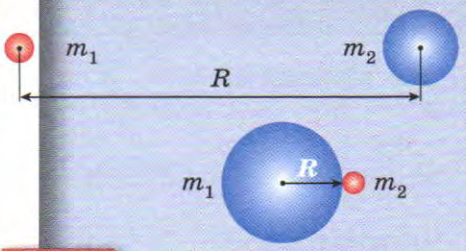
$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2.$$

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ Одно из проявлений силы всемирного тяготения — *сила тяжести*. Так принято называть силу притяжения тел к Земле вблизи её поверхности. Если M — масса Земли, $R_з$ — её радиус, m — масса данного тела, то сила тяжести равна:

$$F = G\frac{Mm}{R_з^2} = mg,$$

где g — *ускорение свободного падения* у поверхности Земли:

$$g = G\frac{M}{R_з^2}.$$

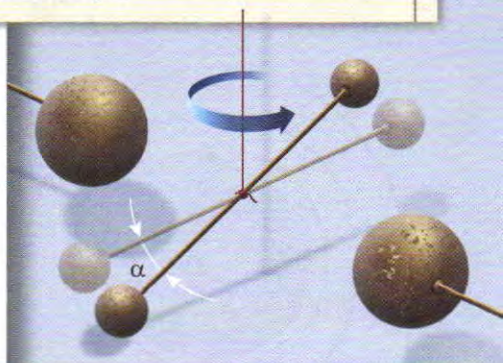


Если обозначить величины: массы тел — m_1 и m_2, расстояние между ними — R, гравитационная постоянная — G, то закон всемирного тяготения для этих тел можно записать так:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{R^2},$$

где $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$.

Первые измерения гравитационной постоянной были осуществлены только в XVIII в. английским учёным Г. Кавендишем. Опыты проводились при помощи так называемых крутильных весов. По углу закручивания нити Кавендиш сумел измерить ничтожно малую силу притяжения между маленьким и большим металлическими шарами. Результаты опыта позволили определить гравитационную постоянную.



ВОПРОСЫ:

- Как формулируется закон всемирного тяготения?
- Чему равна гравитационная постоянная?

7 ДВИЖЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое искусственный спутник Земли.
- Что такое первая космическая скорость.

ВСПОМНИТЕ:

- Второй закон Ньютона.
- Закон всемирного тяготения.
- Движение тела по окружности.

Естественным спутником Земли является Луна. Искусственными спутниками Земли называют космические летательные аппараты, выведенные на околоземные орбиты. При помощи искусственных спутников возможно решение различных научных и прикладных задач. Запуск первого искусственного спутника Земли, ставшего первым искусственным небесным телом, созданным человеком, был осуществлён в Советском Союзе 4 октября 1957 г.

ЧТО НУЖНО СДЕЛАТЬ, ЧТОБЫ ВЫЙТИ ЗА ПРЕДЕЛЫ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ? Если тело выведено за пределы земной атмосферы, на него действуют только силы тяготения со стороны Земли, Солнца и других небесных тел. Жизненный опыт показывает, что, для того чтобы тело вышло за пределы земной атмосферы, у него должна быть достаточно большая начальная скорость. Действительно, тело, брошенное вверх с небольшой начальной скоростью, быстро упадёт на Землю. Чем больше начальная скорость, тем на большую высоту поднимется тело. При некоторой начальной скорости тело покинет пределы земной атмосферы и превратится в искусственный спутник Земли. Очевидно, что при дальнейшем увеличении начальной скорости тело будет всё больше удаляться от поверхности Земли и может превратиться в искусственный спутник Солнца. При ещё большем увеличении скорости тело может покинуть Солнечную систему.

Рассмотрим рисунок Ньютона, встречающийся в одной из его работ. На рисунке изображён земной шар, а на нём — высокая гора. Ньютон пишет о том, что брошенный с такой горы камень отклонится под действием силы тяжести от прямолинейного пути и, описав криволинейную траекторию, упадёт на Землю. Чем с большей скоростью будет брошен камень, тем дальше он упадёт. В отсутствие сопротивления воздуха и при достаточно большой скорости камень вообще может не упасть, а начнёт двигаться вокруг Земли по некоторой орбите.

СКОРОСТЬ ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА Рассчитаем скорость, с которой должно лететь тело, чтобы стать искусственным спутником Земли. Согласно второму закону Ньютона

$$F = ma, \qquad (1)$$

где m — масса спутника; a — ускорение спутника на высоте h. Так как спутник движется по окружности, это ускорение — центростремительное, и его можно найти по формуле

$$a = \frac{v^2}{R_З + h}, \qquad (2)$$

где $R_З$ — радиус Земли.

На спутник действует сила тяжести, которая по закону всемирного тяготения равна

$$F_{тяж} = G\frac{mM_З}{(R_З + h)^2}. \qquad (3)$$

Подставив формулы (2) и (3) в формулу (1), получим

$$G\frac{mM_З}{(R_З + h)^2} = m\frac{v^2}{R_З + h} \quad \Rightarrow \quad v^2 = G\cdot\frac{M_З}{R_З + h},$$

откуда

$$v = \sqrt{G\frac{M_З}{R_З + h}}. \qquad (4)$$

Эта формула позволяет рассчитать скорость v, которую надо сообщить телу, поднятому на высоту h над Землёй, чтобы оно стало искусственным спутником Земли.

Спутник, вращающийся вокруг Земли вблизи её поверхности, имеет ускорение g, направленное к центру Земли, т. е. такое же ускорение свободного падения, которое имеет и тело, свободно летящее по параболической траектории или падающее по вертикали вблизи земной поверхности. Значит, движение спутника есть просто свободное падение. Это движение отличается от движения тел, брошенных под углом к горизонту, тем, что скорость спутника настолько велика, что радиус кривизны его траектории равен радиусу Земли.

ПЕРВАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ Минимальная скорость, которую необходимо сообщить телу у поверхности Земли, чтобы оно стало искусственным спутником, называется *первой космической скоростью*.

Чтобы найти первую космическую скорость v_1, следует учесть, что она определяется как скорость спутника вблизи поверхности Земли, т. е. когда значение h много меньше значения $R_З$ и его значением в формуле (4) можно пренебречь:

$$v_1 = \sqrt{G\frac{M_З}{R_З}}. \qquad (5)$$

Подставив в формулу (5) значения

$$M_З = 6 \cdot 10^{24}\ \text{кг},\ R_З = 6400\ \text{км} = 6{,}4 \cdot 10^6\ \text{м},$$

получим $v_1 \approx 7900$ м/с $= 7{,}9$ км/с.

Значение первой космической скорости можно получить и другим способом. Движение искусственного спутника происходит только под действием силы тяжести, следовательно, его центростремительное ускорение совпадает с ускорением свободного падения вблизи поверхности Земли:

$$a_ц = g = \frac{v_1^2}{R_З + h} \approx \frac{v_1^2}{R_З}.$$

Получаем

$$v_1 = \sqrt{gR_З} = \sqrt{9{,}8\frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 6{,}4 \cdot 10^6\ \text{м}} \approx 7{,}9\frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

Тело может стать искусственным спутником Земли, только если его скорость больше чем 7,9 км/с и меньше чем 11,2 км/с. При скорости, меньшей первой космической, тело упадёт на Землю. А при скорости, большей $v_2 = 11{,}2$ км/с, которая называется *второй космической скоростью*, оно преодолеет притяжение Земли и окажется в космическом пространстве. Именно с такой скоростью космические корабли достигли Луны, Венеры и Марса. При достижении телом *третьей космической скорости* $v_3 = 16{,}7$ км/с тело преодолеет притяжение Солнца и покинет Солнечную систему.

Высоты полёта искусственных спутников над Землёй различны — от 200–300 км до нескольких десятков тысяч километров. Искусственные спутники выводятся на орбиты с помощью управляемых многоступенчатых ракет-носителей, которые от старта до некоторой расчётной точки в пространстве движутся благодаря тяге, развиваемой реактивными двигателями. После достижения ракетой расчётной скорости (по величине и направлению) работа реактивных двигателей прекращается; это так называемая точка выведения спутника на орбиту. Запускаемый космический аппарат, который несёт последняя ступень ракеты, автоматически отделяется от неё и начинает движение по некоторой орбите относительно Земли и становится искусственным небесным телом.

Первым человеком, совершившим полёт в космос на корабле-спутнике «Восток», был Юрий Гагарин. Это знаменательное событие произошло 12 апреля 1961 г.

ВОПРОСЫ:

- Что такое искусственный спутник Земли?
- Что такое первая космическая скорость?

8 ГРАВИТАЦИЯ И ВСЕЛЕННАЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое гравитация и какую роль она играет во Вселенной.

ВСПОМНИТЕ:
- Как формулируется закон всемирного тяготения?

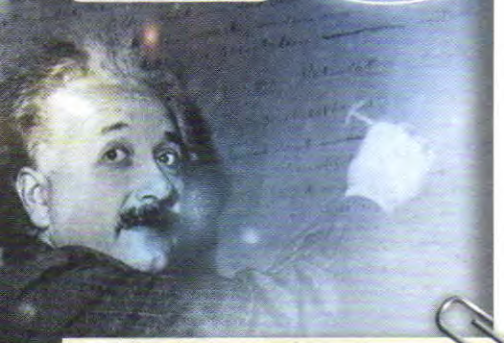
Под словом «Вселенная» чаще всего мы имеем в виду весь окружающий нас мир. Это понятие используется и тогда, когда хотят сказать о самом большом объекте реального мира, который можно наблюдать и изучать. Все тела Вселенной, доступной для наблюдения, подчиняются закону всемирного тяготения.

ГРАВИТАЦИЯ Фундаментальное свойство всех тел притягиваться друг к другу называют всемирным тяготением или *гравитацией* (от лат. *gravitas* — тяжесть). Свойство гравитации связано с массой тела.

Согласно последним представлениям науки

ВСЕЛЕННАЯ

Возраст	13,7 млрд лет
Размер наблюдаемой части	примерно 10^{28} см
Масса наблюдаемой части	10^{50} т
Средняя плотность вещества	примерно 10^{-29} г/см^3



Попытки понять и описать математически законы гравитации предпринимались физиками и до Ньютона. Очень важный результат был получен английским учёным Робертом Гуком, который в 1674 г. писал, что «все небесные тела имеют притяжение, или силу тяготения». Именно Гуку принадлежит открытие «закона обратных квадратов», согласно которому «притяжение обратно пропорционально квадрату расстояния до центра».

Одним из самых выдающихся открытий в физике стало объяснение природы гравитации, которое впервые было дано в общей теории относительности Альбертом Эйнштейном. Общая теория относительности, опубликованная в 1915–1916 гг., по существу, является обобщённой теорией тяготения. Можно сказать, что теория относительности Эйнштейна произвела в науке революционный переворот.

Силы гравитационного притяжения (силы тяготения) между окружающими нас телами обычных размеров чрезвычайно малы. Отметим также, что силы гравитации между двумя заряженными частицами намного меньше сил их электрического притяжения или отталкивания. Но именно силы гравитационного притяжения между нейтральными атомами водорода на ранней стадии развития Вселенной привели к образованию звёзд.

По мере увеличения массы силы притяжения между телами становятся всё более заметными и при переходе к масштабам небесных тел они начинают играть главную роль и достигают огромных величин. Например, сила взаимного притяжения Земли и Луны составляет около 10^{20} Н.

Именно благодаря гравитации отдельные небесные тела организуются в системы. Размеры таких систем различны: от сравнительно небольших (с астрономической точки зрения) и простых систем, например система Земля—Луна, Солнечная система и двойные, или кратные, звёзды, до насчитывающих сотни тысяч звёзд больших звёздных скоплений. Считается, что гравитация лежит в основе структуры Вселенной.

Даже после того как теория тяготения Эйнштейна получила признание в научном мире, предпринимались попытки построения теории гравитации, основанной на других принципах. Однако всякий раз оказывалось, что именно теория Эйнштейна подтверждается астрономическими наблюдениями и экспериментальными проверками.

СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА Солнце — это звезда, возраст которой составляет около 5 млрд лет. Солнечной системой называют систему небесных тел, состоящую из самого Солнца, а также планет, спутников планет, комет, метеорных тел и космической пыли. Все тела Солнечной системы движутся в области преобладающего гравитационного влияния Солнца.

По физическим характеристикам большие планеты Солнечной системы разделяют на внутренние (Меркурий, Венера, Земля, Марс) и внешние планеты-гиганты (Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун).

В настоящее время Плутон, который ранее считали девятой планетой, астрономы не считают планетой Солнечной системы.

Закон всемирного тяготения даёт возможность вычислить массы планет и их спутников, объяснить такие явления, как приливы и отливы в океанах, а также понять многие другие явления. Именно благодаря закону всемирного тяготения стало возможным открытие Нептуна и Плутона сначала при помощи теоретических вычислений. И только позже эти открытия были подтверждены астрономическими наблюдениями.

В 1781 г. английский астроном Уильям Гершель открыл планету Уран. Была вычислена её орбита и составлена таблица положений этой планеты на много лет вперёд. Однако проверка этой таблицы на основе астрономических наблюдений показала, что её данные не совпадают с реальными. Была выдвинута гипотеза, что отклонение в движении Урана вызвано притяжением неизвестной планеты, находящейся от Солнца ещё дальше, чем Уран. Анализируя данные, англичанин Джон Адамс и француз Урбен Леверье вычислили положение гипотетической планеты на небе. По просьбе Леверье немецкий астроном Иоганн Галле занялся проверкой гипотезы, и 28 сентября 1846 г. Галле, направив телескоп на указанное место, обнаружил новую планету, которую назвали Нептуном. Подобным образом 14 марта 1930 г. был открыт и Плутон.

СИЛА ТЯЖЕСТИ И УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ НА РАЗНЫХ ПЛАНЕТАХ Говоря о силе тяжести, раннее мы имели в виду силу, с которой Земля взаимодействует с другими телами. В общем случае под силой тяжести можно понимать силу, создаваемую тяготением массивного тела, и поэтому имеет смысл говорить о силе тяжести на других планетах. При этом можно рассчитать и ускорение свободного падения вблизи поверхности других планет, зная массу планеты и её радиус:

$$g = \frac{GM}{R^2}.$$

3

При этом силу тяжести на данной планете можно найти по формуле $F = mg$.

Гелиоцентрическая система Коперника впервые дала возможность определить относительные расстояния планет от Солнца и от Земли. После изобретения Галилеем телескопа появилась возможность изучения физических характеристик космических тел, входящих в Солнечную систему. В 1609 г. Галилей направил изготовленный им маленький телескоп на Луну, Венеру, Юпитер и Сатурн и сделал ряд поразительных для его эпохи открытий. Наблюдая солнечные пятна, Галилей установил, что Солнце вращается вокруг своей оси.

Во Вселенной есть объекты, являющиеся источниками колоссальной гравитации: на их поверхности сила тяжести достигает огромных значений. Такими объектами являются, например, белые карлики и нейтронные звёзды (сверхплотные остатки некоторых звёзд). Ещё больше сила тяготения вблизи объектов, называемых чёрными дырами. Притяжение этих небесных тел так велико, что они не испускают даже собственный свет, т. е. они не светятся, а остаются чёрными.

УСКОРЕНИЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ на поверхности некоторых небесных тел, м/с²

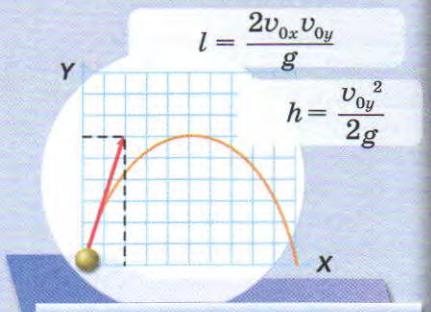
Меркурий	3,7
Венера	8,88
Земля	9,81
Марс	3,86
Сатурн	10,44
Уран	8,86
Нептун	11,09
Солнце	273,1
Луна	1,52
Юпитер	23,95

ВОПРОСЫ:

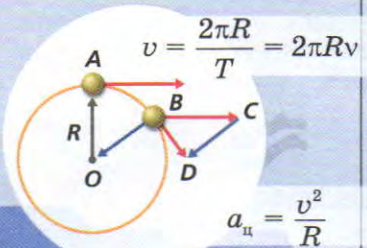
- Какие процессы происходят во Вселенной в результате действия сил тяготения?
- От чего зависит сила гравитационного притяжения?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

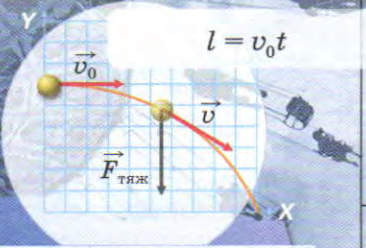
- Движение тела, брошенного горизонтально, под углом к горизонту, а также движение тела по окружности — это примеры криволинейного движения.
- При движении по окружности мгновенная скорость тела в любой точке траектории направлена по касательной к траектории в этой точке, а ускорение тела, движущегося с постоянной по модулю скоростью, направлено по радиусу окружности к её центру.
- Движение по окружности характеризуется периодом и частотой обращения.
- Согласно закону всемирного тяготения два тела притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной массе каждого из них и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними.
- Фундаментальное свойство всех тел притягиваться друг к другу называют всемирным тяготением или гравитацией. Установлено, что гравитация — это основа структуры самой Вселенной.



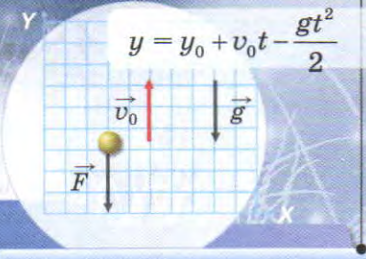
ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ



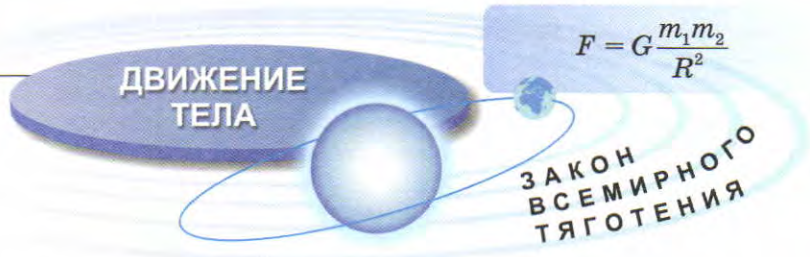
ПО ОКРУЖНОСТИ



ГОРИЗОНТАЛЬНО



ВЕРТИКАЛЬНО ВВЕРХ



ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Объясните, почему прыжок с разбега всегда будет дальше, чем прыжок с места.
- Как бы изменился период обращения Луны вокруг Земли, если бы при той же орбите масса Луны была бы в два раза меньше?
- Влияет ли на происходящие дорожно-транспортные происшествия сила притяжения, действующая согласно закону всемирного тяготения между автомобилями? Ответ обоснуйте.
- Можно ли утверждать, что человек притягивает Землю с такой же силой, с которой Земля притягивает человека? Ответ обоснуйте.

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

- МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ
- МАЯТНИК. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ
- ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА
- ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ
- ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС
- ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ
- ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

...Каждая частица вещества, в котором распространяется волна, должна сообщать своё движение не только ближайшей частице... но необходимо сообщает его также и всем другим частицам, которые касаются её и препятствуют её движению...

Христиан Гюйгенс

9 МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое колебательные движения.
- Что такое колебательная система.
- Что такое свободные и вынужденные колебания.
- Что такое пружинный маятник.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое неравномерное движение?
- Как формулируется закон Гука?
- Какие системы называют замкнутыми?

В жизни мы часто наблюдаем движения, которые повторяются с течением времени. Вы уже знакомы с одним из примеров повторяющегося движения — движением по окружности. Наблюдая за движением маятника часов, движением качелей, колебаниями струн музыкального инструмента и т. п., можно заметить одно общее во всех этих примерах — многократное повторение одного и того же цикла движений.

ПЕРИОДИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ Периодическим называется повторяющееся движение, у которого каждый цикл в точности воспроизводит любой другой цикл. В реальных условиях точного повторения движения не всегда можно добиться. Однако в некоторых случаях отклонения от совершенно точного повторения настолько малы, что ими можно пренебречь и считать движение периодическим.

СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ Механическое движение, которое совершает, например, маятник часов или тело, подвешенное на пружине, называют **колебательным**. Отличительной особенностью такого движения является то, что оно может совершаться без воздействия периодических внешних сил. Так, например, если толкнуть качели, они будут продолжать раскачиваться некоторое время без нашего воздействия на них. Почему это происходит? Первоначально была совершена механическая работа, в результате качели отклонились от положения равновесия и их потенциальная энергия увеличилась. Под действием силы, возвращающей качели в положение равновесия, они могут совершать колебательные движения. Колебания, происходящие только за счёт начального запаса энергии, называют **свободными колебаниями**.

В отличие от свободных колебаний, **вынужденные колебания** происходят в случае, когда на тело или совокупность тел *периодически* действует некоторая внешняя сила. Примером вынужденных колебаний может служить такое движение качелей, когда их постоянно раскачивают.

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА Системы тел, которые способны совершать *колебания*, называют **колебательными системами**. В колебательной системе всегда присутствует сила, которая возвращает тело в положение равновесия.

ПРУЖИННЫЙ МАЯТНИК В качестве одной из простейших колебательных систем рассмотрим пружинный маятник. Эта система состоит из грузика, пружины, стойки, к которой прикреплён левый конец пружины, и стержня, вдоль которого может двигаться груз практически без трения. Масса пружины много меньше массы груза, поэтому массой пружины пренебрегают.

Рассмотрим физическую установку, состоящую из пружины и прикреплённого к ней шарика с отверстием. Шарик может скользить по проходящему через отверстие гладкому стержню. При этом возникающее трение настолько мало, что при изучении движения шарика им можно пренебречь.

Пока пружина не деформирована, сила упругости на тело не действует. Сила тяжести уравновешена силой реакции опоры. Поэтому груз находится в *положении равновесия*.

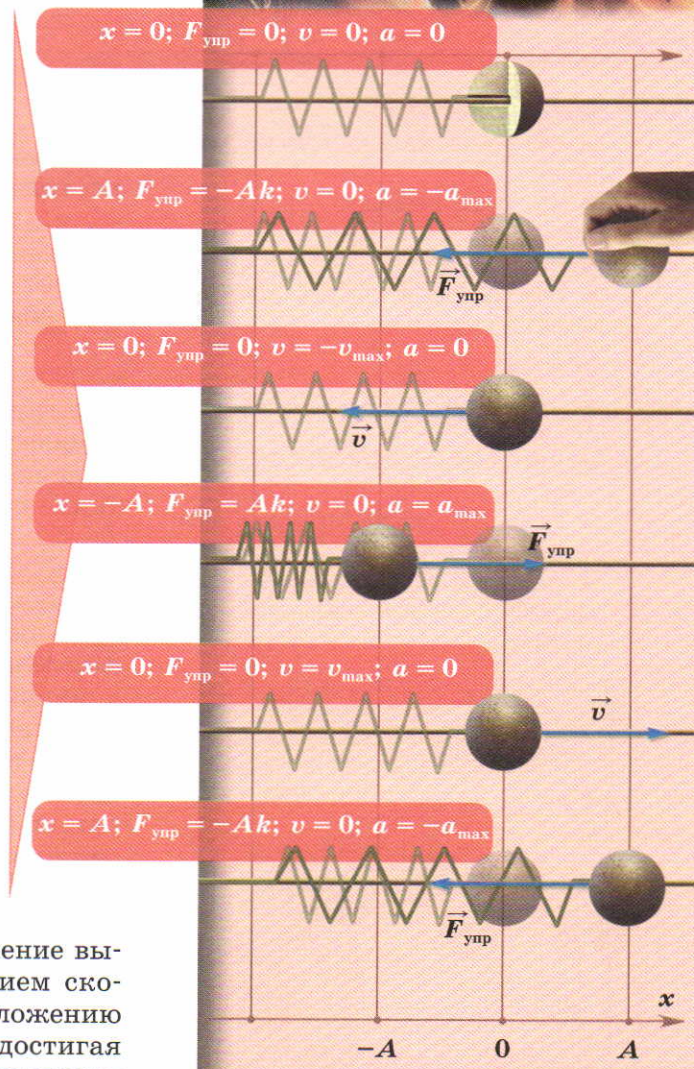
Направим ось OX вдоль стержня, выбрав в качестве начала отсчёта точку, определяющую данное положение шарика. При этом сила упругости, скорость шарика и его ускорение равны нулю.

Выведем груз из положения равновесия, растянув пружину на некоторое расстояние A. На груз будет действовать сила упругости пружины $\vec{F}_{упр}$, которая согласно закону Гука зависит от коэффициента жёсткости пружины k, пропорциональна смещению (отклонению груза от положения равновесия) и направлена к положению равновесия. Если груз отпустить, то под действием этой силы он начнёт двигаться к положению равновесия. При этом в точке наибольшего растяжения пружины шарик будет обладать максимальным ускорением, так как сила упругости в этой точке максимальна. Направление силы упругости и направление вызванного ею ускорения совпадают с направлением скорости груза. Поэтому по мере приближения к положению равновесия его скорость всё время возрастает, достигая своего максимального значения. В положении равновесия сила упругости равна нулю и, следовательно, равно нулю и ускорение.

Далее тело продолжает своё движение по инерции. Пружина сжимается, и в ней опять возникает сила упругости, которая направлена вправо, к положению равновесия. Поэтому скорость тела уменьшается, и оно останавливается в крайнем левом положении, характеризуемым координатой $x = -A$. В крайнем левом положении сила упругости максимальна и направлена к положению равновесия. Поэтому сразу после остановки тело вновь начнёт движение. Груз снова пройдёт положение равновесия, но уже слева направо и опять отклонится от него на расстояние A, т. е. вернётся в точку, откуда началось движение. Таким образом, груз совершит одно полное колебание. Далее процесс повторится.

Одно из основных свойств всех колебательных систем заключается в том, что возникает периодически изменяющаяся сила, пропорциональная смещению тела, возвращающая систему в положение устойчивого равновесия.

В пружинном маятнике колебания совершались под действием внутренней силы — силы упругости.



В пружинном маятнике колебания совершаются под действием внутренней силы — силы упругости (сила трения пренебрежимо мала). Следовательно, свободные колебания — это колебания, происходящие под действием внутренних сил.

ВОПРОСЫ:

- Что такое колебательная система?
- Что такое свободные и вынужденные колебания?
- Что такое пружинный маятник?

10 МАЯТНИК. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое математический маятник.
- Что такое период и частота колебаний.
- Что такое амплитуда колебаний.
- Как выглядит график колебательного движения.

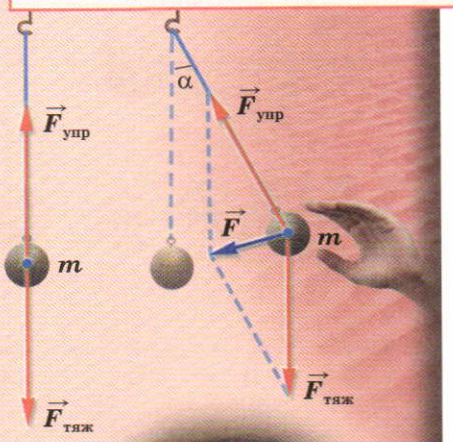
ВСПОМНИТЕ:

- Что такое колебательная система?
- Что такое равнодействующая сила?
- Правило параллелограмма для суммы векторов.
- Что такое период и частота обращения и как они связаны между собой?

Линейка, висящая на гвоздике, груз на верёвке, качели — всё это колебательные системы, подобные маятнику настенных часов. Любая из этих систем способна совершать свободные колебания около положения равновесия. У всех этих колебательных систем возвращающая сила возникает в результате действия силы тяжести.

ФИЗИЧЕСКИЙ МАЯТНИК Колебательные системы, подобные грузу на верёвке или качелям, представляют собой физические тела разной формы и размеров, которые совершают колебания около точки подвеса или опоры. Такие системы называют **физическими маятниками**.

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МАЯТНИК Для изучения свойств колебательного движения обычно рассматривают простейшую систему — *математический маятник* (*нитяной маятник*). Это грузик малого размера, подвешенный на длинной тонкой нити. В математическом маятнике пренебрегают массой нити и считают нить нерастяжимой. Также считают, что масса математического маятника — это только масса грузика, а силы упругости действуют только со стороны нити. В данном случае колебательной системой является нить, подвешенное на ней тело, штатив, на котором нить закреплена, и Земля.



На покоящийся грузик, подвешенный на нити, действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и сила упругости $\vec{F}_{упр}$, которые уравновешивают друг друга. Если отклонить маятник от положения равновесия, то силы тяжести и упругости будут направлены под углом друг к другу, а их равнодействующая $\vec{F}$ уже не будет равна нулю.

Действительно, равнодействующая сила равна векторной сумме всех сил, действующих на тело:

$$\vec{F} = \vec{F}_{тяж} + \vec{F}_{упр}.$$

Так как складываемые векторы направлены не вдоль одной прямой, их сумму можно найти по правилу параллелограмма. Под действием силы $\vec{F}$ маятник начнёт двигаться к положению равновесия. По инерции груз пройдёт положение равновесия и отклонится от него в другую сторону. Дойдя до своего крайнего положения, маятник под действием равнодействующей сил начнёт вновь двигаться к положению равновесия. Пройдя его, он опять отклонится. Далее процесс будет повторяться.

ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ При колебательном движении все положения колеблющегося тела периодически повторяются. Время, за которое совершается одно полное колебание, называют **периодом колебаний**.

Обозначается период колебаний буквой T и в СИ измеряется в секундах. На практике период колебаний можно измерить при помощи часов или секундомера.

Генрих Рудольф Герц
(1857—1894)
Выдающийся немецкий физик. Его работы сыграли огромную роль в развитии науки и техники и положили начало изобретению беспроволочного телеграфа, радио и телевидения.

ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ Аналогично периоду и частоте обращения тела по окружности колебательное движение характеризуется не только периодом, но и частотой. *Частота колебаний* — это число колебаний в единицу времени. Обозначается частота колебаний греческой буквой ν.

Если период колебаний маятника $T = 0{,}2$ с, то это означает, что продолжительность одного полного колебания такого маятника $^2/_{10}$, или $^1/_5$ с. Тогда за секунду такой маятник совершит пять колебаний, т. е.

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}2}\,\frac{1}{\text{с}} = 5\ \text{с}^{-1}.$$

Таким образом, частота колебаний является величиной, обратной периоду колебаний.

Единицей частоты колебаний является одно колебание в секунду, т. е. 1/с, или с^{-1}. Эта единица называется герцем (Гц) в честь немецкого учёного Генриха Герца:

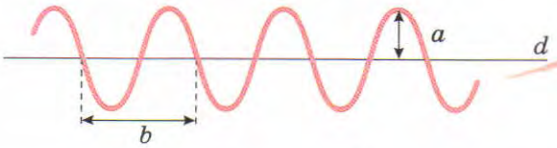
$$1\ \text{Гц} = 1\ \text{с}^{-1}.$$

1 Гц — это частота таких колебаний, при которых за 1 с совершается одно полное колебание.

АМПЛИТУДА КОЛЕБАНИЙ Ещё одной характеристикой колебательного движения является *амплитуда колебаний* — наибольшее по модулю смещение тела от положения равновесия.

Обозначается амплитуда колебаний буквой A и измеряется в единицах длины — метрах, сантиметрах и т. д. Зависит амплитуда колебаний от того первоначального толчка или отклонения, при помощи которого маятник был приведён в движение. Для математического маятника в качестве амплитуды надо взять либо длину дуги OA, либо длину отрезка OA, либо длину отрезка AC (половина хорды BA). Дело в том, что для малых амплитуд эти длины практически совпадают.

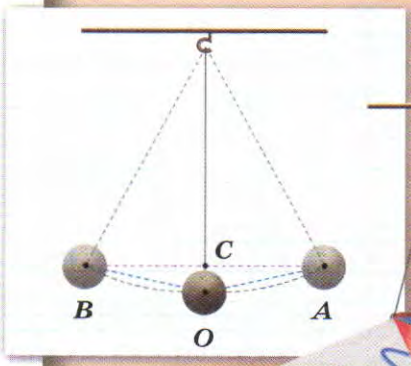
ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ Если в качестве математического маятника использовать воронку с песком или красящей жидкостью, а под колеблющимся маятником равномерно перемещать бумажную ленту, на ней останется характерный след. Вычерченная на ленте за некоторый промежуток времени кривая будет выглядеть так, как показано на рисунке.

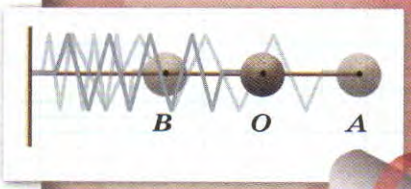


Амплитуде колебаний здесь будет соответствовать расстояние a, которое показывает наибольшее отклонение кривой от прямой d, соответствующей состоянию равновесия маятника. Расстояние b соответствует расстоянию, на которое переместится бумажная лента за время, равное периоду колебаний воронки.

Если обозначить величины: частота колебаний — ν, период колебаний — T, то связь между этими физическими величинами можно выразить так:

$$\nu = \frac{1}{T}.$$





ВОПРОСЫ:

- Что такое математический маятник?
- Что такое период и частота колебаний?
- Что такое амплитуда колебаний?
- Как выглядит график колебательного движения?

11 ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- От чего зависит период колебаний математического маятника.
- Как вычислить период колебаний математического маятника.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое пружинный и математический маятники?
- Каковы основные характеристики колебательного движения?
- Чему равно центростремительное ускорение?

Наблюдая в Пизанском соборе за качанием подвешенной на длинной цепи центральной люстры со свечами (паникадила), которую толкнули при зажигании свечей, Галилей обратил внимание на то, что амплитуда колебаний постепенно уменьшалась, но период оставался одним и тем же.

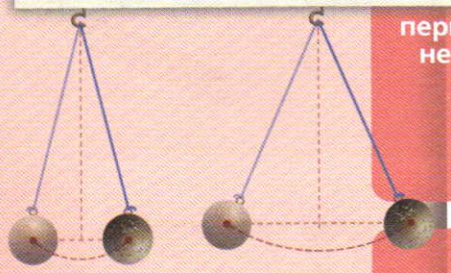
ЗАКОНОМЕРНОСТИ КОЛЕБАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА Можно считать, что в соборе Галилей наблюдал за колебательной системой, которую приближённо можно считать математическим маятником. Интересно то, что период колебаний Галилей определял, пользуясь собственным пульсом. Эти наблюдения побудили Галилея приступить к исследованиям, результаты которых имели огромное теоретическое и практическое значение.

Наблюдения и опыты с математическим маятником позволили установить две закономерности:

1. Если отклонять маятник на различные (но не слишком большие) углы и затем отпускать, то он будет колебаться с одинаковым периодом, хотя и с разными амплитудами, т. е. *период колебаний маятника не зависит от амплитуды.*

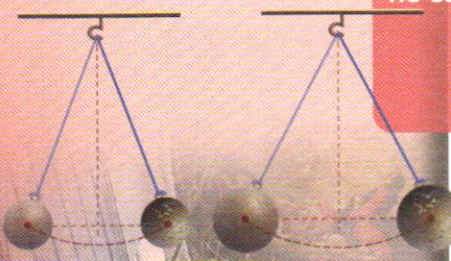
2. Если при одной и той же длине маятника подвешивать грузы различной массы, период колебаний будет один и тот же. Следовательно, *период колебаний маятника не зависит от массы груза.*

Если обозначить величины: масса грузика математического маятника — m, длина нити — l, амплитуда колебаний — A, период колебаний — T, то



период колебаний маятника не зависит от амплитуды:

$m_1 = m_2;$
$l_1 = l_2;$
$A_1 \neq A_2;$
$T_1 = T_2.$



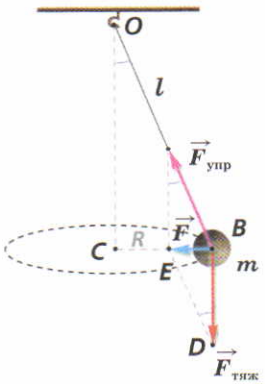
период колебаний не зависит от массы маятника:

$l_1 = l_2;$
$m_1 \neq m_2;$
$T_1 = T_2.$

ФОРМУЛА ПЕРИОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА При колебании маятника в вертикальной плоскости груз движется ускоренно по дуге под действием равнодействующей силы $\vec{F}$, которая меняется при движении.

Таким образом, мы наблюдаем ускоренное движение, при котором ускорение меняется с течением времени. Для количественного описания такого движения элементарных знаний механики и математики уже недостаточно. Поэтому для упрощения мы поступим следующим образом.

Предположим, что маятник колеблется так, чтобы нить маятника описывала конус и груз двигался по окружности.



Период обращения маятника по конусу и период колебания в одной плоскости будут близки. При этом чем меньше угол отклонения, тем ближе будут значения периодов. Поэтому для вывода формулы периода колебаний математического маятника можно воспользоваться результатом, полученным для конического маятника. Для этого надо взять два одинаковых маятника и заставить один из них колебаться в вертикальной плоскости, а другой вращаться по конусу. Период обращения маятника по конусу будет таким же, что и период колебания в одной плоскости. Период обращения конического маятника равен отношению длины описываемой грузом окружности к значению его скорости:

$$T = \frac{2\pi R}{v}. \qquad (1)$$

Если угол отклонения невелик, то можно считать, что сила $\vec{F}$ направлена по радиусу окружности BC. Тогда

$$F = ma_{ц} = \frac{mv^2}{R}. \qquad (2)$$

Треугольники OBC и BDE подобны, поэтому можно записать: $OC : CB = BD : BE$.

Так как $OC = h$, $BC = R$, $BD = \vec{F}_{тяж}$, а $BE = \vec{F}$, то:

$$F = \frac{Rmg}{h}. \qquad (3)$$

Приравнивая выражения (2) и (3), получаем выражение для скорости обращения конического маятника:

$$v = R\sqrt{\frac{g}{h}}. \qquad (4)$$

Наконец, подставляя выражение (4) в выражение (1), получаем

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

При малых отклонениях маятника $h \approx l$. Если длина нити $l = 1$ м, а отклонение маятника составляет $R = 5$ см, то по теореме Пифагора можно найти величину h:

$$h = \sqrt{10\,000 - 25} = 99{,}9 \text{ см}.$$

Следовательно, для малых углов можно записать:

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

Именно в таком виде записывается формула периода колебаний математического маятника.

Зависимость периода колебаний маятника от ускорения свободного падения позволяет опытным путём определить значение g. По изменению значения g на одной и той же географической широте можно судить о наличии месторождений полезных ископаемых. Подобные измерения позволили открыть Курскую магнитную аномалию.

Можно оценить, сколько ударов пульса мог отсчитать Галилей за один период колебаний, если известно, что длина цепи, на которой была подвешена люстра в Пизанском соборе, приблизительно составляет 49 м. Оценки показывают, что период колебаний такого маятника составляет около 14 с. Если предположить, что сердце бьётся с частотой 60 ударов в минуту, то это число составит 14 ударов.

Если обозначить величины: длина нити математического маятника — l, ускорение свободного падения — g, то период колебаний математического маятника можно рассчитать по формуле

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

Исследуя колебания маятника, Галилей установил, что время качаний маятников разной длины пропорционально квадратным корням из их длин. В 1638 г. он сформулировал этот закон в книге «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых отраслей...».

ВОПРОСЫ:

- От чего зависит период колебаний математического маятника?
- Как вычислить период колебаний математического маятника?

12 ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

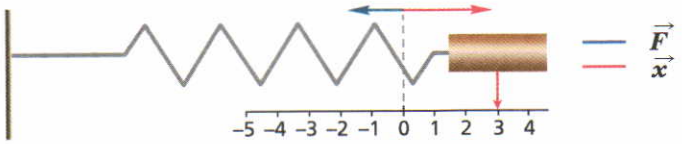
- Какие колебания называются гармоническими.
- Что представляет собой график гармонических колебаний.
- Какие превращения энергии происходят при колебаниях маятника.
- Что такое затухающие колебания.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие силы действуют на грузы при колебаниях пружинного и математического маятников?
- Как выглядит графическое изображение колебательного движения?
- Что такое потенциальная и кинетическая энергии?
- Как формулируется закон сохранения энергии?

Среди различных колебательных процессов выделяется особый вид колебаний, которые называют гармоническими. Этот вид колебаний является основным для дальнейшего изучения более сложных колебательных систем.

ГАРМОНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ Вы уже знаете, что если пренебречь силой трения, то на груз пружинного маятника будет действовать сила упругости пружины. Она согласно закону Гука зависит от коэффициента жёсткости пружины k, пропорциональна смещению (т. е. отклонению груза от положения равновесия) и направлена к положению равновесия: $F_{упр} = -kx$. Знак «минус» здесь означает, что направление силы упругости противоположно направлению смещения груза.



Рассмотрим математический (нитяной) маятник. Колебания математического маятника обусловлены тем, что равнодействующая силы тяжести и силы упругости $\vec{F} = \vec{F}_{тяж} + \vec{F}_{упр}$, действующая на груз, отлична от нуля. Обозначим через x величину смещения груза. Хотя перемещение происходит по дуге, но при малых углах отклонения можно не учитывать различия между длиной дуги и величиной смещения. Рассмотрим два подобных треугольника OBC и DBE. Отношение соответствующих катетов равно отношению гипотенуз, т. е.

$$\frac{F}{x} = \frac{mg}{l}, \text{ или } F = \frac{mg}{l}x. \quad (1)$$

Величина $\frac{mg}{l}$ во время колебаний не меняется. Обозначим:

$$\frac{mg}{l} = k. \quad (2)$$

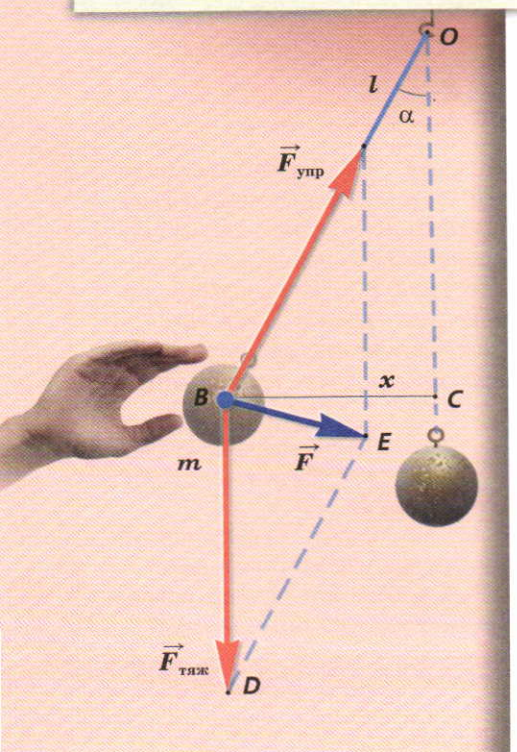
Тогда выражение для модуля возвращающей силы можно записать следующим образом: $F = kx$. При этом её направление противоположно направлению смещения груза. Получается, что как для пружинного маятника, так и для математического маятника возвращающая сила направлена в сторону, противоположную смещению, и пропорциональна ему, т. е. $F \sim -x$.

Колебания, которые происходят под действием силы, пропорциональной смещению колеблющегося тела из положения равновесия и направленной противоположно этому смещению, называют **гармоническими**.

Конечно, гармонические колебания рассматриваются как модель, так как в реальности всегда присутствуют силы трения и сопротивления среды.

С помощью математических преобразований можно получить формулу для периода колебаний пружинного маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}.$$

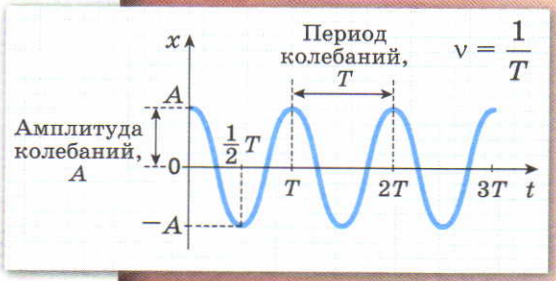


ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Используем в качестве груза маятника сосуд с красящей жидкостью и под ним расположим бумажную ленту, движущуюся с постоянной скоростью. Получившуюся кривую называют **осциллограммой** (от лат. *oscillum* — колебание и греч. *gamma* — запись). А рассмотренный прибор является простейшим *осциллографом* — прибором для записи колебаний.

Бумажная лента равномерно движется в течение некоторого промежутка времени, поэтому можно связать ось времени с направлением её движения. Проведя ось времени через точки, соответствующие прохождению грузом положения равновесия, мы получим график зависимости координаты от времени в гармонических колебаниях. С помощью графика колебаний можно определить положение тела в любой момент времени.

Кривые, подобные изображённой на рисунке, называются синусоидами. Подробнее вы узнаете об этом в старших классах.



СОХРАНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ

Когда математический маятник покоится в положении равновесия, его кинетическая энергия равна нулю. Примем за нулевой уровень отсчёта потенциальной энергии маятника его положение равновесия. Поэтому здесь равна нулю и его полная механическая энергия.

Когда маятник отклоняют на высоту h над нижним положением, его потенциальная энергия максимальна и равна $E_П = mgh$.

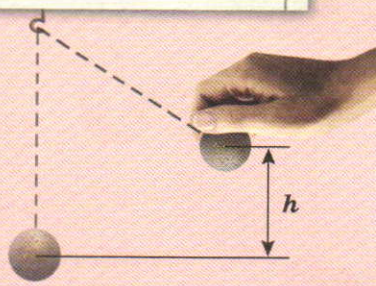
Когда маятник отпускают, потенциальная энергия переходит в энергию кинетическую, причём в нижней точке траектории, где потенциальная энергия равна нулю, кинетическая энергия максимальна и равна потенциальной энергии в верхней точке:

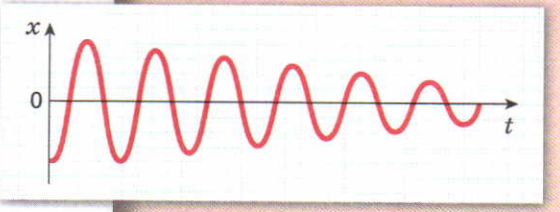
$$\frac{mv_{max}^2}{2} = mgh.$$

При этом полная механическая энергия колебательной системы остаётся постоянной.

Казалось бы, такие колебания не должны затухать. Однако наличие силы трения и силы сопротивления среды приводит к тому, что происходит потеря механической энергии за счёт её превращения во внутреннюю энергию.

Незатухающие свободные колебания, которые происходили бы в колебательной системе в отсутствие трения, называются собственными колебаниями системы.





ЗАТУХАЮЩИЕ КОЛЕБАНИЯ

Под влиянием силы трения происходит уменьшение амплитуды колебаний и через некоторое время колебания прекращаются. Такие колебания с уменьшающейся амплитудой называют **затухающими**. Причём, чем больше силы сопротивления движению, тем быстрее прекращаются колебания.

Если механическая энергия колебательной системы достаточно велика, а трение в ней мало, то колебания с небольшой амплитудой можно считать приблизительно гармоническими. Полностью пренебречь затуханием можно лишь рассматривая небольшое число колебательных движений.

ВОПРОСЫ:

- Какие колебания называются гармоническими?
- Что представляет собой график гармонических колебаний?
- Какие превращения энергии происходят при колебаниях маятника?
- Что такое затухающие колебания?

13 ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ. РЕЗОНАНС

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое вынужденные колебания.
- Когда возникает резонанс.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие колебания называются гармоническими?
- Что такое затухающие колебания?
- Что представляет собой график гармонических колебаний?
- От чего зависит период и частота колебаний маятника?
- Какие силы называют внутренними и внешними?

Если при качании на качелях не прикладывать никаких усилий, то качели достаточно быстро остановятся. Для того чтобы этого не произошло, обычно качели слегка подталкивают в такт их колебаниям. При этом лёгкого подталкивания качелей в определённые моменты времени оказывается достаточным, чтобы быстро раскачать качели до колебаний с большой амплитудой, а затем поддерживать эти колебания.

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ Так как колебания затухают вследствие потерь механической энергии, необходимо восполнять эти потери за каждый период колебаний. Это можно сделать, если воздействовать на колеблющееся тело периодически изменяющейся силой. Например, если подталкивать грузик маятника рукой, он может качаться в течение любого промежутка времени. Подобным образом обычно качаются на качелях — их подталкивают в такт колебаниям.

Колебания, происходящие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называют **вынужденными колебаниями**. Внешнюю периодически изменяющуюся силу, вызывающую эти колебания, называют **вынуждающей силой**.

В отличие от свободных колебаний, которые из-за наличия трения затухают, *вынужденные колебания являются незатухающими*. Потери энергии в процессе этих колебаний компенсируются поступлением энергии от источника внешней силы. Вынужденные колебания происходят до тех пор, пока действует вынуждающая сила.

Кроме того, свободные колебания могут происходить лишь с определёнными частотами и периодами колебаний, которые зависят от характеристик колебательной системы. *Вынужденные колебания совершаются с частотой, равной частоте изменения внешней силы.*

Выясним, как амплитуда вынужденных колебаний зависит от соотношения между частотой вынуждающей силы и собственной частотой колебательной системы.

Подвесим на нитях, прикреплённых к общей перекладине, маятник *1* и маятник *2*, имеющий массу существенно больше. Длина нити маятника *1* постоянна, этой длине соответствует вполне определённый период, следовательно, и определённая частота свободных колебаний. Длину нити маятника *2* можно изменять, подтягивая свободный конец нити, при этом меняется и его собственная частота колебаний.

Если привести в движение маятник *2*, то он через перекладину будет действовать на маятник *1* с некоторой вынуждающей силой, меняющейся с такой же частотой, с какой колеблется маятник *2*.

Если начать уменьшать длину нити маятника *2*, начнёт уменьшаться и его период колебаний. Следовательно,

частота его колебаний увеличится. При этом увеличится и частота вынуждающей силы, действующей на маятник *1*. Опыт показывает, что при этом начнёт увеличиваться амплитуда вынужденных колебаний маятника *1*. Увеличение амплитуды будет продолжаться до тех пор, пока длины маятников не станут равными. Когда длины маятников становятся равными, т. е. когда частота вынуждающей силы совпадает с частотой собственных колебаний маятника *1*, его амплитуда колебаний резко возрастает. При дальнейшем уменьшении длины маятника *2* частота вынуждающей силы оказывается больше собственной частоты маятника *1* и амплитуда его колебаний уменьшается.

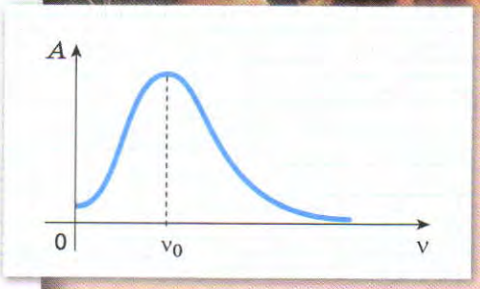
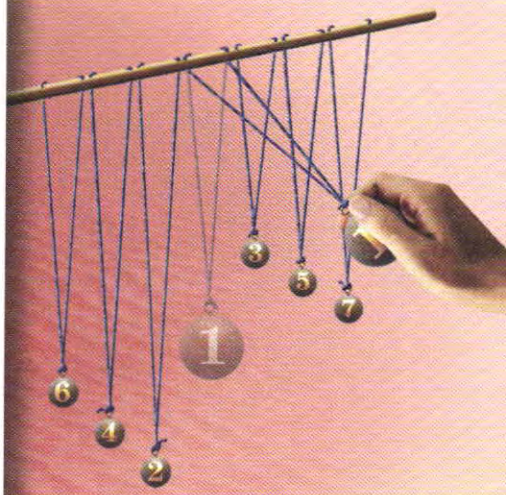


График зависимости амплитуды вынужденных колебаний от частоты вынуждающей силы

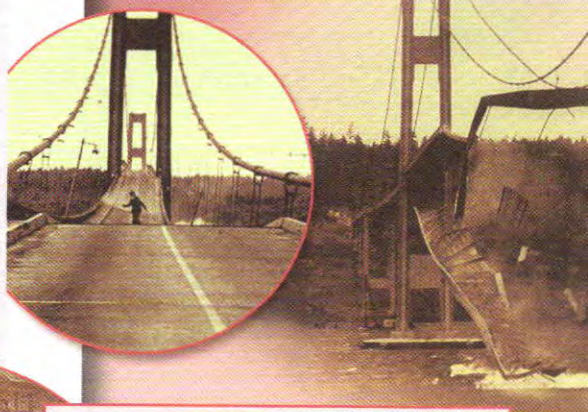
ЯВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСА Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы называют *резонансом*.

На рейку подвешивают несколько маятников разной длины. При этом маятник *1* массивный, а остальные маятники лёгкие. Маятник *1* приводят в движение в плоскости, перпендикулярной рейке. Он будет совершать свободные колебания, периодически действуя с некоторой силой на рейку. Рейка, в свою очередь, будет действовать на остальные маятники, которые начнут совершать вынужденные колебания с частотой колебаний маятника *1*. При этом маятники *2* и *3* останутся почти неподвижными, так как их собственные частоты значительно отличаются от частоты маятника *1*, т. е. амплитуды маятников *2* и *3* будут малы. Амплитуды маятников *4* и *5* будут больше, а маятники *6* и *7*, имеющие ту же длину нити, что и маятник *1*, начнут колебаться с очень большой амплитудой, т. е. *войдут в резонанс с маятником 1*.



Явление резонанса необходимо учитывать на практике. Резонансные явления могут вызывать необратимые разрушения в различных механических системах, например в неправильно спроектированных мостах. Так, в 1905 г. рухнул Египетский мост в Санкт-Петербурге, когда по нему проходил конный эскадрон, а в 1940 г. разрушился Такомский мост в США. Чтобы предотвратить такие повреждения, строй солдат должен сбивать шаг при прохождении мостов.

Явление резонанса используют, когда с помощью небольшой силы необходимо получить большое увеличение амплитуды колебаний. Например, тяжёлый язык большого колокола можно раскачать, действуя сравнительно небольшой силой с частотой, равной собственной частоте колебаний колокола.



ВОПРОСЫ:

- Что такое вынужденные колебания?
- Когда возникает резонанс?

14 ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как колебания распространяются в среде.
- Что такое волны.
- Что такое упругие волны.
- Что такое продольные и поперечные волны.

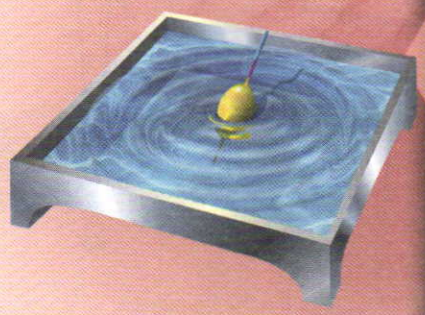
ВСПОМНИТЕ:

- Что собой представляет колебательное движение?
- Каково внутреннее строение вещества?

Колебательные движения тело совершает, находясь в некоторой среде — в воздухе, воде и т. д. Теперь рассмотрим, что же происходит в этом случае, т. е. перейдём от рассмотрения колебательных движений к изучению распространения колебаний в различных средах.

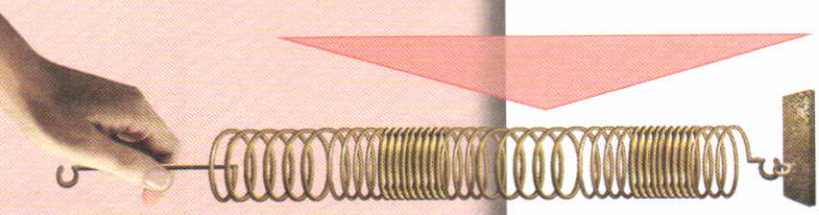
РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ВОДЕ Если бросить в воду камень, от него пойдут круги. Подобные процессы распространения возмущения представляют собой волну. Волны на поверхности воды всем хорошо знакомы. На поверхности моря, озера или реки часто можно наблюдать рябь, а если дует сильный ветер, то возникают волны.

Рассмотрим эти явления подробнее. На поверхность воды в сосуде поместим лёгкий поплавок. Заставив его совершать колебания, мы увидим, что от него по воде идут круги — волны. Таким образом, колебания поплавка передаются сначала частицам среды и далее от одних частиц среды к другим. Это обусловлено тем, что соседние частицы среды взаимодействуют между собой.



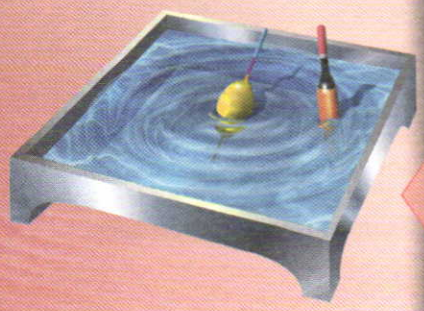
РАСПРОСТРАНЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В ПРУЖИНЕ Подобное волновое движение можно наблюдать в длинной пружине, расположенной горизонтально.

Если один конец пружины закрепить, а другой слегка сжимать и отпускать, то по пружине будет распространяться волна. При сжатии пружины возникает сила упругости, которая заставляет витки пружины разжиматься. В этом месте пружины возникает разрежение. При ритмичном воздействии витки, подобно маятнику, колеблются возле положений равновесия, то сближаясь, то удаляясь друг от друга. Эти колебания постепенно передаются от витка к витку вдоль всей пружины. Можно наблюдать, как по пружине распространяются сгущения и разрежения витков.



ВОЛНЫ Колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называют *волнами*. В обоих рассмотренных примерах причиной, вызвавшей возникновение волны, стали колебания. Мы будем рассматривать только бегущие волны, основное свойство которых заключается в том, что они, распространяясь в пространстве, переносят энергию без переноса вещества.

В сосуд с водой, в котором находится поплавок, поместим ещё один поплавок. После того как первый поплавок начнёт совершать колебания, начнёт колебаться и второй поплавок за счёт энергии, полученной от волны. При этом сам поплавок будет оставаться на месте. Значит, частицы воды не переносятся волной, т. е. не происходит переноса вещества.



УПРУГИЕ ВОЛНЫ Наряду с волнами на поверхности жидкости в механике изучают так называемые *упругие волны* — возмущения, распространяющиеся в различных средах в результате действия в них сил упругости. Например, упругими являются бегущие волны, распространяющиеся по пружине или вдоль резинового шнура, один из концов которого прикреплён к стене.

ПРОДОЛЬНЫЕ И ПОПЕРЕЧНЫЕ ВОЛНЫ Все волны делятся на два вида — *продольные* и *поперечные*. Продольными волнами называются волны, в которых колебания происходят вдоль направления распространения волны.

Волны, в которых колебания происходят перпендикулярно направлению их распространения, называются **поперечными волнами**.

Характерной особенностью механических волн является то, что они распространяются в материальных средах (твёрдых, жидких или газообразных). Распространение продольных и поперечных волн можно описать с помощью модели, в которой частицы среды представлены в виде совокупности шариков и пружинок.

ПРОДОЛЬНАЯ ВОЛНА
Деформация растяжения или сжатия

В продольных волнах шарики испытывают смещения вдоль цепочки, а пружинки растягиваются или сжимаются. Такую деформацию называют **деформацией растяжения** или **сжатия**. В жидкостях или газах такая деформация сопровождается уплотнением или разрежением. Продольные механические волны могут распространяться в любых средах — твёрдых, жидких и газообразных.

ПОПЕРЕЧНАЯ ВОЛНА
Деформация сдвига

Если один или несколько шариков сместить в направлении, перпендикулярном цепочке, то возникнет *деформация сдвига*. В результате вдоль цепочки побежит поперечная волна. В жидкостях и газах упругая деформация сдвига не возникает. Смежные слои жидкости или газа могут свободно скользить друг относительно друга без проявления упругих сил. Следовательно, поперечные волны не могут существовать в жидкой или газообразной среде.

ВОПРОСЫ:

- Что такое волны?
- Что такое упругие волны?
- Что такое продольные волны?
- Что такое поперечные волны?

15 ДЛИНА ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое длина волны.
- Что понимают под скоростью волны.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое волны?
- Какие выделяют виды волн?
- Что такое период и частота колебаний.

Рассмотрим более подробно процесс образования поперечной волны, используя модель из цепочки соединённых пружинками шариков-точек, взаимодействующих между собой посредством силы упругости.

ДЛИНА ВОЛНЫ Приведём первую точку в движение и заставим её совершать колебания. Будем рассматривать, как распространяется волна через каждые четверть периода ($^1/_4\ T$) колебания первой точки.

При смещении точки *1* возникнут силы упругости, которые заставят точку *2* двигаться вслед за точкой *1*. Это приводит к возникновению сил упругости между точками *2* и *3* и т. д. Однако на возникновение деформации и сил упругости потребуется некоторое время. Поэтому точка *2* начнёт колебаться позднее точки *1*, точка *3* — позднее точки *2* и т. д. Так, за первую четверть периода точка *1* окажется в положении максимального отклонения, точка *2* будет двигаться вслед за ней, а на точку *3* только начнёт действовать сила упругости.

За вторую четверть периода точка *1* вернётся в положение равновесия. Точка *3* испытает максимальное отклонение, а точка *5* только начнёт движение.

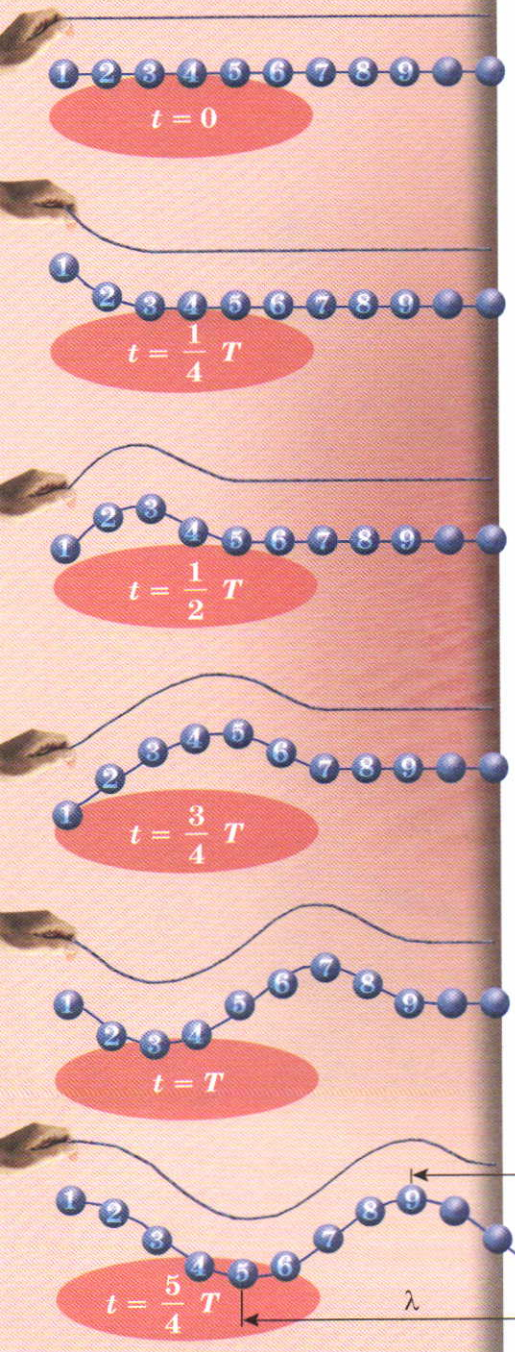
К концу третьей четверти периода точка *1* испытает максимальное отклонение вниз, точка *3* будет проходить положение равновесия, точка *5* испытает максимальное отклонение вверх, а точка *7* только начнёт движение.

К концу периода точка *1* завершит полное колебание и снова окажется в положении равновесия, точка *3* отклонится на амплитудное значение вниз, точка *5* будет проходить положение равновесия, точка *7* отклонится на амплитудное значение вверх, а точка *9* только начнёт движение.

Мы видим, что точки *1* и *9* колеблются одинаково. Ещё через четверть периода они обе окажутся в положении максимального отклонения вверх, а ещё через четверть периода окажутся в положении равновесия. Таким образом, за время, равное периоду колебаний, волна распространяется от точки *1* до точки *9*.

Расстояние, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний, называют *длиной волны*. Или можно сказать, что длиной волны называют расстояние между двумя ближайшими гребнями или впадинами поперечной волны либо расстояние между двумя ближайшими сгущениями или разрежениями продольной волны.

Длину волны обозначают греческой буквой λ (лямбда). Её основной единицей является метр (1 м).



Длина волны

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ Каждая волна распространяется с определённой скоростью. *Скоростью волны* называют скорость распространения колебаний.

Из рисунка видно, что за время, равное периоду колебаний T, волна распространяется на расстояние, равное длине волны λ. Поэтому

$$\lambda = vT.$$

Отсюда скорость распространения волны будет равна:

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Если учесть, что частота колебаний — величина, обратная периоду колебаний, то скорость распространения волны можно выразить через частоту колебаний:

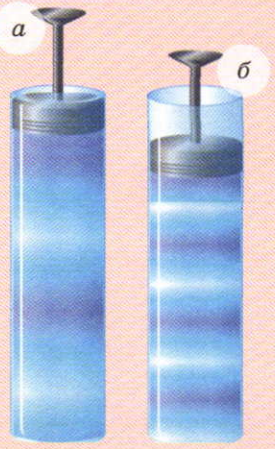
$$v = \lambda\nu.$$

Колебания частиц среды, в которой распространяется волна, являются вынужденными. Поэтому их период колебаний равен периоду колебаний источника волны. Однако скорость распространения волны, а соответственно и длина волны зависят от среды, в которой они распространяются. Это связано в первую очередь с агрегатным состоянием вещества.

В твёрдых телах частицы расположены близко друг к другу и связь между ними велика. В жидкостях частицы расположены дальше друг от друга, чем в твёрдых телах, они слабее взаимодействуют друг с другом. В газах взаимодействие между частицами совсем слабое. Поэтому наибольшая скорость распространения волны в твёрдых телах, наименьшая — в газах.

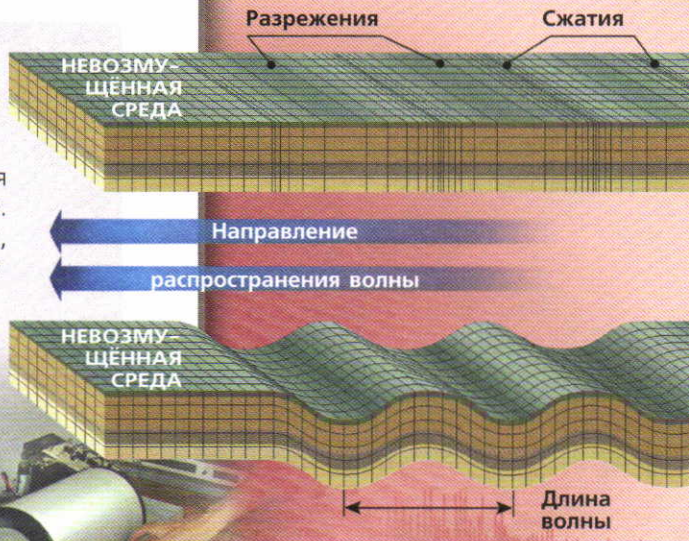
Если обозначить величины: длина волны — λ, частота колебаний — ν, период колебаний — T, то скорость распространения волны можно рассчитать по формуле

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu.$$

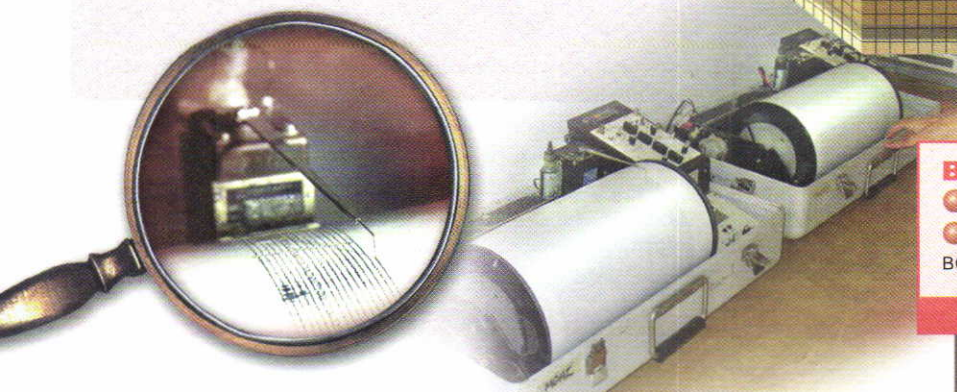


Модель распространения волны в воде (а), в воздухе (б)

Распространение продольных и поперечных сейсмических волн



Волны, наблюдаемые в природе, нередко переносят огромную энергию и являются причиной разрушений. Например, морские волны, особенно цунами, обладают большой разрушительной силой. Сейсмические волны распространяются в земной коре при землетрясениях или мощных взрывах. При землетрясениях происходят сдвиги земной коры, достигающие 10–15 м. Для изучения землетрясений используются специальные приборы — сейсмографы. Основной частью сейсмографа является маятник, начинающий колебаться при каждом появлении сейсмических волн.

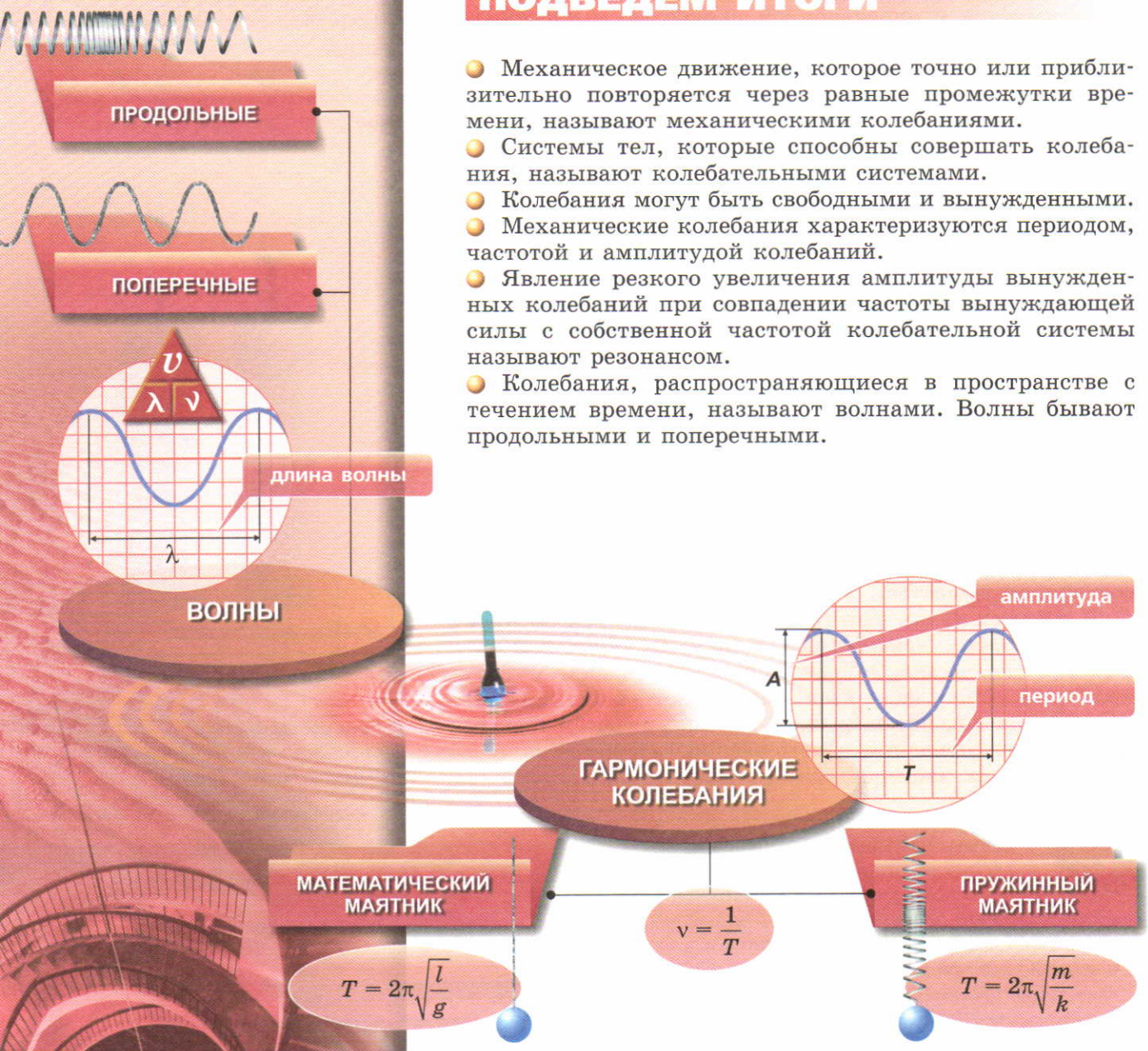


ВОПРОСЫ:

- Что такое длина волны?
- Что понимают под скоростью волны?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Механическое движение, которое точно или приблизительно повторяется через равные промежутки времени, называют механическими колебаниями.
- Системы тел, которые способны совершать колебания, называют колебательными системами.
- Колебания могут быть свободными и вынужденными.
- Механические колебания характеризуются периодом, частотой и амплитудой колебаний.
- Явление резкого увеличения амплитуды вынужденных колебаний при совпадении частоты вынуждающей силы с собственной частотой колебательной системы называют резонансом.
- Колебания, распространяющиеся в пространстве с течением времени, называют волнами. Волны бывают продольными и поперечными.



ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Объясните, в чём различия между продольными и поперечными волнами.
- Изменится ли период колебаний пружинного маятника, если его перенести из воздуха в воду?
- Изменится ли период колебаний математического маятника, если его поместить на экватор? на полюс?
- Почему строй солдат должен идти вольным шагом при переходе через мосты или эстакады?
- Почему в квартире начинают дрожать стёкла, если по улице проезжает тяжёлая автомашина?

ЗВУК

- ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ИСТОЧНИКИ ЗВУКА
- ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ ЗВУКА
- ГРОМКОСТЬ ЗВУКА. ВЫСОТА И ТЕМБР ЗВУКА
- ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА. ЭХО
- РЕЗОНАНС В АКУСТИКЕ
- УЛЬТРАЗВУК И ИНФРАЗВУК В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

...Теория звука, в обычном её понимании, охватывает ту же область, что и теория колебаний вообще. Мы, как правило, будем ограничиваться теми классами колебаний, для которых наши уши оказываются готовым и чувствительным элементом исследования. Не обладая слухом, мы едва ли много больше интересовались бы колебаниями, чем глаз — светом.

Джон Рэлей

16 ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ИСТОЧНИКИ ЗВУКА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое звуковые колебания.
- Колебания каких частот способен воспринимать человек.
- Какие тела являются источниками звука.
- Что такое ультразвук и инфразвук.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое колебания?
- Что такое волны?
- Что такое частота колебаний?

Вы уже знакомы с колебательным движением и некоторыми его закономерностями. Теперь изучим, что же происходит в воздухе или любой другой среде, внутри которой находится колеблющееся тело.

ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ Когда тело совершает колебания в воздухе, оно, несомненно, оказывает влияние на частицы вещества, из которых состоит воздух. Частицы воздуха смещаются от тех положений, в которых они находились ранее. Колеблющееся тело сжимает ближайший к нему слой воздуха, этот слой оказывает давление на следующий слой и т. д. Таким образом, частица за частицей, приводится в движение весь окружающий воздух, и в нём возникает волна.

Одной из характеристик колебательного движения является частота колебаний. Оказывается, при частоте колебаний, превышающей 16 Гц, человеческое ухо начинает воспринимать их как звук. Мы способны слышать колебания в достаточно широком диапазоне частот — от 16 Гц до 20 кГц. Такие колебания называют *звуковыми*.

Важно отметить, что звуковые колебания могут возникать не только в воздухе, но и в любой другой среде: газообразной, жидкой или твёрдой.

Раздел физики, в котором изучают звуковые явления, называют **акустикой** (от греч. *akustikos* — звуковой).

Естественные источники звука

Искусственные источники звука

ИСТОЧНИКИ ЗВУКА Окружающий нас мир наполнен различными звуками. Общим для всех тел, издающих звуки, является то, что все они совершают колебательные движения.

Например, струна в музыкальном инструменте не зазвучит до тех пор, пока её не приведут в колебательное движение.

Зажмём в тисках металлическую линейку и приведём её конец в колебательное движение. Если правильно подобрать длину линейки, которая колеблется, то линейка начнёт издавать звук.

Эти и другие опыты свидетельствуют о том, что любой источник звука обязательно колеблется, но чаще всего эти колебания незаметны глазу. Например, звуки голосов людей или животных возникают в результате колебаний их голосовых связок.

Источники звука можно разделить на *естественные* и *искусственные*. При изучении звуковых явлений часто используют искусственный источник звука — *камертон*.

Камертон был изобретён в начале XVIII в. английским музыкантом Дж. Шором для настройки музыкальных инструментов. Для этих целей он широко используется и в наши дни.

Камертон представляет собой изогнутый металлический стержень на ножке. Ножка камертона обычно закрепляется на деревянном ящике. Ударив по камертону молоточком, можно услышать чистый музыкальный звук. Этот звук возникает из-за частых колебаний ветвей камертона, незаметных для глаза. Поэтому, если поднести к звучащему камертону лёгкий шарик, то шарик начнёт отскакивать от него. Это происходит именно из-за частых колебаний ветвей камертона.

Как и в случае с колебаниями маятника, характер звуковых колебаний можно изучить при помощи их графического изображения. Для этих целей удобно воспользоваться узкой и длинной металлической линейкой, закреплённой в лапке штатива и колеблющейся в горизонтальной плоскости. Если на свободном конце линейки закрепить иглу и привести её в соприкосновение с равномерно перемещаемой закопчёной пластинкой, то колеблющаяся игла будет оставлять на пластинке характерную волнообразную линию.

В становление и развитие акустики неоценимый вклад внёс Джон Уильям Стретт, третий лорд Рэлей, опубликовавший в 1877–1878 гг. свой труд «Теория звука». В этой книге Рэлей не только пересмотрел всю ранее созданную теорию акустики, но и дал первое систематическое изложение учения о колебаниях и волнах малой амплитуды. Рэлей писал об особой важности математической трактовки обсуждаемых физических явлений и процессов.

УЛЬТРАЗВУК И ИНФРАЗВУК Жизненный опыт показывает, что далеко не всякое тело, совершающее колебания, становится источником звука.

Мы не слышим колебаний обычного пружинного маятника. В опыте с металлической линейкой наличие или отсутствие звука зависит от её длины. Всё дело в частоте колебаний, которой характеризуется колебательная система.

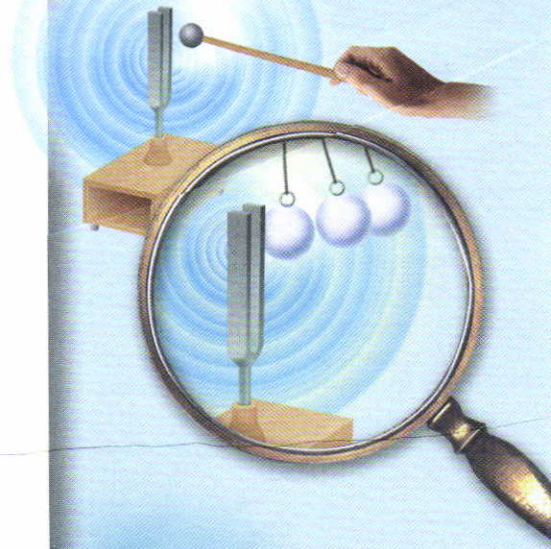
Колебания с частотой меньше 16 Гц называют *инфразвуком*. Колебания с частотой более 20 кГц называют *ультразвуком*.

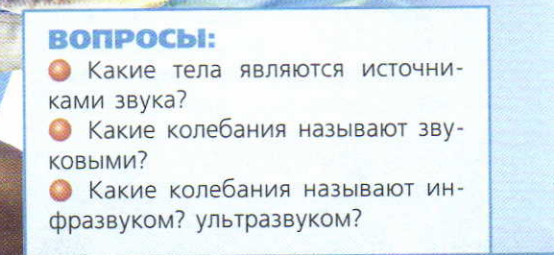
Инфразвук и ультразвук не воспринимаются человеческим ухом. Лишь представители живой природы способны на это.

Так, учёные обнаружили, что медузы и рыбы воспринимают инфразвуковые волны в диапазоне частот от 8 до 13 Гц.

Многие животные, например кошки, собаки, муравьи и летучие мыши могут издавать и воспринимать ультразвуки.

Ультразвуки самых высоких частот способны издавать и воспринимать дельфины. Частота этих ультразвуков может достигать 200 кГц.





ВОПРОСЫ:

- Какие тела являются источниками звука?
- Какие колебания называют звуковыми?
- Какие колебания называют инфразвуком? ультразвуком?

17 ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ ЗВУКА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Как распространяется звук.
- Какую волну представляет собой звук.
- Как определить скорость распространения звука.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое колебания и волны?
- Что такое звуковые колебания?
- Какие виды волн вы знаете?
- Что такое скорость волны?

Все звуки проходят те или иные расстояния, прежде чем дойдут до наших ушей. Теперь рассмотрим, как именно распространяется звук. Необходима ли для передачи звука среда — газ, жидкость или твёрдое тело?

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА Впервые установить экспериментально, передаётся ли звук в вакууме, удалось в 1660 г. Роберту Бойлю. Для этого он использовал вакуумный насос, изобретённый им в 1657 г. и построенный вместе с Гуком. Бойль поместил в сосуд вакуумного насоса часы. Звук, издаваемый часами, стал тише, но всё же был вполне различим. Затем Бойль откачал воздух из сосуда с часами и убедился, что ничего не слышит. Этот опыт доказал, что для распространения звука необходима среда.

Среда, отделяющая нас от колеблющихся тел, — это обычно воздух. Но звук может также распространяться в жидкой и твёрдой среде. Под водой хорошо слышны звуки, издаваемые водными транспортными средствами, удары камней и т. д. Приложив ухо к железнодорожному рельсу, можно услышать звук движущегося поезда, когда другим способом его ещё нельзя услышать.

Если положить механические часы на один конец деревянной доски, а к другому концу доски приложить ухо, можно ясно услышать тиканье часов.

Жизненный опыт показывает, что различные твёрдые тела проводят звук по-разному. Например, дерево, металлы хорошо проводят звук. А пористые и мягкие тела являются плохими проводниками. Их часто используют для звукоизоляции. Так, если звук шагов по гладкому полу слышен на достаточно большом расстоянии, то звук шагов по полу, покрытому мягким ковром, практически не слышен.

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ Итак, звук может распространяться в любой среде — твёрдой, жидкой или газообразной, но не может распространяться в вакууме.

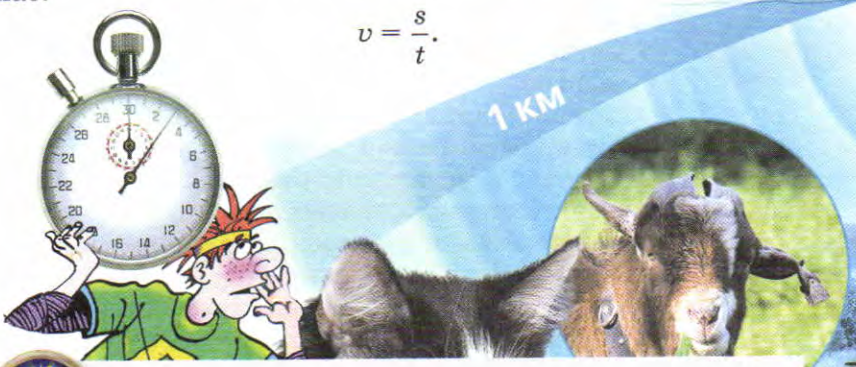
Каков механизм распространения звука? Колебания источника звука передаются находящимся около него частицам среды, например воздуха. Эти частицы передают колебания соседним частицам и т. д. От источника звука начинают исходить чередующиеся сгущения и разрежения воздуха. В результате в среде образуются звуковые волны, действующие на барабанную перепонку уха, колебания которой и воспринимаются человеком. *Звуковые волны в воздухе являются продольными волнами сжатия и разрежения.*

СКОРОСТЬ ЗВУКА Звуковые волны, так же как и механические, характеризуются скоростью распространения. Именно поэтому во время грозы мы сначала видим вспышку молнии и лишь через некоторое время слышим раскаты грома.

Гром и молния происходят в один и тот же момент времени, а запаздывание возникает из-за того, что скорость звука в воздухе существенно меньше скорости света, идущего от молнии. Скорость света относится к фундаментальным физическим постоянным и равна приблизительно 300 000 000 м/с. Поэтому вспышку молнии мы видим практически в момент её возникновения. При этом звук грома доходит до нас со скоростью примерно 1 км за 3 с, т. е. скорость звука в воздухе равна приблизительно 340 м/с.

Экспериментально значение скорости распространения звука можно определить, зная расстояние до источника звука и измерив промежуток времени между моментом возникновения звука и моментом, когда он доходит до нас:

$$v = \frac{s}{t}.$$



Зная скорость звука, нетрудно оценить расстояние до места, где происходит гроза. Так, если от момента вспышки молнии до слышимых раскатов грома прошло 9 с, то гроза находится от нас на расстоянии примерно 3 км.

И люди, и животные воспринимают звуковые волны двумя звукоприёмниками — ушами. Занимаясь вопросами восприятия звука, учёные открыли бинауральный эффект (от лат. *bini* — пара, два и *auris* — ухо). Он заключается в том, что уши людей и животных способны определять, в каком направлении от них находится звучащее тело. В настоящее время в этой области осталось ещё много неизученного, однако уже ясно, что для звуковых волн с частотой менее 1,5 кГц решающую роль играет разность во времени, за которое звук достигает правого и левого уха. Учёные установили, что органы слуха реагируют на разницу времени звучания уже в $3 \cdot 10^{-5}$ с, что соответствует расстоянию порядка 1 см. Это особенно характерно для звуков и шумов с резким началом или некоторыми повторяющимися особенностями.

ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ СКОРОСТЬ ЗВУКА Скорость звука зависит от самой среды, в которой распространяется звуковая волна. Измерения скорости звука в различных средах показали, что в твёрдых телах и жидкостях она значительно больше, чем в воздухе. Например, в воде скорость распространения звука приблизительно в 4,5 раза больше, чем в воздухе, и составляет 1450 м/с, а в железе звук распространяется со скоростью около 5850 м/с.

Скорость звука также зависит от температуры среды: с повышением температуры она возрастает, с понижением убывает. Так, например, скорость звука в воздухе при температуре 0 °С составляет 333 м/с, а при температуре 30 °С она увеличивается до 350 м/с.

МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изготовить переговорное устройство из двух бумажных стаканчиков, соединённых длинной капроновой ниткой.

«ПОМОЩНИК»

- Проделайте отверстие в дне каждого стаканчика.
- Закрепите стаканчики на концах нити.
- В эксперименте должны участвовать два человека.
- Натяните нить. Используйте один стаканчик как микрофон, а другой приложите к уху.

ВОПРОСЫ:

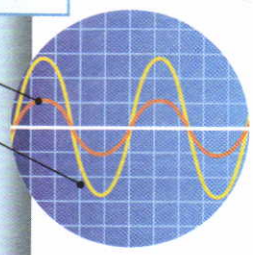
- В каких средах может распространяться звук?
- Какую волну представляют собой звуковые волны?
- От чего зависит скорость звука?

18 ГРОМКОСТЬ ЗВУКА. ВЫСОТА И ТЕМБР ЗВУКА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Основные характеристики звука — громкость, высоту и тембр.

ВСПОМНИТЕ:
- Что является источником звука?
- Что такое амплитуда и частота колебаний?

Звуки, окружающие нас, могут быть громкими и еле слышными, приятными и неприятными, звонкими и глухими, высокими и низкими. Для характеристики звука используются такие понятия, как громкость, высота и тембр звука.



ГРОМКОСТЬ ЗВУКА Для того чтобы выяснить, от какой характеристики звуковой волны зависит громкость звука, вновь обратимся к опыту с камертоном. Чем сильнее мы ударим молоточком по камертону, тем громче будет звук, который мы слышим. Поднеся лёгкий шарик к ветви камертона, легко заметить, что, чем громче звучит камертон, тем с большей амплитудой колеблется шарик. Следовательно, камертон, звучащий громче, имеет большую амплитуду колебаний. Если прислушаться к звуку камертона после удара, то слышно, как он постепенно ослабевает. Это происходит потому, что колебания ножек камертона являются затухающими и их амплитуда с течением времени уменьшается. Громкость звука зависит от амплитуды колебаний: чем больше амплитуда колебаний, тем громче звук.

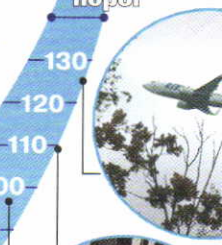
Единицу громкости звука называют *сон* (от лат. *sonus* — звук).

Для характеристики громкости звука используют ещё одну важную физическую величину — *звуковое давление*. Звуковое колебание создаёт чередование сжатия и разрежения воздуха в точке среды, поэтому давление воздуха то больше, то меньше того давления, которое было в отсутствие звука. Этот избыток или недостаток давления и называют звуковым.

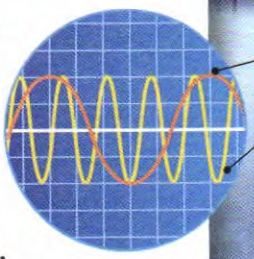
Сегодня в практических задачах акустики громкость звука характеризуется уровнем звукового давления, измеряемым в *белах* (Б) или *децибелах* (дБ), составляющих десятую часть бела.

Александр Грехэм Белл
(1847—1922)

Стал известен благодаря изобретению телефона, менее известны его работы по определению порога слышимости.
В 1890 г. основал Ассоциацию глухих и плохо слышащих, которая действует до сих пор. Белл был первым учёным, который предложил количественные характеристики восприятия звука. Он обнаружил, что диапазон громкости, нормально воспринимаемой человеком, составляет 13 порядков!



ВЫСОТА ЗВУКА Ещё одной характеристикой звука является *высота звука*. Мы легко различаем низкий голос (бас) и высокий (сопрано). Различные струны гитары, скрипки и виолончели издают звуки разной высоты.

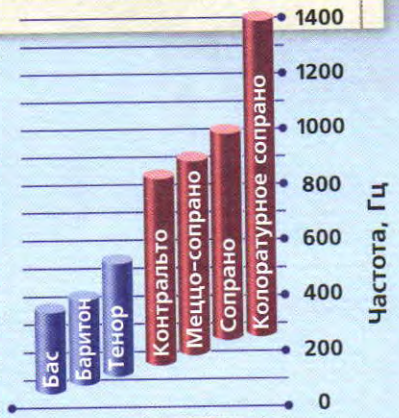


Для исследования влияния характеристик звуковой волны на высоту звука можно использовать камертоны различного размера, один из которых будет издавать более высокий звук, а другой — более низкий звук. Если рассмотреть графики колебаний ветвей этих камертонов, то видно, что более высокому звуку соответствует бóльшая частота колебаний.

Следовательно, высота звука зависит от частоты колебаний: чем больше частота колебаний источника звука, тем выше издаваемый им звук.

Восприятие громкости звука нашим ухом зависит не только от амплитуды, но и от частоты колебаний в звуковой волне. При равной амплитуде колебаний как более громкие мы лучше воспринимаем те звуки, частота которых лежит в пределах от 1000 до 5000 Гц.

Наряду с физическими характеристиками звука для его восприятия важны также физиологические особенности человеческого организма. Например, высокий женский голос с частотой 1000 Гц будет для нашего уха громче низкого мужского с частотой 200 Гц, даже если амплитуды колебаний голосовых связок в обоих случаях одинаковы.



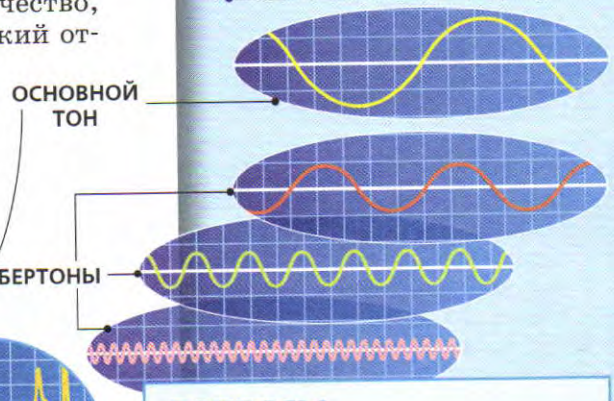
МУЗЫКАЛЬНЫЙ ТОН Колебания камертона близки к гармоническим. Они медленно затухают, и отклонение от периодичности у них невелико.

Звук, издаваемый камертоном или другим гармонически колеблющимся телом, называют *музыкальным тоном* или *чистым тоном* либо просто *тоном*.

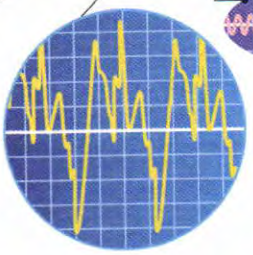
ТЕМБР ЗВУКА В окружающем нас мире мы редко сталкиваемся с чистым тоном. Мы легко распознаём различные источники звука, даже если их звук имеет одинаковую высоту.

Так, несложно отличить звук гитары от звука рояля или трубы, голоса разных людей друг от друга. Объясняется это тем, что если колебание не является гармоническим, то на слух оно имеет ещё одно качество, кроме высоты и громкости, а именно специфический оттенок, называемый *тембром*.

Дело в том, что большинство звуков представляет собой совокупность гармонических колебаний разных частот. Осциллограмма звуков рояля показывает, что звук складывается из колебаний различных амплитуд и частот.



Составляющую наибольшего периода (т. е. наименьшей частоты) называют *основным тоном*. Именно основной тон и определяет высоту сложного звука. Остальные составляющие сложного звука называют *обертонами* (от нем. *Oberton* — верхний тон). У них частота колебаний и, следовательно, высота тона больше, чем у основного.



Набор всех обертонов создаёт уникальную окраску, или тембр звука.

ВОПРОСЫ:

- От чего зависит громкость звука?
- От чего зависит высота звука?
- От чего зависит тембр звука?

19 ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА. ЭХО

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое отражение и поглощение звука.
- Как образуется эхо.
- Что такое реверберация.

ВСПОМНИТЕ:
- Как распространяется звук?
- Какую волну представляет собой звук?

Что произойдёт, если на пути звуковой волны появится преграда, стена или какое-либо другое препятствие?

ОТРАЖЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКА Рассмотрим ситуацию, когда на пути звуковой волны встаёт плоская твёрдая поверхность, например стена. Так как звуковая волна является продольной волной сжатия и разрежения, то, передаваясь от одного слоя молекул воздуха к другому, сгущение дойдёт до воздушного слоя, прилегающего к поверхности стены. Получив толчок, частицы этого слоя ударятся о стену, оттолкнутся от неё и образуют новую волну сгущения, бегущую в обратном направлении.

Этот процесс называют *отражением звука*. В большинстве случаев плоские твёрдые поверхности отражают около 95% звука. Например, известно, что толстая гранитная стена отражает 99% звука.

Какой бы жёсткой ни была стена, стоящая на пути звуковой волны, она всё равно деформируется под действием ударов молекул воздуха, образующих волну. Под давлением слоя воздуха, прижатого к поверхности стены, она прогибается (хотя эта деформация и очень мала) и образует звуковую волну внутрь вещества, из которого стена состоит. Часть энергии звуковой волны затрачивается на деформацию препятствия. При этом, как и в любом другом случае, деформация сопровождается нагреванием. Именно поэтому звук отражается не полностью.

Чем массивнее стена, тем больше она инертна и тем меньше она деформируется под действием силы. Чем стена тоньше, легче и мягче, тем больше она деформируется под действием звуковой волны и, следовательно, тем слабее отражает звук.

Ослабление звуковой волны называют *поглощением звука*.

Большую роль в нашей жизни играет звукоизоляция — ослабление звука при его прохождении через препятствия. Под звукоизоляцией понимают также снижение уровня шума, проникающего в помещения извне. Часто для улучшения звукоизоляции используют материалы, хорошо поглощающие звук и плохо его отражающие. Такие материалы называют звукопоглощающими. Звукопоглощающими материалами в обычном жилом помещении могут быть ковры, занавеси и другие мягкие ворсистые материалы.

ЭХО Поскольку при взаимодействии звуковой волны со стеной волна отражается, то возникает вопрос: можем ли мы услышать звуковую волну, отражённую от поверхности?

Оказывается, человеческое ухо способно воспринимать отражённый звук отдельно от первоначального звука только в том случае, когда промежуток времени между ними не меньше чем $^1/_{15}$ с. Это звуковое явление хорошо знакомо всем, и его называют *эхом*. Эхо можно

услышать в горах, больших пустых помещениях, на лестничных площадках и т. д. Многократное эхо возникает тогда, когда мы слышим звуковые волны, последовательно отразившиеся от нескольких препятствий и разделённые интервалом времени $t > {}^{1}/_{15}$ с.

В древнегреческой мифологии есть сюжет, посвящённый любви горной нимфы по имени Эхо и юноши Нарцисса. От безответной любви Эхо высохла и окаменела, так что от неё остался лишь голос, способный повторять окончания произнесённых в её присутствии слов. Имя нимфы и стало впоследствии названием звукового явления.

В обычных жилых помещениях мы не слышим эхо потому, что интервал времени между первоначальным звуком и его отражением составляет величину, существенно меньшую ${}^{1}/_{15}$ с.

Теперь определим, с какого расстояния можно услышать эхо. Произнесённый звук должен пройти расстояние до стены, отразиться от неё и вернуться обратно, т. е. пройти двойное расстояние не меньше чем за ${}^{1}/_{15}$ с. Так как значение скорости звука в воздухе известно ($v = 340$ м/с), то это расстояние составляет

$$s \geq \frac{vt}{2} = \frac{340}{2 \cdot 15}\ \text{м} \approx 11\ \text{м}.$$

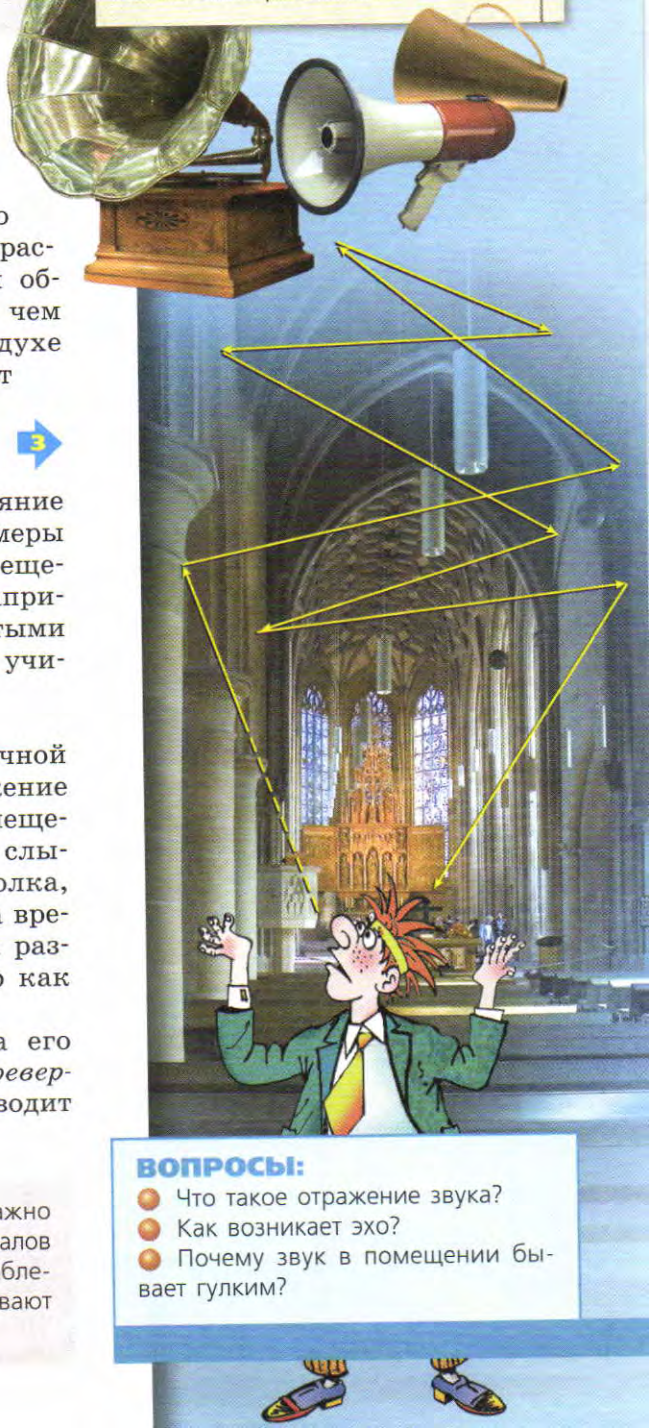
Для возникновения эха важно не только расстояние между источником звука и препятствием, но и размеры и форма поверхности этого препятствия, а также вещество, из которого это препятствие состоит. Так, например, эффект эха возникает в помещениях со сводчатыми потолками. Это было известно ещё в древности и учитывалось, например, при строительстве храмов.

РЕВЕРБЕРАЦИЯ То, что мы не слышим эха в обычной комнате, не означает, что мы не слышим отражение звука от её стен. Дело в том, что в закрытых помещениях, кроме звука, создаваемого источником, мы слышим и его многократные отражения от стен, потолка, пола и т. д. Из-за очень малого значения интервала времени между этими отражениями мы не можем их различить как отдельные звуки, а воспринимаем это как увеличение длительности первоначального звука.

Эффект увеличения длительности звука из-за его отражения от различных препятствий называют *реверберацией*. В пустых помещениях реверберация приводит к возникновению гулкости.

Отражение звука от стен помещений очень важно учитывать при строительстве театров, концертных залов и залов для собраний. Науку, занимающуюся проблемой наилучшей слышимости в закрытых помещениях, называют архитектурной акустикой.

На свойстве звука отражаться от гладких поверхностей основан принцип действия рупора — расширяющейся трубы обычно круглого или прямоугольного сечения. При использовании рупора звуковые волны не рассеиваются во все стороны, а образуют узконаправленный пучок, за счёт чего громкость звука увеличивается, и он распространяется на большее расстояние.



ВОПРОСЫ:

- Что такое отражение звука?
- Как возникает эхо?
- Почему звук в помещении бывает гулким?

20 РЕЗОНАНС В АКУСТИКЕ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

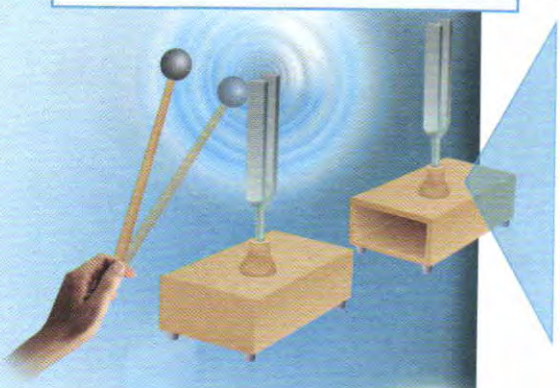
- Как возникает звуковой резонанс.
- Для чего нужны резонаторы.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое свободные и вынужденные колебания?
- Что такое резонанс и когда он возникает?

Резонансные явления могут возникать при механических колебаниях любой частоты. Значит, резонанс может возникнуть и в случае звуковых колебаний.

АКУСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС Резонанс возникает тогда, когда частота вынуждающей силы совпадает с собственной частотой колебательной системы. В этом случае амплитуда установившихся вынужденных механических колебаний достигает наибольшего значения.



Возьмём два камертона с одинаковой собственной частотой колебаний. Ударим молоточком по одному из камертонов. Он зазвучит. Затем приглушим его, прикоснувшись к нему рукой. Мы услышим звучание другого камертона. Это происходит потому, что второй камертон начинает колебаться под действием дошедших до него звуковых волн, созданных колебаниями первого камертона. Частоты собственных колебаний камертонов одинаковы, поэтому возникает *резонанс*: амплитуда колебаний второго камертона становится достаточно велика, чтобы звучание было слышно.

Если изменить частоту собственных колебаний второго камертона, например изменив его размеры, то он не будет отзываться на колебания первого камертона, и явления резонанса не произойдёт.

Для возникновения звукового резонанса можно воспроизвести опыт, аналогичный опыту с набором маятников. Вместо набора маятников для этого необходим набор звуковых резонаторов, например камертонов и струн. Струны рояля или пианино образуют обширный набор колебательных систем с разными собственными частотами. Если, открыв рояль и нажав педаль, громко пропеть над струнами какую-нибудь ноту, то можно услышать, как инструмент откликается звуком той же высоты и сходного тембра.

В этом опыте наш голос создаёт звуковую волну, действующую на все струны. Однако откликаются только те из них, которые могут войти в резонанс с гармоническими колебаниями — основным и обертонами, входящими в состав спетой нами ноты.

Поднесём вибрирующий камертон к высокому стеклянному цилиндрическому сосуду. Будем понемногу наливать воду в сосуд. Через некоторое время мы отчётливо услышим звук. Если продолжать наливать воду, то звук прекратится.

В этом случае на колебания камертона отзывается воздушный столб в сосуде. Очевидно, что наиболее громкое звучание воздушного столба наступает, когда собственная частота его колебаний совпадает с частотой колебаний камертона. Это и есть условие резонанса. Такой закрытый с одного конца сосуд называют *резонатором*.

РЕЗОНАТОР Для того чтобы усилить звук камертона, его обычно укрепляют на верхней стенке ящика, открытого с одной стороны. При звучании камертона колебания его стержня заставляют стенку, на которой он закреплён, прогибаться. Из-за этого воздух то выталкивается из ящика, то втягивается в него. Таким образом, возникают колебания воздушного столба в ящике.

Длина ящика подбирается так, чтобы собственная частота колебаний столба воздуха в ящике, открытом с одной стороны, была настроена в резонанс на частоту камертона. Таким образом, ящик служит резонатором, усиливающим звучание камертона.

Резонаторами служат трубы духовых инструментов, трубы органа. В струнных музыкальных инструментах, таких, как гитара, скрипка, виолончель, роль резонаторов выполняют части их корпусов — деки. Именно они усиливают издаваемые струнами звуки и придают звучанию инструмента характерную для него окраску — тембр.

Тембр музыкального инструмента зависит не только от формы и размеров, но и от материалов, из которых он изготовлен, а также от самой технологии его изготовления. Именно поэтому так ценны музыкальные инструменты, изготовленные выдающимися мастерами.

В своих исследованиях по акустике Гельмгольц использовал шаровые резонаторы, получившие впоследствии его имя. Резонатор представляет собой шар с двумя отверстиями; одно из них находится в короткой цилиндрической трубочке, направляемой к источнику звука, а другое в небольшой конической трубке, вставляемой в ухо. Такие резонаторы выделяют из сложного звука только один соответствующий им простой тон. С их помощью можно уловить и очень слабые звуки, например обертоны, которые непосредственно услышать нельзя, так как они заглушаются другими, более сильными звуками.

Герман Гельмгольц
(1821–1894)
Немецкий физик, математик, физиолог и психолог, положивший начало акустике.
Он создал модель уха, позволившую изучить характер воздействия звуковых волн на орган слуха, решил задачу органной трубы, провёл исследования колебания струн и акустических резонаторов.

Человеческий голос возникает от колебаний голосовых связок. Для усиления звука у нас имеются резонаторы — это гортань и полость рта. Существует выражение: «От громкого голоса дрожали стёкла». Здесь имеется в виду возникновение акустического резонанса. Например, стенки стеклянного бокала начинают вибрировать, если на бокал направить звуковую волну с частотой, равной его собственной. Если амплитуда станет очень большой, то бокал может даже разбиться. Известен исторический факт, когда в результате резонанса при пении Ф. И. Шаляпина дрожали (резонировали) даже хрустальные подвески люстр.

ВОПРОСЫ:

- Как возникает звуковой резонанс?
- Для чего нужны резонаторы?
- Приведите примеры резонаторов.

21 УЛЬТРАЗВУК И ИНФРАЗВУК В ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Где в природе встречаются ультразвуки и инфразвуки.
- Где используется ультразвук и инфразвук.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое инфразвук и ультразвук?
- Что такое эхо?
- Что такое акустический резонанс?

Ультразвук и инфразвук играют существенную роль в живой природе и технике, а также оказывают влияние на человеческий организм.

ИНФРАЗВУК В ПРИРОДЕ Инфразвуки имеют большое значение в природе. Например, рыбы и другие морские животные заранее чувствуют приближение шторма или циклона, улавливая инфразвуковые волны, создаваемые штормовыми волнениями. Это помогает им заранее уплыть в безопасное место. Инфразвук — это составляющая звуков леса, моря, атмосферы. Он возникает при землетрясениях, подводных и подземных взрывах, во время бурь и ураганов и т. д. Инфразвук способен распространяться на большие расстояния и может служить предвестником бурь, ураганов, цунами.

Если шторм разыграется за сотни километров от берега, то он придёт в эти места почти через сутки, а медузы уже слышат его и уходят на глубину. Происходит это потому, что медузы улавливают инфразвуки с частотой 8—13 Гц при помощи крошечных слуховых колбочек, расположенных на краю «колокола» медузы.

ВЛИЯНИЕ ИНФРАЗВУКА НА ЧЕЛОВЕКА При больших амплитудах инфразвук ощущается как боль в ухе. В конце 60-х гг. XX в. французский исследователь Гавро обнаружил, что инфразвук определённых частот может вызвать у человека тревожность и беспокойство, головные боли, снижение внимания и работоспособности и даже иногда нарушение равновесия.

Возбуждающее действие рок-музыки объясняется резонансным влиянием на организм звуков низких частот.

Все механизмы, которые работают при частотах вращения менее 20 оборотов в секунду, излучают инфразвук. В машиностроительной отрасли инфразвук возникает при работе вентиляторов, компрессоров, двигателей внутреннего сгорания, дизельных двигателей. Поэтому очень важно соблюдение техники безопасности.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАЗВУКА В ТЕХНИКЕ Способность распространения инфразвуковых волн в воздухе, воде и земной коре на очень далёкие расстояния нашла практическое применение при определении мест сильных взрывов или положения стреляющего орудия, а также для предсказания стихийного бедствия — цунами.

УЛЬТРАЗВУК В ПРИРОДЕ Ультразвуки могут издавать и воспринимать такие животные, как дельфины, муравьи, летучие мыши и др. Во время полёта летучие мыши издают ультразвуковые сигналы. Именно это помогает им легко ориентироваться в темноте, не натыкаться на окружающие предметы и даже ловить добычу. Летучие мыши определяют своё местоположение и расстояние до окружающих предметов по запаздыванию отражённого звукового сигнала. Они также могут ловить насекомых, воспринимая эхо от добычи.

Дельфины также имеют свою систему ультразвуковых сигналов: эхолокационные (сонарные) служат для

Муравьи также издают ультразвуковые сигналы с различными частотами в разных ситуациях. Все муравьиные звуковые сигналы можно разделить на три группы: «сигнал бедствия», «сигнал агрессии» и «пищевой сигнал».
Муравьи издают и воспринимают звуки в широком диапазоне частот.

обследования обстановки и «свист» для коммуникации с сородичами. Дельфинов используют в пет-терапии для лечения людей при помощи ультразвукового сонара.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА Хотя о существовании ультразвука учёным было известно давно, практическое использование его в науке, технике и промышленности началось сравнительно недавно.

Из-за большой частоты ультразвук обладает особыми свойствами, которые нашли широкое применение в медицине как для диагностики, так и для лечения. Учёные считают, что он не вреден для человеческого организма, но, как и во многом другом, здесь важно знать меру. Медики считают безопасной громкость ультразвука в 80—90 Дб. Громкость ультразвука свыше 120 Дб при длительном воздействии отрицательно влияет на здоровье человека.

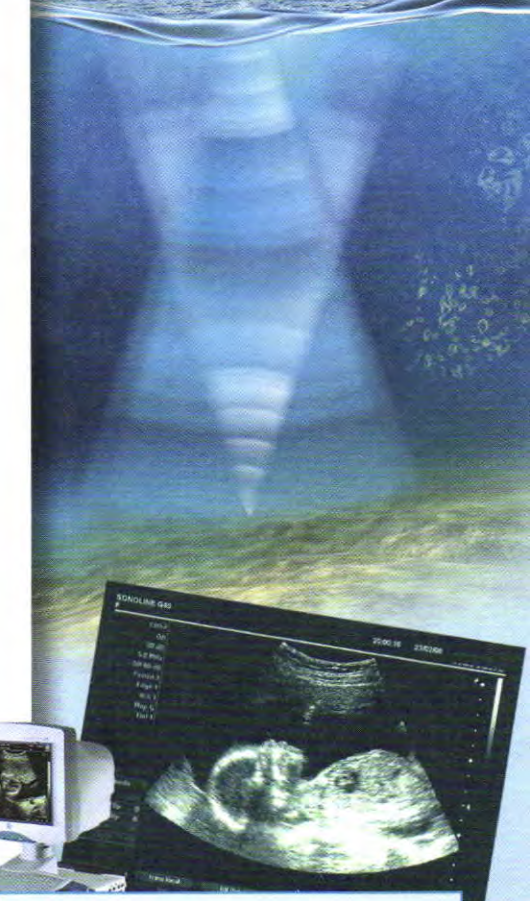
ЭХОЛОКАЦИЯ Способ определения местоположения тел по отражённым от них ультразвуковым сигналам называют **эхолокацией** (от лат. *localis* — местный, т. е. определение места с помощью эха). Эхолокация широко используется в мореплавании. На судах устанавливают *эхолоты* и *гидролокаторы* — приборы для распознавания подводных объектов и определения глубины и рельефа дна. Для этой цели на дне судна помещают излучатель и приёмник звука. Излучатель даёт короткие сигналы. Анализируя время задержки и направление возвращающихся сигналов, компьютер определяет положение и размер объекта, отразившего звук.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ Для обнаружения и определения различных повреждений в деталях машин используется прибор, называемый **ультразвуковым дефектоскопом** (от лат. *defectus* — изъян, недостаток и греч. *skopio* — смотрю). Он помогает обнаружить пустоты, трещины и т. п. На исследуемую деталь направляют ультразвуковые сигналы, которые отражаются от находящихся внутри её неоднородностей и, возвращаясь, попадают в приёмник. В тех местах, где дефектов нет, сигналы проходят сквозь деталь без существенного отражения и не регистрируются приёмником.

УЛЬТРАЗВУК В МЕДИЦИНЕ Ультразвук широко используется в медицине для постановки диагноза и лечения некоторых заболеваний. В отличие от рентгеновских лучей его волны не оказывают вредного влияния на организм.

Диагностические ультразвуковые исследования (УЗИ) позволяют распознавать различные изменения органов и тканей. Специальное устройство направляет ультразвуковые волны с частотой от 0,5 до 15 МГц на определённую часть тела, они отражаются от исследуемого органа, и компьютер выводит на экран его изображение.

Впервые идея практического использования ультразвука возникла в первой половине XX в. в связи с разработкой методов и приборов для обнаружения в глубине моря различных объектов: подводных лодок, рифов, подводных частей айсбергов и т. д. Это было вызвано прежде всего начавшимся участием подводных лодок в военных операциях во время Первой мировой войны.



ВОПРОСЫ:

- Где в природе встречаются ультразвуки и инфразвуки?
- Где используется ультразвук и инфразвук?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

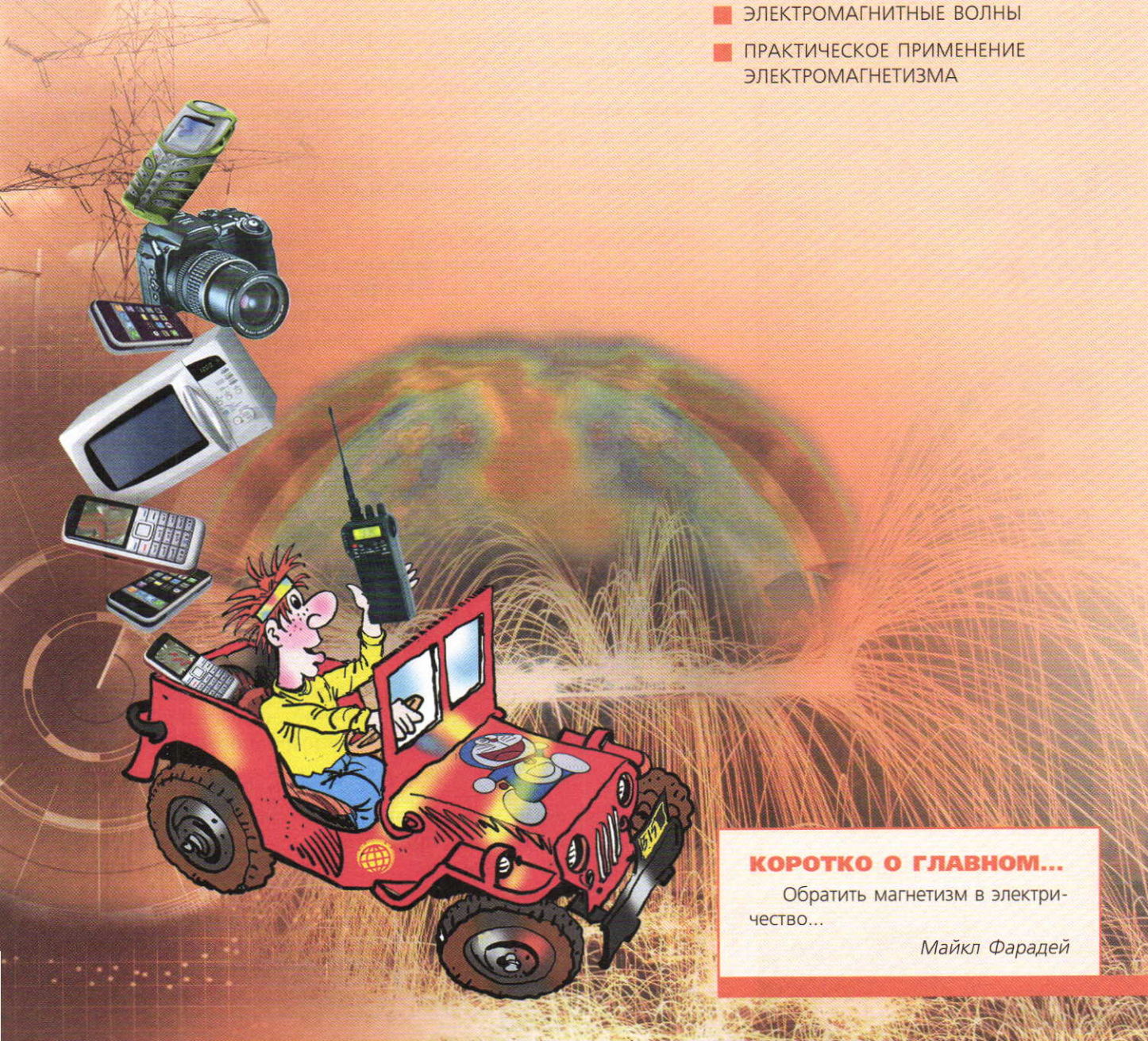
- Звуковые волны — это продольные механические колебания, распространяющиеся в среде, которые воспринимаются органами слуха человека и животных. Раздел физики, изучающий звуковые явления, называют акустикой.
- Скорость распространения звуковых волн называется скоростью звука. В твёрдых телах и жидкостях скорость звука значительно больше, чем в воздухе.
- Громкость звука зависит от амплитуды колебаний, а высота звука — от их частоты.
- Звук, издаваемый гармонически колеблющимся телом, называют музыкальным тоном или чистым тоном.
- Колебания с частотой менее 16 Гц называют инфразвуком. Колебания с частотой более 20 кГц называют ультразвуком.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Известно, что некоторые животные, например собаки, реагируют на свистки (колебания воздуха), не слышные человеку. Как можно объяснить это?
- Объясните, как прикладываемая к уху рука позволяет нам услышать слабый звук.
- Если дуть у отверстия бутылки, то получается звук. Как рассчитать частоту звука?
- Какое из насекомых чаще машет крыльями: комар, муха или шмель?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

- ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
- ОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК
- ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ
- ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК
- ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ
- ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ
- ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ
- ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА



КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Обратить магнетизм в электричество...

Майкл Фарадей

22 ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- От каких физических величин зависит сила, действующая на проводник с током, помещённый в магнитное поле.
- Что такое индукция магнитного поля.
- В каких единицах измеряется магнитная индукция.

ВСПОМНИТЕ:

- Что является источником магнитного поля?
- Как графически изображается магнитное поле?
- Что такое сила Ампера?
- Правило левой руки.

В 8 классе вы познакомились с понятием магнитного поля и магнитными явлениями. В частности, вы знаете, что на проводник с током, помещённый в магнитное поле, действует сила Ампера. Продолжим рассмотрение магнитных явлений уже на количественном уровне.

ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ Вам известно, что магнитная стрелка, расположенная рядом с проводником с током или постоянным магнитом, устанавливается в определённом положении. Рамка с током, помещённая между полюсами подковообразного магнита, принимает ориентированное положение, при котором линии магнитного поля перпендикулярны плоскости рамки.

В физике величины, которые характеризуются не только численным значением, но и направлением, называют векторными. Поэтому величина, характеризующая магнитное поле, должна быть векторной.

Эту величину называют **индукцией магнитного поля** или **магнитной индукцией** и обозначают буквой $\vec{B}$.

МОДУЛЬ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ Поясним смысл этой величины и укажем способ её измерения. Для этого проведём опыт по измерению силы, которая действует на проводник с током, помещённый между полюсами подковообразного магнита перпендикулярно его магнитным линиям.

Пусть первоначально проводник уравновешен. Показание динамометра обозначим F_1. Оно численно равно модулю силы тяжести, действующей на проводник.

Пропустим по проводнику ток такого направления, чтобы на него подействовала магнитная сила (сила Ампера), направленная вертикально вниз. Направление тока выбираем в соответствии с правилом левой руки: линии магнитного поля должны входить в ладонь перпендикулярно к ней, а отставленный на 90° большой палец должен быть направлен вертикально вниз. При этом четыре сомкнутых пальца покажут направление тока в проводнике.

Если показания динамометра при наличии тока в проводнике обозначить F_2, то значение силы Ампера, действующей на проводник, равно разности показаний:

$$F = F_2 - F_1.$$

Данный опыт можно повторить, изменяя (увеличивая или уменьшая) длину проводника при неизменной силе тока. Согласно этим опытам сила Ампера оказывается пропорциональной длине проводника l.

Если теперь при неизменной длине проводника изменять силу тока в нём, то можно прийти к заключению, что сила Ампера пропорциональна силе тока I в проводнике.

Опыт показывает, что сила Ампера зависит от ориентации проводника в магнитном поле. Эта сила достигает своего максимального значения в случае, когда проводник расположен перпендикулярно линиям поля.

Однако отношение модуля силы Ампера F к длине проводника l и силе тока I, т. е. к произведению Il, не зависит ни от длины проводника, ни от силы тока в нём. Следовательно, отношение F/Il зависит только от свойств магнитного поля и может служить его количественной характеристикой. Эту характеристику поля называют *модулем магнитной индукции*:

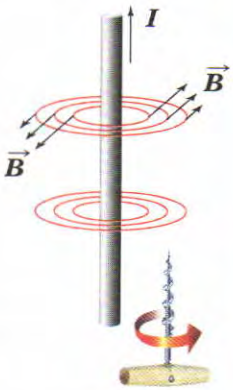
$$\text{индукция} = \frac{\text{сила Ампера}}{\text{сила тока} \times \text{длина проводника}}, \text{ или } B = \frac{F}{Il}.$$

Модулем магнитной индукции называют величину, равную отношению силы, действующей на расположенный перпендикулярно магнитным линиям проводник с током, к произведению силы тока в нём на длину проводника:

$$B = \frac{F}{Il}.$$

НАПРАВЛЕНИЕ ЛИНИЙ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ Напомним, что за направление магнитной линии принимают направление, которое указывает северный полюс магнитной стрелки. За направление вектора магнитной индукции принимается направление от южного полюса S к северному полюсу N свободно устанавливающейся стрелки, помещённой в данную точку поля.

Используя понятие вектора магнитной индукции, магнитные линии также называют *линиями магнитной индукции*. Или, другими словами, линиями магнитной индукции называют линии, касательные к которым в каждой точке поля направлены так же, как и вектор магнитной индукции.



Например, картина линий магнитной индукции поля, образованного прямолинейным проводником с током, представляет собой систему концентрических окружностей, лежащих в плоскости, перпендикулярной этому проводнику. Центр этих окружностей находится на оси проводника. В рассматриваемом случае направление вектора индукции в конкретной точке пространства определяется правилом буравчика.

Линии магнитной индукции условились проводить так, чтобы по их густоте можно было судить о модуле магнитной индукции: чем гуще линии магнитной индукции, тем больше её модуль.

Никола Тесла
(1856—1943)
Югославский физик, инженер, изобретатель в области электротехники и радиоэлектроники.

ЕДИНИЦЫ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В СИ за единицу магнитной индукции принята индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила, равная 1 Н. Эту единицу называют *тесла* (Тл) в честь выдающегося югославского физика Николы Тесла:

$$1\,\text{Тл} = 1\,\frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}}.$$

На практике используется также более мелкая единица индукции — *миллитесла*: 1 мТл = 0,001 Тл.

ВОПРОСЫ:

- От каких физических величин зависит сила, действующая на проводник с током в магнитном поле?
- Как определяется модуль и направление вектора магнитной индукции?
- Что принимают за единицу магнитной индукции в СИ?

23 ОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое однородное магнитное поле.
- Что такое магнитный поток.
- В каких единицах измеряется магнитный поток.

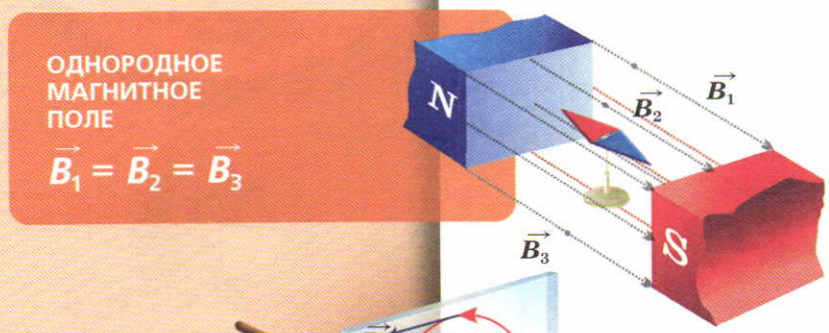
ВСПОМНИТЕ:

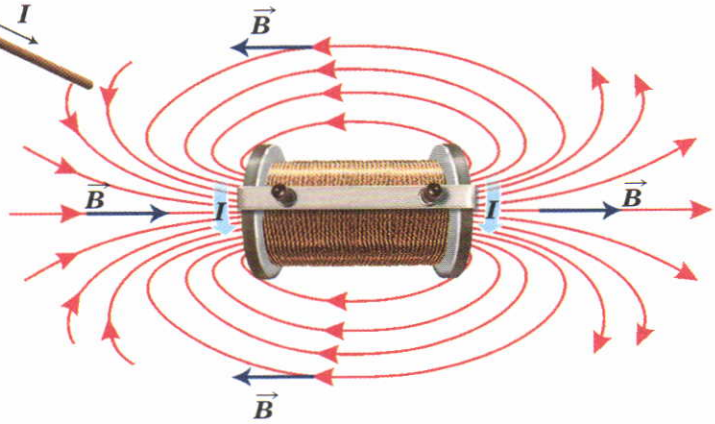
- Что такое магнитная индукция?
- Как направлен вектор магнитной индукции?
- Что такое линии магнитной индукции?
- Как связаны густота магнитных линий и модуль магнитной индукции?

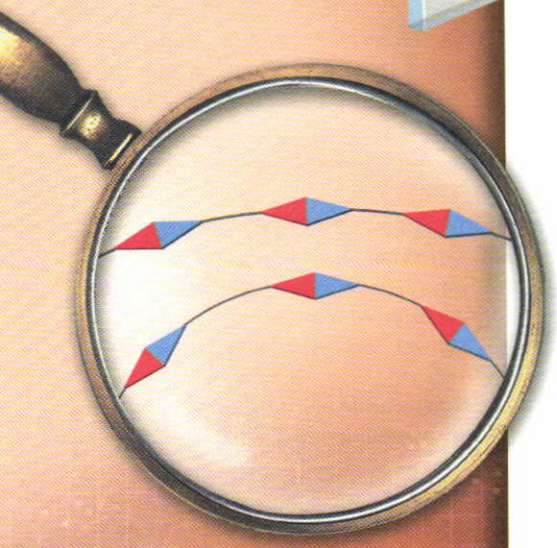
На прошлом уроке вы познакомились с силовой характеристикой магнитного поля, которую называют магнитной индукцией. Однако это не единственная количественная характеристика магнитного поля. Но прежде чем перейти к рассмотрению другой не менее важной характеристики магнитного поля, остановимся на вопросе о том, что такое однородное и неоднородное магнитное поле.

ОДНОРОДНОЕ И НЕОДНОРОДНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ Рассмотрим магнитное поле между полюсами кольцевого магнита. Магнитные линии здесь расположены параллельно друг другу. Так как во всех точках поля вектор магнитной индукции $\vec{B}$ не только одинаково направлен, но и имеет одно и то же значение, значит, и густота линий магнитной индукции в любой области поля между полюсами будет одна и та же.

Магнитное поле называют **однородным**, если во всех его точках магнитная индукция $\vec{B}$ одинакова как по направлению, так и по значению. В противном случае магнитное поле называют **неоднородным**. Примерами неоднородного магнитного поля могут служить: поле тока, протекающего по прямолинейному участку проводника; магнитное поле вокруг катушки с током; магнитное поле полосового магнита.

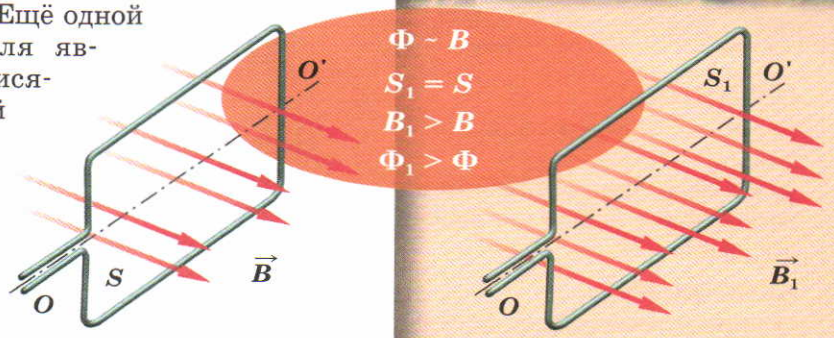




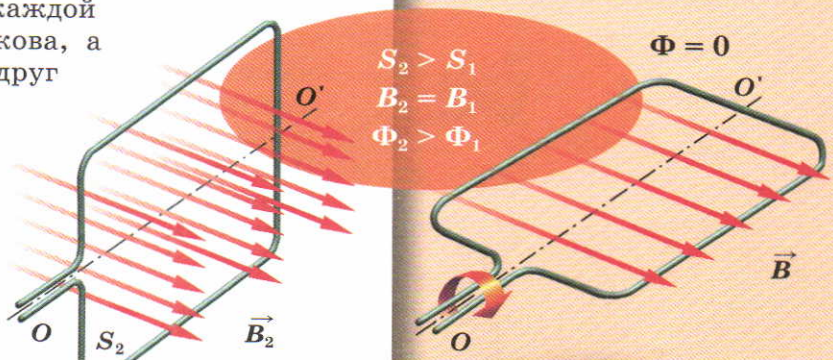


В этом не трудно убедиться с помощью магнитных стрелок, установленных вблизи источника магнитного поля. По характеру ориентации стрелок можно качественно судить о степени неоднородности поля в конкретном случае.

ПОТОК МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ Ещё одной характеристикой магнитного поля является физическая величина, зависящая от числа линий магнитной индукции, пронизывающих некоторую поверхность. Эту величину называют **потоком вектора магнитной индукции** или **магнитным потоком** и обозначают буквой Ф.



Понятие магнитного потока можно рассмотреть на примере однородного магнитного поля, в каждой точке которого индукция одинакова, а линии индукции параллельны друг другу.



Наглядно поток магнитной индукции можно рассматривать как величину, пропорциональную числу магнитных линий, проходящих через площадь S, ограничивающую некоторую поверхность. Поскольку число магнитных линий зависит от их густоты, то, очевидно, магнитный поток пропорционален модулю вектора индукции магнитного поля: $Ф \sim B$.

Чем больше индукция, тем больший магнитный поток $Ф_1$ пронизывает контур площадью S. Вместе с тем магнитный поток зависит и от площади контура: при том же значении магнитной индукции магнитный поток $Ф_2$, пронизывающий контур большей площади, будет больше. Следовательно, магнитный поток пропорционален также площади контура.

Очевидно, что в случаях, когда линии магнитной индукции перпендикулярны плоскости контура, магнитный поток принимает наибольшее значение. Однако при изменении ориентации контура в магнитном поле, например при вращении вокруг оси OO', магнитный поток будет уменьшаться. В том случае, когда плоскость контура окажется параллельной линиям магнитной индукции, магнитный поток станет равным нулю.

ЕДИНИЦЫ МАГНИТНОГО ПОТОКА В Международной системе единиц (СИ) за единицу магнитного потока принят *вебер* (Вб).

1 Вб — это магнитный поток через поверхность площадью 1 м², расположенную в однородном магнитном поле индукцией 1 Тл, перпендикулярной линиям индукции:

$$1\ Вб = 1\ Тл \cdot 1\ м^2 = 1\ Тл \cdot м^2.$$

На практике часто используется и меньшая единица магнитного потока — *милливебер*:

$$1\ мВб = 0{,}001\ Вб.$$

Вильгельм Эдуард Вебер
(1804—1891)
Немецкий физик, основные работы которого посвящены электромагнетизму, а также акустике, теплоте и молекулярной физике.

ВОПРОСЫ:

- Что такое однородное и неоднородное магнитное поле?
- Что такое поток магнитной индукции?
- От каких величин зависит магнитный поток?
- В каких единицах измеряется магнитный поток?

24 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

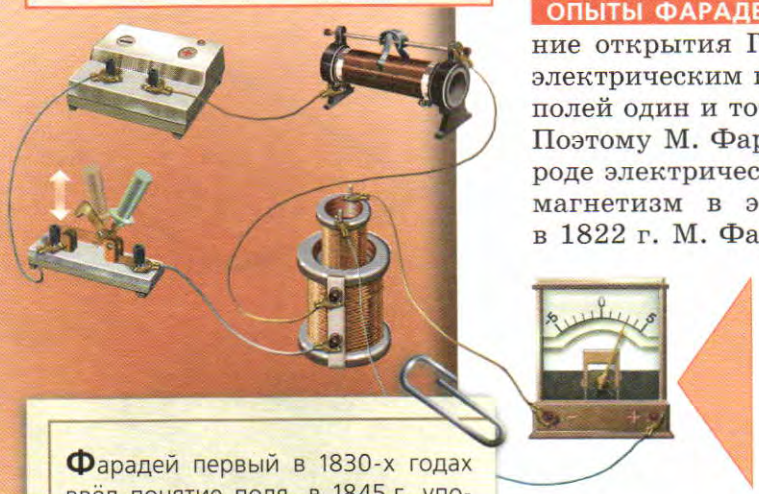
- Что такое электромагнитная индукция.
- От каких факторов зависит возникновение электромагнитной индукции.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое магнитный поток?
- Какие факторы влияют на изменение магнитного потока?

Первая половина XIX столетия ознаменовалась двумя выдающимися открытиями. В 1820 г. Г. Эрстед обнаружил совершенно новое электрическое явление, заключавшееся в том, что при прохождении тока через проводник вокруг него образуется магнитное поле. А примерно через десятилетие М. Фарадей открыл ещё одно важное свойство магнетизма, позволившее глубже понять взаимосвязь электрических и магнитных явлений.

ОПЫТЫ ФАРАДЕЯ М. Фарадей ясно осознавал значение открытия Г. Эрстеда: обнаружен факт порождения электрическим полем поля магнитного. Но у каждого из полей один и тот же источник — электрические заряды. Поэтому М. Фарадей был глубоко уверен в единой природе электрических и магнитных явлений. «Превратить магнетизм в электричество» — такой девиз записал в 1822 г. М. Фарадей в своём рабочем дневнике.

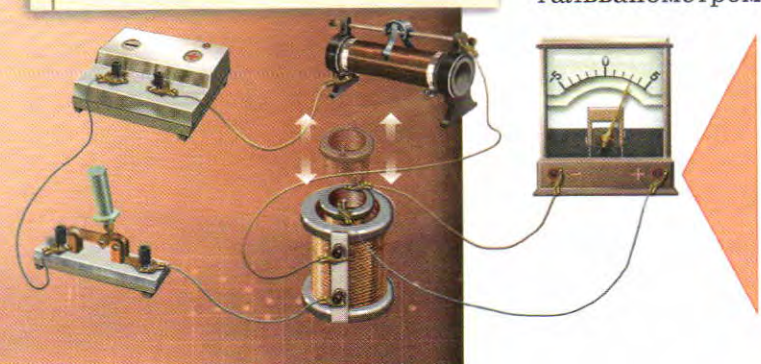


Фарадей первый в 1830-х годах ввёл понятие поля, в 1845 г. употребил термин «магнитное поле», а в 1852 г. сформулировал свою концепцию поля. Все основные работы по электричеству и магнетизму Фарадей представлял Королевскому обществу в виде серий докладов на протяжении 24 лет под названием «Экспериментальные исследования по электричеству». Он писал: «...надежда получить электричество при помощи обыкновенного магнетизма в разные времена побуждала меня экспериментально изучить индуктивное действие электрических токов».

Проделаем опыт, который повторяет один из первых опытов Фарадея, выполненных им в 1831 г. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, чувствительного гальванометра, реостата, двух катушек и ключа. Подключим одну из катушек к источнику тока, а вторую катушку расположим так, чтобы часть её входила внутрь первой катушки. Соединив выводы второй катушки с гальванометром, замкнём ключ.

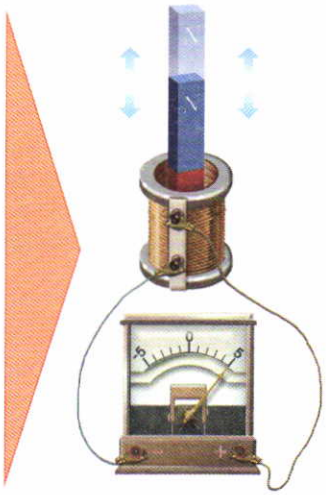
Опыт показывает, что в момент замыкания ключа стрелка гальванометра отклоняется на несколько делений, а затем возвращается в исходное положение. Это говорит о том, что в течение короткого времени по виткам второй катушки протекал электрический ток. Аналогичное явление наблюдается и при размыкании ключа, только в этом случае стрелка гальванометра отклоняется в противоположную сторону, что свидетельствует об изменении направления тока в катушке.

Проделаем другой опыт Фарадея, используя то же самое оборудование. Только на этот раз ключ оставим в замкнутом положении, а катушку, соединённую с гальванометром, будем перемещать относительно первой катушки, подключённой к источнику. В процессе перемещения катушки в её цепи протекает ток. Как установил учёный, неважно, какая из катушек перемещается: можно перемещать катушку, соединённую с источником, оставляя вторую катушку неподвижной. Результат будет тот же самый — в цепи катушки, соединённой с гальванометром, появляется ток.



ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Как объяснить описанный выше опыт? Может быть, определяющую роль здесь играет наличие источника тока? Для проверки этого предположения видоизменим опыт. Соберём цепь, состоящую только из катушки и гальванометра. Если теперь внутрь катушки вводить полосовой магнит, то стрелка гальванометра будет отклоняться, указывая на возникновение *индукционного* (от лат. *inductor* — возбудитель), т. е. наведённого тока в цепи катушки.



«Ток возникает лишь при движении магнита относительно провода, а не в силу свойств, присущих ему в покое», — записал Фарадей в свой научный дневник.

Майкл Фарадей
(1791—1867)
Английский физик и химик, основоположник учения об электромагнитном поле.

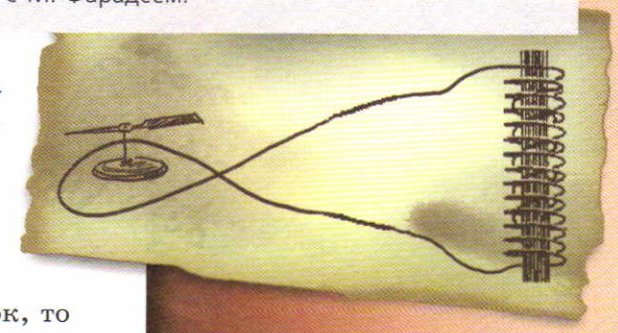
В дневнике М. Фарадея записана дата открытия явления электромагнитной индукции — 29 августа 1831 г. Интересно, что почти в одно и то же время с Фарадеем эксперименты по получению электрического тока с помощью магнита проводил швейцарский физик Жан-Даниэль Колладон. Для этого он использовал гальванометр с лёгкой магнитной стрелкой. Магнит вдвигался в катушку, в которой Колладон надеялся получить ток. Чтобы магнит не оказывал влияния на стрелку, концы катушки были выведены в соседнюю комнату и там присоединены к гальванометру. Вдвинув магнит в катушку, Колладон шёл в эту комнату и видел, что гальванометр показывает нуль. Если бы он всё время наблюдал за гальванометром, а магнитом занимался бы кто-то другой, замечательное открытие было бы сделано Колладоном. Но этого не случилось.

Практически в это же время американский физик Дж. Генри, много лет занимавшийся исследованием электромагнитных явлений и ничего не знавший о работах М. Фарадея, пишет своему другу о своих экспериментах, «касающихся тождественности электричества и магнетизма».

Сегодня неизвестно, по какой причине Дж. Генри прекратил начатые в сентябре эксперименты и продолжил их лишь девять месяцев спустя. Однако точно установлено, что электромагнитную индукцию Дж. Генри открыл в промежутке между 14 и 28 июня 1832 г. Если бы Генри не прервал свои эксперименты, он разделил бы славу этого открытия с М. Фарадеем.

Хотя приведённые опыты внешне выглядят различно, М. Фарадей уловил нечто общее, от чего зависит возникновение индукционного тока. Именно в замкнутом проводящем контуре индукционный ток возникает только тогда, когда изменяется число линий магнитной индукции, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром. Поскольку число линий индукции определяет магнитный поток, то при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, в этом контуре возникает электрический ток, существующий в течение всего времени изменения магнитного потока.

Здесь мы сформулировали сущность явления электромагнитной индукции на качественном уровне. С количественной формулировкой закона электромагнитной индукции вы познакомитесь при дальнейшем изучении физики в старших классах.



ВОПРОСЫ:

- При каких условиях в замкнутом проводнике возникает индукционный ток?
- Какое явление называют электромагнитной индукцией?

25 ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое переменный ток.
- Что такое генератор переменного тока.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое электромагнитная индукция?
- При каких условиях возникает электромагнитная индукция?
- Что такое турбина?

Открытие Фарадеем явления электромагнитной индукции оказало определяющее влияние на всё дальнейшее развитие технической цивилизации. Например, на этом явлении основано получение электрической энергии, вырабатываемой на электростанциях.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК Рассмотрим действие установки, состоящей из подковообразного магнита, проволочной рамки и миллиамперметра. Рамка находится в магнитном поле и подключена к миллиамперметру с помощью устройства, называемого *коллектором*.

Простейший коллектор состоит из двух изолированных друг от друга полуколец, соединённых с концами рамки, которые могут вращаться вместе с ней. Сами полукольца находятся в контакте с неподвижными щётками, которые непосредственно подключены к миллиамперметру.

Установим плоскость рамки перпендикулярно линиям магнитного поля. Назовём это положение начальным. Очевидно, в этом положении рамку пронизывает максимальный магнитный поток. Если теперь быстро повернуть рамку из этого положения на 180°, то можно заметить, что в процессе поворота рамки стрелка прибора отклоняется на несколько делений. При дальнейшем повороте рамки в том же направлении ещё на 180° стрелка отклоняется в противоположную сторону.

Данный опыт свидетельствует о том, что при вращении рамки в магнитном поле в ней возникает электрический ток. Направление тока меняется при каждом повороте рамки на 180° от её начального положения.

Согласно показаниям миллиамперметра при этом меняется и сила тока от нулевого значения до некоторого максимального в тот момент времени, когда рамка повернётся на 90° из начального положения. При этом магнитный поток меняется от максимального значения до нулевого.

При дальнейшем вращении рамки ток убывает и принимает нулевое значение в момент времени, когда рамка повернётся на 180°.

Если продолжать вращение рамки ещё на 180°, то характер изменения силы тока сохранится, но его направление будет противоположным.

Электрический ток, значение и направление которого периодически меняются, называют *переменным током*.

ГЕНЕРАТОР ПЕРЕМЕННОГО ТОКА Рассмотренный выше опыт представляет собой пример работы простейшего генератора электрического тока.

В настоящее время переменный ток получают в основном с помощью *электромеханических индукционных генераторов*, преобразующих механическую энергию в электрическую. На самом деле в этих генераторах вращается не обмотка, в которой индуцируется переменный ток, а электромагнит. Вращающаяся часть генератора называется *ротором* и является источником магнитного поля.

Ротор располагается внутри стальной станины цилиндрической формы, называемой *статором*. Во внутренней части статора имеются специальные пазы, в которые укладывается медный провод в виде витков. При вращении ротора в этих витках индуцируется переменный ток.

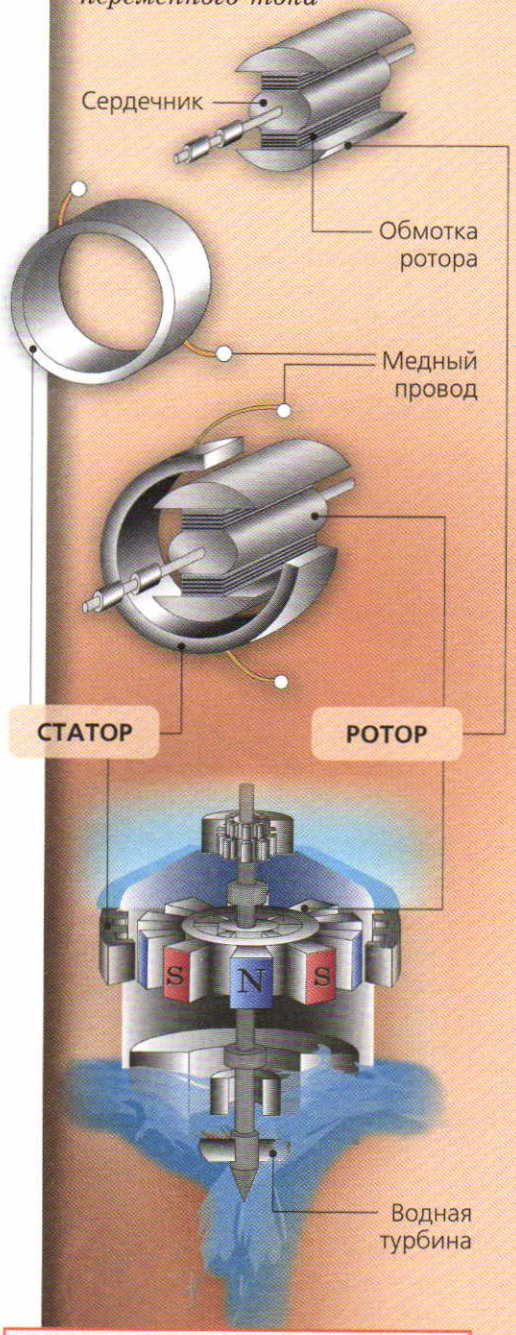
Ротор также имеет сложную форму и представляет собой стальной сердечник с навитой на него обмоткой, по которой протекает постоянный электрический ток. Создаваемое этим током магнитное поле вращается вместе с ротором.

Ротор генератора вращается при помощи какого-либо двигателя — гидротурбины, паровой турбины, двигателя внутреннего сгорания.

Стандартная частота переменного тока, используемого в электрических сетях России и странах Европы, равна 50 Гц. Это означает, что через каждые 0,02 с направление тока меняется на противоположное.

Поскольку скорость вращения гидротурбины мала, роторы современных гидрогенераторов имеют несколько пар полюсов. Применение многополюсных генераторов позволяет в определённых пределах варьировать частоту переменного тока.

Устройство генератора переменного тока



Английский физик Д. Бернал, являющийся одним из основателей науковедения (изучения закономерностей развития науки), писал: «Открытие Фарадея имело также значительно большее практическое значение по сравнению с открытием Эрстеда потому, что оно означало возможность получения электрического тока механическим путем, а также обратную возможность приведения в действие машин с помощью электрического тока. По сути дела, в этом открытии Фарадея заключалась судьба всей тяжёлой электропромышленности, однако потребовалось чуть ли не 50 лет для того, чтобы оказалось возможным извлечь все вытекающие из него выгоды».

Одним из примеров новейших применений открытия Фарадея являются так называемые МГД–генераторы (МГД – магнитно-гидро-динамические), в которых отсутствуют какие-либо подвижные механические части. В этих устройствах вместо проволочной рамки между полюсами магнита движется плазма, образовавшаяся в результате сгорания природного газа. Носители заряда в плазме отклоняются магнитным полем к полюсам генератора, что и приводит к возникновению электрического тока во внешней цепи.

ВОПРОСЫ:

- Что такое переменный ток?
- На каком явлении основано действие генератора переменного тока?
- Из каких основных частей состоит генератор тока?
- Опишите механизм получения переменного электрического тока.

26 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое вихревое электрическое поле.
- Каков характер взаимосвязи электрического и магнитного полей.
- Кто создал теорию электромагнитного поля.

ВСПОМНИТЕ:

- Какое поле называется электрическим?
- Опыты Фарадея.
- В чём заключается сущность явления электромагнитной индукции?

На предыдущих уроках вы узнали, при каких условиях в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток. Однако остался невыясненным очень важный вопрос: почему хаотически движущиеся между узлами кристаллической решётки свободные электроны пришли в направленное движение?

ИНДУКЦИОННОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ Вопрос действительно непростой, поскольку непонятно, какие силы заставляют электроны двигаться направленно. Само магнитное поле этого сделать не может, так как оно действует только на движущиеся электрические заряды. Наглядно это показали опыты Ампера, в которых магнитное поле оказывало действие на проводник с током.

Ещё одним фактором является то, что электромагнитная индукция выглядит совершенно одинаково в двух внешне различающихся опытах. Например, в одном опыте мы перемещаем магнит относительно неподвижной катушки, а в другом — перемещаем катушку относительно неподвижного магнита.

Принимая во внимание особенности магнитного поля, нужно также помнить о том, что на заряды действует ещё и электрическое поле. Однако это поле, называемое кулоновским, создаётся неподвижными зарядами, а индукционный ток возникает под действием переменного магнитного поля.

Поэтому можно предположить, что электроны в неподвижном проводнике приводятся в движение электрическим полем, которое само порождается изменяющимся со временем магнитным полем.

Это новое фундаментальное свойство магнитного поля впервые теоретически обосновал в 1865 г. английский учёный Дж. Максвелл: изменяющееся во времени магнитное поле порождает электрическое поле. Это поле по своей природе является индукционным.

Джеймс Клерк Максвелл
(1831—1879)
Английский физик, создатель классической электродинамики, один из основателей статистической физики.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ Теперь явление электромагнитной индукции мы можем трактовать в новом свете. Главное в нём — это процесс порождения магнитным полем поля электрического.

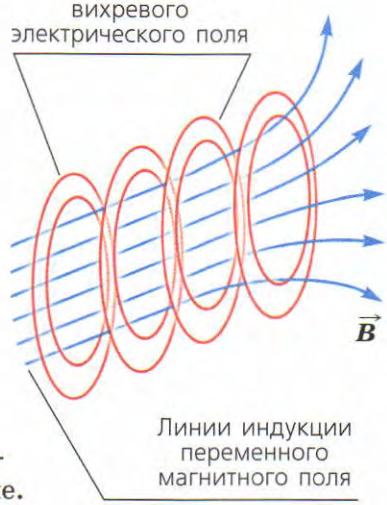
Вместе с тем, теория Максвелла сразу же поставила ряд новых принципиальных вопросов. Например, отличается ли индукционное электрическое поле от обычного кулоновского поля, созданного неподвижными зарядами? Это поле порождается только в проводнике или во всём окружающем проводник пространстве? Какую роль при этом играет наличие самого проводящего контура?

Важно отметить, что ответы на эти и другие вопросы заложены в самой теории Максвелла. Индукционное электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля, имеет совсем другую структуру, чем кулоновское поле. Оно не связано с какими-либо элек-

> Теория, которую я предлагаю, может быть названа теорией *электромагнитного поля*, потому что она имеет дело с пространством, окружающим электрические и магнитные поля. Она может быть названа также динамической теорией, поскольку она допускает, что в этом пространстве имеется материя, находящаяся в движении, посредством которой и производятся наблюдаемые электромагнитные явления.
>
> *Джеймс Максвелл*

трическими зарядами. Поэтому силовые линии этого поля не имеют ни начала, ни конца, и представляют собой некоторые замкнутые линии, похожие на линии магнитного поля. Подобные поля называют **вихревыми**. При этом неважно, есть ли проводящий контур или его нет. Наличие проводника лишь помогает обнаружить возникающее вихревое электрическое поле.

Теперь пришло время задать, пожалуй, самый важный вопрос: если переменное магнитное поле порождает электрическое поле, то возможен ли реально обратный процесс — порождение переменным электрическим полем поля магнитного? Теория Максвелла даёт утвердительный ответ: изменяющееся со временем электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Эти тесно взаимосвязанные и порождающие друг друга поля образуют электромагнитное поле.



Сам Максвелл твёрдо верил в существование электромагнитного поля, хотя экспериментальное подтверждение этого факта было получено лишь спустя 22 года.

Электрические и магнитные поля есть проявления единого материального объекта — электромагнитного поля. Эти поля тесно взаимосвязаны, и изменение одного из них неизбежно ведёт к изменению другого.

Электромагнитные пушки сегодня считаются перспективным видом вооружений, где для разгона снаряда используют электромагнитное поле, а не тепловую энергию химических реакций, как это происходит в обычных огнестрельных пушках. Результаты новейших испытаний самой мощной в мире электромагнитной пушки, созданной в США, поражают воображение: это устройство без помощи порохового заряда придаёт снаряду скорость 9 тыс. км/ч, что в несколько раз превышает скорость звука.

Одним из многочисленных примеров использования электромагнитного поля является ускорение микрочастиц. Однако имеются примеры по ускорению макроскопических тел с помощью так называемых электромагнитных пушек. Так, например, ещё в 1845 г. такая пушка катушечного типа была использована для запуска металлического стержня длиной около 20 м.

Кристиан Беркеленд, профессор физики в университете г. Осло, за период с 1901 г. по 1903 г. получил три патента на свою электромагнитную пушку. В 1901 г. Беркеленд создал первую такую электромагнитную пушку катушечного типа и использовал её для разгона снаряда массой 500 г до скорости 50 м/с. С помощью второй большой пушки, созданной в 1903 г. и выставленной в настоящее время в норвежском техническом музее в г. Осло, он достигал разгона снаряда массой 10 кг до скорости примерно 100 м/с.

Электромагнитная пушка катушечного типа состоит из ствола (не показанного на рисунке) с рядом неподвижных катушек ускорения. На эти катушки последовательно подаётся напряжение, что приводит к возникновению в них электрического тока, порождающего электромагнитного поле. Это поле, воздействуя на катушку снаряда, индуцирует в ней электрический ток. В результате воздействия магнитного поля на ток в катушке снаряда и возникает сила, ускоряющая снаряд.

ВОПРОСЫ:

- Какое электрическое поле мы называем индукционным или вихревым?
- Возможно ли опытное обнаружение вихревого электрического поля? Приведите примеры.
- В чём заключается главная идея теории Максвелла?

27 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое электромагнитные колебания.
- Что такое колебательный контур.
- Что такое конденсатор.
- Из каких элементов состоит колебательный контур.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое переменный ток?
- Что такое электрическое поле?
- Что такое напряжение?

Вы уже знаете, что для возникновения механических волн необходимы колебания. Например, колебания поплавка приводят к возникновению волны на поверхности воды, колебания голосовых связок приводят к возникновению звуковых волн и т. д. Вместе с тем, существует другой класс колебаний, не являющихся механическими и имеющих иную природу.

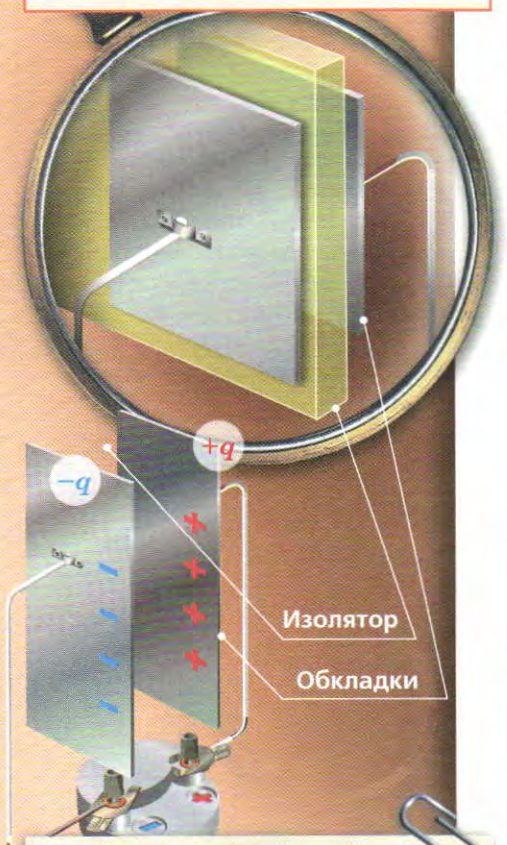
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ На предыдущих уроках вы познакомились с переменным током, вырабатываемом на электростанциях. Частота этого тока равна 50 Гц, и её называют **промышленной частотой.**

Однако в телефонных проводах, например при передаче звука, течёт ток, изменяющийся в соответствии с частотой передаваемых звуковых колебаний. Как правило, частоты этих колебаний лежат в пределах от 50 до 10 кГц. Изменения тока носят колебательный характер. Такого рода колебания называют **электромагнитными колебаниями.**

Электромагнитные колебания, соответствующие звуковым частотам, называют колебаниями **звуковой** или **низкой частоты.**

Радиопередачи и телевидение основаны на применении токов с частотами в миллионы и сотни миллионов герц. Такие колебания называют электромагнитными колебаниями **высокой частоты.**

Для получения электромагнитных колебаний используются специальные устройства, которые называют колебательными контурами. **Колебательный контур** — это электрическая цепь, состоящая из катушки и элемента, называемого *конденсатором*.



КОНДЕНСАТОР. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ Конденсатор — это устройство, позволяющее накапливать электрические заряды (от лат. *condensation* — накопление).

Простейший конденсатор состоит из двух металлических пластинок (обкладок), разделённых слоем изолятора, например, воздуха или слюды.

Если обкладки конденсатора подсоединить к полюсам источника тока, например, батарейки, то на обкладках появятся равные по модулю, но противоположные по знаку электрические заряды q и $-q$.

Как показывает опыт, заряды на обкладках конденсатора пропорциональны напряжению между ними:

$$q \sim U.$$

Коэффициент пропорциональности обозначается буквой C и называется электрической ёмкостью или просто ёмкостью конденсатора:

$$q = CU.$$

Ёмкость конденсатора тем больше, чем больше площадь его обкладок и чем ближе друг к другу они расположены.

В электрических схемах для конденсаторов используется следующее условное изображение:

Заметим, что 1 Ф — это очень большая ёмкость. Ёмкость обычных конденсаторов, как правило, не превышает тысячных долей фарада.

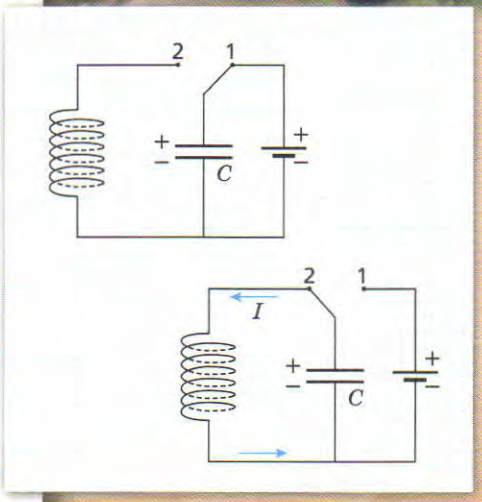
Единицей ёмкости в СИ является *фарад* (Ф), названной в честь английского учёного М. Фарадея.

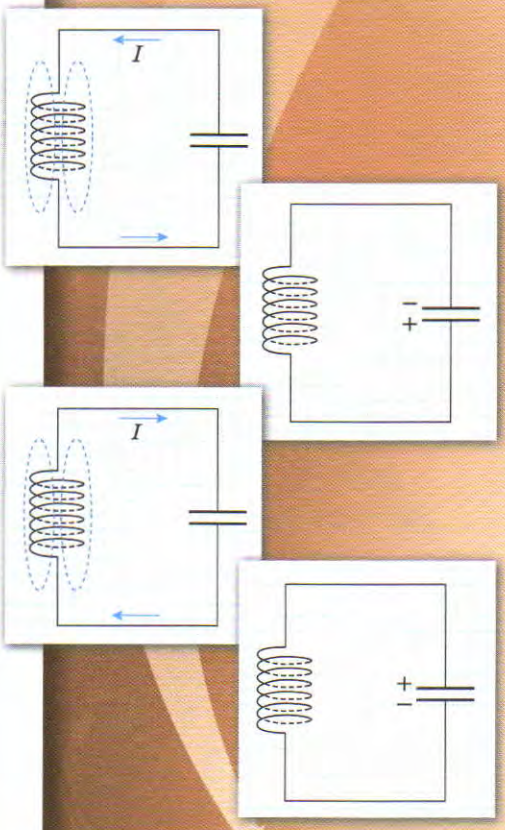
1 Ф — это такая ёмкость конденсатора, при которой заряд, равный 1 Кл, создаёт между обкладками конденсатора напряжение 1 В.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР Зарядим конденсатор от источника тока, в результате чего между его обкладками возникнет электрическое поле. Затем с помощью ключа замкнём конденсатор на катушку, состоящую из нескольких витков проволоки. Под действием электрического поля заряды начнут двигаться по виткам катушки, создавая в цепи ток. По мере разрядки конденсатора электрическое поле в нём будет ослабевать, а в катушке возникнет магнитное поле. В тот момент, когда конденсатор полностью разрядится, магнитное поле катушки будет самым сильным. Это означает, что энергия электрического поля конденсатора полностью перейдёт в энергию движущихся зарядов. Поскольку движущиеся заряды (электрический ток) порождают магнитное поле, то можно сказать, что совокупная кинетическая энергия этих зарядов и представляет собой энергию магнитного поля. Хотя в этот момент электрическое поле в конденсаторе отсутствует, заряды некоторое время будут двигаться в цепи в прежнем направлении по инерции. В результате конденсатор снова зарядится, но только на обкладке, где были положительные заряды, появятся отрицательные, а там, где были отрицательные заряды, окажутся положительные. Другими словами, конденсатор перезарядится, и ток на мгновение прекратится.

Далее явление повторится в обратном порядке: конденсатор начнёт разряжаться, энергия электрического поля будет преобразовываться в энергию магнитного поля, и катушка вновь перезарядит конденсатор. В последующий момент конденсатор опять будет разряжаться. Повторение процессов означает, что заряды в контуре будут совершать колебания, переходя с одной обкладки на другую. Если не пополнять извне заряды на обкладках конденсатора, то колебания зарядов в колебательном контуре довольно быстро затухнут. Это объясняется наличием сопротивления у проводников: при протекании тока проводники нагреваются, на что расходуется энергия контура. Таким образом, в колебательном контуре возникает переменный ток. Частота этого тока зависит от ёмкости конденсатора, от числа витков и размеров катушки. Если ёмкость конденсатора невелика, а катушка состоит из малого числа витков, то частота тока будет большой. При увеличении ёмкости конденсатора и числа витков у катушки частота колебаний будет уменьшаться.

Колебательный контур является основной частью устройства, называемого генератором высокой частоты. В свою очередь, генераторы высокой и сверхвысокой частоты являются неотъемлемой частью оборудования радио- и телестанций, станций, обслуживающих мобильную телефонную связь, в радиолокации и т. д.





ВОПРОСЫ:

- Какие колебания называются колебаниями высокой частоты?
- Что такое конденсатор?
- Что такое колебательный контур?
- В каких устройствах используются колебательные контуры?

28 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что называют электромагнитными волнами.
- Что такое напряжённость электрического поля.

ВСПОМНИТЕ:

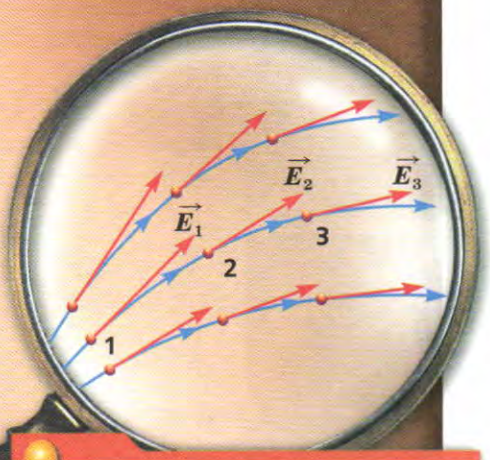
- Что такое силовые линии электрического поля?
- Что такое магнитная индукция?
- Что такое поперечные волны?
- Каковы основные характеристики волны?

Вы уже познакомились с таким важным понятием, как электромагнитное поле. При этом особое внимание обращалось на тот факт, что порождающие друг друга электрическое и магнитное поля должны быть переменными. Но как добиться того, чтобы электрическое поле, создаваемое зарядами, было переменным?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ Для ответа на поставленный вопрос попытаемся понять, что произойдёт в случае, если заряженная частица не просто сместится из одной точки пространства в другую, а будет совершать колебания относительно некоторого начального положения. В результате движения частицы электрическое поле в непосредственной близости от неё будет периодически меняться. Изменяющееся электрическое поле будет порождать переменное магнитное поле, которое вызовет появление индукционного электрического поля на уже большем расстоянии от частицы, и т. д. Таким образом, изменение электромагнитного поля будет далее захватывать всё более отдалённые области пространства. Процесс распространения переменного электромагнитного поля, порождённого колеблющейся заряженной частицей, и представляет собой *электромагнитную волну*. Колебательное движение всегда является ускоренным. Следовательно, для получения электромагнитных волн нужны *ускоренно движущиеся заряды*.

В отличие от звуковых волн, которые могут распространяться только в среде, электромагнитные волны согласно теории Максвелла могут распространяться не только в среде, но и в вакууме. В связи с этим возникает вопрос: можем ли мы представить себе некий образ волны? Или какие физические величины испытывают колебания в электромагнитной волне?

Вам уже известно, что вектор магнитной индукции $\vec{B}$ является силовой характеристикой магнитного поля. От значения и направления вектора магнитной индукции зависит сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся в нём заряженную частицу.



Для электрического поля также вводится его силовая характеристика. Данную векторную величину называют **напряжённостью электрического поля** и обозначают буквой $\vec{E}$. Аналогично вектору магнитной индукции направление вектора напряжённости электрического поля совпадает с направлением касательной к силовой линии электрического поля в данной точке. По определению напряжённость электрического поля равна отношению силы, действующей на помещённую в данную точку поля заряженную частицу, к значению её заряда.

Из теории Максвелла следует, что в электромагнитной волне векторы $\vec{B}$ и $\vec{E}$ перпендикулярны друг другу и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны.

Если обозначить величины: силу, действующую на помещённую в данную точку поля заряженную частицу — $\vec{F}$, электрический заряд частицы — q, то напряжённость электрического поля $\vec{E}$ в этой точке рассчитывают по формуле

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

Именно эти физические величины являются основными характеристиками электромагнитной волны и испытывают периодические изменения. При этом модули этих векторов одновременно достигают максимальных и минимальных значений, т. е. колеблются синхронно.

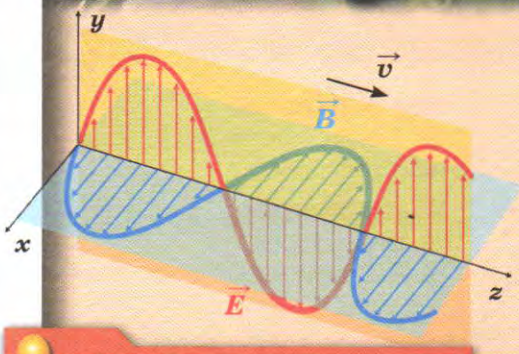
Так как направление распространения электромагнитной волны перпендикулярно направлениям колебаний векторов $\vec{B}$ и $\vec{E}$, то электромагнитные волны являются поперечными.

Дж. Максвелл не только теоретически обосновал возможность существования электромагнитных волн, но и вычислил скорость их распространения. Для вакуума это значение является фундаментальной величиной, равной скорости света и обозначается буквой c:

$$c = 300\ 000 \text{ км/с}.$$

Для электромагнитных волн связь между длиной волны λ, частотой колебаний ν и скоростью распространения c определяется такой же формулой, как и для механических волн:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

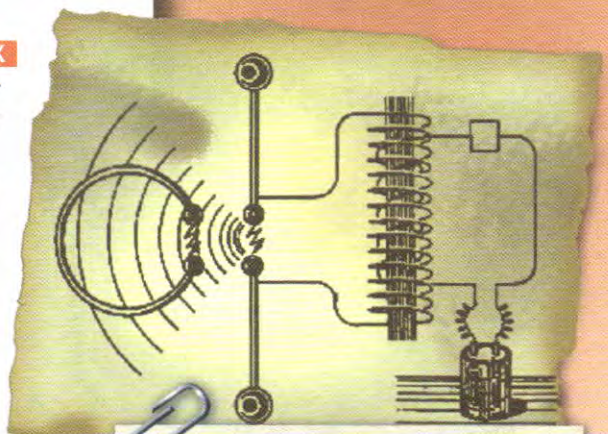


Если обозначить величины: частота колебаний — ν, скорость распространения электромагнитной волны — c, то длину электромагнитной волны λ рассчитывают по формуле

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН Электромагнитные волны впервые экспериментально обнаружил в 1887 г. немецкий учёный Г. Герц.

В опытах Герца ускоренное движение заряженных частиц осуществлялось с помощью специального разрядника, состоящего из двух металлических стержней с шарами на концах (вибратор Герца). Шарам сообщались большие разноимённые заряды, в результате чего между ними происходил электрический разряд. При этом в самих стержнях возникали электрические колебания. Приёмное устройство состояло из проволочного витка с двумя шарами на концах. Приём электромагнитной волны наблюдался в виде маленькой искры, которая проскакивала между шарами.



Описанные эксперименты, как, по крайней мере, кажется мне, устраняют сомнения в тождественности света, теплового излучения и электродинамического волнового движения.

Генрих Герц

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН Шкала длин электромагнитных волн необычайно широка, а их применение чрезвычайно многообразно. Достаточно привести пример лишь одного диапазона — радиоволн: радиосвязь и телевидение, мобильная телефонная связь и радиолокация, радиоастрономия и средства космической связи и т. д. Кроме этого, такое хорошо всем знакомое явление, как загар, объясняется воздействием на кожу ультрафиолетового излучения — электромагнитных волн с очень малой длиной волны.

Электромагнитные волны, пронизывающие всё окружающее нас пространство, обусловлены как природными явлениями (свечение Солнца, излучение нагретых тел и т. д.), так и работой большинства технических устройств (телевизор, компьютер, микроволновая печь, линии электропередачи и т. п.).

ВОПРОСЫ:

- В каком случае электрические заряды являются источниками электромагнитных волн?
- Что такое напряжённость электрического поля?
- Какие физические величины характеризуют электромагнитную волну?

29 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- В чём заключается основная идея радиосвязи.

ВСПОМНИТЕ:
- Опыты Герца.
- Что такое электромагнитные колебания?

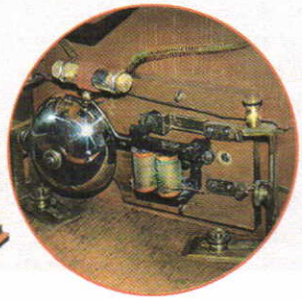
Опыты Герца послужили толчком для исследования новых возможностей передачи и приёма электромагнитных волн. Этим вопросом занимались учёные и инженеры многих стран.

РАДИОСВЯЗЬ **Возможность передачи и приёма электромагнитных волн на расстояние привели к возникновению целого ряда средств связи, без которых немыслима наша сегодняшняя жизнь.**

Александр Степанович Попов
(1859—1905)
Выдающийся русский учёный, изобретатель радио.

Впервые мысль о применении электромагнитных волн для передачи сигналов на расстояние высказал А. С. Попов. В 1894 г. он собрал радиоприёмник, регистрирующий электромагнитные волны, возникающие при грозовых разрядах. В 1895 г. Попов при помощи созданных им генератора и приёмника передал первую в мире беспроводную телеграмму (радиограмму) на расстояние 250 м. Первая радиограмма содержала всего два слова: «*Heinrich Hertz*».

Почти одновременно с Поповым итальянец Г. Маркони создал свою радиотелеграфную установку и в 1897 г. получил на неё патент (документ, удостоверяющий авторство и исключительное право на изобретение), чего не сделал в своё время Попов. Поэтому официально именно Маркони считается изобретателем радио. В 1901 г. Маркони потряс мировую общественность, осуществив первую в историю передачу радиосигналов через Атлантический океан на расстояние 1800 км. Через десять лет радиоприёмники стали неотъемлемой частью жизни человека. Передача информации стала практически мгновенной и достаточно дешёвой.



Благодаря радиовещанию мы можем передавать и принимать звуковую информацию без помощи проводов. Основная идея функционирования радиовещания состоит в следующем: в начале канала связи стоит устройство, которое преобразует звук в электрические сигналы. Затем эти сигналы преобразуются в форму, пригодную для передачи на большие расстояния, и излучаются в пространство. На другом конце линии сигналы попадают в приёмник, который их усиливает и преобразует обратно в звук.

Звуковые колебания имеют сравнительно низкие частоты. Электромагнитные колебания, имеющие такие же частоты, как и звуковые, практически невозможно передать на расстояние. Поэтому для передачи звука на большие расстояния нужны колебания, частота которых превышает частоту звуковых колебаний в миллионы раз, и при которых может излучаться электромагнитная волна.

Гульельмо Маркони
(1874—1937)
Выдающийся итальянский физик, инженер-электрик, изобретатель радио.

Радиосвязь осуществляется посредством испускания, передачи и приёма электромагнитных колебаний с частотой в диапазоне от тысяч до миллионов герц, которые носят название радиоволн.

Электромагнитные волны излучаются передающей антенной, в которой высокочастотные колебания возбуждаются с помощью специального генератора. Такие колебания получили название *несущих* *а*. Если в цепь передающей антенны включить микрофон и произносить перед ним звуки, то колебания мембраны микрофона будут преобразовывать звуковые волны *б* в электрические сигналы в виде переменного тока *в*, частота которого совпадает с частотой звуковых колебаний. Этот ток будет изменять амплитуду несущих высокочастотных колебаний в соответствии с амплитудой звуковых колебаний *г*. Это преобразование называют *амплитудной модуляцией*. Модулированный сигнал при помощи антенны излучается в пространство. Приёмник, настроенный на частоту передающей станции, улавливает радиоволну и превращает её в электрический сигнал *д*. Электронное устройство этот сигнал усиливает, а громкоговоритель преобразует его в звуковые волны *е*.

ТЕЛЕВИДЕНИЕ При помощи радиоволн можно передавать также и движущееся изображение. Эта возможность реализована в телевидении.

Приняв при помощи антенны радиосигналы различных телеканалов, телевизор выделяет сигналы именно того канала, на который он в данный момент настроен. Далее происходит обратное преобразование радиосигнала в звук и изображение.

Главный принцип действия телевидения был предложен в 1880 г. независимо двумя учёными: американцем В. Е. Сойером и французом М. Лебланом. В 1922 г. шотландский инженер Д. Л. Бэрд начал разрабатывать телевизионное оборудование и в 1926 г. в Лондоне продемонстрировал первые распознаваемые изображения человеческих лиц.

МОБИЛЬНАЯ ТЕЛЕФОНИЯ Для передачи звуковых сигналов при помощи мобильных телефонов используются радиоволны высокой частоты, называемые ультракороткими. Эти сигналы расходятся по всему миру благодаря релейным станциям и искусственным спутникам Земли.

В сеть мобильной телефонной связи входит множество антенн для передачи и приёма сигналов. Каждая такая антенна действует на ограниченном пространстве. При звонке с помощью мобильного телефона сигнал на ультракоротких волнах улавливается ближайшей антенной, поступает в сеть и благодаря центральному компьютеру направляется по назначению.

В мобильной телефонии используют волны, которые распространяются прямолинейно.
Для обеспечения мобильной связи на больших расстояниях используют сеть ретрансляторов. Зоны их работы образуют шестиугольники, похожие на соты. Именно поэтому мобильные телефоны называют также сотовыми.

ВОПРОС:
В чём заключается основная идея радиосвязи?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

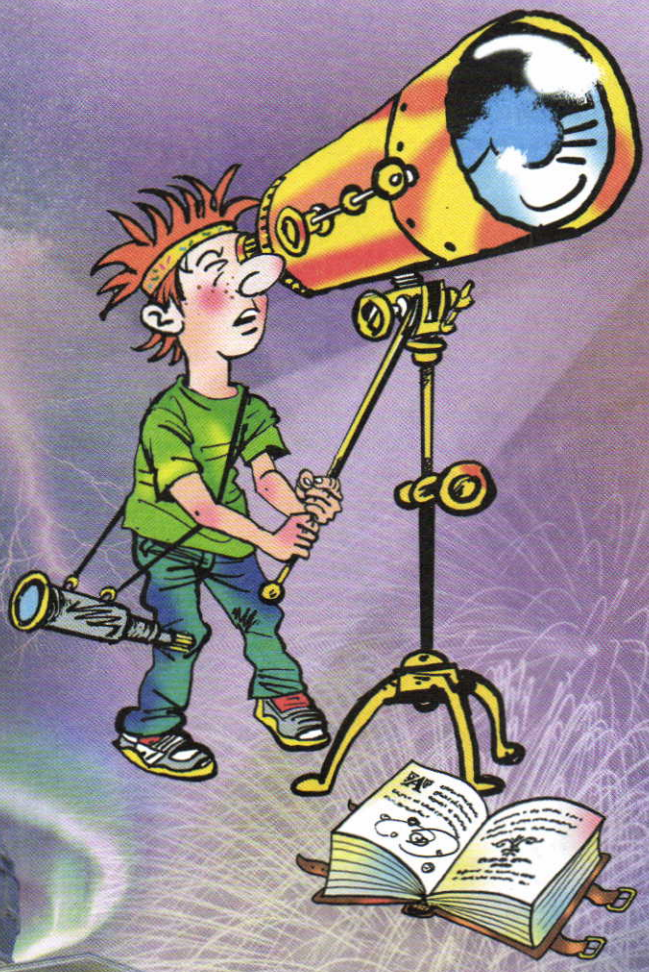
- Векторную физическую величину, характеризующую магнитное поле, называют индукцией магнитного поля.
- Физическую величину, характеризующую магнитное поле в пределах некоторой поверхности, пронизываемой линиями этого магнитного поля, называют магнитным потоком.
- Явление электромагнитной индукции состоит в следующем: при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур, в этом контуре возникает электрический ток, существующий в течение всего времени изменения магнитного потока.
- Переменным током называют электрический ток, значение и направление которого периодически меняются.
- Изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, а изменяющееся со временем электрическое поле порождает переменное магнитное поле. Эти тесно взаимосвязанные и порождающие друг друга поля есть суть единого электромагнитного поля.
- Процесс распространения переменного электромагнитного поля, порождённого колеблющимся зарядом, представляет собой электромагнитную волну. Для получения электромагнитных волн нужны ускоренно движущиеся заряды.
- В вакууме скорость распространения электромагнитных волн равна фундаментальной постоянной — скорости света.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Магнит быстро опускают в катушку. На что расходуется работа силы тяжести?
- Каково назначение коллектора электрогенератора? Меняется ли полярность полуколец коллектора при работе электрогенератора?
- Является ли магнитное поле материальным объектом?
- Приведите примеры использования электромагнитных колебаний в быту, технике, военном деле.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

- СВЕТ. ИСТОЧНИКИ СВЕТА
- РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ
- ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА
- ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО
- ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА
- ЛИНЗЫ
- ИЗОБРАЖЕНИЕ, ПОЛУЧАЕМОЕ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЗЫ
- ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
- ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ



КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

...Почему в плоских зеркалах предметы и изображения представляются одинаковыми, в выпуклых и сферических — уменьшенными...

Архимед

30 СВЕТ. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что изучается в разделах геометрическая оптика и волновая оптика.
- Что такое источники света.

ВСПОМНИТЕ:
- Какие световые явления встречаются нам в природе и быту?
- Что такое излучение?
- Что такое электромагнитные волны?

Почему небо голубое? Что такое радуга и полярное сияние? Почему при ярком свете мы видим окружающие нас предметы многоцветными, а с наступлением сумерек цветность предметов уменьшается? На понимание природы световых явлений у человечества ушло не одно тысячелетие.

ПРИРОДА СВЕТА Если задуматься над вопросом, каким образом мы получаем информацию об окружающем нас мире, то главную роль здесь играет зрение. Учёные считают, что более 80% информации из окружающего мира мы получаем с помощью глаз. Для того чтобы мы смогли увидеть предмет, наши органы зрения должны преобразовать свет, излучённый или отражённый этим предметом. Поэтому природа световых явлений волновала учёных с глубокой древности.

Современная теория световых явлений сложилась в конце XIX — начале XX вв. благодаря работам Дж. Максвелла и Г. Герца, которые доказали, что свет имеет электромагнитную природу.

Раздел физики, в котором изучают световые явления, называют **оптикой** (от греч. *optike* — наука о зрительных восприятиях).

Геометрической оптикой называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света, основываясь на представлении о световых лучах. *Волновая оптика* — раздел оптики, который описывает распространение света с учётом его волновой природы.

В курсе физики 8 класса уже говорилось о том, что свет является излучением. Следовательно, свет передаёт телам, на которые он попадает, энергию. Говорят, что свет является видимым излучением, или электромагнитными волнами, видимыми человеческим глазом.

Представление о световых лучах возникло ещё в античной науке. Евклид, обобщив достижения своих предшественников, сформулировал законы распространения и отражения света. Бурное развитие геометрической оптики в XVII в. было обусловлено изобретением таких оптических приборов как лупа, телескоп, микроскоп и т. д. Геометрическая оптика является примером теории, позволившей при достаточно небольшом числе фундаментальных понятий и законов получать много практически важных результатов. В теории оптических устройств она сохранила большое значение до настоящего времени.

Представления о волновом характере распространения света восходят к основополагающим работам голландского учёного второй половины XVII в. Х. Гюйгенса. Но только благодаря электромагнитной теории света, созданной Максвеллом, удалось в конце XIX в. найти простое объяснение целого ряда явлений, непонятных до тех пор.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

ИСКУССТВЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

люминесцирующие

тепловые

ИСТОЧНИКИ СВЕТА Тела, от которых исходит свет, называются *источниками света*. По происхождению источники света можно разделить на *искусственные*, т. е. созданные человеком, и *естественные*, т. е. созданные природой. Естественными источниками света являются Солнце, звёзды, молнии, полярные сияния, светящиеся насекомые и др. Искусственные источники света в зависимости от того, какой процесс лежит в основе получения излучения, делят на *тепловые* и *люминесцирующие* (от лат. *lumen* — свет). В тепловых источниках свет возникает в результате нагревания тел до высокой температуры, а в люминесцирующих — в результате превращения тех или иных видов энергии в видимое излучение независимо от теплового состояния излучающего тела. Примерами тепловых источников света являются пламя свечи, лампочка накаливания и т. д. Примерами люминесцирующих источников света, часто называемых холодным светом, являются лампы дневного света, экран телевизора и т. д.

Первые искусственные источники света (костёр, лучина, факел) появились в глубокой древности. Вплоть до конца XIX в. применялись в основном тепловые источники света, основанные на сжигании горючих веществ (свечи, масляные и керосиновые лампы и т. п.). Только в конце XIX в. появились первые электрические источники света, которые можно было использовать на практике. В их создание большой вклад внесли русские учёные П. Н. Яблочков, В. Н.Чиколев, А. Н. Лодыгин и др. С начала XX в. электрическая лампа накаливания благодаря удобству в эксплуатации начинает быстро и повсеместно вытеснять остальные источники света.

Природные явления люминесценции — северное сияние, свечение некоторых насекомых, минералов, гниющего дерева — были известны с очень давних времён, однако изучать люминесценцию стали с конца XIX в. Первые образцы отечественных люминесцентных ламп были созданы в 1936—1940 гг. группой московских учёных и инженеров под руководством С. И. Вавилова.

Особый класс искусственных источников света, не являющихся тепловыми, составляют устройства, называемые светодиодами. Они широко применяются для производства ёлочных гирлянд, ночников, детских игрушек и т. д.

Кроме источников света мы видим тела, которые сами по себе источниками света не являются. Почему мы видим дома и машины, мебель и окружающих нас людей? Если тело освещено каким-либо источником света, то излучение, идущее от него, попав на это тело, меняет своё направление. Свет отражается от поверхности тела, и человеческий глаз реагирует именно на этот отражённый свет. Именно поэтому в темноте, в отсутствие источников света, предметы становятся невидимыми. Почему видна Луна, которая сама не является естественным источником света, ещё в V в. до н. э. объяснил Демокрит. Мы видим Луну потому, что видим свет Солнца, отражённый от её поверхности.

Павел Николаевич Яблочков
(1847—1894)
Учёный, изобретатель. В 1876 г. П. Н. Яблочков получил первый в мире патент на изобретение электрической лампы.
Лампу П. Н. Яблочкова в Европе современники называли «русский свет», в России — «русское солнце».

Александр Николаевич Лодыгин
(1847—1923)
Русский электротехник, изобретатель лампы накаливания.
В 1874 г. получил патент на своё изобретение.
А. Н. Лодыгин впервые превратил лампу накаливания из физического прибора в практическое средство освещения.

ВОПРОСЫ:
- Что изучается в разделах геометрической оптики и волновой оптики?
- Какие виды источников света вы знаете?
- Почему видны тела, не являющиеся источниками света?

31 РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое световой луч.
- Как образуется тень и полутень.
- Что такое точечный источник света.
- Когда возникают солнечные и лунные затмения.

ВСПОМНИТЕ:

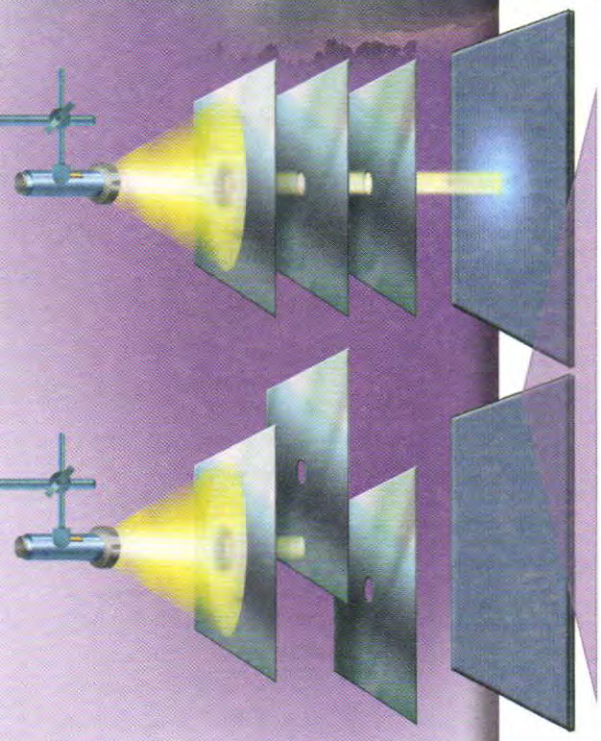
- Что изучается в разделе геометрической оптики?
- Что такое источники света?

О прямолинейном распространении световых лучей люди узнали ещё в глубокой древности, наблюдая за тенями от предметов. Иногда, когда Солнце проглядывает из-за туч или сквозь листву, можно наблюдать хорошо всем знакомое явление, которое мы называем солнечными лучами.

СВЕТОВОЙ ЛУЧ Закон распространения света сформулирован в первых дошедших до нас сочинениях по оптике, принадлежащих древнегреческому математику Евклиду. Описывая световые явления, Евклид основывался на понятии световых лучей.

Световой луч в геометрической оптике имеет геометрический смысл и *рассматривается как линия, вдоль которой распространяется свет.*

Обычно источники испускают свет одновременно во всех направлениях в пространстве, как, например, обычная лампа. Если включить карманный фонарь, то его корпус будет ограничивать световой поток, и свет будет распространяться в виде светового пучка, расширяющегося по мере удаления от источника.



ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА

Почему мы не видим предметы, находящиеся за углом здания, за деревом, за другими препятствиями? Почему мы не видим источник света, если перед ним поставить непрозрачное тело? Для ответа на эти вопросы проведём следующий опыт.

Электрический фонарик испускает пучок света, направленный на экран. Между источником света и экраном расположим три листа картона с отверстиями так, чтобы на экране появилось пятно света. При этом отверстия на листах картона расположены на одной прямой. Сдвинем в сторону один из листов. Отверстия больше не будут находиться на одной прямой, и свет не достигнет экрана. Мы видим, что свет распространяется прямолинейно.

Закон прямолинейного распространения света, сформулированный Евклидом, гласит: *свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.* Так же как и в воздухе, свет распространяется прямолинейно и в прозрачных твёрдых телах, и в жидкостях. Различают *математический* (геометрический) световой луч и *физический* световой луч.

Физический световой луч — это световой пучок конечной ширины или достаточно узкий пучок света, который можно считать нерасходящимся. Геометрический световой луч можно рассматривать как ось светового пучка.

Так как свет является излучением, а вы уже знаете, что любое излучение переносит энергию, то можно сформулировать ещё одно определение: *световой луч указывает направление переноса энергии световым пучком.*

Понятие светового луча возникло из закона прямолинейного распространения света. Существует мнение, что само понятие прямой линии возникло из оптических наблюдений.

ТЕНЬ И ПОЛУТЕНЬ Прямолинейным распространением света объясняется хорошо всем знакомое явление образования тени и полутени от предметов.

В качестве источника света возьмём обычную маленькую электрическую лампочку. Недалеко от неё будем помещать различные предметы. Проводя опыт в тёмной комнате, мы увидим на экране тень от этих тел. Тень — это область экрана, в которую не попадают лучи от источника.

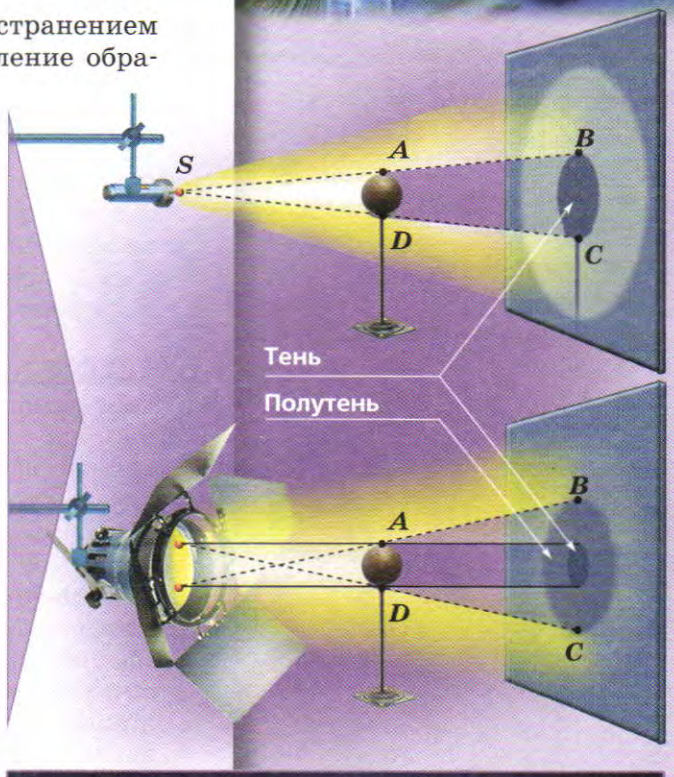
Чёткая тень получается только от источника света, размеры которого много меньше расстояния от него до экрана. Такой источник света называют *точечным*.

Точечный источник света — это источник света, размеры которого намного меньше расстояния, на котором оценивается его действие.

Обозначим точечный источник света S. Если провести прямую линию через точки S и A, то на ней будет лежать и точка B. Прямая SB является лучом света, который касается шара в точке A.

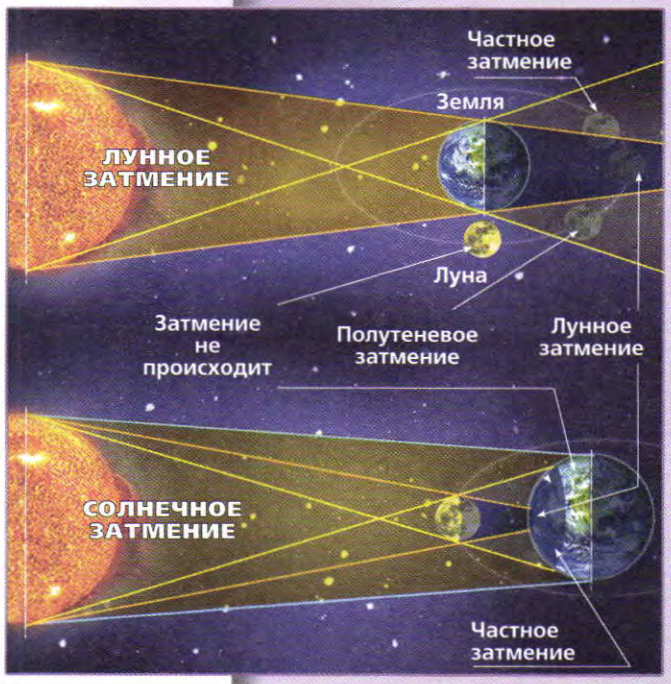
Если повторить вышеописанный опыт, но в качестве источника света использовать большую лампу, размеры которой сравнимы с расстоянием до экрана, то вокруг тени на экране образуется частично освещенное пространство — полутень.

Полутень — это область, в которую попадает свет от части источника света. В данном случае источник света состоит из множества точечных источников, каждый из которых испускает лучи. На экране появляются области, в которые свет от одних точек попадает, а от других нет. В этих областях образуется полутень. Часть области экрана оказывается совсем не освещена. Здесь образуется полная тень.



ЗАТМЕНИЯ Закон прямолинейного распространения света позволяет объяснить возникновение солнечных и лунных затмений.

Во время лунного затмения Луна попадает в тень, отбрасываемую Землёй. Если вся Луна находится в области полной тени от Земли, наблюдается *полное лунное затмение*. Если Луна погружена в тень не вся, то наблюдается *частное лунное затмение*. Если Луна попадает только в область полутени, то происходит полное или частное *полутеневое затмение*. Во время солнечного затмения тень от Луны падает на Землю. В тех местах, куда упала тень, будет наблюдаться полное затмение Солнца. В местах полутени только часть Солнца будет закрыта Луной. В остальных местах Земли затмения не будет.



ВОПРОСЫ:

- Что такое световой луч?
- Как формулируется закон прямолинейного распространения света?
- Что такое тень и полутень?
- Почему происходят солнечные и лунные затмения?

32 ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое луч падающий и луч отражённый.
- Как формулируются законы отражения света.

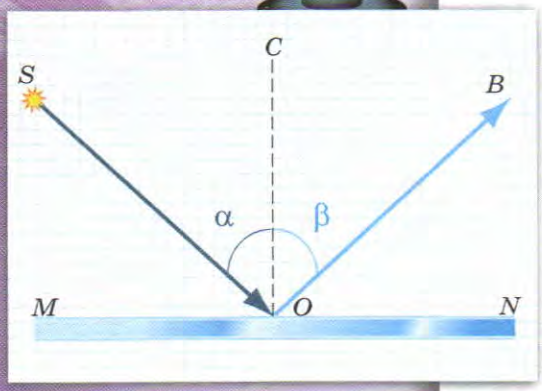
ВСПОМНИТЕ:

- Что такое свет?
- Что такое источники света?
- Что такое световой луч?
- Что такое точечные источники света?

Кроме источников света, мы видим и тела, которые источниками света не являются. Происходит это потому, что свет отражается от поверхности тела и человеческий глаз реагирует именно на этот отражённый свет. Закон отражения света, так же как и закон распространения света, был известен ещё Евклиду и Архимеду, а во II в. Клавдий Птолемей проверил его экспериментально.

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА Хорошо всем знакомое зеркало обладает замечательной отражательной способностью. При помощи зеркала в солнечный день можно пускать солнечные зайчики — световые пятна на стенах, потолке и т. п. Это явление объясняется тем, что попадающие на зеркальную поверхность световые лучи отражаются от неё и меняют своё направление.

Отражение света можно исследовать с помощью специального прибора, называемого *оптическим диском*. Он представляет собой установленный на подставке диск с круговой шкалой. Диск снабжён передвижным источником света (маленькой лампочкой). Этот источник света, дающий узкий пучок света, можно передвигать по краю диска. В центре диска закреплена зеркальная пластина. Если на эту пластину направить световой луч, то луч отразится от зеркала и на поверхности диска появится отражённый луч. Изменяя положение источника света, можно наблюдать, как изменяется и направление световых лучей.



Изобразим поверхность раздела двух сред (воздух — зеркало) в виде прямой MN. На неё из точки S падает пучок света. Его направление задано лучом SO, который называют *падающим лучом*. Луч OB — *отражённый луч*. Из точки падения луча O проведём перпендикуляр OC к поверхности MN. Угол между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча называют *углом падения* (угол α). Угол между отражённым лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча называют *углом отражения* (угол β). Опыты с оптическим диском показывают, что, во-первых, падающий и отражённый лучи лежат в одной плоскости. Если бы это было не так, то мы бы не увидели отражённый луч, лежащий на оптическом диске. Во-вторых, угол падения светового луча всегда равен углу отражения.

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА Проведённый опыт позволяет сформулировать **закон отражения света:**

луч падающий и луч отражённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности, восстановленным в точке падения луча;

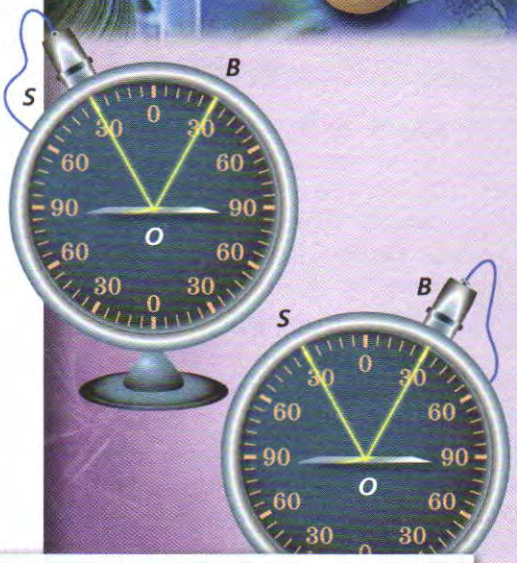
угол падения равен углу отражения:

$$\angle\alpha = \angle\beta.$$

Закон отражения света упоминается в знаменитом труде Евклида «Начала» наряду с основами геометрии, которая сегодня носит название «евклидова геометрия».

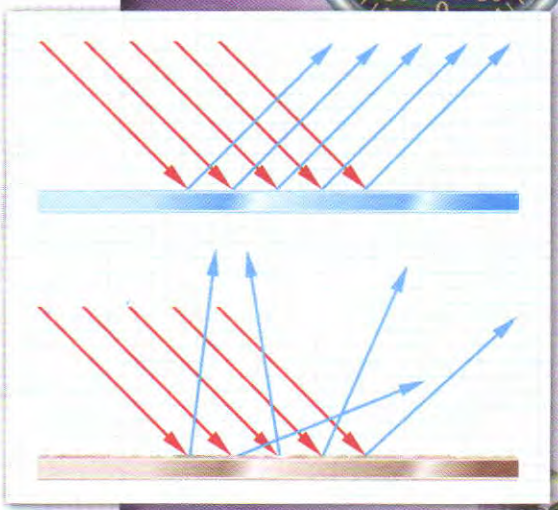
ОБРАТИМОСТЬ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ Из закона отражения света следует свойство световых лучей, которое называют **обратимостью световых лучей**. Это свойство легко наблюдать при помощи оптического диска. Пусть падающий луч *SO* отражается в направлении *OB*. Тогда, если луч падает на зеркало в направлении *BO*, отражённый луч будет идти по направлению *OS*.

Другими словами, луч, идущий по пути отражённого луча, отражается затем по пути падающего.



ЗЕРКАЛЬНОЕ И РАССЕЯННОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА Если пучок параллельных световых лучей падает на гладкую плоскую поверхность, то отражённые лучи будут также параллельны друг другу. Такое отражение называют **зеркальным**. В действительности абсолютно гладких поверхностей не существует, поэтому говорить о том, гладкая поверхность или нет, можно только с некоторой степенью приближения.

Если пучок параллельных лучей падает на шероховатую поверхность, то отражённые лучи уже не будут параллельными. Шероховатая поверхность обычно представляет собой маленькие плоские участки, которые расположены под разными углами друг к другу. Именно поэтому отражённые световые лучи будут направлены в разные стороны. Такое отражение света называют **рассеянным** или диффузным.



МОЖНО ЛИ УВИДЕТЬ СВЕТОВОЙ ЛУЧ? Когда солнечный луч попадает в комнату, можно увидеть на стене световое пятно, при этом сам луч не виден. Однако, если воздух в комнате запылён, нам кажется, что мы видим сам световой луч. Но это не так: в этом случае мы видим не сам световой луч, а реагируем на отражённые от пылинок световые лучи.

ЗАКОН НЕЗАВИСИМОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА Оказывают ли влияние друг на друга пересекающиеся пучки света? Чтобы ответить на этот вопрос, проделаем опыт. Возьмём два разноцветных источника света, расположив их так, чтобы световые пучки пересекались. Мы увидим, что луч от синего источника проходит сквозь луч от красного источника. Однако это не приводит к искажениям изображений на экране.

Итак, **закон независимости распространения света** утверждает, что световые пучки, пересекаясь, не влияют друг на друга. Однако этот закон справедлив лишь для световых пучков небольшой интенсивности. Мощные пучки света, например, лазерные, будут оказывать влияние друг на друга.

ВОПРОСЫ:

- Сформулируйте закон отражения света.
- Что такое обратимость световых лучей?
- В чём различие между зеркальным и рассеянным отраженим света?
- Сформулируйте закон независимости распространения света.

33 ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое мнимое изображение.
- Как получается изображение в плоском зеркале.
- Каковы особенности изображения в плоском зеркале.

ВСПОМНИТЕ:
- Закон отражения света.
- Признаки равенства треугольников.

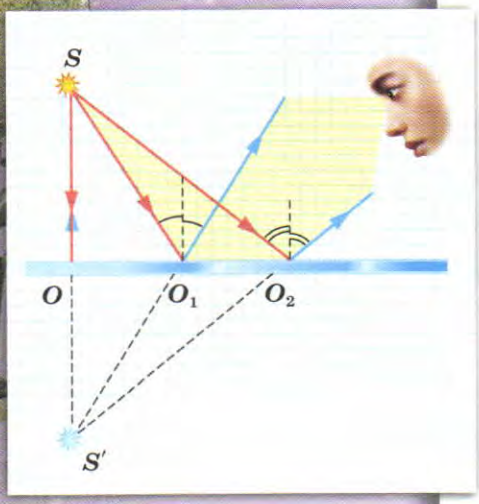
Зеркала играют большую роль в нашей жизни. Глядя в них, мы чистим зубы и причёсываемся. Зеркала в автомобилях позволяют существенно увеличить обзор и помогают в обеспечении безопасности дорожного движения. Изображение в зеркале часто являлось темой различных художественных произведений. Так, одна из самых знаменитых книжек для детей, написанная английским писателем и математиком Льюисом Кэрроллом, в русском переводе называется «Алиса в Зазеркалье» (англ. *Through the Looking-Glass and What Alice Found There* — «Сквозь зеркало, и Что там увидела Алиса»).

ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО Плоскую поверхность, зеркально отражающую свет, называют *плоским зеркалом*. С плоским зеркалом мы сталкиваемся очень часто в быту. Чистое оконное стекло или поверхность пруда тоже может служить плоским зеркалом.

В древности зеркала делали из листов полированного металла, обычно меди или бронзы. Такие зеркала, как правило, давали нечёткие изображения, потому что они были не идеально плоскими и рассеивали падающий на них свет.

Современные зеркала изготавливаются из плоских листов стекла с нанесённым на них тонким отражающим покрытием из серебра или алюминия на задней поверхности. Стекло защищает покрытие и позволяет сделать его идеально плоским.

Когда предмет находится перед зеркалом, то кажется, что за зеркалом находится такой же предмет. То, что мы видим за зеркалом, называют **изображением предмета**. Рассмотрим, как возникают изображения предметов в плоском зеркале.



ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ПЛОСКОМ ЗЕРКАЛЕ Рассмотрим точечный источник света S, находящийся перед зеркалом. Для простоты из всех лучей, падающих от источника на зеркало, выделим три луча — SO, SO_1, SO_2. По закону отражения каждый из лучей отражается от зеркала под таким же углом, под которым он падает на зеркало. Глаз наблюдателя реагирует именно на этот расходящийся пучок отражённых лучей. Продолжим отражённые лучи в обратном направлении. Тогда они сойдутся в некоторой точке S', находящейся за зеркалом. Получается, что наблюдатель как будто бы видит пучок света, исходящий от этой точки S', которая и является изображением источника S. Именно здесь наблюдатель будет видеть получившееся изображение.

Изображение в плоском зеркале называют *мнимым*, так как оно получается в результате пересечения не реальных лучей света, а их воображаемых продолжений.

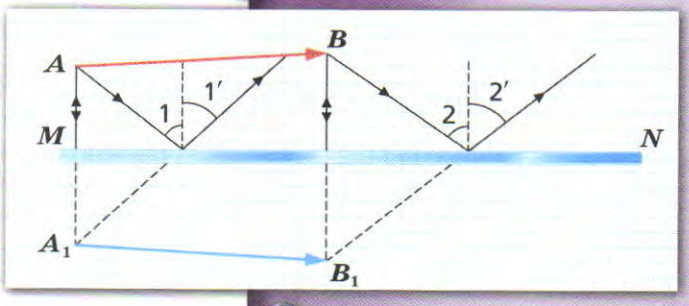
Пользуясь признаками равенства треугольников, можно доказать, что

$$\Delta SOO_1 = \Delta S'OO_1 \text{ и } SO = S'O.$$

Если изображение получено пересечением реальных световых лучей, то его называют *действительным*.

Следовательно, изображение предмета за зеркалом находится на таком же расстоянии от него, как и сам предмет.

Установим на столе кусок плоского стекла в вертикальном положении. Оно будет служить полупрозрачным зеркалом, т. е., с одной стороны, при помощи этого стекла можно получать зеркальные отражения, а с другой — можно видеть то, что происходит за этим стеклом. Поместив перед стеклом зажжённую свечу, мы увидим её отражение. Кажется, что отражение свечи располагается позади стекла. Возьмём вторую такую же свечу и, не зажигая её, поставим по другую сторону стекла. Передвигая вторую свечу, найдём положение, при котором она совместится с полученным ранее изображением. Теперь вторая свеча будет казаться также зажжённой. Измерим расстояния от зажжённой свечи до стекла и от стекла до незажжённой свечи, совмещённой с изображением. Эти расстояния окажутся равными.



Опыт показывает, что мнимое изображение предмета в плоском зеркале находится на таком же расстоянии от зеркала, на каком предмет расположен перед ним. Этот опыт также показывает, что размеры изображения предмета в плоском зеркале равны размерам предмета.

Предмет и его изображение в плоском зеркале представляют собой фигуры, симметричные относительно плоскости зеркала. Это означает, что в зеркале «право» и «лево» меняются местами. Например, посмотрим на изображение правой руки в зеркале. Пальцы на этом изображении расположены так, как будто это рука левая.

Подводя итоги, можно сказать, что изображение предмета в плоском зеркале всегда является: мнимым; прямым, т. е. неперевёрнутым; равным по размеру самому предмету; находящимся на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним; симметричным самому предмету.

Для того, чтобы построить изображение предмета в плоском зеркале, необязательно использовать два или более лучей.
Например, для построения изображения стрелки *AB* достаточно опустить перпендикуляры из точек *A* и *B* на зеркало и продлить их соответственно на расстояния *AM* и *BN*. Получим стрелку A_1B_1, симметричную *AB* относительно поверхности зеркала. Стрелка A_1B_1 и будет искомым изображением.

ПЕРИСКОП Получение изображения с помощью плоского зеркала используют в устройстве перископа. Этот прибор позволяет видеть над препятствиями. Например, перископы устанавливают на подводных лодках, чтобы увидеть, что происходит на поверхности воды. Также их используют для контроля состояния объектов, представляющих опасность для здоровья человека.

Перископ представляет собой трубу, состоящую из трёх секций: одной вертикальной и двух горизонтальных. В местах соединения горизонтальных и вертикальной секций расположены зеркала. Зеркала параллельны и составляют угол 45° с горизонталью.

ВОПРОСЫ:

- Что такое плоское зеркало?
- Каковы свойства изображения, получаемого при помощи плоского зеркала?
- Каковы принципы работы перископа?

34 ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое преломление света.
- Как формулируются законы преломления света.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое луч падающий и луч отражённый?
- Закон отражения света.

В основе геометрической оптики лежат четыре закона, три из которых вы уже знаете: закон прямолинейного распространения света в однородной среде, закон отражения света от зеркальной поверхности и закон независимости световых лучей. Давайте рассмотрим четвёртый закон — закон преломления света на границе двух прозрачных сред.

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА Вы уже знаете, что свет, падая на границу раздела двух сред, частично отражается от неё. Если среда прозрачна, то часть света может пройти сквозь неё. В этом случае наблюдается явление преломления света. Преломление света мы часто наблюдаем в нашей жизни. Ложка или трубочка, опущенная в стакан с водой, кажется надломленной на границе воды и воздуха. Это объясняется тем, что световой пучок при переходе из одной среды в другую меняет своё направление. *Преломление света* — это изменение направления распространения света при его переходе из одной среды в другую.

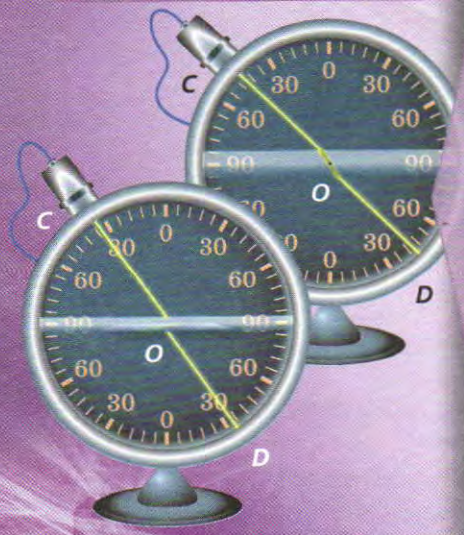
Виллеброрд Снеллиус (Снелль, ван Снел ван Ройен)
(1580—1626)
Голландский астроном и математик. Установил закон преломления света.

Закон преломления света в отличие от законов прямолинейного распространения света и закона отражения света стал известен человечеству гораздо позднее. Его пытались открыть сначала греческие, а позже арабские учёные. Автором закона преломления считается голландец Виллеброрд Снеллиус, экспериментально открывший его в 1621 г. Сам учёный свой труд не опубликовал, о чём известно из сочинений Рене Декарта, независимо от него сформулировавшего тот же закон в 1637 г.

Проведём опыт, используя оптический диск, в центре которого установлена стеклянная пластина. В отличие от опыта с зеркальной пластиной теперь световой луч не отразится на границе раздела двух сред (воздух — стекло). Луч проникает внутрь стекла и меняет направление своего распространения.

В этом опыте также можно проверить выполнение закона обратимости световых лучей. Если передвинуть осветитель по краю оптического диска и пустить световой луч в направлении луча DO, то после преломления света мы получим световой луч, совпадающий с лучом OC.

Обозначим линию раздела двух сред (воздух — вода) MN. Пусть на эту поверхность из точки S падает пучок света. Его направление задано лучом SO. Луч SO — *падающий луч*. При попадании светового луча на границу раздела двух сред наблюдается его преломление. Луч OB называют *преломлённым лучом*. Из точки падения луча O проведём перпендикуляр OC к поверхности раздела двух сред. Угол между падающим лучом и перпендикуляром к поверхности раздела двух сред в точке падения луча называют *углом падения* (угол α).



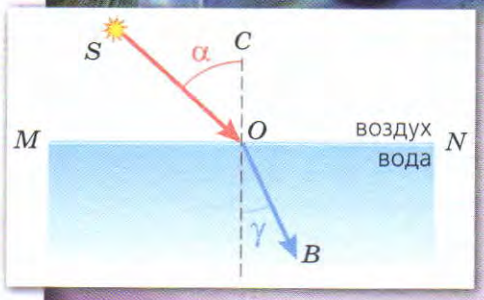
Угол между преломлённым лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча называют *углом преломления* (угол γ).

Из опыта с оптическим диском можно сделать следующие выводы:

1) чем больше угол падения, тем больше угол преломления;

2) при переходе луча света из воздуха в стекло угол преломления меньше угла падения;

3) при переходе луча света из стекла в воздух угол преломления больше угла падения.



ОПТИЧЕСКАЯ ПЛОТНОСТЬ СРЕДЫ Различие углов падения и преломления обусловлено тем, что скорость распространения света в различных средах различна.

Говорят, что чем больше скорость распространения света в среде, тем меньше её оптическая плотность. Стекло и воздух имеют разную оптическую плотность, т. е. скорость распространения света в стекле меньше, чем в воздухе. Поэтому оптическая плотность стекла больше, чем оптическая плотность воздуха. Оптическая плотность воды также больше оптической плотности воздуха.

Когда мы пытаемся на глаз оценить глубину водоёма или сосуда с водой, необходимо учитывать, что из-за преломления света глубина кажется нам меньше, чем на самом деле. Это явление легко проверяется на опыте. Наблюдатель размещает сосуд (чашку) с лежащим на его дне предметом (монеткой) таким образом, чтобы края сосуда не позволяли увидеть ни дна, ни этот предмет. Затем, не меняя направление взгляда, в сосуд начинают наливать воду, и через некоторое время предмет становится видимым.

ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА Только в середине XVII в. стало понятно, что преломление света на границе двух сред объясняется различием их оптических плотностей.

Если луч света переходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, то угол преломления меньше угла падения:

$$\alpha > \gamma.$$

Если луч света переходит из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную, то угол преломления больше угла падения:

$$\alpha < \gamma.$$

При изменении угла падения меняется и угол преломления. При этом опытами установлено, что отношение между углами не сохраняется, а остаётся постоянным отношение синусов углов падения и преломления.

Таким образом, для любой пары веществ с различной оптической плотностью можно записать:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n,$$

где n — **относительный показатель преломления** для двух данных сред.

Учитывая вышесказанное, можно сформулировать **закон преломления света** следующим образом:

лучи падающий, преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости. При этом отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред.

Если луч переходит из воздуха в воду, то относительный показатель преломления этих сред равен 1,33. Относительный показатель преломления для воздуха и некоторых сортов стекла составляет приблизительно 1,5.

ВОПРОСЫ:

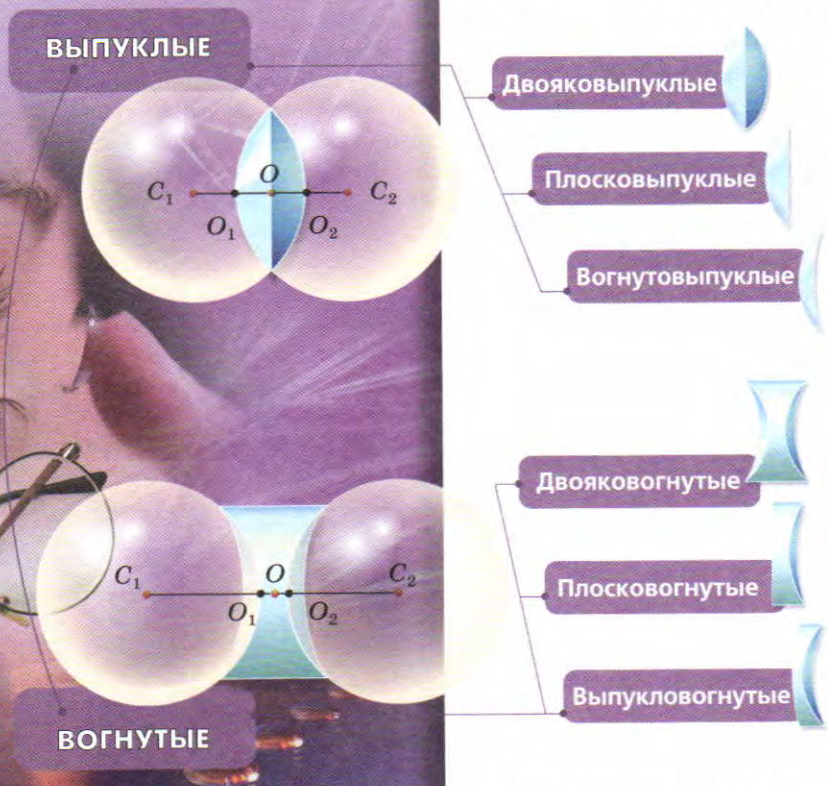
- Что такое преломление света?
- Что характеризует оптическая плотность?
- Как формулируется закон преломления света?

35 ЛИНЗЫ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое линзы.
- Что такое оптическая ось и оптический центр линзы.
- Что такое оптическая сила линзы и какова её единица.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое преломление света?

Зная законы отражения и преломления света, можно решать разнообразные задачи, связанные с управлением световыми пучками. Одними из старейших оптических устройств, используемых для этого, являются линзы. Линзы являются составной частью фотоаппаратов, микроскопов, телескопов и т. д. Хорошо всем знакомые очки, служащие для коррекции зрения, состоят из оправы и линз. Широкое распространение в последнее время получили контактные линзы, использующиеся для коррекции близорукости и дальнозоркости.



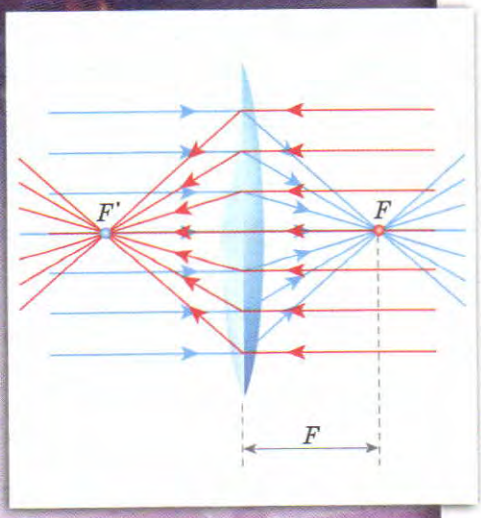
ВИДЫ ЛИНЗ **Линзой** (от лат. *lens* — чечевица) называют прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями. Линзы бывают двух видов: выпуклые и вогнутые. Линзу, у которой края тоньше, чем середина, называют *выпуклой*. Линзу, у которой края толще, чем середина, называют *вогнутой*.

Линзы использовались ещё в Древней Греции и в Римской империи для добывания огня с помощью солнечного света.

К концу XIII в. относят первые документальные свидетельства появления очков. До XVI в. пользовались очками только с выпуклыми линзами.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЗ Прямую, проходящую через центры C_1 и C_2 сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называют **главной оптической осью линзы.**

Мы будем рассматривать линзы, толщина которых мала по сравнению с радиусами поверхностей. Такие линзы называют *тонкими*. Для этих линз вершины сферических поверхностей (точки O_1 и O_2) практически совпадают. Эту точку называют **оптическим центром линзы** (точка O).



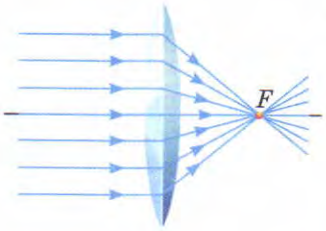
Направим на выпуклую линзу пучок лучей, параллельный главной оптической оси. После преломления в линзе эти лучи пересекутся в одной точке F, которая находится на главной оптической оси. Эту точку называют **фокусом линзы.** Если световой пучок пропустить через линзу с другой стороны, то будет наблюдаться та же картина. У каждой линзы два фокуса — по одному с каждой стороны.

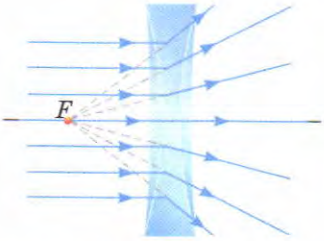
Расстояние от линзы до её фокуса называют **фокусным расстоянием линзы** и обозначают F.

Прохождение светового пучка сквозь линзу можно наблюдать на простом опыте. На пути светового пучка устанавливается линза, а за линзой помещается передвижной экран. Последовательно перемещая экран, можно наблюдать за изменением размера и яркости светового пятна. В том положении экрана, в котором мы видим маленькое яркое пятно, находится фокус линзы.

СОБИРАЮЩИЕ И РАССЕИВАЮЩИЕ ЛИНЗЫ В зависимости от того, что происходит после преломления с пучком световых лучей, параллельных главной оптической оси линзы, линзы делят на собирающие и рассеивающие.

Пучок лучей, направленный на выпуклую линзу параллельно её главной оптической оси, после преломления соберётся в одной точке — фокусе линзы. Поэтому выпуклую линзу называют **собирающей**. Если же такой пучок лучей направить на вогнутую линзу, то после преломления в линзе пучок станет расходящимся. Если продолжить преломлённые лучи в обратном направлении, то они сойдутся в одной точке с той стороны линзы, с какой падает на неё свет. Эту точку называют **мнимым фокусом**, а саму вогнутую линзу — **рассеивающей**.





Фокусное расстояние линзы зависит от степени кривизны её поверхностей. Линза с более выпуклыми поверхностями преломляет лучи сильнее, чем линза с менее выпуклыми поверхностями. Поэтому её фокусное расстояние меньше: $F_1 < F_2$.

ОПТИЧЕСКАЯ СИЛА ЛИНЗЫ Кроме фокусного расстояния линзы характеризуются величиной, которую называют оптической силой линзы. **Оптическая сила линзы** — это величина, обратная её фокусному расстоянию:

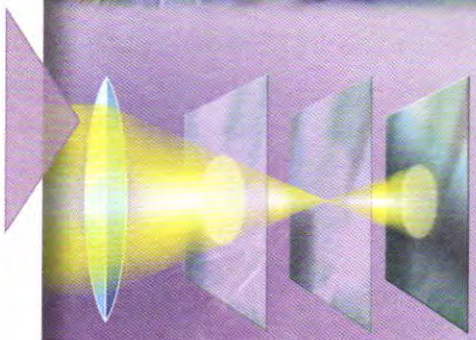
$$D = \frac{1}{F}.$$

Чем меньше фокусное расстояние линзы, тем больше её оптическая сила, т. е. тем сильнее она преломляет лучи.

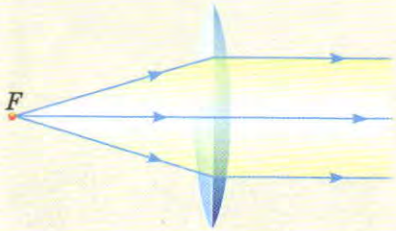
За единицу оптической силы линзы принята *диоптрия* (дптр). 1 дптр — это оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м.

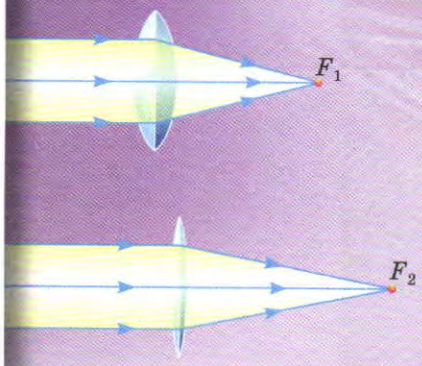
Рассеивающие линзы обладают мнимым фокусом, поэтому их оптическую силу и фокусное расстояние считают *отрицательными*.

Оптическую силу и фокусное расстояние собирающей линзы считают *положительными*.



Поместим источник света в фокус выпуклой линзы. Лучи от источника света расходятся во всех направлениях. Некоторые из них проходят через линзу и преломляются. После прохождения через линзу лучи будут направлены параллельно главной оптической оси.





ВОПРОСЫ:

- Что такое линзы?
- Что такое оптическая ось, оптический центр и фокусное расстояние линзы?
- Что называют оптической силой линзы и какова её единица?

36 ИЗОБРАЖЕНИЕ, ПОЛУЧАЕМОЕ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЗЫ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Как вид изображения и его положение зависят от взаимного расположения предмета и линзы.

ВСПОМНИТЕ:

- Почему мы видим предметы, не являющиеся источниками света?
- Что такое линзы?
- Что такое оптическая ось и оптический центр линзы?
- Что такое оптическая сила линзы и какова её единица?

Если посмотреть на предмет сквозь лупу, можно увидеть его увеличенное изображение. Если же посмотреть на предмет сквозь линзу очков для близоруких (такие линзы имеют отрицательные значения оптической силы), то увидишь уменьшенное изображение. Таким образом, при помощи линз, как и при помощи зеркала, можно получать изображения. При этом очевидно, что параметры изображения должны зависеть как от параметров самой линзы, так и от взаимного месторасположения линзы и предмета.

ЛУЧИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для того чтобы получилось изображение любой точки, принадлежащей предмету или источнику света, необходимо, чтобы световые лучи, исходящие от неё в различных направлениях, после преломления в линзе снова собирались в одну точку. При этом не важно, через какую часть линзы прошли эти лучи.

Если выходящие из линзы лучи сходятся, то они образуют *действительное изображение*.

Если же прошедшие через линзу лучи являются расходящимися, пересекаются в одной точке не сами лучи, а их продолжения. В этом случае получается *мнимое изображение*.

Для того чтобы построить изображение любой точки, достаточно рассмотреть два луча из трёх стандартных лучей:

1) *Луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси линзы.*

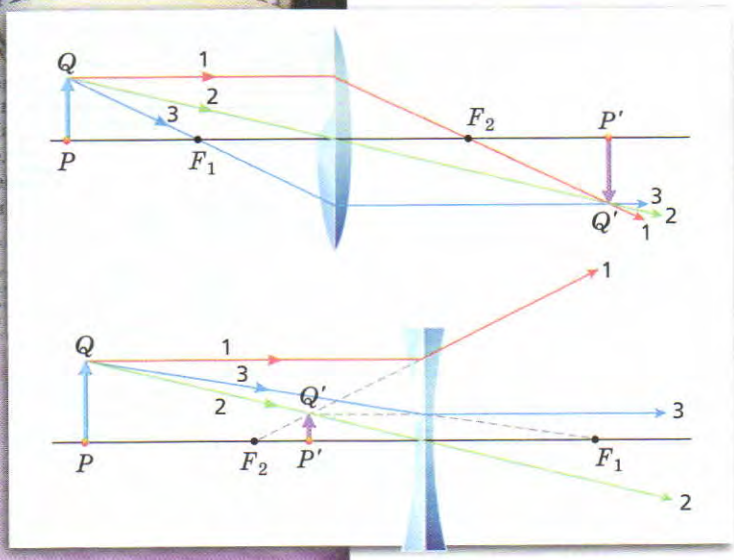
После преломления в линзе луч либо сам (если линза собирающая), либо своим продолжением (если линза рассеивающая) проходит через фокус линзы.

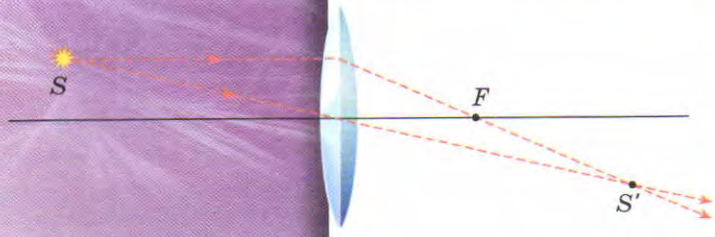
2) *Луч, проходящий через оптический центр линзы.*

При прохождении через линзу этот луч не изменяет своего направления.

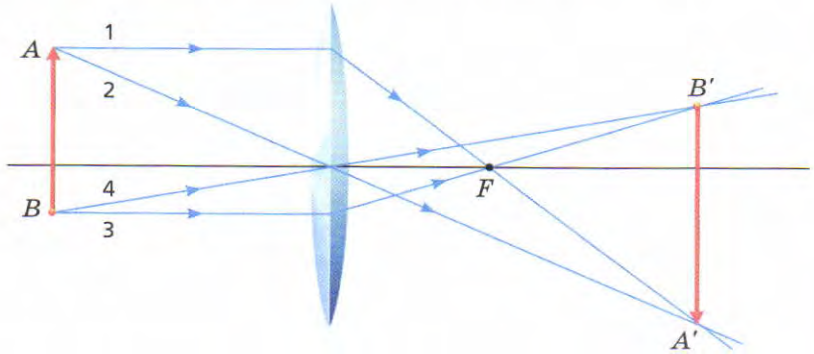
3) *Луч, проходящий через фокус.* После преломления этот луч идёт параллельно главной оптической оси.

Далее мы будем использовать при построении первые два из трёх перечисленных стандартных лучей. Точка пересечения этих лучей (или их продолжений) является изображением исходной точки.

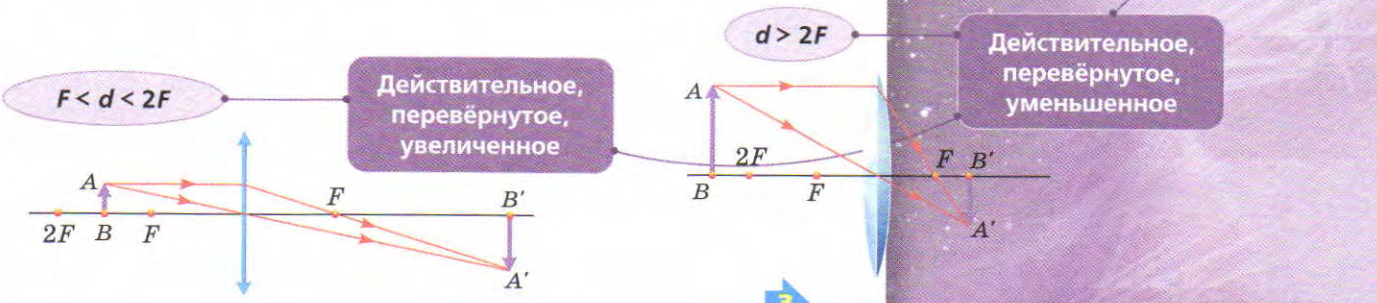




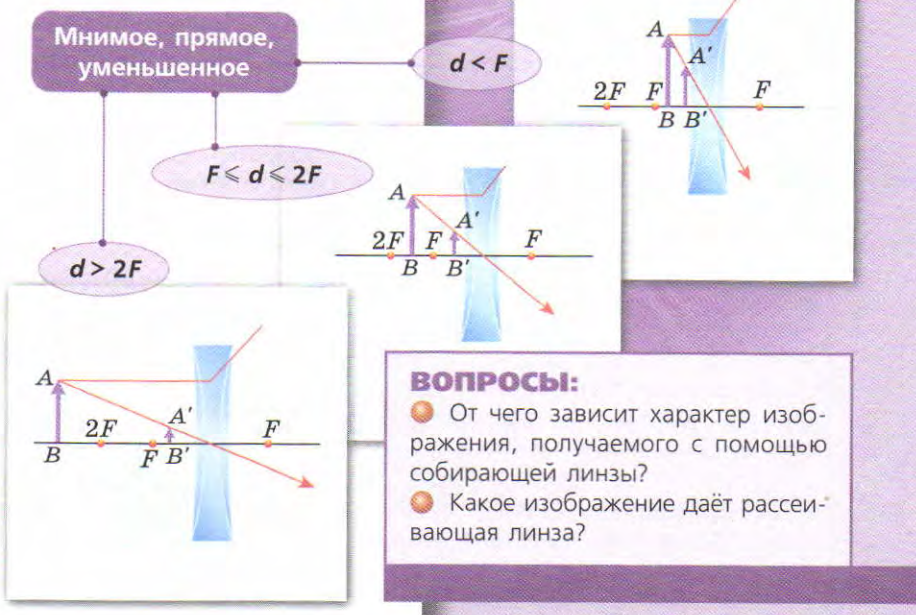
ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ДАВАЕМОГО СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗОЙ Чтобы построить изображение линейного предмета, например стрелки AB, необходимо построить изображение точки A, затем изображение точки B, после чего соединить полученные точки A' и B'. Отрезок $A'B'$ будет являться изображением данного предмета.



В зависимости от взаимного расположения предмета и линзы изображение будет различным: увеличенным или уменьшенным, прямым или перевёрнутым, действительным или мнимым. Обозначим расстояние от предмета до линзы буквой d, а фокусное расстояние буквой F.



ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ДАВАЕМОГО РАССЕИВАЮЩЕЙ ЛИНЗОЙ Если пучок лучей направить на вогнутую линзу, то после преломления в линзе пучок станет расходящимся. При помощи рассеивающей линзы невозможно получить действительное изображение. Изображение, даваемое рассеивающей линзой, является мнимым, прямым и уменьшенным, и не зависит от взаиморасположения линзы и предмета. При всех построениях лучей, проходящих через тонкую линзу, нужно лишь знать расположение оптического центра и главных фокусов.



ВОПРОСЫ:

- От чего зависит характер изображения, получаемого с помощью собирающей линзы?
- Какое изображение даёт рассеивающая линза?

37 ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Строение глаза.
- Какие части глаза образуют оптическую систему.
- Что такое аккомодация.
- Что такое бинокулярное зрение.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое линзы?
- Как вид изображения и его положение зависят от взаимного расположения предмета и линзы?

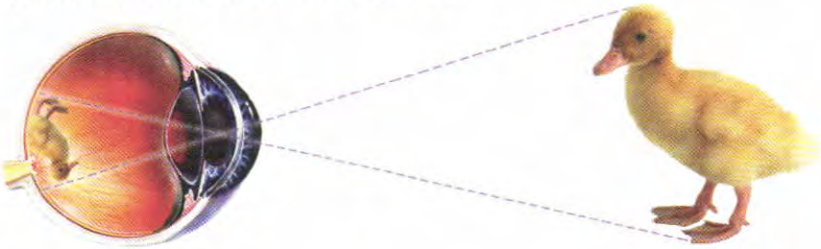
Органы зрения являются одними из важнейших органов чувств человека и большинства животных. Органы зрения также называют зрительными анализаторами. Органы зрения — это не только глаза. Люди видят благодаря тому, что информация, полученная посредством глаза, передаётся в определённые области коры головного мозга, где и формируется та картина внешнего мира, которую мы видим.

УСТРОЙСТВО ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА Глаз человека является сложным оптическим прибором, состоящим из двух линз с переменным фокусным расстоянием. Глаз, или глазное яблоко, имеет почти шарообразную форму. Снаружи глаз покрыт прочной белой оболочкой — *склерой*, которая защищает его от повреждений. Передняя часть склеры прозрачна для света и называется *роговицей*. За роговицей расположена прозрачная водянистая масса, а за ней — *радужная оболочка*. Она определяет цвет глаз. В радужной оболочке есть отверстие — *зрачок*. Диаметр зрачка может изменяться: увеличиваться в темноте и уменьшаться на свету. После зрачка свет проходит через *хрусталик* — прозрачное тело, напоминающее двояковыпуклую линзу. Хрусталик окружён мышцами, прикрепляющими его к склере. За хрусталиком расположено *стекловидное тело*, заполняющее всю остальную часть глаза. Таким образом хрусталик разделяет внутреннюю поверхность глаза на две камеры: *переднюю камеру*, заполненную водянистой влагой, и *заднюю камеру*, заполненную стекловидным телом. Задняя стенка склеры — *сетчатка* — состоит из разветвлений волокон зрительного нерва, чувствительных к свету. Светочувствительные клетки (палочки и колбочки), содержащиеся в клетчатке, называются *фоторецепторами*.

Глаз называют периферической частью органа зрения. Он состоит из глазного яблока, защитного аппарата глазного яблока (верхнее и нижнее веки, глазница) и придаточного аппарата глаза (слёзная железа, её протоки, а также глазодвигательный аппарат, состоящий из мышц.

КАК МЫ ВИДИМ РАЗЛИЧНЫЕ ПРЕДМЕТЫ? Оптическая система глаза состоит из роговицы, передней камеры, заполненной водянистым веществом, хрусталика и стекловидного тела. Световые лучи, попадая в глаз, преломляются в оптической системе глаза, и на сетчатке глаза появляется изображение. Можно сказать, что сетчатка является шарообразным экраном, на который проецируется окружающий нас мир. Изображение предмета, возникающее на сетчатке глаза, является действительным, уменьшенным и перевёрнутым.

Особенностью глаза как оптической системы является то, что последняя среда, проходимая светом непосредственно перед образованием изображения на сетчатке, обладает показателем преломления, отличным от единицы. Вследствие этого фокусные расстояния оптической системы глаза во внешнем пространстве (переднее фокусное расстояние) и внутри глаза (заднее фокусное расстояние) неодинаковы.

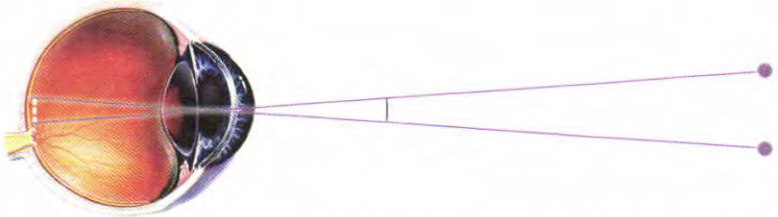


Почему же мы видим предметы такими, какие они есть на самом деле? Дело в том, что в сетчатке оптическая информация воспринимается светочувствительными нервными клетками и передаётся в мозг. Обрабатывая сигналы, мозг снова переворачивает изображение.

ОСТРОТА ЗРЕНИЯ Если изображения двух точек будут попадать на одну фоторецепторную клетку (колбочку) глазного дна, мы будем воспринимать их как одну точку. Если расстояние между точками увеличится настолько, что их изображения попадут на две соседние рецепторные клетки, мы увидим линию, то есть будем воспринимать их слитно. Чтобы точки воспринимались раздельно, их изображения должны попадать на две рецепторные клетки, разделённые хотя бы ещё одной.

Остротой зрения называют способность различать границы и детали видимых объектов. Острота зрения определяется по минимальному угловому расстоянию между двумя точками, при котором они воспринимаются раздельно.

За норму, соответствующую остроте зрения 1.0, принимается такая различительная способность глаза, при которой две точки видны как раздельные, если угол между лучами, идущими от них в глаз, равен 1° (1 градус = 60 минут).



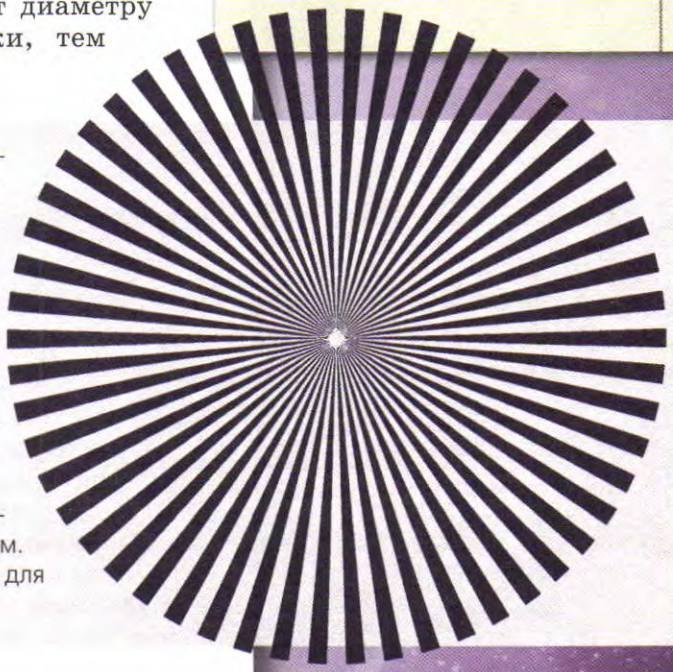
При такой остроте зрения величина изображения на сетчатке равна 0,004 мм, что соответствует диаметру колбочки. Чем меньше диаметр колбочки, тем больше разрешающая способность глаза.

Известны опыты по изучению того, как изменится зрительное восприятие человека, если с помощью специальных очков перевернуть световые лучи ещё на пути к глазу так, чтобы изображение на сетчатке было не перевёрнутым, а прямым. В начале эксперимента испытуемые, надев такие очки, видели все предметы перевёрнутыми, что доставляло им массу неудобств. Но спустя некоторое время участники эксперимента вновь начинали правильно ориентироваться в окружающей обстановке. При этом они начинали вновь видеть предметы правильно, как если бы очки не искажали видимое ими окружение.

Звезда Сименса даёт прекрасную возможность наблюдать, как острота зрения постоянно меняется, причём эти изменения отчасти подчиняются волевому контролю.

Для того, чтобы проверить остроту зрения, можно воспользоваться звездой Сименса. Если чёткость зрения неидеальна, то, не доходя до центра, лучи расплываются и начинают перекрываться между собой. На очень коротком участке они могут как бы слиться с фоном. Однако по мере дальнейшего продвижения к центру лучи вдруг снова оказываются чётко видны. При этом изображение превращается как бы в свой негатив. На месте чёрного луча оказывается белый фон, а на месте белого фона — чёрный луч.

Люди с хорошим зрением могут наблюдать этот эффект, если поднесут картинку очень близко к глазам. Однако на большом расстоянии от картинки лучи для них будут сливаться в сплошную серую массу.



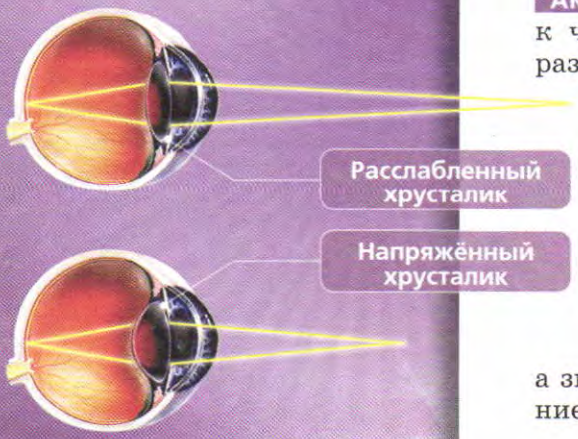
БИНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ Наличие двух глаз позволяет сделать наше зрение стереоскопичным (или бинокулярным), то есть сформировать трёхмерное изображение. Проводящие пути зрительной системы устроены так, что в левое полушарие головного мозга попадает информация о том, что справа от нас, а в правое полушарие — о том, что слева от нас. Затем две части изображения — правую и левую — головной мозг соединяет воедино.

У большинства животных глаза расположены по разные стороны головы, поэтому они видят каждым глазом свою картину. Видимые ими предметы не отличаются рельефностью, к которой мы привыкли, но поле зрения гораздо обширнее.

У человека и приматов глаза эволюционировали и «перешли» на переднюю часть головы. Учёные считают, что такое расположение глаз даёт два преимущества: объёмное видение окружающего пространства и способность видеть «сквозь предметы». Для проверки этой способности достаточно провести простой эксперимент. Надо взять карандаш и, держа его вертикально, посмотреть на панораму прямо за ним. Если закрыть один глаз, а затем второй, то легко увидеть, что карандаш в любом случае закрывает какую-то область пространства. Но если посмотреть обоими глазами, то всё, что ранее было «спрятано», теперь вполне обозримо.

Рыбы, насекомые, рептилии, птицы, кролики и лошади проводят свою жизнь на открытых пространствах, где необходимо видение всего, что происходит вокруг — панорамное зрение. И именно этому способствует их боковое расположение глаз. Люди и крупные млекопитающие (приматы, тигры, медведи) подчас проживают в среде, перегруженной мелкими деталями и препятствиями. Их глаза устремились к передней части головы и стали смотреть вперёд прямо перед собой. И хотя они утратили возможность видеть то, что происходит у них за спиной, они получили способность смотреть, например, сквозь листву, что находится перед ними.

АККОМОДАЦИЯ Способность глаза приспосабливаться к чёткому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза, называется *аккомодацией* (от лат. *accomodatio* — приспособление).



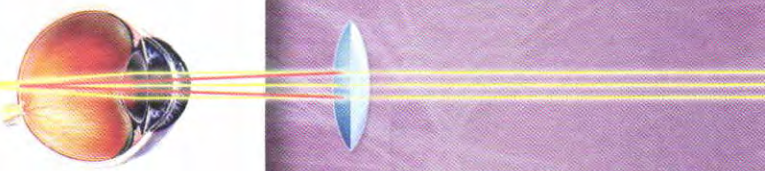
Когда человек смотрит на удалённые предметы, он не напрягает зрение, мышцы, удерживающие хрусталик, расслаблены, и изображение оказывается на сетчатке. Когда же человек переводит взгляд на близкие к нему предметы, изображение должно сместиться за сетчатку. Чтобы изображение не было размытым, глазные мышцы сжимают хрусталик, делая его более выпуклым. При этом его кривизна, а значит и оптическая сила увеличиваются, и изображение опять оказывается на сетчатке.

Аккомодация имеет предел. Если расположить предмет совсем близко, то мышцы не способны сжать хрусталик до получения на сетчатке чёткого изображения. Нормальный глаз может длительно без особого напряжения рассматривать предметы, расположенные от него не ближе 25 см. Это расстояние называют *расстоянием наилучшего видения*.

БЛИЗОРУКОСТЬ И ДАЛЬНОЗОРКОСТЬ У человека с хорошим (нормальным) зрением глаз в ненапряжённом состоянии собирает параллельные лучи в точке, лежащей на сетчатке глаза. Наиболее распространены два недостатка зрения — близорукость и дальнозоркость.

Близорукость — это недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу собираются не на сетчатке, а ближе к хрусталику. Близорукие люди не могут чётко видеть удалённые предметы. Расстояние наилучшего зрения для близорукого глаза меньше 25 см.

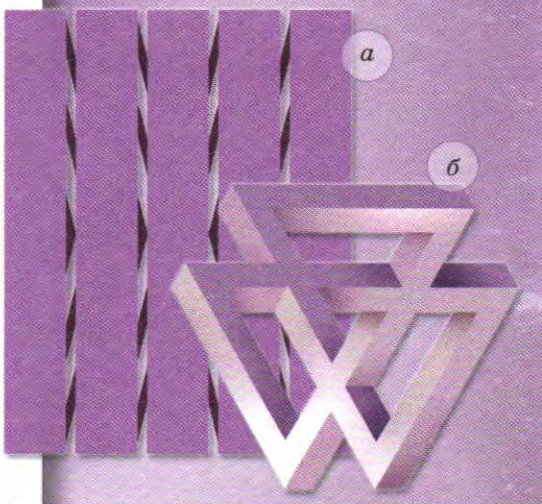
Дальнозоркость — это недостаток зрения, при котором параллельные лучи после преломления в глазу собираются не на сетчатке, а за ней. Дальнозорким людям трудно сфокусировать взгляд на близких предметах. Расстояние наилучшего зрения для дальнозоркого глаза больше 25 см.

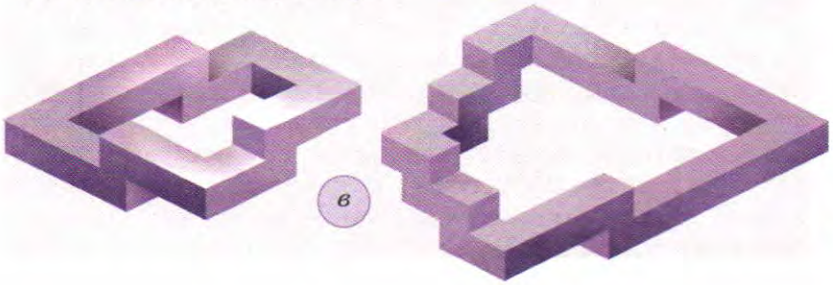


Близорукость и дальнозоркость исправляют с помощью соответствующих линз. При близорукости для того, чтобы изображение отодвинулось от хрусталика и переместилось на сетчатку, следует уменьшить оптическую силу преломляющей системы глаза. Для этого применяют рассеивающие (вогнутые) линзы. При дальнозоркости изображение оказывается за сетчаткой. Оптическую силу системы дальнозоркого глаза надо увеличить. Для этого используют собирающие (выпуклые) линзы.

Зрение — очень сложный процесс. Это особенно ясно, когда сталкиваешься с неожиданными эффектами зрительного восприятия. Сегодня существует большое количество разнообразных изображений, которые принято называть зрительными иллюзиями или невозможными фигурами.

На рисунке *а* линии не изгибаются — это иллюзия. Фигура на рисунке *б* — невозможная фигура, а лестницы на рисунке *в* всё время поднимаются вверх.





ВОПРОСЫ:

- Какие части глаза образуют оптическую систему?
- Каким получается изображение на сетчатке глаза?
- Что такое бинокулярное зрение?
- Что такое аккомодация?
- Что такое близорукость и дальнозоркость?

38 ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

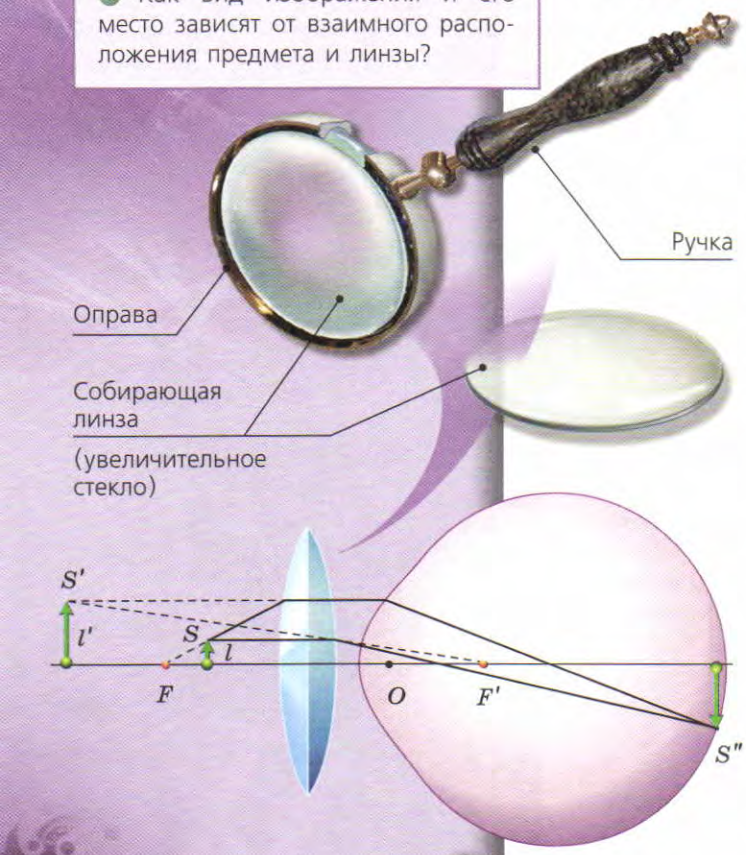
ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Устройство и принцип действия лупы.
- Устройство и принцип действия оптического микроскопа.
- Устройство и принцип действия оптического телескопа.
- Устройство и принцип действия линзы фотоаппарата.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое линзы?
- Как вид изображения и его место зависят от взаимного расположения предмета и линзы?

Оптическими приборами называют устройства, предназначенные для получения изображений различных объектов. Существуют разнообразные оптические приборы, которые вооружают глаз. Одни из них позволяют различать удалённые предметы (бинокль, телескоп), другие — мелкие предметы (лупа, микроскоп). К оптическим приборам также относятся технические устройства, позволяющие получать изображения на экранах, светочувствительных пластинках, фотоплёнках и т. д., установленных в плоскости изображения. К подобным приборам относятся, например, фотоаппарат и проекционный аппарат.



УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛУПЫ

Рассмотрим простейший оптический прибор — *лупу*, представляющую собой собирающую линзу с малым фокусным расстоянием (около 10 см). С помощью лупы можно увеличить изображение от 2 до 25 раз. При работе лупу берут за ручку и приближают достаточно близко к глазу, а рассматриваемый предмет помещают на такое расстояние, при котором его изображение становится более чётким. Лупу используют в различных областях человеческой деятельности: биологии, медицине и т. д.

Как получается изображение предмета с помощью лупы? Расстояние от лупы до рассматриваемого предмета должно быть чуть меньше фокусного. Тогда изображение этого предмета является мнимым, прямым и увеличенным.

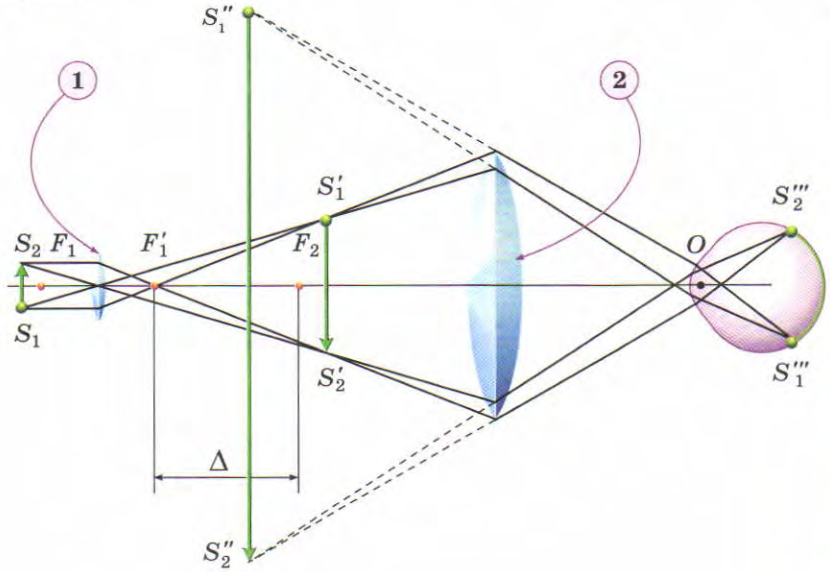
Изучим ход лучей при рассматривании небольшого предмета через лупу. Обозначим: F и F' — фокусы линзы, точка O — оптический центр глаза. Мнимое изображение точки S предмета l, полученное после прохождения исходящих из неё лучей через лупу, обозначим через S'. Получившееся изображение обозначим через l'. При этом лучи, исходящие из точки S, преломляются сначала в лупе, затем в преломляющих средах глаза и собираются в точке S'' на сетчатке. В той же точке S'' собрались бы лучи, если бы лупы не было, а сам источник находился бы в точке S' и имел размер такой, как предмет l'.

Лучи, изображённые пунктиром, в действительности не существуют, так как мнимое изображение, полученное при их помощи, не испускает и не отражает световые лучи. Ощущение того, что мы видим предмет l', возникает потому, что глаз автоматически восстанавливает ход попавших в него лучей, а лучи после преломления в лупе падают на глаз так, как если бы этот предмет был реальным предметом.

Лупа может быть использована как в промышленности, так и в быту. Например, настольные лупы используют часовщики, ювелиры, исследователи и преподаватели, а также некоторые врачи.

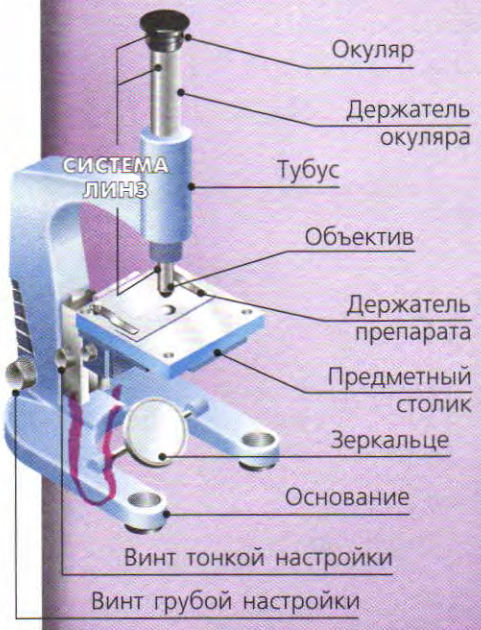
УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА Часто увеличение лупы оказывается недостаточным. Для получения большого увеличения малых объектов используют систему из двух или более линз. Такие системы линз применяются в приборах, называемых *оптическими микроскопами* (от греч. *mikros* — малый и *skopeo* — смотрю).

Оптическая система микроскопа состоит из двух частей: объектива (обращённого к объекту) и окуляра (обращённого к глазу). Небольшие линзы объектива приближают к образцу. Объектив даёт действительное, перевёрнутое, увеличенное изображение предмета. Это промежуточное изображение рассматривается глазом через окуляр, действие которого аналогично действию лупы.



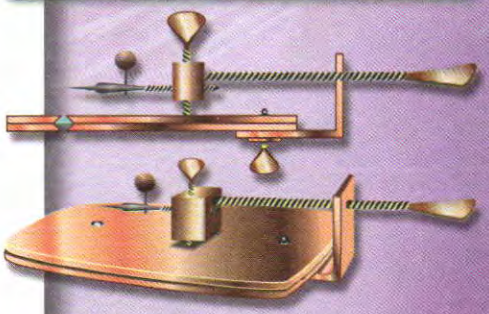
Небольшой предмет S_1S_2 располагается перед объективом *1* микроскопа на расстоянии, немного большем фокусного расстояния объектива F_1. После прохождения световых лучей через объектив получается его действительное изображение $S_1'S_2'$, которое находится между окуляром *2* и его передним фокусом F_2. Это изображение рассматривается глазом через окуляр как через лупу, на сетчатке глаза образуется изображение $S_1'''S_2'''$, которое воспринимается глазом как исходящее от мнимого, увеличенного изображения $S_1''S_2''$.

Имя первого изобретателя микроскопа неизвестно. Считается, что в конце XVI в. в Нидерландах потомственные оптики Захарий и Ханс Янсены смонтировали две выпуклые линзы внутри одной трубки, т. е. фактически создали первый микроскоп. В 1609 г. Г. Галилей разработал составной микроскоп с выпуклой и вогнутой линзами. Считается, что первым, кто сумел привлечь к микроскопу внимание биологов, является Антони ван Левенгук (1632—1723). Его микроскопы представляли собой небольшие изделия с одной сильной линзой.

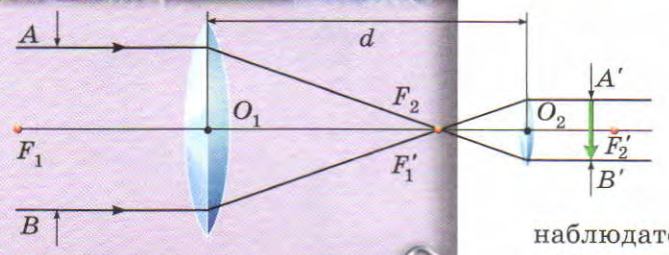


Увеличение микроскопа значительно больше увеличения, даваемого объективом или окуляром. Увеличение микроскопа равно произведению увеличения объектива и увеличения окуляра. Поэтому нередко применяют микроскопы с увеличением около 1000 раз и даже больше.

Микроскопы — незаменимое оптическое оборудование для таких областей человеческой деятельности, как медицина, биология, электроника и геология. С их помощью проводятся исследования, на результатах которых основываются научные открытия, определяется диагноз и разрабатываются новые лекарственные препараты.



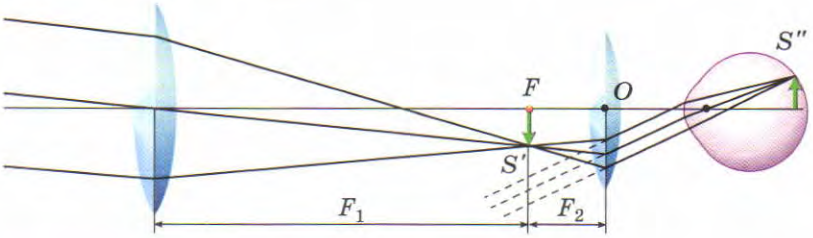
Простой микроскоп А. Левенгука



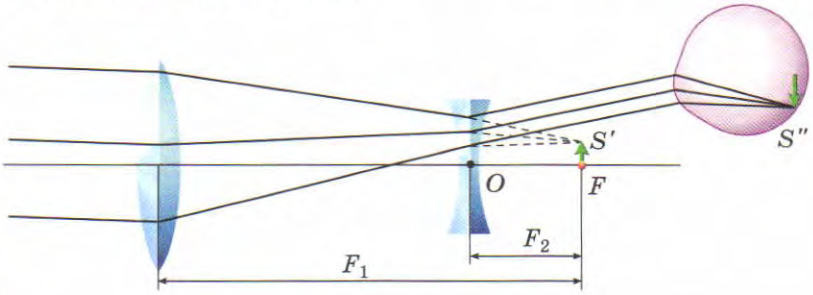
ТЕЛЕСКОПЫ Телескопы, или зрительные трубы, предназначены для наблюдения удалённых объектов. Как и микроскоп, они состоят из двух линз — обращённой к предмету собирающей линзы с большим фокусным расстоянием (объектив) и линзы с малым фокусным расстоянием (окуляр), обращённой к наблюдателю. В зрительных трубах объектив и окуляр располагаются так, что задний фокус объектива F_1' почти совпадает с передним фокусом окуляра F_2. Объектив даёт действительное, уменьшенное, перевёрнутое изображение бесконечно удалённого предмета, которое рассматривается в окуляр, как в лупу. Объектив зрительной трубы должен быть всегда собирающей линзой. Окуляр может быть как собирающей, так и рассеивающей линзой. В зависимости от типа окуляра различают зрительную трубу Кеплера и зрительную трубу Галилея.

Современные телескопы представляют собой большие и сложные сооружения со множеством различных частей и механизмов. Большую роль в усовершенствовании телескопов сыграли успехи в производстве оптического стекла, возросшее искусство шлифовки и полировки оптических поверхностей, общее развитие техники, а также различные открытия учёных-оптиков. Была изобретена фотография, которая значительно расширила возможности астрономических исследований и внесла большие изменения в конструкцию телескопов.

ЗРИТЕЛЬНАЯ ТРУБА КЕПЛЕРА Зрительную трубу с собирающим окуляром называют трубой Кеплера. Она предназначена для астрономических наблюдений. Труба Кеплера даёт действительные, увеличенные, перевёрнутые изображения удалённых предметов и поэтому неудобна для земных наблюдений.



ЗРИТЕЛЬНАЯ ТРУБА ГАЛИЛЕЯ Зрительную трубу с рассеивающим окуляром называют трубой Галилея. Она даёт увеличенные, прямые изображения и предназначена для земных наблюдений.



а) космический телескоп «Хаббл»;
б) оптические телескопы;
в) «Большой телескоп Канарских островов», Испания, о. Пальма;
г) зрительные трубы Галилея

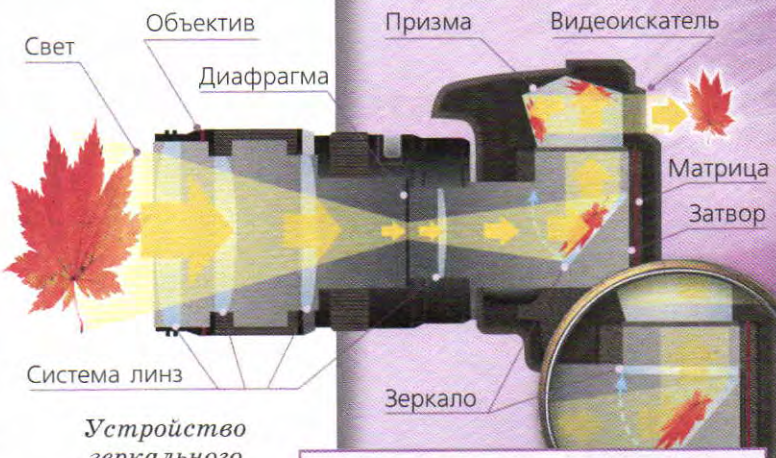
ФОТОАППАРАТ Линзы являются главной частью ещё одного прибора — *фотоаппарата*, который позволяет получать изображения различных объектов на светочувствительной фотоплёнке или пластинке (в цифровых фотоаппаратах). В процессе фотографирования (от греч. *photys* — свет и *graphe* — письмо) линза проецирует изображение объекта съёмки на поверхность, покрытую светочувствительным слоем. Это изображение должно быть уменьшенным и действительным, так как мнимое изображение не может воздействовать на светочувствительный состав. Такое изображение даёт собирающая линза, если предмет находится за двойным фокусом линзы.

С момента создания первого фотоаппарата основная схема его работы почти не изменилась.
В настоящее время широкое распространение получили цифровые фотоаппараты. Они почти полностью заменили плёночные фотоаппараты, использовавшиеся повсеместно вплоть до 90-х гг. XX в.

Первый фотоснимок сделал в 1826 г. французский инженер Жозеф Нисефор Ньепс, открывший способ сохранения полученного изображения путём обработки попадающего на поверхность из стекла света асфальтовым лаком. В 1835 г. английский физик Уильям Тальбот, изучая возможности камеры Ньепса, смог добиться улучшения качества фотоизображений с помощью изобретённого им отпечатка фотографии — негатива. В 1889 г. в истории фотографии появляется имя Джорджа Истмана Кодака, который запатентовал первую фотоплёнку в виде рулона, а потом и фотокамеру «Кодак», сконструированную специально для фотоплёнки. В 1904 г. братья Люмьер начали выпускать пластины для цветного фото, которые стали основоположниками будущего цветной фотографии. В 1988 г. компания «Fujifilm» официально выпустила в продажу первый цифровой фотоаппарат.
Первые попытки получить движущееся изображение были предприняты во второй половине XIX в. Первые кинокамеры имели множество объективов и затворов для ускоренной съёмки. Полученные отпечатки помещались в просмотровое устройство, где они прокручивались, создавая иллюзию движения. Сегодня существует аппаратура, которую называют киносъёмочной и кинопроекционной. Современное кино снимают со скоростью 24 кадра в секунду. Эта скорость является достаточной для создания ощущения непрерывного движения.

Основной частью фотоаппарата является *объектив* — линза или система линз. Он помещается в передней части светонепроницаемой *камеры*. Объектив можно плавно перемещать относительно плёнки для получения на ней чёткого изображения предмета. Во время фотографирования объектив открывают при помощи специального затвора, и изображение попадает на *светочувствительную плёнку*.

Корпус современного цифрового фотоаппарата — это светонепроницаемая коробка, внутри которой расположена чувствительная к свету *матрица фотоаппарата*. Кроме неё, в корпус вмонтирована вся управляющая электроника, глазок видоискателя и другие элементы. На корпусе установлен *объектив*, представляющий собой конструкцию с набором линз. Основным препятствием для света на пути к матрице является *затвор* — сложное техническое устройство, при срабатывании которого световой поток попадает на матрицу.



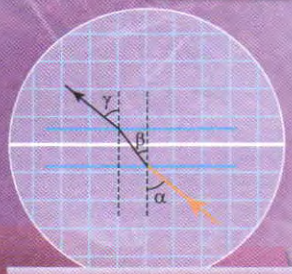
Устройство зеркального фотоаппарата

ВОПРОСЫ:
- В чём различия зрительной трубы Кеплера и зрительной трубы Галилея?
- Из каких основных частей состоит фотоаппарат?
- В чём заключается принцип действия микроскопа?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

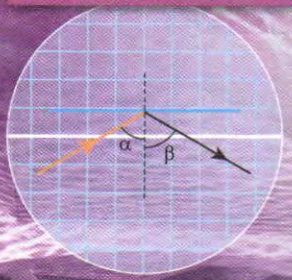
- Геометрическая оптика — раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света и световых лучей — линий, вдоль которых распространяется свет.
- Свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.
- Угол падения светового луча равен углу отражения.
- Световые пучки небольшой интенсивности, пересекаясь, не влияют друг на друга.
- При переходе светового луча из одной среды в другую происходит его преломление — изменение направления распространения света.
- Если луч света переходит из среды оптически менее плотной в среду оптически более плотную, то угол преломления меньше угла падения.
- Оптические приборы — зеркала, линзы, микроскопы и т. д. — позволяют получать изображения различных объектов.

ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА



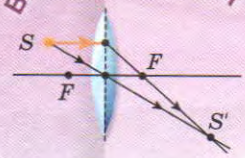
ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ



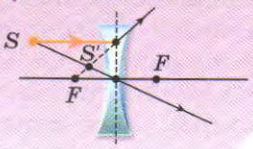
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

ВЫПУКЛАЯ ЛИНЗА



$$D = \frac{1}{F}$$

ВОГНУТАЯ ЛИНЗА



ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- При каких условиях съёмки отверстие диафрагмы фотоаппарата должно быть большим, а при каких малым?
- Почему образуются миражи? Как явление образования миражей можно объяснить на основе закона прямолинейного распространения света?
- Что будет больше — облако или его тень — на поверхности Земли?
- Почему любой водоём всегда кажется более мелким, чем в действительности?
- Благодаря чему достигается аккомодация глаза человека? Чем она отличается от «аккомодации» оптической системы фотоаппарата?
- Предложите технологию изготовления телескопа в домашних условиях? Что для этого необходимо?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

- СКОРОСТЬ СВЕТА. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА
- РАЗЛОЖЕНИЕ БЕЛОГО СВЕТА НА ЦВЕТА. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА
- ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН
- ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА
- ДИФРАКЦИЯ ВОЛН. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА
- ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

...Солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости.

Исаак Ньютон

39

СКОРОСТЬ СВЕТА. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

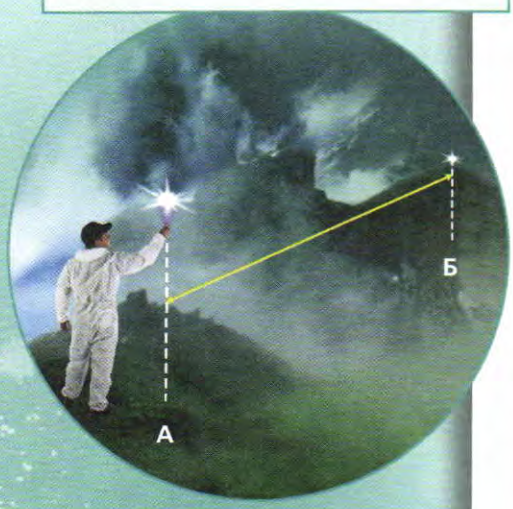
- В чём заключается астрономический метод определения скорости света.
- Каково значение скорости света.
- Каковы лабораторные методы определения скорости света.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое световой луч?
- Как распространяются световые лучи?

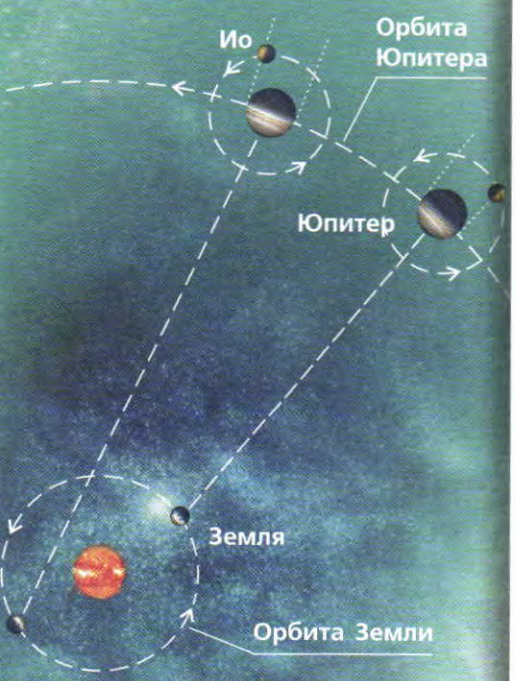
Все световые явления, рассматриваемые в рамках геометрической оптики, изучаются на основе предположения о прямолинейном распространении света в однородной среде. При этом ничего не говорится о том, насколько быстро происходит этот процесс во времени.

ПЕРВЫЕ ОПЫТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СКОРОСТИ СВЕТА Античные учёные, в частности Аристотель, считали, что свет распространяется в пространстве мгновенно. Такая точка зрения господствовала на протяжении более двух тысяч лет. Первый исторически известный эксперимент по определению скорости света был выполнен Галилеем. Идея опыта достаточно проста. Два наблюдателя *А* и *Б* с фонарями располагались на вершинах двух холмов на расстоянии нескольких километров друг от друга. В некоторый момент наблюдатель *А* открывал свой фонарь и в этот же момент начинал отсчёт времени. Другой наблюдатель, увидев свет, посылал световой сигнал своим фонарём обратно наблюдателю *А*. Когда первый наблюдатель видел свет фонаря *Б*, он тотчас заканчивал отсчёт времени. При этом временной интервал между посылкой и приёмом сигнала наблюдатель *А* измерял по числу ударов пульса. Скорость света определялась как отношение двойного расстояния между наблюдателями к промежутку времени между посылкой и приёмом сигнала.



Очевидно, что столь несовершенный метод не мог дать сколько-нибудь надёжную оценку скорости света. По-видимому, это хорошо понимал и сам Галилей.

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА Впервые определить скорость света удалось в 1676 г. датскому астроному О. Рёмеру. Успех опыта Рёмера в решающей степени объяснялся тем обстоятельством, что расстояния, проходимые светом в этих измерениях, были поистине огромными. Именно Рёмер наблюдал затмения одного из спутников (спутник Ио) самой большой планеты Солнечной системы — Юпитера. Так как орбиты Земли, Юпитера и спутника Ио лежат в одной плоскости, то Рёмер в телескоп хорошо видел, как спутник проходил перед планетой, а затем исчезал из поля зрения, заходя в её тень. Через некоторое время Ио вновь появлялся в виде крохотной звёздочки. Промежуток времени между двумя последовательными появлениями спутника составил 42 ч 28 мин 36 с.



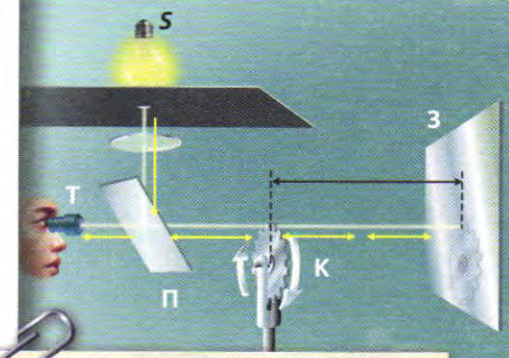
Свои первые измерения Рёмер провёл в то время, когда положения Земли и Юпитера на орбитах соответствовали их максимальному сближению. Примерно через полгода Рёмер повторил наблюдения затмения Ио, когда Земля удалилась от Юпитера на расстояние, равное диаметру своей орбиты. Результат оказался неожиданным:

Ио в поле зрения телескопа появился на 22 мин позже, чем тогда, когда положение Земли на орбите было диаметрально противоположным. Рёмер правильно истолковал полученный результат: задержка наступления затмения равна времени, которое потребовалось свету, чтобы пройти расстояние, равное диаметру земной орбиты. Разделив это расстояние на время запаздывания, Рёмер получил значение скорости света. Это значение оказалось необычайно большим, примерно 230 000 км/с, но всё же конечным. Это и есть главный результат опыта Рёмера.

Олаф (Оле) Кристенсен Рёмер
(1644—1710)
Датский астроном, первым измеривший скорость света.

МЕТОД ФИЗО Первым лабораторным методом по определению скорости света был опыт французского физика А. Физо, поставленный им в 1849 г. Метод Физо в общих чертах напоминал метод Галилея, только роль наблюдателя *А* выполняло вращающееся зубчатое колесо, а роль наблюдателя *Б* — плоское зеркало.

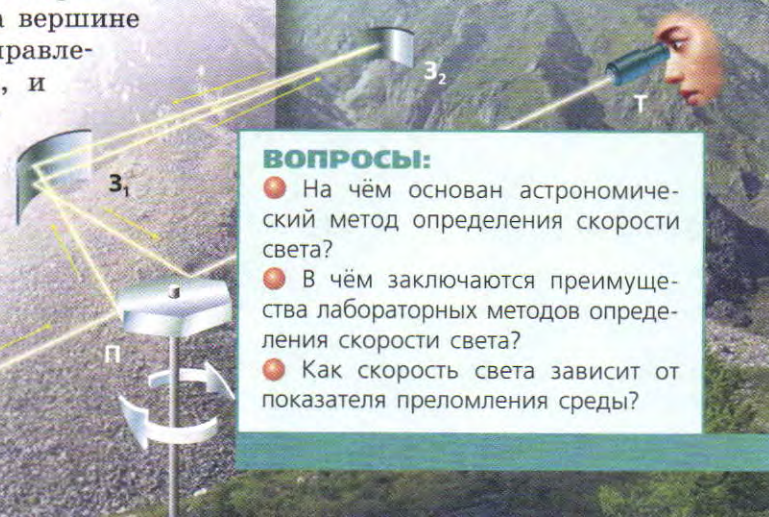
Узкий световой пучок от источника *S* после отражения от полупрозрачной пластинки *П* направлялся на кромку вращающегося зубчатого колеса *К*. Пройдя в прорезь между зубцами, свет падал на отдалённое зеркало *З*, и отразившись, возвращался назад. Если за время движения светового луча от колеса до зеркала и обратно на месте прежней прорези появлялась новая прорезь, то наблюдатель в зрительной трубе *Т* видел свет. Если же за указанное время на месте прорези появлялся зубец, то свет в трубе не наблюдался. Зная частоту вращения колеса и измерив расстояние между колесом и зеркалом, Физо получил значение скорости света 312 000 км/с.



Скорость света в среде зависит от свойств среды. Например, скорость света в воде оказалась в 1,33 раза меньше, чем в воздухе.
Поскольку 1,33 — показатель преломления воды, то отсюда следует, что скорость света зависит от показателя преломления среды: чем он больше, тем меньше скорость света в среде.

МЕТОД МАЙКЕЛЬСОНА В другом, более точном лабораторном методе определения скорости света прерывание света осуществлялось при помощи быстро вращающегося стального восьмигранного зеркала в форме призмы.

Такой опыт был выполнен в 1879 и 1926 гг. американским физиком А. Майкельсоном. Световой пучок от источника *S* направлялся на грань призмы *П* и после отражения падал на вогнутое зеркало $З_1$, установленное на горе. Отражённый от этого зеркала луч направлялся на такое же зеркало $З_2$, установленное на вершине другой горы. Отражённый в обратном направлении свет вновь падал на грань призмы, и после отражения попадал в объектив зрительной трубы. При этом свет проходил суммарное расстояние, равное 70,7 км, за $^1/_8$ оборота призмы. Зная частоту вращения призмы, Майкельсон получил значение скорости света, которое лишь незначительно отличается от общепринятого:
c = 299 792 км/с.

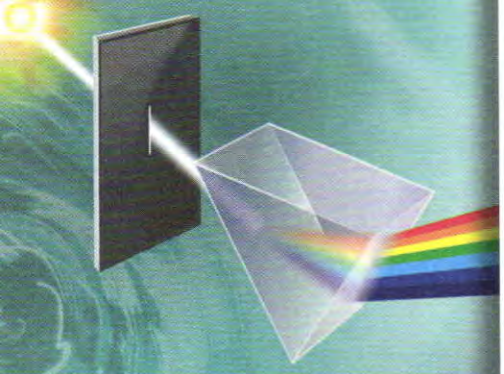


ВОПРОСЫ:
- На чём основан астрономический метод определения скорости света?
- В чём заключаются преимущества лабораторных методов определения скорости света?
- Как скорость света зависит от показателя преломления среды?

40 РАЗЛОЖЕНИЕ БЕЛОГО СВЕТА НА ЦВЕТА. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Каков состав белого света.
- Как зависит преломление света от цвета светового луча.
- Чем обусловлен цвет тела.
- Что такое дисперсия света.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое световой луч?
- Что такое преломление света?



Мы привыкли видеть окружающий нас мир красочным и обычно не задумываемся над вопросами: а что же такое цвет тел? Можем ли мы рассматривать цвет как одно из основных свойств материальных объектов?

ОПЫТЫ НЬЮТОНА До Ньютона вопросами о природе цвета занимались в основном художники, поэты и философы. Их рассуждения, как правило, касались пропорции смешения различных цветов, и на этой основе строились те или иные теории цвета. В частности, ещё в IV в. до н. э. древнегреческий учёный Аристотель выдвинул свою теорию цветов, согласно которой солнечный свет является простым, а все остальные цвета получаются из него в результате смешивания с различным количеством тёмного цвета.

В 1666 г. Ньютон, занимаясь усовершенствованием телескопов, обратил внимание на тот факт, что изображение, получаемое с помощью объектива телескопа, окрашено по краям. Предполагая, что это может быть связано с преломлением света, он направил узкий пучок солнечного света, образованного малым отверстием в ставне, на грань стеклянной призмы, установленной в затемнённой комнате. При этом на противоположной стене комнаты, выполнявшей роль экрана, появилось удлинённое изображение щели, состоящее из ряда цветных полос.

Результаты опыта озадачили Ньютона и породили ряд вопросов. Во-первых, почему белый свет, входящий в призму, выходил из неё в виде цветной полосы, содержащей семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зелёный, жёлтый, оранжевый и красный? Во-вторых, почему круглый в сечении пучок после преломления в призме оказался существенно растянутым в длину? Влияет ли вещество самой призмы на окрашивание белого света? Располагая цвета в определённой последовательности, Ньютон, по-видимому, учитывал последовательность цветов в радуге. Получившуюся на экране цветную полоску Ньютон назвал *спектром* (от лат. *spectrum* — изображение). Из опыта следовало, что белый свет является сложным: пройдя через призму, он разлагается на пучки различных цветов.

Однако далеко не все современники Ньютона согласились с этим выводом: слишком уж необычным казалось это предположение.

Между тем Ньютон нашёл простой и убедительный способ доказательства справедливости своей теории. Для этого он на пути пучка, прошедшего через призму, поместил вторую призму, повёрнутую на 180° относительно первой. При этом вторая призма действовала как собирающая линза: вышедший из неё пучок в точке схождения лучей становился белым.

> Он первым исследовал разнообразие световых лучей,
> И проистекающие отсюда особенности цветов,
> Которых до того времени никто даже не подозревал...
>
> (*Строки из надписи, высеченной на плите могилы Ньютона в Вестминстерском аббатстве в Лондоне*)

ДИСПЕРСИЯ СВЕТА Таким образом, опыты Ньютона убедительно свидетельствовали о том, что белый свет имеет сложную структуру. Вместе с тем Ньютона интересовал вопрос: оказывает ли влияние вещество призмы на характер окрашивания пучка? Для ответа на этот вопрос он закрывал отверстие в ставне поочерёдно синим и красным стеклом и наблюдал при этом синее и соответственно красное пятно на стене. Это означало, что призма не может влиять на цвет пучка.

Опытным путём Ньютон нашёл ответ и на другой важный вопрос: почему пучки разных цветов по-разному отклоняются призмой? В своём фундаментальном трактате «Оптика» Ньютон так сформулировал полученный им вывод: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости». В наибольшей степени преломляются фиолетовые пучки, в наименьшей — красные.

Как известно, показатель преломления среды зависит от скорости света v в веществе: $n = c/v$, где c — скорость света в вакууме. Следовательно, пучок фиолетового цвета преломляется в большей степени потому, что фиолетовый цвет имеет в веществе наименьшую скорость. Красные же лучи преломляются меньше других потому, что их скорость в веществе наибольшая.

Зависимость показателя преломления среды от цвета световых лучей Ньютон назвал *дисперсией* (от лат. *dispersion* — рассеяние).

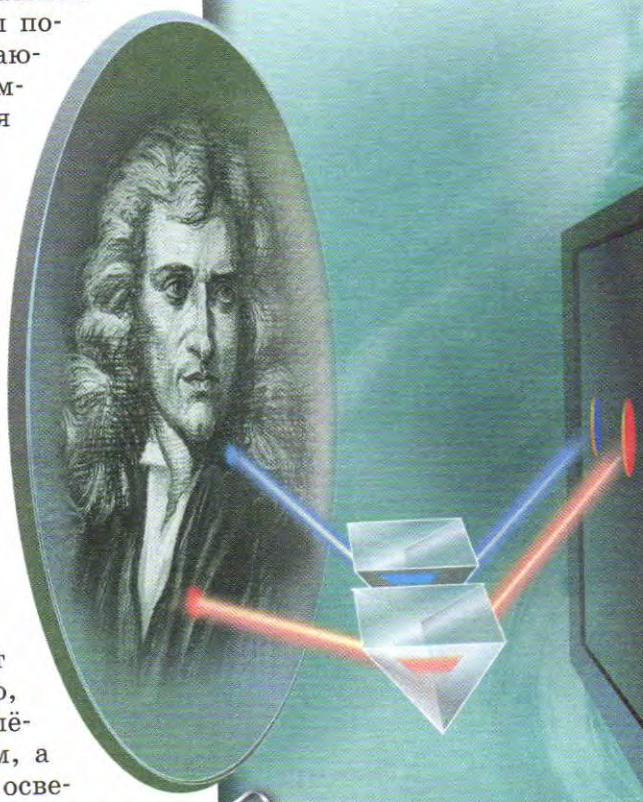
ЦВЕТ ТЕЛА Окружающий нас мир является красочным именно потому, что солнечный свет является сложным. Но всё же пока непонятно, почему траву и листья растений мы видим зелёными, мак — красным, одуванчик — жёлтым, а мел — белым? Почему различные предметы, освещённые одним и тем же солнечным светом, имеют разный цвет?

Чтобы разобраться в этом, будем освещать, например, синим светом поочерёдно синие, зелёные, жёлтые и красные листы бумаги из набора для изготовления аппликаций. Мы увидим, что только при освещении синей бумаги она будет казаться нам яркой. При освещении же синим светом бумаги других цветов она будет выглядеть тёмной. Это означает, что тела, имеющие синюю окраску, рассеивают в основном синие лучи, а остальные поглощают. Аналогично тела, имеющие красную окраску, в основном рассеивают красные лучи.

Белые тела, которые освещаются дневным светом, в равной степени рассеивают лучи всех цветов, поэтому мы их видим белыми.

Чёрные же тела представляются нам чёрными потому, что они поглощают практически все падающие на них лучи.

Даже много позднее, в начале XIX в. великий немецкий поэт Гёте, обладавший исключительным авторитетом, выступил против теории цвета Ньютона. Одним из его аргументов было то, что любой цветной свет темнее белого и, следовательно, яркость не может быть получена из темноты.



Среди палитры цветов красный, синий и зелёный цвета относятся к основным.

ВОПРОСЫ:

- В чём заключается сущность опыта Ньютона по пропусканию солнечного света через призму?
- Из каких цветов состоит спектр солнечного света?
- Что такое дисперсия света?
- От чего зависят и чем обусловлены цвета тел?

41 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое интерференция волн.
- При каких условиях можно наблюдать интерференцию волн.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое механические колебания?
- Что такое механические волны?

Христиан Гюйгенс
(1629—1695)
Голландский математик, физик, астроном и механик. Изобрёл маятниковые часы.

Изучая законы геометрической оптики, а также вопросы, связанные с изменением скорости света и явлением дисперсии света, мы ничего не говорили о его природе.

ДВЕ ТЕОРИИ О ПРИРОДЕ СВЕТА Проблема природы света активно обсуждалась ещё в XVII–XVIII вв. В то время существовали две теории о природе света.

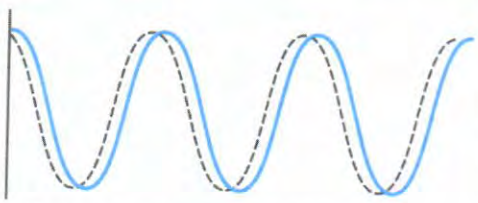
Согласно одной из них, представителем которой являлся Ньютон, свет — это поток особых частиц, называемых корпускулами.

Другой теории света в XVII в. придерживался Гюйгенс. Согласно его представлениям, свет — это волны, которые распространяются в особой среде — мировом эфире, заполняющем всё пространство.

Эти представления поддерживались на протяжении XVIII в. Л. Эйлером, М. В. Ломоносовым и В. Франклином. И только в начале XIX в. работами О. Френеля и Т. Юнга была достоверно обоснована волновая природа света.

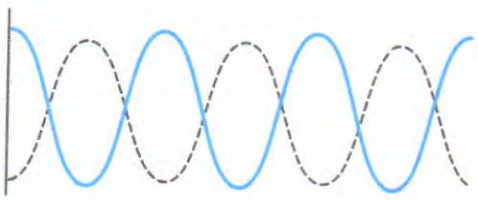
Чтобы разобраться в этих непростых вопросах, обсудим сначала проявление волновых свойств на примере механических волн.

СЛОЖЕНИЕ ВОЛН Возможно, вам приходилось когда-либо наблюдать за появлением ряби, образовавшейся на поверхности воды от двух камней, брошенных одновременно в водоём на небольшом расстоянии друг от друга. При этом вы могли заметить некоторые особенности картины ряби, получающейся при наложении двух кольцевых волн. Одна из особенностей заключается в том, что каждая волна распространяется по поверхности воды так, как если бы другой волны вовсе не было. Нечто аналогичное наблюдается и для звуковых волн: когда в оркестре одновременно звучат несколько музыкальных инструментов, наше ухо способно улавливать звучание каждого из них.



Взаимное усиление волн

Вторая особенность примечательна тем, что там, где гребни одной волны встречаются с гребнями другой, получаются более высокие волны, т. е. их амплитуда колебаний больше. В этом случае принято говорить, что волны усиливают друг друга. Там же, где гребни одной волны накладываются на впадины другой, амплитуда колебаний значительно меньше. В этом случае мы наблюдаем взаимное ослабление волн. Если амплитуды волн равны, то возможно их полное гашение, и ряби на поверхности воды в этих местах не будет.

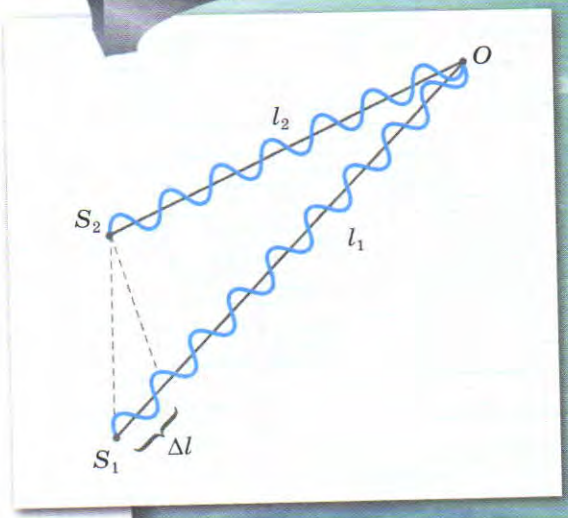


Взаимное ослабление волн

Следует отметить, что явления взаимного усиления и ослабления волн можно наблюдать также и для звуковых волн. Например, заставим звучать камертон ударом резинового молоточка и будем его вращать за подставку, держа около уха. При этом можно заме-

тить, что при некоторых положениях камертона звук усиливается, а при некоторых — ослабляется. Причина данного явления заключается в следующем: поскольку частоты колебаний ножек камертона одинаковы, то каждая ножка возбуждает звуковые волны одинаковой длины и с равными амплитудами. Поэтому при вращении камертона возможны такие его положения по отношению к уху, при которых гребень волны, возбуждаемой одной ножкой, накладывается на впадину волны, возбуждаемой другой. В этом случае будет наблюдаться ослабление звука.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ВОЛН Рассмотрим более подробно опыт по возбуждению волн на поверхности воды. Пусть в прямоугольной кювете возбуждаются две круговые волны с помощью двух ударников в виде шариков, укреплённых на пластине, которая совершает периодические колебания. При этом в некоторой точке O на поверхности воды будет наблюдаться сложение колебаний, образованных двумя волнами от источников S_1 и S_2.



Обозначим пути, проходимые волнами от источников до точки наблюдения O, соответственно через l_1 и l_2. Результат сложения волн, приходящих в точку наблюдения, будет зависеть от того, в каком состоянии каждая волна достигает данной точки: в виде гребня или в виде впадины.

Это, в свою очередь, зависит от *разности хода* волн $\Delta l = l_1 - l_2$: если разность хода, например, равна длине волны, то первая волна придёт в точку наблюдения позже второй на время, в точности равное периоду колебаний. Последнее означает, что в этом случае гребни волн совпадают и будет наблюдаться *усиление* колебаний. Усиление колебаний будет наблюдаться всегда в тех случаях, когда на разность хода *укладывается целое число длин волн*.

Если на разность хода укладывается половина длины волны (в общем случае *нечётное число полуволн*), то первая волна отстаёт от второй на половину периода (на *нечётное число полупериодов*). При такой разности хода гребень одной волны будет накладываться на впадину другой и в точке O будет наблюдаться взаимное *гашение* волн. При этом важно подчеркнуть, что для получения устойчивой картины усиления и ослабления результирующих колебаний необходимо, чтобы разность хода волн не зависела от времени. Явление сложения в пространстве волн одной частоты, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний, называют *интерференцией*.

Интерференция является характерной чертой всех волновых процессов, она присуща волнам любой природы: механическим, волнам на поверхности воды, электромагнитным.

ВОПРОСЫ:

- Что такое сложение волн?
- При каких условиях возможно усиление результирующих колебаний при сложении волн?
- Что такое интерференция волн?

42 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- В чём состоит опыт Юнга.
- Как выглядит интерференционная картина в опыте Юнга.
- Как объясняются цвета тонких плёнок.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое интерференция волн?
- Что такое разность хода волн?
- Каковы условия усиления и ослабления колебаний при интерференции волн?

Упомянутые ранее две теории света — корпускулярная теория Ньютона и волновая теория Гюйгенса — с теми или иными оговорками объясняли большинство явлений геометрической оптики. И лишь благодаря авторитету Ньютона большинство естествоиспытателей склонялись в пользу корпускулярной теории. Поэтому необходим был такой эксперимент, который позволил бы сделать однозначный вывод.

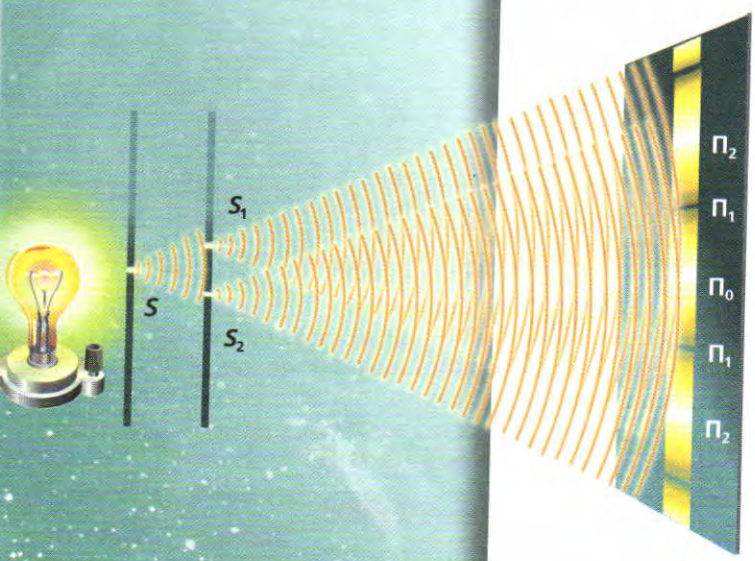
ОПЫТ ЮНГА Как вы уже знаете, одной из характерных особенностей всех волновых процессов является интерференция. Поэтому обнаружение интерференции света могло бы рассматриваться в качестве главного аргумента в поддержку волновой природы света. Однако все попытки обнаружить интерференцию света от двух независимых источников, например от двух одинаковых ламп, не увенчались успехом. Включение дополнительного источника приводило лишь к увеличению освещённости, но никакой интерференционной картины не возникало.

Английский физик Т. Юнг, человек с необычайно широким кругом научных интересов, в 1802 г. осуществил удивительно простой и изящный опыт по интерференции света, ставший впоследствии классическим.

Томас Юнг
(1773—1829)
Английский физик, врач, астроном и востоковед, один из создателей волновой теории света.

За непрозрачной ширмой с узкой щелью Юнг поместил достаточно интенсивный источник, свет от которого через щель падал на другую ширму, снабжённую двумя узкими щелями, расположенными на расстоянии 1–2 мм друг от друга. В результате этого световой пучок, исходящий из щели S, посредством щелей S_1 и S_2 разделялся на два пучка.

В соответствии с корпускулярной теорией Ньютона на экране, установленном за ширмами, должны были появиться две полоски. Однако вместо этого на экране появился ряд светлых полосок, разделённых тёмными промежутками. Самым удивительным было то, что прямо против промежутка между щелями S_1 и S_2 на экране образовалась центральная светлая полоска, симметрично которой расположились другие полоски. Это свидетельствовало о том, что свет огибает препятствия так, как предсказывала волновая теория Гюйгенса. Характерную картину чередования на экране максимумов и минимумов освещённости можно объяснить, если допустить, что свет состоит из волн. Светлые полосы $П_0$, $П_2$, $П_2'$ и т. д. образуются волнами, исходящими из щелей S_1 и S_2, которые взаимно усиливают друг друга. Тёмные полосы $П_1$, $П_1'$ и т. д. создаются волнами, которые взаимно гасят



друг друга. Таким образом, при разделении светового пучка на два пучка получаются взаимно усиливающие друг друга световые волны, которые интерферируют.

Как уже отмечалось выше, явление интерференции присуще только волновым процессам и характерно для всех видов волн. Поэтому опыт Юнга сыграл определяющую роль в обосновании волновой природы света.

ЦВЕТА ТОНКИХ ПЛЁНОК Вероятно, вам приходилось наблюдать радужные переливы цветов тонкой плёнки нефтепродуктов на поверхности луж, а также восхищаться игрой красок мыльных пузырей, которые вы выдували через тонкую трубочку. И едва ли при этом вы задумывались над тем, что наблюдаете явление интерференции света.

Рассмотрим опыт, который несложно осуществить даже в домашних условиях. На проволочную рамку, которую предварительно окунули в мыльный раствор, направляется свет от какого-либо источника. Опыт лучше всего проводить в затемнённой комнате, а в качестве источника использовать спиртовку, в пламя которой вносится кусочек ткани, смоченной раствором поваренной соли. При этом на поверхности мыльной плёнки, расположенной вертикально, будут наблюдаться чередующиеся жёлтые и чёрные полосы.

Вы уже обладаете достаточным запасом знаний, чтобы разобраться в этом явлении. Если смотреть сбоку, то сильно увеличенное сечение плёнки напоминает клин, так как мыльный раствор стекает вниз. Световая волна, падающая в точку K поверхности, частично отражается и частично проникает внутрь плёнки, отражаясь при этом в точке L, находящейся на задней поверхности. В результате получаются две волны, излучаемые из точек K и M, которые будут интерферировать, поскольку они порождены одной и той же волной. Разные участки плёнки имеют различную толщину, поэтому если на разности хода KLM укладывается целое число волн, то волны будут усиливать друг друга, и в этом месте плёнки будет наблюдаться *жёлтая* линия. Если же на пути LM укладывается нечётное число полуволн, то будет тёмная полоса.

Любопытным примером интерференции являются так называемые кольца Ньютона. Несмотря на название, первым это явление обнаружил Роберт Бойль, а через два года кольца Ньютона были независимо обнаружены Робертом Гуком.

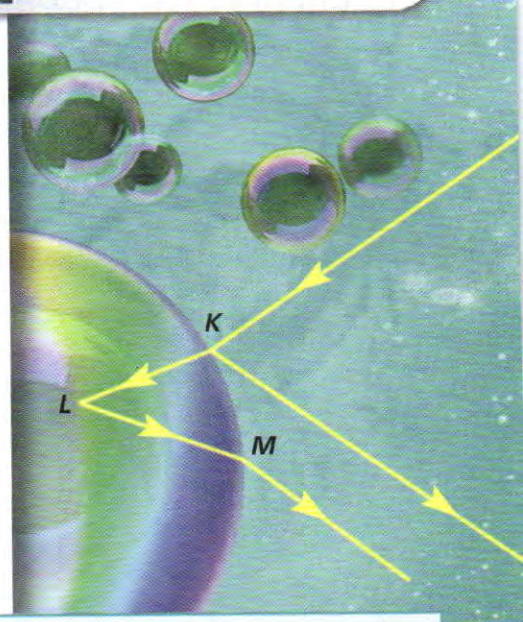
Для наблюдения колец Ньютона свет направлялся на плосковыпуклую линзу, установленную на тщательно отполированную пластинку. В отражённом свете наблюдалась интерференционная картина в виде концентрических колец. Ньютон подробно исследовал это явление, обнаружил закономерности в расположении и окраске колец, а также объяснил эти закономерности на основе корпускулярной теории света.

МОИ ФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовать характер изменения окраски мыльного пузыря, помещённого в стеклянную банку.

«ПОМОЩНИК»

- Приготовьте литровую банку с полиэтиленовой крышкой.
- Налейте в банку небольшое количество мыльной воды.
- Проделайте шилом отверстие в центре крышки.
- Возьмите трубочку от сока и вставьте её в отверстие крышки.
- Выдуйте небольшой мыльный пузырь и осторожно опустите его в банку, закрыв при этом крышку.
- Залепите кусочком пластилина открытый конец трубочки.
- Расположите банку так, чтобы на неё сбоку падал свет.
- Рассмотрите, как изменяется окраска мыльного пузыря в зависимости от угла падения света.



ВОПРОСЫ:

- Почему два независимых источника не могут создать устойчивую интерференционную картину?
- Какой главный вывод сделал Юнг на основе своего опыта?
- Почему при освещении мыльной плёнки жёлтым светом мы не наблюдаем радужной окраски?

43 ДИФРАКЦИЯ ВОЛН. ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое дифракция волн.
- При каких условиях волны изменяют направление своего распространения.
- Каковы особенности дифракции световых волн.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие виды механических волн существуют?
- В чём заключается главная идея опыта Юнга?

На предыдущих уроках вы познакомились с интерференцией волн, которая характерна для всех волновых процессов. Вместе с тем существует ещё одно явление, которое также присуще только волнам.

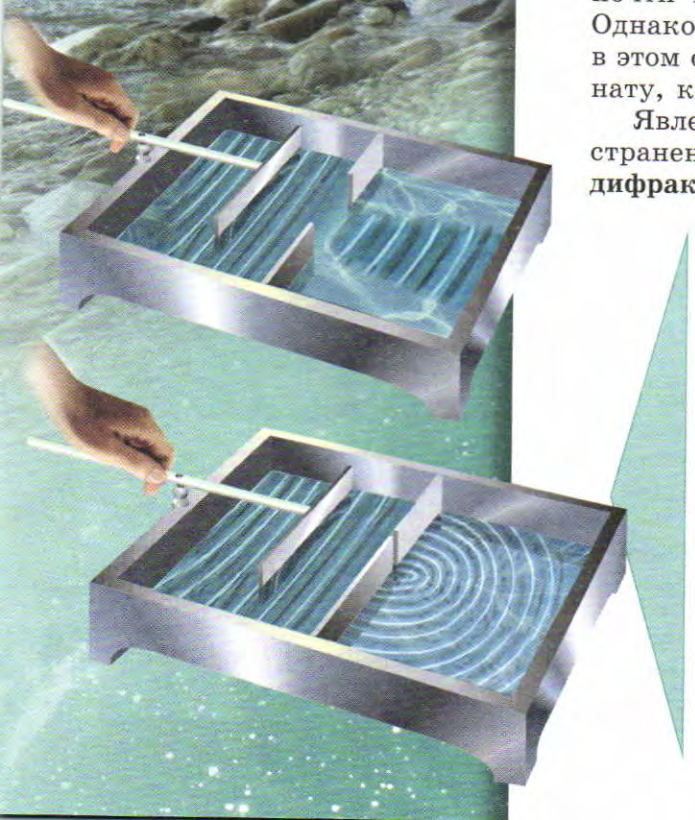
ДИФРАКЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛН Вероятно, вам не раз приходилось наблюдать за поведением волн на поверхности воды, когда волна встречает на своём пути различные препятствия. При этом, если размеры препятствия малы по сравнению с длиной волны, например, торчащий из воды прутик, небольшой камень и т. п., то волны его свободно огибают, смыкаясь за ним.

Совсем другая картина наблюдается, когда размеры препятствия существенно превосходят длину волны. В этом случае за препятствием (например, большим камнем) образуется область невозмущённой водной поверхности.

Особенно наглядно способность огибать препятствия наблюдается у звуковых волн. Например, мы отчётливо слышим шум работающего двигателя автомобиля за углом здания, хотя автомобиля не видим.

Когда мы работаем в комнате, то обычно закрываем дверь в шумный коридор. Если же дверь открыть настежь, то шум мешает работать. А как вы думаете, будет ли в комнате по-прежнему тихо, если дверь немного открыть и оставить узкую щель? Может быть, это почти то же самое, что и полностью закрытая дверь? Однако повседневный опыт убеждает нас в обратном: в этом случае шум из коридора так же проникает в комнату, как и при широко открытой двери.

Явление отклонения волн от прямолинейного распространения, огибание волнами препятствий называют **дифракцией** (от лат. *diffraction* — разломанный).



Рассмотрим опыт, наглядно демонстрирующий явление дифракции.

Возбудим с помощью узкой дощечки волны на поверхности воды, налитой в прямоугольную кювету, снабжённую экраном со щелью. Для этого придадим дощечке периодически колебательные движения в направлении, перпендикулярном её продольной оси. В результате по поверхности воды будут последовательно распространяться гребни со впадинами между ними.

Опыт показывает, что если на пути волн установлен экран со щелью, размеры которой велики по сравнению с длиной волны, то волны проходят сквозь щель, почти не меняя своей формы и направления распространения. Лишь на значительном расстоянии за щелью имеет место некоторое расширение фронта волны.

Совершенно иная картина распространения волн наблюдается в случае, когда размеры щели меньше длины волны. При этом кардинально меняется форма волн за щелью — они становятся круговыми, а колебания охватывают всю поверхность воды за экраном. В данном случае дифракция волн полностью аналогична дифракции звуковых волн на щели, образованной неплотно закрытой дверью, о чём говорилось выше.

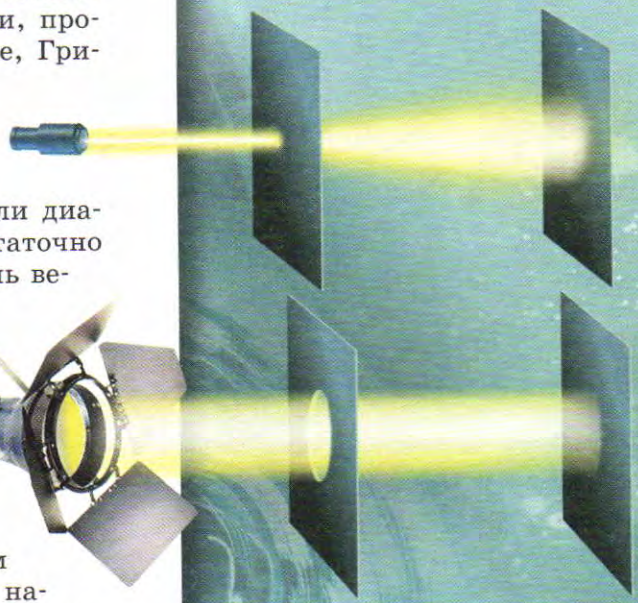
ДИФРАКЦИЯ СВЕТА Рассмотренные ранее опыты по интерференции света убедительно свидетельствуют о его волновой природе. Поэтому для света должна также наблюдаться и дифракция, которая присуща любому волновому процессу. Но в отличие от дифракции механических волн, наблюдать дифракцию света много сложнее. Дело в том, что световые волны дифрагируют заметным образом только в том случае, когда размеры препятствия сравнимы с длиной волны, а она у света очень мала.

Первые опыты по дифракции света выполнил в XVII в. итальянский учёный Ф. Гримальди. В частности, пропуская узкий пучок света через малое отверстие, Гримальди обнаружил отступление от закона прямолинейного распространения света: размер светлого пятна на экране, расположенном против отверстия, оказался больше размера самого отверстия. Опыты также показали, что если диаметр отверстия (размер щели) в ширме достаточно велик, а расстояние от ширмы до экрана не очень велико, то закон прямолинейного распространения света выполняется с высокой точностью. Поскольку Гримальди разделял точку зрения Гюйгенса на природу света, то наблюдаемые особенности в распространении света он объяснял как следствие его волновой природы.

Классический опыт по дифракции света был осуществлён в 1802 г. Т. Юнгом, открывшим явление интерференции света. Схема опыта по наблюдению дифракции была практически полностью аналогична опыту по интерференции света, подробно описанному выше. Световой пучок, исходивший из узкой щели первой ширмы, освещал две близко расположенные щели во второй ширме. Вследствие дифракции из этих щелей выходили два расходящихся световых пучка, которые частично перекрывались, при этом на экране, установленном за ширмой, наблюдалась интерференционная картина.

Таким образом, на основе опыта Т. Юнг продемонстрировал два важнейших свойства света — интерференцию и дифракцию. Кроме того, опираясь на результаты своего опыта, Юнг впервые получил точную оценку длины световой волны. Последовательную теорию дифракции света развил в своих работах современник Юнга французский учёный О. Френель.

Франческо Мария Гримальди
(1618—1663)
Итальянский физик и астроном. Дал описание открытого им явления дифракции света.



ВОПРОСЫ:

- Какое явление называют дифракцией?
- При каком соотношении между длиной волны и размерами препятствия будет наблюдаться дифракция?
- Почему дифракцию света наблюдать труднее, чем дифракцию механических волн?

44 ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- К какому виду волн принадлежат световые волны.
- Какие существуют устройства, позволяющие изучать световые волны.
- Нужна ли особая среда для распространения света.
- Какова истинная природа света.

ВСПОМНИТЕ:

- Какие виды механических волн существуют?
- Что такое электромагнитные волны?

Природа света достаточно сложна. Вы знаете, что для распространения механических волн обязательно нужна среда, обладающая необходимыми упругими свойствами. Означает ли это, что свет тоже упругая волна и для его распространения нужна особая среда? Иначе как можно объяснить распространение света Солнца и далёких звёзд через бездну космического пространства, где отсутствует обычное вещество?

ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН Чтобы разобраться в особенностях распространения света, вспомним, какие виды механических волн существуют. Вы уже знаете, что в твёрдых телах, жидкостях и газах могут распространяться продольные волны, поскольку для их существования в среде должны возникать упругие деформации сжатия и растяжения. Поперечные же волны могут распространяться только в твёрдых телах, в которых возникают упругие деформации сдвига.

Рассмотрим в этой связи опыт по прохождению поперечной волны, возбуждаемой на упругом шнуре, через две решётки из параллельных брусьев, расположенных в одном случае вертикально, а в другом — горизонтально. Видно, что волны, образованные на шнуре, свободно пройдут через две решётки в том случае, если колебания частиц шнура будут совершаться в вертикальной плоскости параллельно щелям между брусьями.

Но если брусья второй решётки горизонтальны, то они полностью погасят вертикальную поперечную волну. Подчеркнём, что подобная задержка волн характерна только для поперечных волн и только в том случае, когда направление колебаний перпендикулярно к щелям препятствия.

Возможна ли аналогичная проверка на поперечность для световых волн? Конечно, да, поскольку имеются устройства, называемые *поляризационными фильтрами*, принцип действия которых отдалённо напоминает действие решётки. Устройство фильтра таково, что он способен пропускать световые волны лишь в том случае, если направление колебаний совпадает с некоторым направлением в плоскости фильтра. Назовём это направление осью фильтра.

Если солнечный луч направить перпендикулярно плоскости фильтра, то, на первый взгляд, не произойдёт ничего существенного: свет проходит при любой ориентации оси фильтра, лишь его яркость несколько уменьшается. На самом деле это не так: в волне, прошедшей через фильтр, колебания будут осуществляться только в направлении, параллельном оси фильтра.

Поместим теперь за первым фильтром второй так, чтобы их оси были параллельны. Как показывает опыт, в этом случае свет проходит свободно через оба фильтра. При этом наблюдается полная аналогия с прохождением поперечной волны на шнуре через решётки с параллельными брусьями.

Если же изменить ориентацию осей фильтров, сделав их взаимно перпендикулярными, то второй фильтр полностью задерживает прохождение света. Это означает, что световая волна является поперечной.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА Вместе с тем, оставался один вопрос, который на протяжении почти трёх столетий волновал умы учёных: если свет — волна, то для его распространения необходима среда. Более того, если свет — поперечная волна, то среда должна быть твёрдой. Эта необычная и невидимая упругая среда, которая должна заполнять всё мировое пространство, получила название *светоносного эфира*. Одна из парадоксальных особенностей, которыми был наделён эфир, заключалась в том, что, способствуя распространению света, он не должен был оказывать сопротивления движению материальных тел, например звёзд и планет.

Взгляды на природу света начали радикально меняться начиная со второй половины XIX в., после создания Дж. Максвеллом теории электромагнетизма. Максвелл теоретически доказал возможность существования электромагнитных волн, способных распространяться в пустоте. Из теории Максвелла также следовало, что электромагнитные волны являются поперечными, и скорость их распространения в вакууме должна быть равна скорости света. Это позволило Максвеллу предположить, что свет представляет собой электромагнитные волны.

Электромагнитная теория света получила своё экспериментальное подтверждение после открытия Г. Герцем электромагнитных волн. При этом Герц опытным путём доказал, что электромагнитным волнам, как и световым, присущи явления отражения, преломления, интерференции и дифракции.

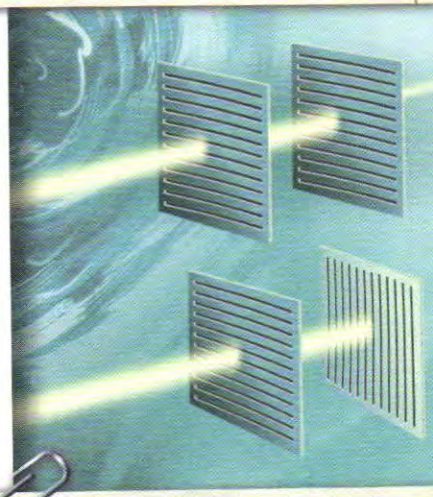
ИНФРАКРАСНОЕ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЯ Видимый свет представляет собой лишь небольшой диапазон электромагнитных волн, существующих в природе. Длины волн видимого света заключены в интервале от 0,4 мкм (фиолетовый свет) до примерно 0,7 мкм (красный свет).

Электромагнитные волны с длинами волн менее 0,4 мкм и примерно до 10 нм называют **ультрафиолетовым излучением**. Этот вид излучения не воспринимается глазом, но оказывает сильное химическое и биологическое действие.

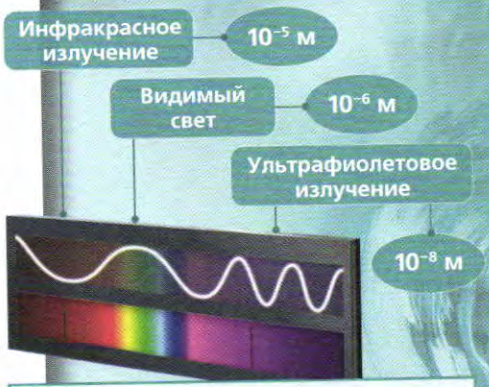
Электромагнитные волны с длинами волн от 0,7 мкм до примерно 2 мм называют **инфракрасным излучением**. Оно испускается нагретыми телами, и часто его называют тепловым излучением.

...Мы имеем серьёзные основания сделать заключение, что сам по себе свет... является электромагнитным возмущением в форме волн...

Джеймс Клерк Максвелл

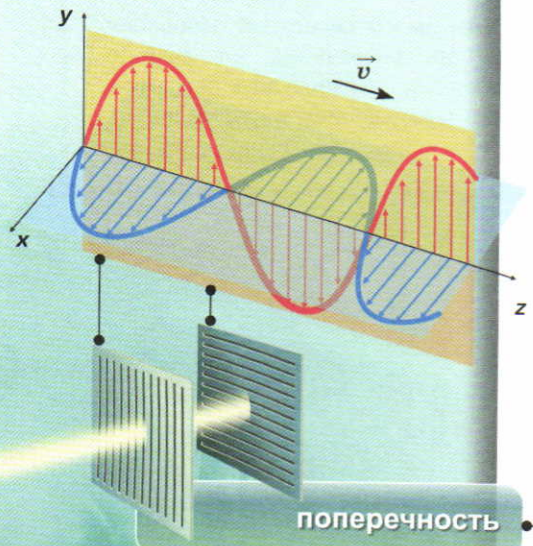


Если свет обладает электромагнитной природой, то для его распространения не нужна гипотетическая среда, обладающая столь необычными свойствами и называемая эфиром.



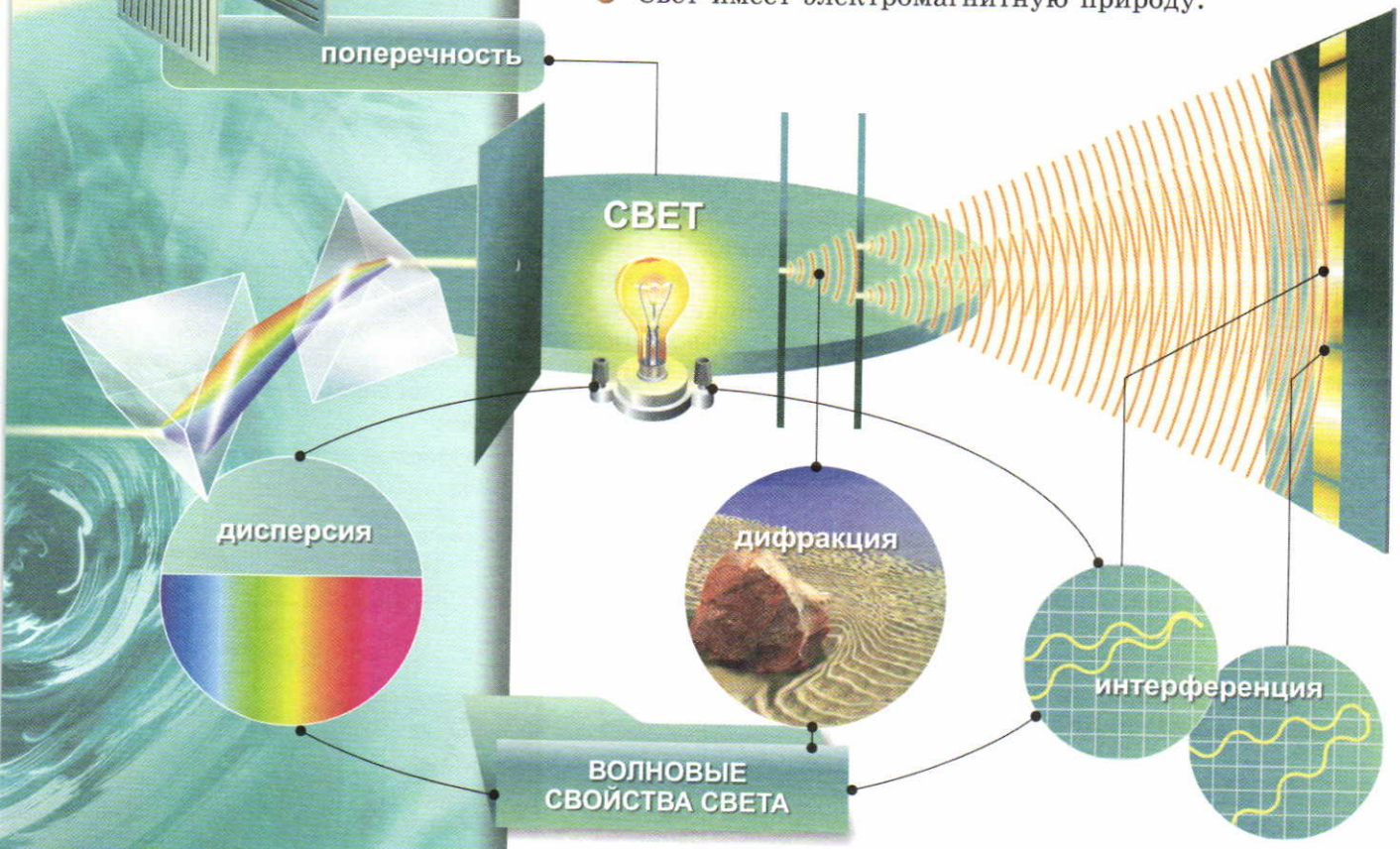
ВОПРОСЫ:

- Какие опыты позволяют утверждать, что световые волны являются поперечными?
- Нужна ли особая среда для распространения света?
- Какие следствия теории Максвелла позволяют утверждать, что свет является электромагнитной волной?



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Волновая оптика — раздел оптики, изучающий световые явления с учётом волновой природы света.
- Скорость света в среде меньше скорости света в вакууме.
- Явление сложения в пространстве волн одной частоты, при котором образуется постоянное во времени распределение амплитуд результирующих колебаний, называют интерференцией.
- Явление отклонения волн от прямолинейного распространения, огибание волнами препятствий называют дифракцией. Световые волны являются поперечными волнами.
- Свет имеет электромагнитную природу.

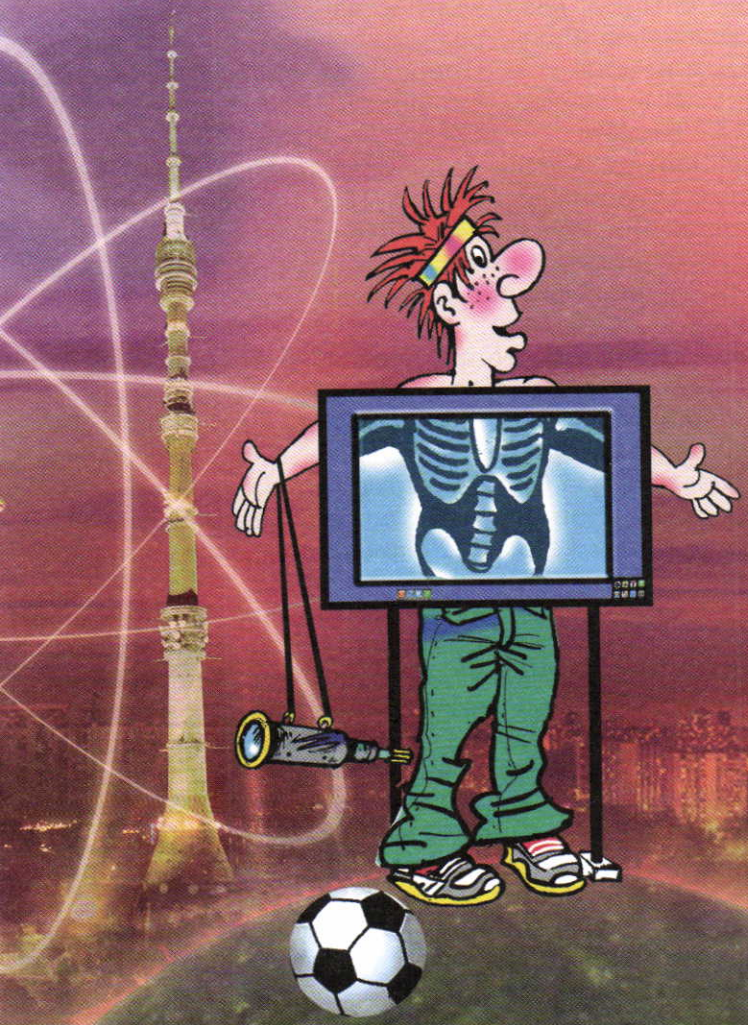


ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Ограничивается ли спектр излучения Солнца только видимой человеческим глазом частью?
- Воспользовавшись дополнительными источниками информации, определите, для чего на поверхности объективов современных фото- и видеокамер, биноклей, очков наносят просветляющий слой?
- Почему при помощи оптического микроскопа нельзя увидеть молекулы и атомы? В чём преимущества электронного микроскопа перед оптическим?

КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

- ОПЫТЫ С КАТОДНЫМИ ЛУЧАМИ. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА
- ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ. КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА
- АТОМ БОРА
- РАДИОАКТИВНОСТЬ
- СОСТАВ АТОМНОГО ЯДРА
- ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
- ДЕЛЕНИЕ И СИНТЕЗ ЯДЕР
- АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА



КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

...Должно разумом достигать потаённого безмерной малостью вида, меры, движения и положения первоначальных частиц, смешанные тела составляющих.

М. В. Ломоносов

45 ОПЫТЫ С КАТОДНЫМИ ЛУЧАМИ. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое катодные лучи.
- Как был открыт электрон.
- Что такое рентгеновское излучение.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое электролиз?
- Что такое ионы?
- Что такое электромагнитные волны?

К концу XIX в. в физике сложилась уникальная ситуация: многие учёные были убеждены в том, что развитие физической теории в основном завершилось. Законы механики и теория всемирного тяготения были известны уже более двухсот лет. Были установлены фундаментальные законы: сохранения энергии, импульса, электрического заряда и ряд других. Считалось также, что все вещества состоят из неделимых мельчайших образований — атомов. Однако вскоре стали появляться экспериментальные данные, которые поставили целый ряд принципиальных вопросов.

Английский исследователь Уильям Крукс, проводя опыты с катодными лучами, помещал в трубку, из которой был откачан воздух, металлический мальтийский крест. Увидев на флуоресцирующем стекле тень, он пришёл к выводу, что катодные лучи распространяются внутри трубки прямолинейно. Приблизив магнит к тонкому пучку катодных лучей, он обнаружил, что флуоресцирующее пятно при этом сместилось, откуда заключил, что магнитное поле искривляет катодные лучи.

ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА Можно с уверенностью утверждать, что началом эры современной физики явилось открытие электрона.

В конце 80-х гг. XIX в. многие физики наблюдали свечение, которое возникало в частично откачанной трубке, снабжённой электродами, соединёнными с высоковольтным источником. Природу частиц, вызывающих свечение газа в трубке, установил в 1897 г. английский физик Дж. Томсон.

В своих опытах Томсон использовал разрядные трубки, из которых откачивался воздух. При наложении высокого напряжения между положительным электродом *A* (анодом) и отрицательным электродом *K* (катодом) в разрядной трубке возникал электрический ток, регистрируемый амперметром.

Томсон установил, что этот ток создаётся зарядами, движущимися от катода *K* к аноду *A*. Если в электроде *A* сделать узкое отверстие, то сформированный пучок заряженных частиц можно направить в правую часть трубки, обладающую большими геометрическими размерами. При попадании на экран, покрытый специальным флуоресцирующим составом, заряженные частицы создавали на нём яркое светящееся пятно.

Пропуская указанные пучки, названные *катодными лучами*, через области электрического и магнитного полей, по характеру их отклонения Томсон пришёл к заключению, что они состоят из отрицательно заряженных частиц вещества. При этом он сумел оценить отношение заряда частицы к её массе.

Кроме того, Томсон установил, что отношение заряда частицы к её массе не зависит от состава газа в разрядной трубке и от рода металла, из которого изготовлен катод. На основе этих результатов Томсон пришёл к выводу, что в состав атомов различных элементов входят одинаковые частицы.

Таким образом, по результатам многочисленных опытов был сделан важный вывод о дискретной структуре атомов: из атома любого химического элемента могут быть высвобождены отрицательно заряженные частицы, имеющие одинаковую массу и одинаковый заряд. Эти мельчайшие частицы, являющиеся носителями электричества, были названы *электронами*.

Впервые термин «электрон» был введён в 1891 г. ирландским физиком и математиком Дж. Стонеем, который на основе опытов Фарадея по электролизу высказал идею о дискретности электрического заряда.

ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ В РАЗВИТИИ УЧЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОНЕ

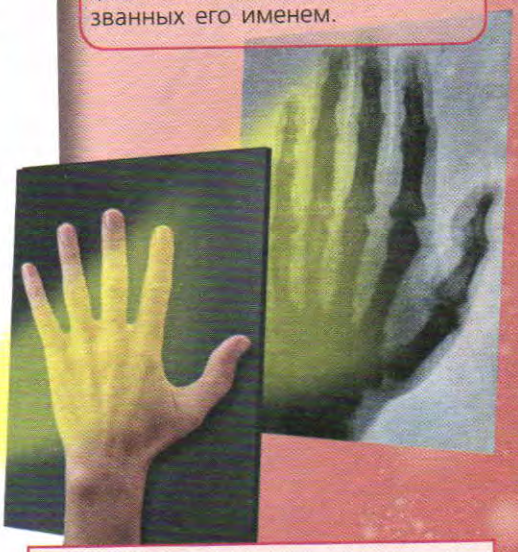
Законы электролиза, установленные Фарадеем задолго до опытов Томсона, послужили отправной точкой в обосновании идеи о дискретности электричества. Экспериментируя с различными электролитами, Фарадей показал, что масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна величине совокупного заряда, прошедшего через раствор. Тщательно выполненные опыты позволили Фарадею установить, что для выделения одинакового числа частиц любого вещества необходимо одно и то же количество электричества. Отсюда напрашивался логический вывод о том, что каждая частица вещества, участвующая в процессе электролиза, переносит в среднем один и тот же заряд. До выдвижения идеи о существовании элементарного электрического заряда оставался всего один шаг.

Вместе с тем для ответа на вопрос, действительно ли существует элементарный заряд, необходимо было измерить заряды отдельных ионов, а не суммарный заряд, переносимый огромным числом ионов. Для этого потребовались новые представления о строении вещества и другие экспериментальные методы.

Вильгельм Конрад Рентген
(1845—1923)
Немецкий физик, первый лауреат Нобелевской премии по физике за открытие лучей, названных его именем.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

В 1895 г., за два года до открытия электрона, немецким физиком В. Рентгеном, изучавшим газовые разряды, было сделано выдающееся открытие. Будучи очень наблюдательным человеком, он обратил внимание на то, что после подачи высокого напряжения между электродами трубки стекло вокруг анода начинало светиться зеленоватым светом. Далее Рентген установил, что разрядная трубка, обёрнутая чёрной бумагой, не пропускающей обычный свет, испускала неизвестное излучение, которое засвечивало фотопластинку, а также вызывало свечение экрана, покрытого солями бария. Это излучение Рентген назвал *X*-лучами.



Учёный помещал на пути *X*-лучей свою руку, и на экране появлялось теневое изображение скелета кисти руки. Последнее говорило о том, что *X*-лучи обладают большой проникающей способностью.

Более поздние исследования показали, что *X*-лучи представляют собой электромагнитные волны, которые излучают электроны при торможении в результате столкновения с анодом. В дальнейшем это излучение получило название **рентгеновских лучей**.

ВОПРОСЫ:

- Что такое катодные лучи?
- К какому выводу пришёл Томсон на основе своих опытов?
- Что установил Фарадей на основе анализа опытов по электролизу?
- Что такое рентгеновское излучение?

46 ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ. КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что собой представляют сплошной и линейчатые спектры испускания и поглощения.
- Что такое спектральный анализ.
- Что такое абсолютно чёрное тело и его излучение.
- Что такое квант излучения.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое преломление света?
- Что такое спектр?
- Что такое дисперсия света?

Изучение закономерностей испускания и поглощения электромагнитного излучения нагретыми телами сыграло большую роль в становлении теории, описывающей законы микромира. Эти законы оказались во многом непохожими на законы классической физики.

СПЛОШНОЙ СПЕКТР Опыты Ньютона по пропусканию света через призму показали, что белый свет является сложным: пройдя через призму, он разлагается на пучки различных цветов, которые образуют на экране разноцветную полоску, называемую *спектром*.

Аналогичный спектр имеют сильно нагретые тела, например нагретые до белого каления металлы. И хотя, перечисляя цвета спектра, обычно называют семь цветов, начиная с красного и заканчивая фиолетовым, на самом деле один цвет переходит в другой постепенно.

Исследования, проведённые при помощи специального чувствительного термометра, показали, что спектр излучения нагретых тел, кроме видимых лучей, содержит ещё и невидимые лучи. Излучение в области длин волн, лежащих за красной областью спектра, называют инфракрасным. Инфракрасные лучи испускают все нагретые тела, например горячая печь. Перед фиолетовой областью видимого спектра было экспериментально обнаружено невидимое излучение. Это — известное вам ультрафиолетовое излучение, обладающее сильным физиологическим воздействием.

Поскольку в спектрах нагретых тел нет пустых промежутков, то такие спектры являются непрерывными. По-другому их называют *сплошными*. Такие спектры дают твёрдые тела, жидкости, а также плотные газы.

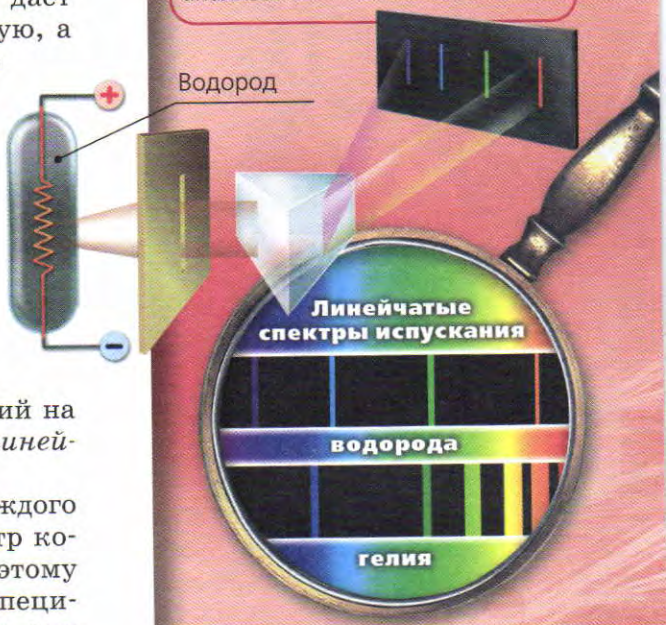
ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ После изобретения в середине XIX в. немецким химиком Р. Бунзеном специальной газовой горелки в изучении спектров излучения веществ наметился существенный прогресс. Вещества, внесённые в пламя горелки, превращались в пар и окрашивали пламя в различные цвета. Например, медь окрашивала пламя в зелёный цвет, поваренная соль — в жёлтый, а литий — в малиново-красный.

Роберт Вильгельм Бунзен
(1811—1899)
Знаменитый немецкий химик-экспериментатор.

По предложению немецкого физика Г. Кирхгофа свет пламени пропускался через призму. Если в пламя горелки внести кусочек асбеста, пропитанного раствором поваренной соли, то на бледном фоне сплошного спектра горелки возникнет яркая жёлтая линия, которую дают пары натрия.

Густав Роберт Кирхгоф
(1824—1887)
Знаменитый немецкий физик. Основоположник спектрального анализа.

Хотя для глаза пламя, окрашенное парами лития и стронция, имеет одинаковый цвет, после прохождения излучения через призму свет литиевого пламени даёт две линии — яркую малиновую и слабую оранжевую, а стронций — голубую, две красные и оранжевую линии. Характерный спектр, также состоящий из набора отдельных цветных линий, даёт свечение газового разряда в трубке, содержащей исследуемый газ. Например, спектр испускания атомарного водорода содержит четыре цветные линии различной яркости, которые разделены широкими тёмными промежутками. Спектр испускания гелия включает уже семь цветных линий.



Таким образом, спектры испускания различных веществ, находящихся в атомарном состоянии, представляют собой набор отдельных цветных линий на чёрном фоне. Такие спектры получили название *линейчатых спектров испускания*.

Как показали тщательные измерения, атомы каждого химического элемента испускают излучение, спектр которого не похож на спектры других элементов. Поэтому для каждого химического элемента составлена специальная таблица, в которой указаны характерные для него линии и их яркость.

СПЕКТРЫ ПОГЛОЩЕНИЯ Видоизменим опыт по пропусканию излучения через пары вещества и поместим перед *ненагретыми* парами вещества источник света, дающий непрерывный спектр. При этом на экране, установленным за призмой, будет наблюдаться сплошной спектр, перерезанный тёмными линиями. Эти линии получили название *линий поглощения*, а сам спектр — *линейчатого спектра поглощения*.

В 1859 г. Р. Бунзен и Г. Кирхгоф установили, что линии поглощения находятся в тех же участках спектра, где должны быть расположены яркие линии в линейчатом спектре испускания, присущие данному газу, т. е. вещество способно поглощать те волны, которые само испускает в нагретом состоянии. Линейчатые спектры поглощения также имеют строгую индивидуальность.

Таким образом, анализ линейчатых спектров излучения и поглощения позволяет расшифровать состав излучающего вещества.

Метод определения химического состава вещества по его спектру называют *спектральным анализом*. Метод спектрального анализа был разработан в 1859 г. Р. Бунзеном и Г. Кирхгофом, что ознаменовало появление нового раздела физики — *спектроскопии*, изучающей спектры электромагнитного излучения.

С помощью спектрального анализа было открыто множество новых элементов. Этим элементам часто давали названия, соответствующие наиболее ярким линиям в их спектрах. Например, элемент рубидий в спектре даёт тёмно-красные, рубиновые линии. Основные линии цезия голубые, в переводе с латинского цезий означает «небесно-голубой».

Впервые линейчатый спектр поглощения наблюдал в 1802 г. английский врач и химик Уильям Хайд Волластон. Изучая непрерывный спектр Солнца, он обнаружил в нём несколько резких тёмных линий. Он не придал им особого значения, полагая, что их появление зависит либо от призмы, либо от источника света, либо от других причин. Только через 12 лет немецкий физик Й. Фраунгофер, продолжая исследования тёмных линий в спектре Солнца, убедился, что их причина не оптический обман, а сама природа солнечного света. Впоследствии их назвали фраунгоферовыми линиями солнечного спектра. Фраунгофер обнаружил подобные линии и в спектрах Венеры и звезды Сириус.

Йозеф Фраунгофер
(1787—1826)
Немецкий физик, знаменитый оптик.

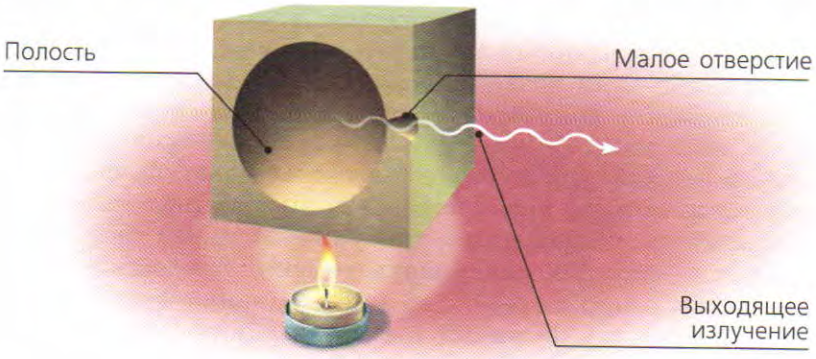
С помощью спектрального анализа Солнца в 1868 г. был открыт неизвестный ранее химический элемент, названный гелием (от греч. *helios* — Солнце). На Земле этот газ открыли только через 27 лет. Изучение линейчатых спектров Солнца и других звёзд показало, что они состоят из тех же химических элементов, которые имеются на Земле.

Спектральный анализ обладает рекордной чувствительностью: с его помощью можно обнаружить примесь нужного элемента в составе сложного вещества даже в том случае, когда его масса не превышает тысячной доли микрограмма.

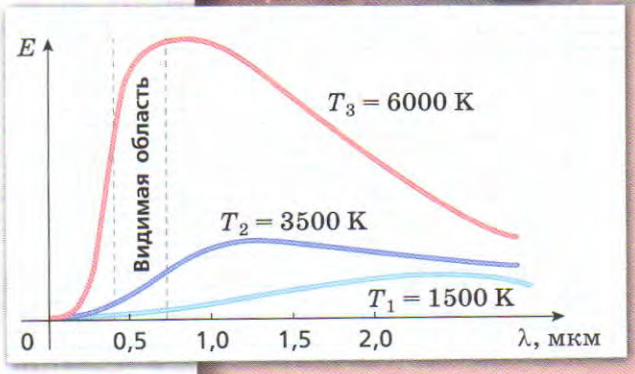
Используемые в лазерной спектроскопии лазеры с перестраиваемой частотой позволяют обнаружить отдельные атомы элемента при концентрации порядка 100 атомов на 1 см^3 объёма газа.

ИЗЛУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО ЧЁРНОГО ТЕЛА Как показали измерения, спектр излучения тел, нагретых до одной и той же температуры, зависит от рода вещества. Однако если внутри образца сделать полость и соединить её с внешним пространством при помощи малого отверстия, то спектральный состав излучения из отверстия уже не

Спектральный состав света, излучаемого звездой, зависит от температуры её поверхности. По характеру линейчатых спектров было установлено, что чем выше температура звезды, тем на меньшие длины волн приходятся наиболее интенсивные линии спектра. Поэтому одни звёзды кажутся нам красными, а другие — белыми или голубыми.



будет зависеть от вещества. Это излучение получило название *излучения абсолютно чёрного тела*. Смысл столь необычного названия можно понять на основе следующего мысленного опыта. Вместо того чтобы нагревать полость изнутри, будем освещать её снаружи узким световым пучком. В этом случае независимо от вещества образца практически все лучи, попавшие в полость, в результате многократных отражений внутри полости наружу практически не выйдут. Мы будем видеть перед собой чёрное отверстие.



В окружающем нас мире нет тел, которые либо только излучают, либо только поглощают излучение. Опыты показали, что излучательная и поглощательная способности тел тесно взаимосвязаны. Чем больше излучательная способность тела при данной температуре, тем лучше оно поглощает энергию при той же температуре.

Зависимость энергии излучения абсолютно чёрного тела от длины волны была тщательно изучена экспериментально. Эта зависимость имеет характерную особенность: существует такая длина волны λ_m, на которую приходится максимум энергии, испускаемой абсолютно чёрным телом. И хотя в действительности абсолютно чёрных тел не существует, по своим оптическим свойствам к ним близки сажа, чёрный бархат, чёрная бумага и т. п. Тщательно выполненные измерения показали, что эти тела действительно являются наиболее интенсивными источниками теплового излучения.

Были предприняты многочисленные попытки описать на основе теории Максвелла спектр излучения абсолютно чёрного тела, однако все эти попытки оказались тщетными.

Макс Планк
(1858—1947)
Выдающийся немецкий физик, один из основоположников квантовой теории.

КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА Выдающийся немецкий учёный М. Планк в 1900 г. нашёл решение проблемы. Он получил формулу, которая детально воспроизвела весь спектр излучения абсолютно чёрного тела, но не имела никакого теоретического обоснования. Более того, при выводе формулы Планк был вынужден сделать совершенно необычное предположение о том, что излучение испускается отдельными порциями, или *квантами*, энергия которых определяется формулой

$$E = h\nu,$$

где ν — частота излучения, а h — коэффициент пропорциональности, названный впоследствии *постоянной Планка*:

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34}\ \text{Дж} \cdot \text{с}.$$

Революционная идея Планка о прерывистом характере излучения абсолютно чёрного тела явилась основой для построения совершенно новой теории — *квантовой физики*.

...Квант действия должен был играть в физике фундаментальную роль. Появление его возвещало нечто совершенно новое, дотоле неслыханное, что, казалось, требовало преобразования самых основ нашего физического мышления...

Макс Планк

ВОПРОСЫ:

- Какие тела излучают сплошные спектры, а какие — линейчатые?
- Что такое спектральный анализ?
- Что такое абсолютно чёрное тело? Какова особенность его спектра испускания?
- В чём заключается суть квантовой гипотезы Планка?

47 АТОМ БОРА

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Почему планетарная модель атома Резерфорда несовершенна.
- Что представляет собой атом согласно модели, предложенной Бором.

ВСПОМНИТЕ:

- Что представляет собой атом согласно планетарной модели?
- Что представляют собой линейчатые спектры испускания и поглощения?

Планетарная модель атома Резерфорда основывалась на законах классической физики Ньютона. Однако скоро стало понятно, что движение электронов в атомах подчиняется другим закономерностям.

НЕДОСТАТКИ ПЛАНЕТАРНОЙ МОДЕЛИ АТОМА Планетарная модель атома Резерфорда имела серьёзные недостатки. Согласно законам электромагнетизма электроны, движущиеся с ускорением вокруг ядра атома, излучают электромагнитные волны. Поэтому их энергия должна уменьшаться. В результате через очень малое время электрон должен был бы упасть на ядро, и атом прекратил бы своё существование. Но ничего подобного не происходит — атом устойчив. Это противоречие модели атома Резерфорда с фактами говорило о том, что к явлениям микромира законы классической физики неприменимы. Дополнительным аргументом в пользу такого заключения служил также тот факт, что планетарная модель никак не объясняла, почему каждому элементу соответствуют определённые линейчатые спектры и почему линии испускания и поглощения в спектрах совпадают.

МОДЕЛЬ БОРА В 1913 г. датский учёный Н. Бор, исходя из планетарной модели атома, попытался объяснить все возникшие противоречия. Бор выдвинул два предположения, которые назвал *постулатами*.

Постулат 1. Атом может находиться в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия E_n (n — номер состояния). Находясь в стационарных состояниях, атомы не излучают и не поглощают энергию.

Согласно первому постулату Бора электрон в атоме может находиться не на любых орбитах, а лишь на стационарных уровнях, где излучения не происходит.

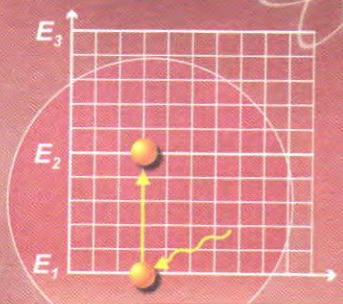
Постулат 2. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения, энергия которого равна разности энергий атома в двух стационарных состояниях:

$$h\nu = E_m - E_n,$$

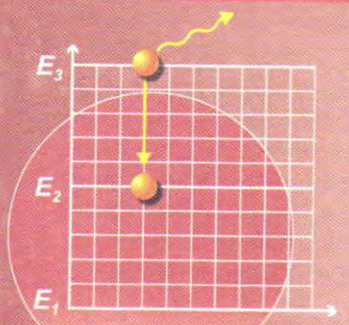
где $h\nu$ — энергия кванта. Впоследствии квант излучения получил название *фотона*.

При переходе электрона с орбиты, на которой он имеет более высокую энергию, на другую орбиту с более низкой энергией *излучается* фотон. Если электрон переходит из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией, то фотон *поглощается*.

Следует отметить, что на самом деле Бор не отвергал полностью законы классической физики. Выдвинутые им постулаты лишь налагали определённые запреты на



Поглощение фотона



Излучение фотона

Постулатом называется некоторое утверждение, принимаемое априори, т. е. без опоры на какие-то известные ранее теории, факты, экспериментальные данные и т. п. Аналогом постулатов в математике является аксиома.

многообразие форм классических траекторий электрона в атоме водорода.

Модель Бора объясняет также и происхождение линейчатых спектров. Когда свет от нагретого газа проходит через призму, на экране мы видим определённую последовательность цветных полос — спектральных линий. Бор объясняет их появление перемещением электронов из одного стационарного состояния в другое. Даже простейший атом водорода с одним электроном имеет сложный спектр. Бор показал, что он точно связан с порядком возможных орбитальных переходов, которые может сделать этот единственный электрон.

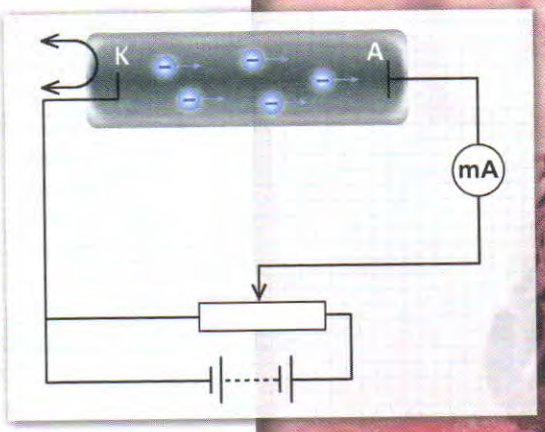
Неправильно думать, что один электрон атома водорода способен излучать всю серию спектральных линий. Когда один электрон переходит с одной орбиты на другую, он излучает только один фотон. Когда мы рассматриваем несколько атомов водорода, то различные электроны переходят на разные орбиты, и мы получаем весь линейчатый спектр.

ОПЫТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ Согласие расчёта положения спектральных линий атома водорода по модели Бора с опытными данными свидетельствовало о существовании стационарных состояний атома. Однако, потребовались дополнительные эксперименты, которые могли подтвердить или опровергнуть этот главный постулат теории Бора.

По-другому постулаты Бора называют правилами квантования, которые он ввёл без всякого обоснования. Этот пример является одним из удивительных случаев озарения в науке. Известно высказывание великого учёного А. Эйнштейна по этому поводу: «Это высшая музыкальность в области теоретической мысли.»

Такие опыты были осуществлены в 1913 г. немецкими физиками Дж. Франком и Г. Герцем. В этих опытах изучалось столкновение электронов, ускоренных электрическим полем, с атомами паров ртути, заполнявших стеклянную трубку.

Опыты показали, что с ростом напряжения между электродами трубки возрастала и сила тока в анодной цепи. Это свидетельствовало о том, что кинетическая энергия электронов, излучаемых катодом *К*, увеличивалась. Однако при некотором определённом значении напряжения происходило резкое уменьшение силы тока в цепи анода *А*. Последнее означало, что электроны, получившие определённый запас кинетической энергии, практически полностью теряли её в результате столкновений с атомами ртути. При этом бóльшая часть энергии электронов превращалась в энергию возбуждения атомов ртути. Такие столкновения называются *неупругими столкновениями*.



В тех же случаях, когда энергия электронов была меньше некоторого определённого значения, их столкновения с атомами носили *упругий* характер. При таких столкновениях электроны не передавали энергию атомам. Отсюда следовало, что внутренняя энергия атома не может принимать произвольные значения. Другими словами, у атома существует набор определённых дискретных состояний, энергии которых различаются. Поэтому и изменения энергии атома могут носить только дискретный характер.

Таким образом, опыты Франка и Герца доказали наличие у атомов стационарных состояний, что полностью подтвердило основные положения теории Бора.

ВОПРОСЫ:

- Какие недостатки имела планетарная модель атома Резерфорда?
- Сформулируйте постулаты Бора.
- Какие опыты подтвердили основные положения теории Бора?

48 РАДИОАКТИВНОСТЬ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое радиоактивность.
- Что такое радиоактивное излучение.
- Какие частицы входят в состав радиоактивного излучения.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое атом?
- Какие частицы входят в состав атома и в состав атомного ядра?

Открытие электрона оказалось важным, но не решающим аргументом, свидетельствующим о сложном строении атома. Практически одновременно с открытием электрона были получены данные, радикально изменившие взгляды учёных на строение материи.

ОТКРЫТИЕ БЕККЕРЕЛЯ Одним из первых доказательств сложного строения атома стало открытие в 1896 г. А. Беккерелем *естественной радиоактивности*. Это открытие оказалось случайным, поскольку на самом деле Беккерель изучал воздействие солнечного излучения на различные соли и минералы.

В это время уже было известно явление фосфоресценции — свечение ряда веществ, возникающее после их облучения солнечными лучами. Экспериментируя с солями урана, Беккерель завернул фотопластинку в плотную чёрную бумагу, положил на неё сверху маленький кусочек урановой соли и выставил всё это на солнечный свет. После проявления фотопластинки на ней обнаружилось тёмное пятно на том месте, где лежала крупинка соли. Беккерель полагал, что это следствие явления фосфоресценции. Но однажды из-за облачной погоды опыт пришлось отложить, и пластинка с солью урана была помещена в светонепроницаемый ящик стола. Несколько дней спустя Беккерель на всякий случай проявил фотопластинку и с удивлением обнаружил на ней тёмное пятно. Учёный понял, что соли урана самопроизвольно без всякого освещения излучают какие-то неизвестные лучи.

Антуан Анри Беккерель
(1852—1908)
Французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике, один из первооткрывателей радиоактивности.

ОПЫТЫ КЮРИ Многие учёные стали повторять опыты Беккереля, и прежде всего супруги Мария и Пьер Кюри. Они пытались проверить, нет ли среди веществ, не исследованных Беккерелем, таких, которые обладают таинственными свойствами урана.

В первых экспериментах поиски велись с помощью электроскопа. Известно, что воздух — изолятор, поэтому положение листочков заряженного электроскопа не должно меняться. Но если воздух подвергнуть действию излучения, тогда он становится проводником. Этим свойством излучения и воспользовались учёные для поиска новых радиоактивных элементов. М. Кюри подносила к заряженному электроскопу различные минералы и смотрела, как ведут себя его листочки. В 1898 г. было обнаружено, что подобные лучи испускает ещё один элемент — торий. В том же 1898 г. супруги Кюри выделили из урановой смоляной руды два новых химических элемента — радий и полоний. От радия и произошёл термин «радиоактивность» (от лат. *radiare* — излучать, испускать лучи). *Радиоактивность* — это способность атомов некоторых химических элементов к самопроизвольному излучению.

Мария Склодовская-Кюри
(1867—1934)
Выдающийся физик и химик, дважды лауреат Нобелевской премии, занималась исследованием радиоактивности.

Учёные заметили, что пробирка, в которой находятся радиоактивные соли радия, на ощупь кажется теплее, чем окружающие тела. Таким образом, было обнаружено, что радиоактивные вещества выделяют энергию. Например, 1 г радия выделяет 570 Дж теплоты в час. За 6 суток её выделится столько, что можно довести до кипения 200 г воды.

СОСТАВ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В 1899 г. Э. Резерфорд провёл опыт, в результате которого было обнаружено, что радиоактивное излучение имеет сложный состав.

Резерфорд построил установку, которая представляла собой толстостенный свинцовый ящик с прорезью. Внутрь ящика он помещал крупицы радия. Из ящика сквозь узкое отверстие выходил направленный и сфокусированный пучок радиоактивного излучения и попадал на фотопластинку. После проявления фотопластинки на ней обнаруживалось одно тёмное пятно в том месте, куда попадал пучок.

Затем всю установку Резерфорд поместил в сильное магнитное поле. Он рассуждал так: если радиоактивное излучение является потоком частиц с положительным зарядом, то на каждую частицу в магнитном поле действует сила, направление которой можно определить по правилу левой руки. На рисунке она направлена ввверх, и весь поток частиц отклоняется вверх. Если радиоактивное излучение — это поток частиц, имеющих отрицательный заряд, то он отклоняется вниз. Если это поток частиц, не имеющих заряда, то пучок не отклоняется.

После проявления на фотопластинке были обнаружены три пятна: центральное, которое было и раньше, и два дополнительных — по разные стороны от центрального. Отсюда следовало, что в пучке излучения действительно присутствовали частицы, обладающие зарядами противоположных знаков.

Положительно заряженные частицы были названы **альфа-частицами** (α-частицы), а отрицательно заряженные — **бета-частицами** (β-частицы).

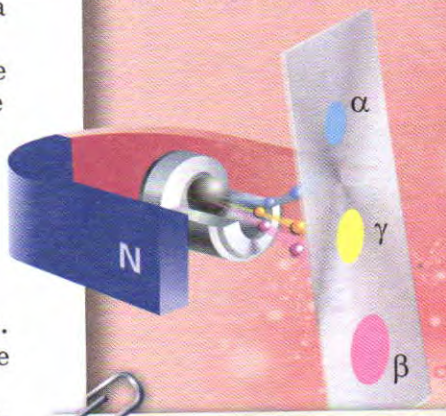
Центральный поток, очевидно, представлял собой излучение, не содержащее заряженных частиц. Это излучение получило название **гамма-излучения** (γ-излучение).

Более детальные исследования различных физических характеристик этих частиц, в частности электрического заряда и массы, позволили установить, что α-частица — это лишённый обоих электронов атом гелия, а β-частица — это электрон.

Было также установлено, что γ-излучение представляет собой электромагнитное излучение с очень короткими длинами волн.

Отметим, что α-, β- и γ-излучения оказались одними из главных инструментов в дальнейшем изучении структуры атома и атомного ядра.

Пьер Кюри
(1859—1906)
Французский учёный-физик, лауреат Нобелевской премии по физике, один из первых исследователей радиоактивности.



При изучении трёх видов излучений выяснилось, что путь α-частиц в воздухе невелик. Они полностью задерживаются листом бумаги.
Более проникающим является β-излучение. Оно задерживается цинковой пластинкой толщиной в несколько миллиметров.
Самые проникающие — это γ-лучи. Они легко проходят через вещество. Чтобы их остановить, нужна либо свинцовая пластина толщиной 5 см, либо 30 см бетона, либо 60 см грунта.

ВОПРОСЫ:

- Что называют радиоактивностью?
- Какие заряженные частицы входят в состав радиоактивного излучения?

49 СОСТАВ АТОМНОГО ЯДРА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое зарядовое и массовое число.
- Что такое изотопы.

ВСПОМНИТЕ:
- Какие существуют модели атомов?
- Какие частицы входят в состав атомного ядра?

После открытия Резерфордом в 1911 г. атомного ядра многочисленные эксперименты подтвердили, что атомные ядра, так же как и сами атомы, имеют сложную структуру.

ЗАРЯДОВОЕ ЧИСЛО Исследования показали, что заряд атомного ядра равен произведению порядкового номера Z элемента в периодической таблице Д. И. Менделеева на элементарный заряд e:

$$q_я = Ze.$$

Таким образом, порядковый номер химического элемента определяет заряд атомного ядра, а следовательно, и число электронов в атоме. Поэтому число Z называют *зарядовым числом*. Например, у гелия зарядовое число $Z = 2$, а у углерода $Z = 6$.

ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА В 1913 г. Резерфорд выдвинул гипотезу, согласно которой ядро атома водорода представляет собой элементарную частицу — протон, которая входит в состав ядер всех химических элементов. В то время уже было известно, что массы атомов химических элементов превышают массу атома водорода в целое число раз (т. е. кратны ей).

Однако ядро не может состоять из одних протонов. Если бы это было так, то масса ядра любого химического элемента равнялась бы массе Z протонов. Но на самом деле массы ядер всех элементов гораздо больше. Поэтому в 1920 г. Резерфорд высказал предположение о существовании электрически нейтральной частицы с массой, приблизительно равной массе протона. Позднее эта частица была обнаружена экспериментально. Её назвали **нейтроном**.

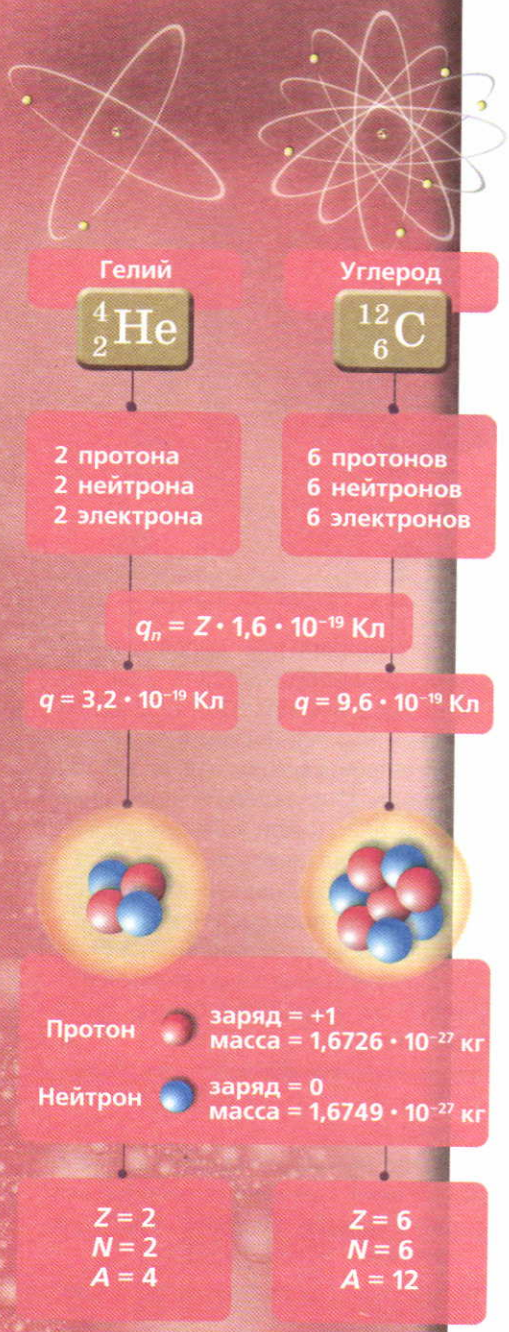
В 1932 г. советские учёные Е. Н. Гапон и Д. Д. Иваненко и немецкий физик Гейзенберг предложили *протонно-нейтронную модель ядра атома*. По этой теории все ядра состоят из двух видов частиц — протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны называют **нуклонами** (от лат. *nucleus* — ядро), а ядра атомов — **нуклидами**.

МАССОВОЕ ЧИСЛО Общее число нуклонов в ядре называют **массовым числом** и обозначают буквой A. Массовое число принято выражать в атомных единицах массы (а. е. м.) и округлять до целых чисел.Атомная единица массы выражают через массу атома углерода; она равна $^1/_{12}$ части массы атома углерода:

$$1 \text{ а. е. м.} = 1{,}66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}.$$

Число протонов в ядре соответствует порядковому (атомному) номеру элемента Z. Разница между массовым и зарядовым числом равна числу нейтронов N. Следовательно, $A = Z + N$.

Ядро любого атома обозначается буквенным символом элемента. Вверху указывается значение его массо-



вого числа A, а внизу — зарядового числа Z. Например, для углерода массовое число равно 12, а зарядовое число равно 6, поэтому записывают: $^{12}_{6}C$.

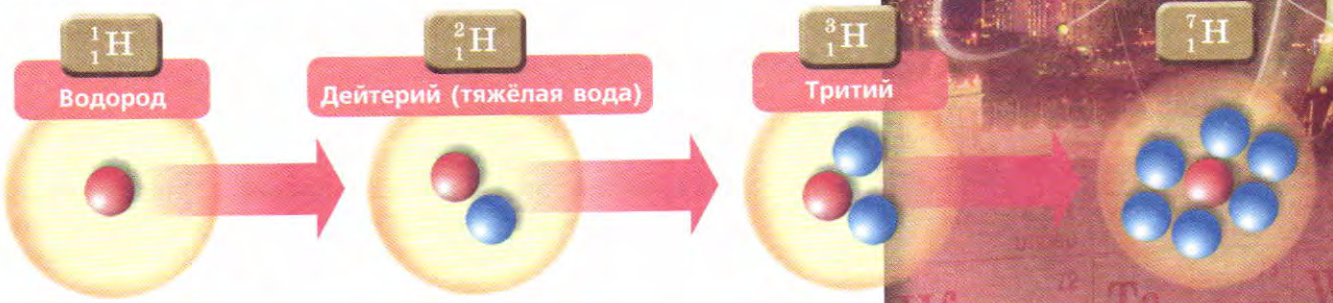
В общем случае любой химический элемент периодической таблицы Д. И. Менделеева можно представить в виде $^{A}_{Z}X$, где X — символ химического элемента.

ИЗОТОПЫ Учёные, исследуя свойства радиоактивных веществ и измеряя массы их атомных ядер, обнаружили, что у одного и того же химического элемента встречаются атомы с отличающимися по массе ядрами.

В ядрах атомов одного и того же химического элемента число протонов всегда одно и то же и равно порядковому номеру этого элемента. Следовательно, ядра атомов должны различаться числом нейтронов.

Ядра, имеющие одинаковое число протонов и разное число нейтронов, называют **изотопами** (от греч. *isos* — одинаковый и *topos* — место). Как видно из названия, изотопы занимают одно и то же место в периодической системе химических элементов и, следовательно, обладают одинаковыми химическими свойствами.

Например, в ядрах водорода всегда 1 протон, а число нейтронов может быть равно 0, 1, 2. В настоящее время в лабораториях получены изотопы водорода с числом нейтронов 3, 4, и даже 6. Из всех известных изотопов только изотопы водорода имеют названия: дейтерий (изотоп $^{2}_{1}H$) и тритий (изотоп $^{3}_{1}H$).



Изотопы бывают устойчивые (стабильные) и неустойчивые (радиоактивные). В настоящее время известно около 280 стабильных изотопов химических элементов и более 2000 радиоактивных изотопов.

Обычно изотопы называют по их массовым числам. Например, существуют радиоактивные изотопы свинца: свинец-210, свинец-211, свинец-212 и свинец-214.

Изотопы находят широкое применение в различных технологических процессах, медицине и здравоохранении, науке и прикладных исследованиях. Как правило, природные элементы представляют собой смесь нескольких изотопов, поэтому возникает задача их разделения. Как известно из опыта, магнитное поле искривляет траекторию движения заряженных частиц. На этом свойстве магнитного поля основано действие устройства, называемого масс-сепаратором, используемом для разделения изотопов по массовому числу.

Радиус ядра можно оценить по формуле

$$R = r_0 A^{1/3},$$

где $r_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-15}$ м (1,3 фм); A — массовое число.

По сравнению с размерами самого атома (около 10^{-10} м) ядро атома крайне мало (приблизительно 10^{-15} м), т. е. ядро меньше атома на 5 порядков (в 100 000 раз). Представим, что атомное ядро увеличили до размеров горошины, тогда диаметр атома будет равен высоте Останкинской башни.

ВОПРОСЫ:

- Что такое зарядовое и массовое числа?
- Чем могут различаться ядра атомов одного и того же химического элемента?

50 ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Что такое ядерные силы.
- Что такое энергия связи атомных ядер.
- Что такое ядерные реакции.
- Как открыли протон и нейтрон.

ВСПОМНИТЕ:
- Какие частицы входят в состав атомных ядер?
- Какие взаимодействия существуют в природе?

Как известно, ядра атомов являются весьма устойчивыми образованиями, хотя в их состав входят одинаково заряженные частицы — протоны. Поскольку размеры ядер очень малы — порядка 10^{-15} — 10^{-14} м, между протонами должны существовать огромные силы электрического отталкивания. Поэтому возникает вопрос: какое взаимодействие препятствует взаимному отталкиванию между одноимённо заряженными частицами?

ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ Вы знаете, что, кроме электромагнитных сил, в природе существуют также гравитационные силы. Может быть, стабилизирующую роль в ядрах играет именно гравитационное взаимодействие между нуклонами? Но, как показывают расчёты, сила гравитационного притяжения между двумя протонами в ядре пренебрежимо мала по сравнению с силой электрического отталкивания. Этот результат позволяет сделать вывод о том, что между ядерными частицами, по-видимому, действуют силы особой природы, радикально отличающиеся от гравитационных и электромагнитных сил. Эти силы называют **ядерными силами**. Ядерное взаимодействие во много раз превосходит электромагнитное, поэтому его называют *сильным взаимодействием*.

Другой особенностью ядерных сил является то, что они очень быстро убывают с увеличением расстояния между ядерными частицами: на расстоянии 10^{-14} м их действием можно пренебречь.

Сейчас мы можем указать причину неудач алхимиков в попытках превратить один химический элемент в другой, т. е. фактически преобразовать ядра атомов: энергия связи в ядрах примерно в миллион раз превышает химическую энергию связи атомов между собой.

	Водород	Дейтерий	Гелий
Число протонов в ядре	1	1	2
Число нуклонов в ядре	1	2	4
Энергия связи ядра, Дж	0	$3{,}5 \times 10^{-13}$	$4{,}5 \times 10^{-12}$

Значения энергии связи ядер

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР Сразу же оговоримся, что с понятием энергии связи мы сталкиваемся при изучении самых разных разделов физики. Энергию связи можно понимать как работу, которую нужно совершить, чтобы развести взаимодействующие тела на такое расстояние, когда их взаимодействием можно пренебречь. Энергия связи обеспечивает устойчивость таких непохожих систем, как планетные системы, молекулы и их образования, атомы, а также атомные ядра. Поэтому энергией связи ядра называют ту энергию, которая необходима для полного расщепления ядра на составляющие частицы.

Нахождение энергии связи ядер стало возможным после открытия А. Эйнштейном в 1905 г. взаимосвязи массы и энергии:

$$E_0 = mc^2,$$

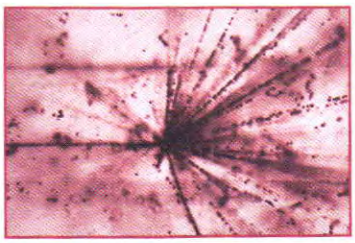
где c — скорость света в вакууме.

Как показали точные измерения, масса ядра всегда меньше суммы масс слагающих его протонов и нейтронов. Это означает, что при слиянии свободных протонов и нейтронов в ядро должна выделяться энергия в виде излучения γ-квантов. Если уменьшение массы обозначить Δm (дефект массы), то значение выделившейся энергии можно найти по формуле $E = \Delta mc^2$.

Первым, кто предположил, за счёт какой энергии обеспечивается устойчивость атомных ядер, был американский физик У. Харкинс, который ввёл в ядерную физику термин «дефект массы».

По этой формуле можно рассчитать значение энергии, выделяющейся при различных ядерных реакциях.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ Процесс превращения ядер атомов одних элементов в ядра атомов других элементов называют *ядерной реакцией*. Например, на рисунке показана фотография превращения ядра железа в ядра различных лёгких элементов (протонов, ядер гелия и т. д.) в результате взаимодействия с ядром серебра.



ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА Впервые ядерную реакцию элементов осуществил Э. Резерфорд в 1919 г.

Установка Резерфорда состояла из источника α-частиц и регистратора этих частиц — флуоресцирующего экрана. Всё это устройство было помещено в сосуд с воздухом. На экране можно было наблюдать бледные вспышки. Позднее учёные обнаружили, что в воздухе происходит ядерная реакция, в которой α-частицы сталкиваются с ядрами азота. В результате образуется ядро кислорода и ядро водорода. Ядро водорода Резерфорд назвал *протоном*.

Для осуществления ядерной реакции необходимо, чтобы взаимодействующие частицы (ядра) сблизились на расстояние, сравнимое с размерами ядер, т. е. до радиуса действия ядерных сил. Для этого частицы должны обладать достаточно высокой энергией.

ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА В 1920 г. Э. Резерфорд высказал предположение о возможном существовании ядерной частицы, масса которой равна массе протона, а заряд отсутствует.

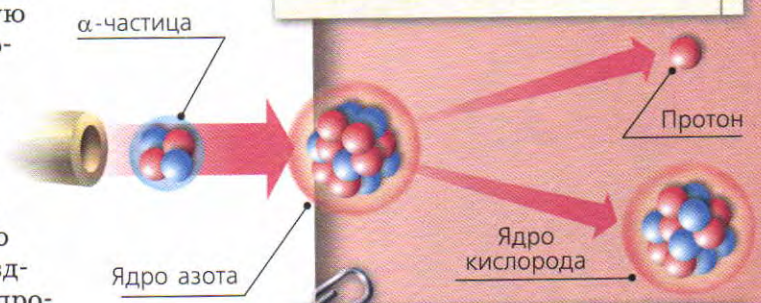
В 1930 г. немецкие физики В. Бете и Г. Беккер обнаружили, что при бомбардировке бериллия α-частицами возникало неизвестное излучение, которое не отклонялось электрическим и магнитным полями. Это говорило о том, что излучение не содержит заряженные частицы. Излучение обладало большой проникающей способностью, его не могли задерживать экраны, которые полностью поглощали γ-лучи.

Изучением нового вида излучения занялся английский физик Дж. Чедвик, ученик Резерфорда. В 1932 г. Чедвик установил, что это излучение способно выбивать из парафина протоны и состоит из электрически нейтральных частиц, масса которых близка к массе протона. Эти частицы, которые назвали *нейтронами*, обозначаются символом ${}_{0}^{1}n$.

Ядерные реакции записывают в виде специальных формул, в которых обозначены атомные ядра и элементарные частицы. Например, ядерную реакцию получения протона можно записать следующим образом:

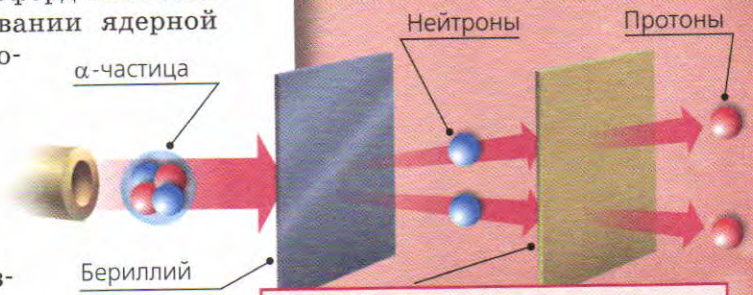
$$ {}_{7}^{14}N + {}_{2}^{4}He \rightarrow {}_{8}^{17}O + {}_{1}^{1}H $$

В процессе ядерных реакций выполняются законы сохранения массового (14 + 4 = 17 + 1) и зарядового (7 + 2 = 8 + 1) числа.



Масса нейтрона всего лишь на 0,0014 а. е. м. превышает массу протона. Однако столь малое различие в массах радикально сказывается на их свойствах: нейтрон в отличие от протона является нестабильной частицей.

$$ {}_{4}^{9}Be + {}_{2}^{4}He \rightarrow {}_{6}^{12}C + {}_{0}^{1}n $$



ВОПРОСЫ:

- Как соотносится ядерное взаимодействие с другими видами взаимодействий в природе?
- В чём заключается взаимосвязь энергии и массы?
- На чём основан расчёт энергии, выделяющейся в ядерных реакциях?
- Что такое ядерная реакция?

51 ДЕЛЕНИЕ И СИНТЕЗ ЯДЕР

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Какие частицы и ядра образуются при делении ядер урана.
- Как происходит процесс цепной ядерной реакции.
- Какие реакции называют термоядерными.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое ядерные реакции?
- Какие частицы входят в состав атомного ядра?
- Что такое ядерные силы?

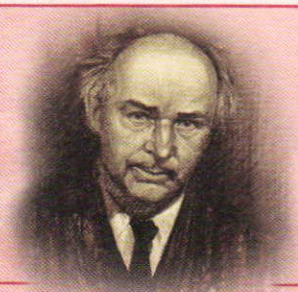
Существует два типа ядерных реакций: реакции деления и реакции слияния (синтеза).

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ
- Деление тяжёлых ядер на более лёгкие
- Слияние лёгких ядер в более тяжёлые

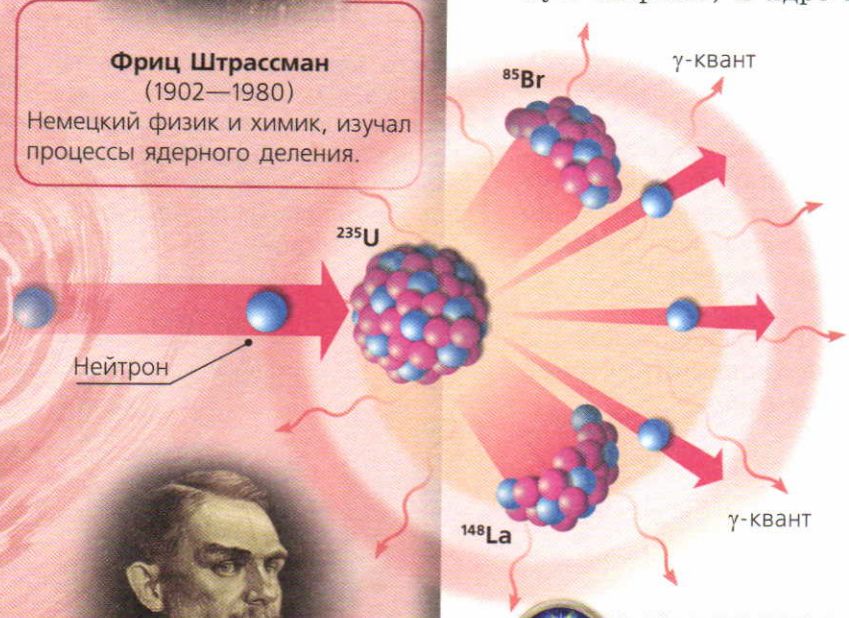
ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА В 1939 г. немецкие учёные Отто Ган и Фриц Штрассман сделали открытие, которое коренным образом изменило жизнь человечества. Это открытие — деление ядер урана на две части при их бомбардировке нейтронами. Был создан и новый источник энергии — ядерная энергетика, и самое страшное оружие — ядерное оружие.

Чтобы понять, почему ядро урана под действием нейтрона начинает делиться, представим себе ядро атома в виде жидкой капли.

Нейтрон, попадая в ядро, сообщает ему дополнительную энергию, и ядро начинает колебаться. В ядре, помимо ядерных сил, присутствует сила электростатического отталкивания, действующая между протонами. Как только крайние части ядра во время колебаний отдаляются на расстояние, где ядерные силы уменьшаются, тогда ядро разделяется. Как правило, образуется два тяжёлых осколка и два–три нейтрона. При этом освобождается энергия, которая представляет собой кинетическую энергию ядер-осколков, нейтронов и γ-квантов. Оценить эту энергию можно по разности масс образовавшихся осколков и массы первичного ядра.



Фриц Штрассман
(1902—1980)
Немецкий физик и химик, изучал процессы ядерного деления.

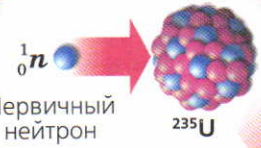


Советскими учёными К. А. Петржаком и Г. Н. Флёровым в 1940 г. было установлено, что уран способен делиться и без внешнего воздействия, т. е. самопроизвольно. Для ядер атомов урана самопроизвольное деление — это редкий процесс. Например, в 1 г урана происходит около 20 таких делений в час.

Отто Ган
(1879—1968)
Немецкий химик, лауреат Нобелевской премии по химии. Изучал расщепление урана.

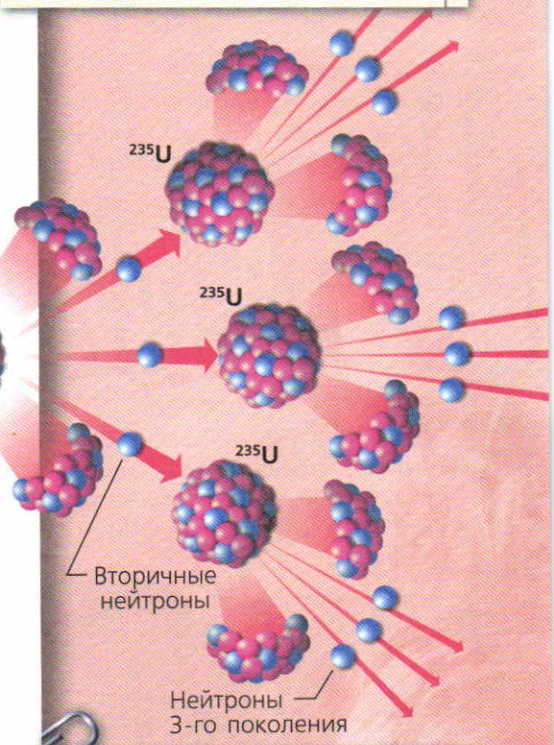
Кроме урана, некоторые элементы, стоящие в конце периодической системы Менделеева, также способны делиться не только при их бомбардировке нейтронами, но и самопроизвольно.

ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР При делении одного ядра урана высвобождается энергия, которая в пересчёте на один протон или нейтрон составляет порядка 10^{-11} Дж. Эта энергия более чем в миллион раз превышает энергию, выделяющуюся в химических реакциях, например в реакциях горения топлива. При работе же крупной ядерной установки одновременно делится очень большое число ядер урана, поэтому выделяется огромная энергия. Но где взять необходимое для такого деления ядер число нейтронов? Эти нейтроны поставляет сам уран. Вспомним, что при делении урана, кроме двух тяжёлых осколков деления, выделяются и два–три нейтрона. Представим себе, что у нас есть некоторое количество ядер урана. Образовавшиеся в результате первого деления нейтроны смогут разделить новые ядра урана, и при этом делении снова образуются нейтроны. После каждого деления увеличивается число нейтронов и происходит всё больше делений. Такой процесс называют **цепной ядерной реакцией.**



Однако нескольких ядер урана недостаточно для протекания цепной ядерной реакции, так как образующихся нейтронов не хватает для деления последующих ядер. Наименьшая масса вещества, при которой возможно протекание цепной реакции, называется *критической массой*.

При делении 1 кг урана-235 выделяется энергия, которую можно получить при сжигании 3000 т каменного угля, это примерно железнодорожный состав из 60 вагонов.



ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ Кроме реакции деления, огромная энергия выделяется и в реакциях синтеза (слияния) лёгких ядер. Такие реакции происходят в недрах Солнца и других звёзд, состоящих в основном из водорода. Например, четыре ядра водорода (протона) в результате ядерных реакций образуют ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. Энергетический выход реакций слияния чрезвычайно высок, поскольку синтез лёгких ядер сопровождается примерно в шесть раз большим выделением энергии на один нуклон по сравнению с делением тяжёлых ядер. Подобные реакции могут протекать только при очень высоких температурах, поэтому их называют *термоядерными*.

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ НА СОЛНЦЕ

- $^1_1H + ^1_1H \longrightarrow ^2_1H$ и выделяется энергия
- $^1_1H + ^2_1H \longrightarrow ^3_2He$ и выделяется энергия
- $^3_2He + ^3_2He \longrightarrow ^4_2He + 2^1_1H$ и выделяется энергия

В атомной бомбе происходят неуправляемые цепные реакции. В них за короткое время распадается огромное количество ядер, в результате чего выделяется колоссальная энергия.
Управляемые цепные реакции используются в устройствах, называемых ядерными (атомными) реакторами. Первый ядерный реактор был построен в 1942 г. в США под руководством итальянского физика Э. Ферми. В России первый реактор был построен в 1946 г. под руководством И. В. Курчатова.

Неуправляемая термоядерная реакция протекает в водородной бомбе. Первая водородная бомба была создана в СССР под руководством А. Сахарова и В. Гинзбурга и взорвана в 1953 г.
Одна из установок, в которой изучаются условия для проведения управляемых термоядерных реакций, называется «Токамак».

ВОПРОСЫ:

- Какую ядерную реакцию называют цепной?
- Какую реакцию называют термоядерной?

52 АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Как можно использовать энергию ядра атома.
- Как устроен атомный реактор.
- Какие преимущества и недостатки у атомной энергетики.

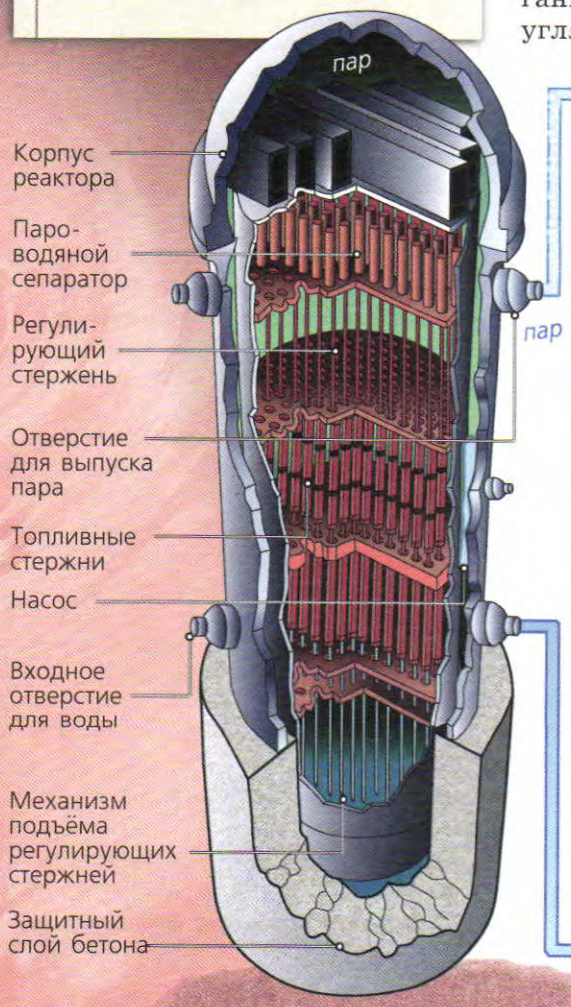
ВСПОМНИТЕ:
- Из чего состоит ядро атома?
- Какие ядра называют изотопами?
- Что такое ядерные реакции?

Наша жизнь немыслима без потребления энергии. Мы готовим пищу, отапливаем дома, заряжаем аккумуляторы мобильных телефонов и т. п. Для жизни нам необходима энергия, которую мы получаем главным образом при сжигании угля, нефти и газа. Но человечество давно осознало, что процесс освоения месторождений горючих полезных ископаемых не может продолжаться бесконечно. Поэтому человек находится в непрерывном поиске новых источников энергии.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА Открытие деления тяжёлых ядер привело к возникновению и развитию атомной энергетики, основанной на использовании энергии, запасённой внутри ядра атома. Установки, на которых эта энергия преобразуется в электрическую, получили название *атомных электростанций* (АЭС).

На современных АЭС для производства электроэнергии используется энергия, выделяющаяся в результате цепной реакции деления. В качестве источника ядерной энергии используется преимущественно уран-235. При делении ядер 1 кг урана-235 в среднем выделяется столько энергии (82 ТДж), сколько выделяется при сжигании примерно 2000 т нефти или 3000 т каменного угля.

Первая атомная электростанция в нашей стране начала действовать в 1954 г. в городе Обнинске, её мощность составляла 5 МВт.



АТОМНЫЙ РЕАКТОР Сердцем атомной электростанции является атомный реактор, который предназначен для осуществления управляемых цепных ядерных реакций. Главную часть реактора называют **активной зоной**.

В активной зоне расположены тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), имеющие трубчатую форму и содержащие топливо. Топливо для реактора представляет собой таблетки, состоящие из оксида урана-235 и запакованные в ТВЭЛы. Топливо в реакторах работает от 3 до 5 лет, после чего ТВЭЛы извлекают из реактора и заменяют на новые.

Чтобы ядерное топливо использовалось максимально эффективно, в активную зону реактора вводят *замедлители*, которые замедляют нейтроны, выделяющиеся при цепных реакциях. Это обосновано тем, что ядра урана-235 с большей вероятностью делятся под действием медленных нейтронов. В качестве замедлителей в реакторе чаще всего используют такое вещество, как графит, который состоит из чистого углерода.

Для управления цепной реакцией в реакторе предусмотрены **регулирующие стержни**, которые состоят из материалов

(соединения кадмия или бора), поглощающих нейтроны. Для того чтобы остановить цепную реакцию, регулирующие стержни полностью погружают в активную зону реактора. Чтобы заново запустить реактор, стержни постепенно выводят из активной зоны до тех пор, пока не начнётся цепная реакция деления ядер урана.

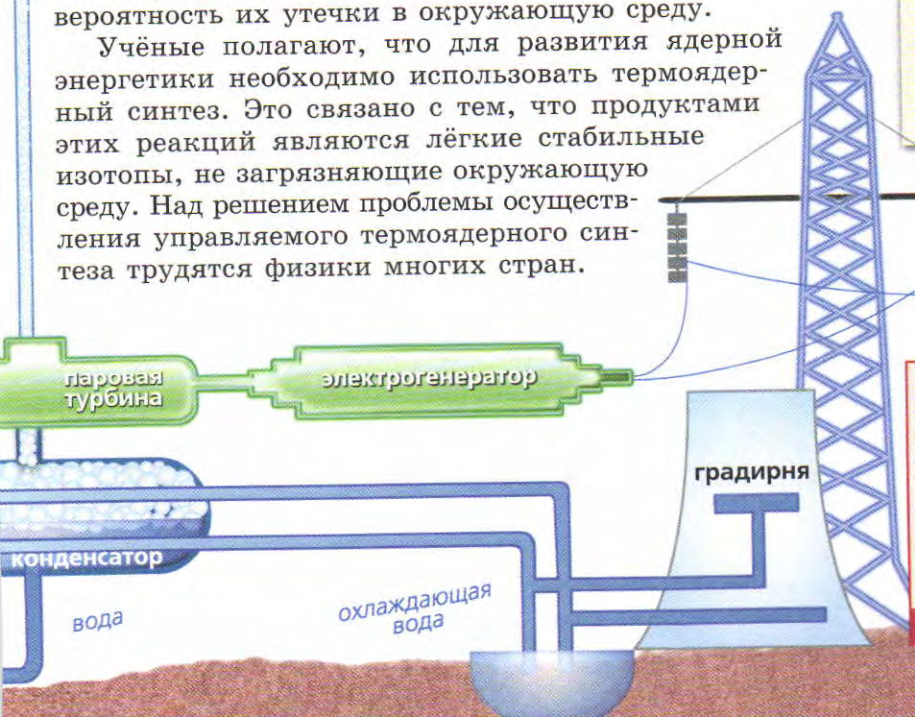
Снаружи активная зона реактора окружена *отражателем нейтронов*, который не позволяет нейтронам покидать активную зону. А поверх отражателя располагаются *стальной корпус* реактора и *защитный слой бетона*, которые ослабляют радиоактивное излучение до биологически безопасного уровня.

АЭС Принцип работы атомной электростанции ничем не отличается от принципа работы обычной тепловой электростанции. Так, тепло, выделяющееся в реакторе, нагревает циркулирующую в реакторе воду и превращает её в пар. Затем пар подаётся на турбину электрогенератора, который преобразует кинетическую энергию пара в электроэнергию.

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ Преимуществом ядерной энергетики является отсутствие вредных выбросов в атмосферу при расходе ядерного топлива. Атомная энергетика также позволяет в перспективе решить проблему ограниченного запаса природного топлива. При этом производимая энергия становится намного дешевле энергии, вырабатываемой на тепловых электростанциях.

Но в атомной энергетике есть и свои проблемы. Одной из основных и очень серьёзных проблем является хранение и переработка радиоактивных отходов. К сожалению, на сегодняшний день не существует абсолютно безопасных методов захоронения ядерных отходов, поскольку при существующих технологиях не исключена вероятность их утечки в окружающую среду.

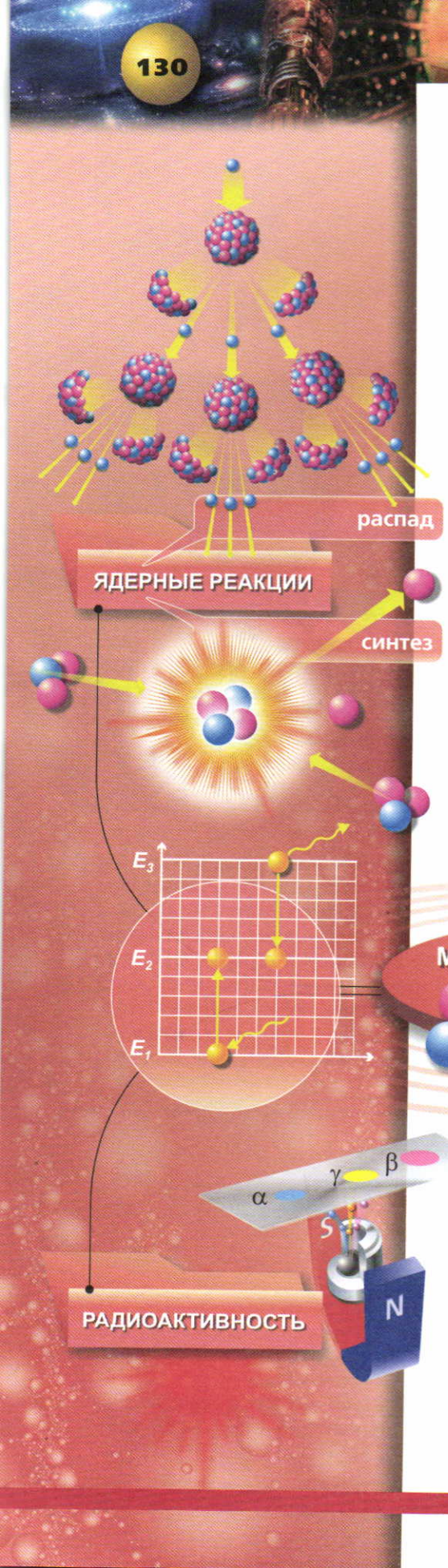
Учёные полагают, что для развития ядерной энергетики необходимо использовать термоядерный синтез. Это связано с тем, что продуктами этих реакций являются лёгкие стабильные изотопы, не загрязняющие окружающую среду. Над решением проблемы осуществления управляемого термоядерного синтеза трудятся физики многих стран.



При сжигании ископаемых углей и нефти образуется большое количество сернистого газа (SO_2) и окислов азота, которые выбрасываются в атмосферу. В атмосфере эти газы соединяются с водой и образуют кислотные дожди, которые губительно действуют на живые организмы и архитектурные сооружения.

ВОПРОСЫ:

- Какие преимущества есть у атомных электростанций по сравнению с тепловыми?
- Какой серьёзный недостаток есть у атомной энергетики на сегодняшний день?



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Вещество способно поглощать те волны, которые само испускает в нагретом состоянии. Метод определения химического состава вещества по его спектру называют спектральным анализом.
- Согласно Планку излучение испускается отдельными порциями, или квантами, энергия которых определяется формулой $E = h\nu$.
- Согласно модели атома Бора электрон в атоме может находиться не на любых орбитах, а лишь на стационарных уровнях, где излучения не происходит. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения.
- Радиоактивное излучение имеет сложный состав: α-частицы (лишённые обоих электронов атомы гелия), β-частицы (электроны) и γ-излучение.
- Процесс превращения ядер атомов одних элементов в ядра атомов других элементов называют ядерной реакцией.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Объясните механизм получения тепла от Солнца.
- Чем структурно различаются изотопы ^{235}U и ^{238}U? Влияет ли это различие на число электронов в атоме урана? Как это различие влияет на использование урана в современной энергетике?
- Приведите примеры использования радиоактивных источников в промышленности?
- Можно ли в настоящее время осуществить мечту алхимиков превратить ртуть в золото?

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

- СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ
- ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СОЛНЦА И ЗВЁЗД
- СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
- РОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ
- СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

КОРОТКО О ГЛАВНОМ...

Стремление человечества к знанию является для нас достаточным оправданием, чтобы продолжать поиск. А наша конечная цель (цель физиков) — никак не меньше, чем полное описание Вселенной, в которой мы обитаем.

Стивен Хокинг

53 СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Как устроена Вселенная.
- Что представляют собой галактики.
- Есть ли планеты вокруг других звёзд.
- Как изменяется наша Вселенная.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое Вселенная?
- Что такое гравитационные силы?

Расстояния во Вселенной очень велики. Поэтому астрономы для выражения расстояний между звёздами и галактиками используют такую единицу, как световой год. Это расстояние, которое луч света проходит за земной год.

1 световой год равен примерно $9{,}46 \cdot 10^{12}$ км.

Ещё одной единицей расстояния в астрономии является **парсек (пк)**:

$$1 \text{ пк} = 3{,}263 \text{ светового года} = 3{,}086 \cdot 10^{13} \text{ км}.$$

Вы уже знакомы с понятием Вселенной. А как она устроена? По каким законам она живёт? На этом уроке мы попытаемся познакомить вас с некоторыми тайнами нашей Вселенной.

ВСЕЛЕННАЯ Самым большим объектом нашего мира является Вселенная. Вселенная — это всё, что существует: от атомов и молекул до огромных космических образований.

ГАЛАКТИКИ Вследствие гравитации астрономические тела во Вселенной организуются в системы. В безбрежном космическом пространстве звёзды объединяются в звёздные архипелаги — *галактики*. На данный момент открыто более миллиарда галактик!

Галактики, в свою очередь, объединяются в отдельные скопления галактик. Так, наша Галактика Млечный Путь вместе с примерно 30 другими галактиками образует скопление, которое называется Местной группой. Близкие к нам галактики мы можем наблюдать как в телескопы, установленные на Земле, так и в телескопы, расположенные на искусственных спутниках Земли. Невооружённым глазом можно различить лишь ближайшие к нам небольшие по размеру две галактики — *Магеллановы Облака* (Малое и Большое) и похожую на нашу галактику *туманность Андромеды*.

ЗВЁЗДЫ И ПЛАНЕТЫ Наше Солнце является лишь одной звездой из великого их множества, составляющего одну из галактик, именуемую Млечным Путём. Вам хорошо известно, что вокруг нашего Солнца вращаются 8 планет. Сразу возникает вопрос: а есть ли планеты вокруг других звёзд?

Вопрос о планетах вблизи других звёзд уже несколько веков привлекает внимание учёных. Ведь с существованием новых планет мы связываем надежды на существование внеземной жизни. Поиск иных планетных систем затруднён в основном из-за гигантских расстояний до

них. К тому же планеты, в отличие от звёзд, не излучают свет сами, а светятся относительно слабым отражённым светом близкой звезды.

На самом деле наблюдения столь слабых источников света доступны крупнейшим телескопам, но их излучение «тонет» в свете рядом расположенной звезды, яркость которой в сотни миллионов раз выше, чем яркость планет. Лишь в 1995 г. шведские астрономы Мишель Мейор и Дидье Гуелоз открыли первую планету, принадлежащую не Солнечной системе, а далёкой звезде. С тех пор учёными было открыто более 300 подобных планет, которые носят название *экзопланет*.

РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ Во Вселенной всё находится в непрерывном движении: планеты вращаются вокруг своих звёзд, звёзды вращаются вокруг центра своих галактик, галактики вращаются вокруг своего центра. Но движутся ли галактики ещё и в пространстве?

В начале XX в. американский учёный Эдвин Хаббл установил, что наблюдаемые с Земли галактики удаляются от нашей планеты. Причём чем дальше от нас находится галактика, тем с большей скоростью она удаляется.

Это явление разбегания видимой Вселенной с нарастающей скоростью по мере удаления от локальной точки наблюдения получило название *закона Хаббла*. В результате учёные сделали вывод, что наша Вселенная расширяется!

Учёные пришли к выводу, что расширяется само вещество Вселенной так, что разбегание галактик можно наблюдать из любой точки Вселенной.

В этом смысле центра, как такового, у нашей Вселенной не существует. Естественно, и Земля не является центром Вселенной.

На самом деле до сих пор учёные не могут понять, будет ли наша Вселенная расширяться до бесконечности, или же расширение в один момент сменится обратным её сжатием. Эту и другие загадки нашей Вселенной, возможно, удастся решить вам.

Млечный Путь состоит примерно из 10^{11} звёзд. Диаметр Млечного Пути примерно равен 80 000 световых лет, а толщина — 6000 световых лет!

Закон Хаббла гласит: Вселенная расширяется, причём скорость, с которой галактики удаляются друг от друга, пропорциональна расстоянию между ними. Математически закон записывается в виде:

$$v = HR,$$

где v — скорость удаления галактик, R — расстояние между ними, $H = 65$ км/(с·Мпк) — коэффициент пропорциональности, который называют **постоянной Хаббла**.

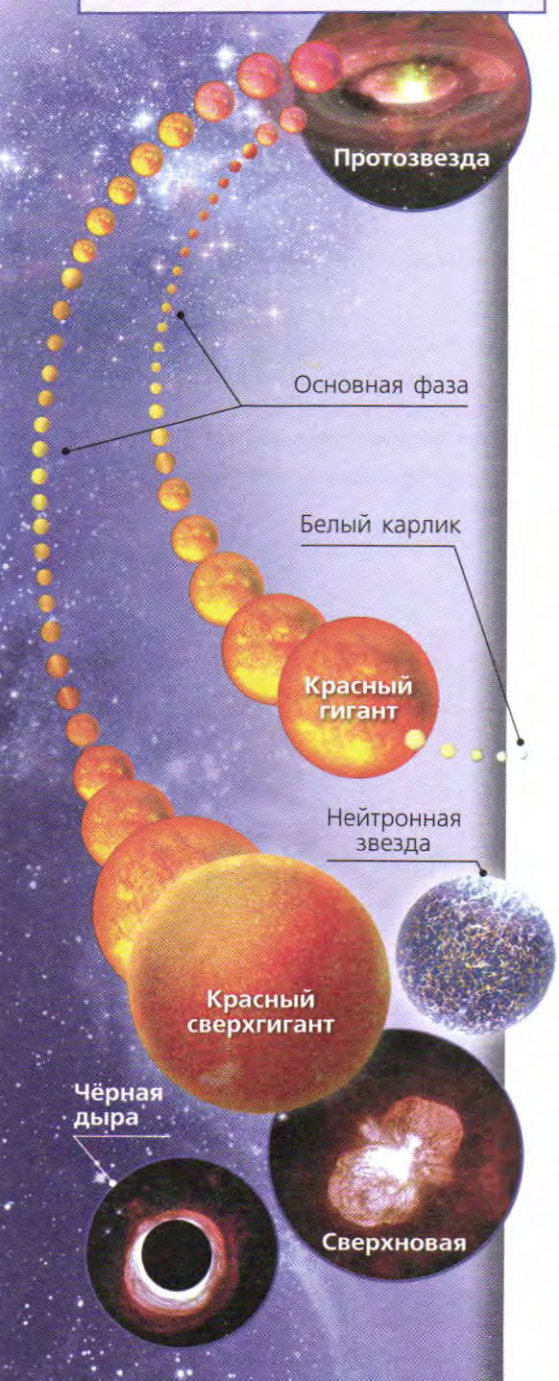
ВОПРОСЫ:

- Можем ли мы увидеть галактики невооружённым глазом?
- Существуют ли планеты вокруг других звёзд? И можем ли мы их увидеть?
- Есть ли центр у нашей Вселенной?

54 ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СОЛНЦА И ЗВЁЗД

ВЫ УЗНАЕТЕ:
- Из чего состоят звёзды.
- Какие процессы происходят внутри звёзд.
- Как рождаются и умирают звёзды.

ВСПОМНИТЕ:
- Что такое гравитационные силы?
- Что такое термоядерные реакции?



Большая часть материи видимой Вселенной сосредоточена в звёздах. Что же собой представляют звёзды? Из чего они состоят? Из чего они рождаются и как умирают?

ИЗ ЧЕГО СОСТОЯТ ЗВЁЗДЫ? Звёзды представляют собой шарообразные небесные тела, состоящие из раскалённого газа, который выделяет свет, тепло и другие формы энергии. Самая ближайшая к нам звезда — Солнце — в основном состоит из водорода с примесью гелия. Температура Солнца и других звёзд очень высока. Например, в центре Солнца она достигает порядка 13 млн градусов. Поэтому газы, из которых состоят звёзды, находятся в сильно ионизированном состоянии, т. е. вещество звёзд представляет собой плазму, состоящую из ядер атомов и свободных электронов. Из-за очень высоких температур ядра в звёздном веществе двигаются с очень большими скоростями (сотни и тысячи километров в секунду), достаточными, чтобы при столкновении наиболее быстро движущихся частиц произошёл ядерный синтез.

При ядерном синтезе выделяется огромное количество энергии, которая обеспечивает условия для последующего ядерного синтеза. Таким образом, звёзды, включая наше Солнце, представляют собой самоподдерживающиеся термоядерные реакторы.

РОЖДЕНИЕ ЗВЕЗДЫ Все звёзды зарождаются из газопылевых облаков, которые носят название *туманностей*. Под действием силы гравитации происходит сжатие, или *коллапс*, туманности. При этом газопылевое облако начинает вращаться, а его центр нагреваться. Когда температура небесного тела достигает порядка 10 млн градусов, начинают протекать термоядерные реакции, в ходе которых ядра водорода сливаются в ядра гелия:

$^{1}_{1}H + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{2}_{1}H$ и выделяется энергия;

$^{1}_{1}H + ^{2}_{1}H \longrightarrow ^{3}_{2}He$ и выделяется энергия;

$^{3}_{2}He + ^{3}_{2}He \longrightarrow ^{4}_{2}He + 2^{1}_{1}H$ и выделяется энергия.

В результате термоядерных реакций высвобождается огромное количество энергии (около $6 \cdot 10^{11}$ Дж на каждый грамм водорода, участвующий в реакции), и загорается новая звезда. Вокруг новых звёзд наблюдаются остаточные газы и пыль, из которых образуются новые планеты.

ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗДЫ Далее судьба звезды во многом зависит от её массы. Так, звёзды размером с наше Солнце светят около 10 млрд лет, пока не израсходуют на ядерный синтез весь водород. О звёздах, находящихся на стадии сжигания водорода, говорят, что они находятся в основной фазе своей эволюции. После того как весь

водород звезды перейдёт в гелий, гелиевая оболочка звезды начинает сжиматься, и звезда становится горячее. Гелий при этом начинает превращаться в углерод:

$$^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He = ^{12}_{6}C$$ и выделяется энергия.

При сгорании гелия в ядре звезды выделяется колоссальное количество энергии, что приводит к расширению её внешних слоёв. Звезда начинает увеличиваться в объёме, а суммарная энергия излучения остаётся на том же уровне. Поэтому внешние слои звезды остывают и меняют свет с жёлто-оранжевого на красный, и звезда превращается в *красного гиганта*. Её диаметр становится примерно в 100 раз больше первоначального. В дальнейшем в результате ядерных реакций в центре массивной звезды происходит синтез всё более тяжёлых элементов вплоть до железа.

После того как израсходуется весь гелий, реакции ядерного синтеза прекратятся. Ядро звезды начинает опять сжиматься, а внешние оболочки рассеиваться в космическом пространстве. Сжавшееся ядро, остаток от прежней звезды, называют *белым карликом*, который с течением времени остывает до холодного состояния.

РОЖДЕНИЕ СВЕРХНОВОЙ ЗВЕЗДЫ Звёзды, масса которых во много раз превышает массу нашего Солнца, по мере сжигания ядерного топлива расширяются и превращаются в *сверхгигантов*, которые намного крупнее красных гигантов. В дальнейшем, после полного сгорания ядерного топлива, ядро звезды начинает остывать и быстро сжиматься. При этом выделяется огромное количество энергии. В итоге звезда взрывается, и на небе можно наблюдать очень яркую вспышку. Такую звезду называют *сверхновой*. Через некоторое время она исчезнет с небосвода.

После сверхновой в зависимости от начальных размеров звезды может остаться лишь небольшое тело — нейтронная звезда размером 10–12 км. Такие звёзды состоят из нейтронов и имеют невероятно высокую плотность (порядка 10^{16} кг/м^3). Нейтронные звёзды являются конечной стадией эволюции звёзд с массой, намного большей, чем масса нашего Солнца.

ЧЁРНЫЕ ДЫРЫ Звёзды с массой, значительно превышающей массу Солнца, заканчивают свой жизненный путь, превращаясь в чёрные дыры. В некоторых сверхновых звёздах сила сжатия настолько велика, что материя ядра звезды сжимается до очень плотного состояния. При этом сила притяжения образовавшегося тела так велика, что оно перестаёт «отпускать» от себя даже собственный свет.

Превратившись в чёрную дыру, тело не исчезает из Вселенной. Чёрную дыру можно обнаружить по гравитационному взаимодействию. Так, чёрные дыры поглощают световые лучи, проходящие вблизи, и отклоняют лучи, проходящие на более далёком расстоянии от них.

По расчётам учёных, наше Солнце находится на стадии активного сжигания водорода примерно 5 млрд. лет. Запасов водорода в ядре ему должно хватить ещё на 5,5 млрд лет.

Газовая оболочка звезды, сброшенная ею под конец существования (изображение сделано с помощью телескопа «Хаббл»)

Звезда, подвергающаяся сильному сжатию, через какое-то время перестаёт излучать свет.
Радиус, до которого необходимо сжать звезду, чтобы она перестала «отпускать» от себя свет, называют *радиусом Шварцшильда* в честь немецкого учёного Карла Шварцшильда, который впервые его рассчитал. Например, для Солнца радиус составляет порядка 3 км. Таким образом, если Солнце сжать до радиуса 3 км и менее, то оно превратится в чёрную дыру!

ВОПРОСЫ:

- Из чего состоят звёзды?
- Как рождаются и умирают звёзды?
- Что такое чёрные дыры?

55 СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Что такое электромагнитный спектр.
- Какие объекты являются источниками электромагнитных излучений во Вселенной.
- Какую роль электромагнитные волны играют в нашей жизни.

ВСПОМНИТЕ:

- Что такое электромагнитные волны?
- Что такое длина и частота волны?

Георгий (Джордж) Антонович Гамов
(1904—1968)
Выдающийся российский и американский физик-теоретик, астрофизик.

Вселенная представляет собой великое множество различного вида электромагнитных излучений. И звёзды, и планеты, и космическая пыль, а также другие объекты Вселенной являются источниками электромагнитного излучения.

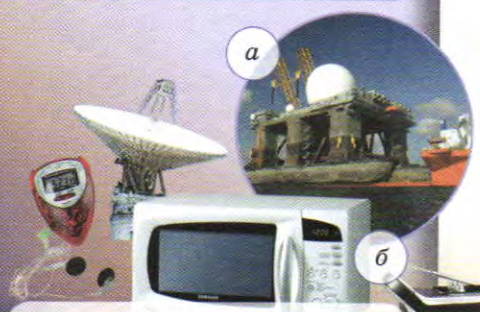
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВО ВСЕЛЕННОЙ Электромагнитные волны, наполняющие нашу Вселенную, различаются главным образом по длине волны.

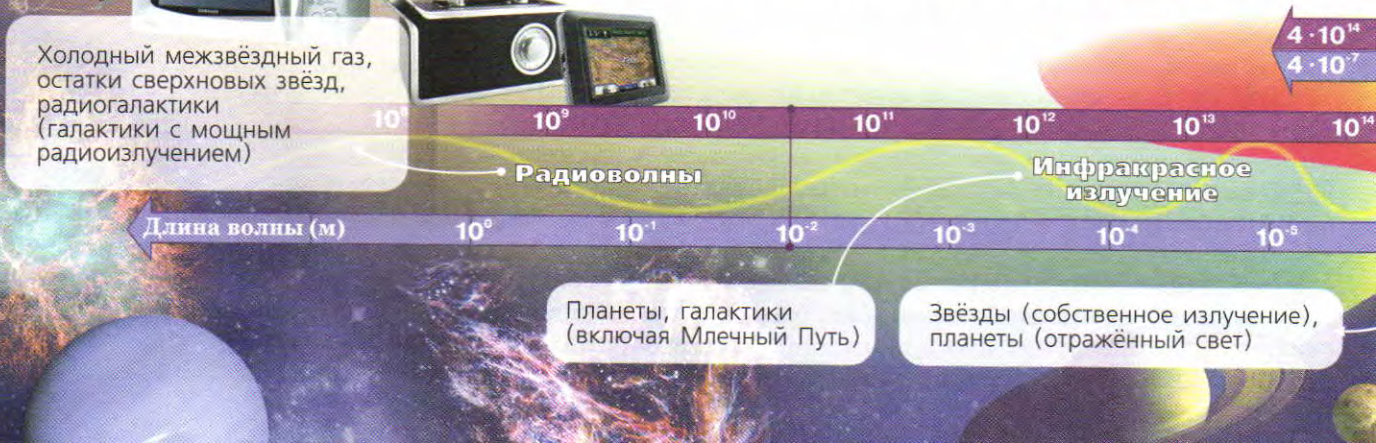
Весь диапазон электромагнитных волн носит название *электромагнитного спектра*. Отдельные части этого спектра принято различать либо по длине волны, либо по частоте. Учитывая, что все электромагнитные волны в вакууме распространяются со скоростью света ($c \approx 300\,000$ км/с), можно записать:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$

Электромагнитный спектр включает в себя радиоволны, микроволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи и гамма-лучи.

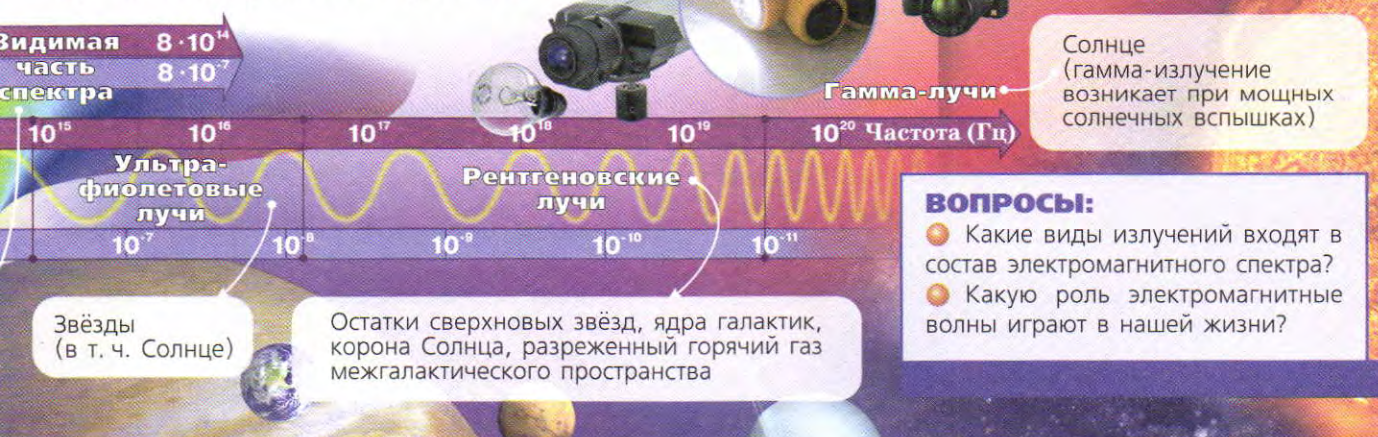
КРАСНОЕ СМЕЩЕНИЕ И РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ Очень горячие космические объекты, например звёзды, испускают свет. В 1912—1914 гг. американский астроном В. Слайфер открыл эффект, который называют *космологическим красным смещением*. Это явление заключается в том, что спектральные линии от далёкого космического источника, например галактики, смещаются в сторону более длинных волн по сравнению с длиной волны тех же линий, измеренной от неподвижного источника. Другими словами, регистрируемая длина волны излучения далёкого источника, удаляющегося от нас с высокой скоростью, становится больше. В 1929 г. Э. Хаббл открыл, что красное смещение для далёких галактик больше, чем для близких, и возрастает приблизительно пропорционально расстоянию между ними. Это открытие позволило сделать вывод о том, что Вселенная постоянно расширяется, а звёзды и галактики удаляются





друг от друга и, в частности, от Земли. Если излучение проходит достаточно большое расстояние и красное смещение усиливается, оно перестаёт быть видимым и становится сначала инфракрасным, а затем микроволновым. Наличие подобного излучения от невероятно мощного источника, существовавшего в первые мгновения рождения нашей Вселенной, предсказал в 1946—1948 гг. Георгий Гамов — выдающийся российский и американский физик-теоретик. Это излучение называют реликтовым, и оно обнаруживается сегодня в виде микроволн, распространяющихся в космосе во всех направлениях.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ Открыв природу электромагнитного излучения, человек освоил самые различные его виды. *Радиоволны* *а* применяются в радио- и телевещании, а также в мобильной телефонии. Диапазон радиоизлучения, примыкающий к инфракрасному, часто называют *микроволнами* *б*. Его также называют сверхчастотным (СВЧ) излучением, так как у него самая большая частота в радиодиапазоне. Микроволны используют в радиолокации, радионавигации, системах спутникового телевидения, мобильной телефонии и т. д. *Инфракрасные лучи* *ж* человек ощущает кожей как тепло. Их используют в приборах ночного видения, которые позволяют нам видеть в темноте. На использовании *видимой части электромагнитного спектра* *в* основано устройство всех оптических приборов. Искусственные источники излучения видимого света (осветительные приборы) применяются для освещения улиц и помещений. *Ультрафиолетовые лучи* *г* мы используем в солярии для получения искусственного загара. *Рентгеновские лучи* *д* широко применяются в медицине при диагностике переломов и различных заболеваний внутренних органов. Они проникают сквозь мягкие ткани организма, но поглощаются более плотными тканями, включая костную. *Гамма-лучи* *е* способны проникать даже сквозь металл, поэтому с их помощью можно обнаружить микротрещины в металлических конструкциях. Гамма-излучение также используется при лечении раковых опухолей.



ВОПРОСЫ:

- Какие виды излучений входят в состав электромагнитного спектра?
- Какую роль электромагнитные волны играют в нашей жизни?

56 РОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

ВЫ УЗНАЕТЕ:

- Сколько лет Вселенной по расчётам учёных.
- Как теория Большого взрыва объясняет происхождение Вселенной.
- Каким может оказаться будущее Вселенной.

ВСПОМНИТЕ:

- Как устроена наша Вселенная?
- Как образуются звёзды?

Первоначально теория Большого взрыва называлась «динамической эволюционирующей моделью». Впервые термин «Большой взрыв» («*Big Bang*») применил в 1949 г. английский астроном Фред Хойл в своей лекции.

Мы уже говорили о том, что наша Вселенная расширяется. Этот факт означает, что Вселенная не была одинаковой во все времена. Отсюда встаёт вопрос: а что было на заре нашей Вселенной, как она выглядела в то время и сколько лет прошло с момента её зарождения?

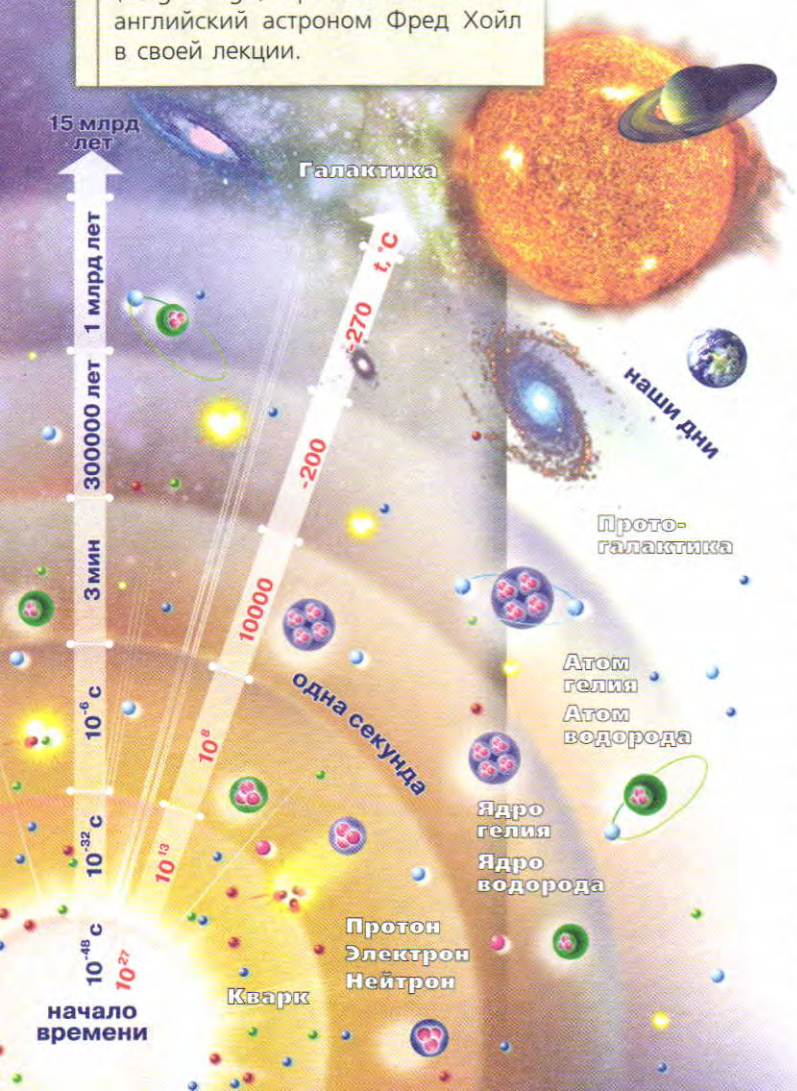
ВОЗРАСТ ВСЕЛЕННОЙ Учитывая, что наша Вселенная расширяется, учёные предположили, что Вселенная расширялась с момента своего рождения. Опираясь на эти доводы, учёные подсчитали, что возраст нашей Вселенной составляет примерно 14 млрд лет. Если это утверждение принять за истину, то в нашей Вселенной не должно быть ни одного объекта, возраст которого превышает 14 млрд лет.

Все известные на сегодняшний день научные данные согласуются с этим утверждением. А как же зародилась наша Вселенная?

ТЕОРИЯ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА На основе различных наблюдений учёные пришли к выводу, что наша Вселенная родилась в результате Большого взрыва, в момент которого возникла не только материя, но также пространство и время, как таковые. С тех пор наша Вселенная расширяется и постепенно остывает. Эту теорию происхождения Вселенной называют *теорией Большого взрыва*.

Сегодня уже хорошо известно, что протоны и нейтроны состоят из более мелких объектов, называемых кварками и глюонами. Учёные предполагают, что в самые первые мгновения после Большого взрыва Вселенная представляла собой первичный «бульон», состоявший из кварков, глюонов, электронов, фотонов и частиц, которые называются нейтрино. Одновременно с этим начался процесс расширения Вселенной и соответственно понижения температуры первичного вещества.

Уже через секунду после Большого взрыва температура составляла около 10 000 млн градусов, что примерно в тысячу раз выше температуры в центре Солнца. В это время Вселенная в основном состояла из фотонов, электронов и некоторого количества протонов и нейтронов, которые образовались в результате объединения кварков и глюонов.



Примерно через 3 мин после Большого взрыва температура Вселенной понизилась до миллиарда градусов, что соответствует температуре внутри самых горячих звёзд. При такой температуре протоны и нейтроны начали объединяться друг с другом с образованием лёгких ядер — ядер гелия.

Примерно через 300 000 лет Вселенная остыла до 10 000 °С, что позволило протонам и ядрам гелия объединиться с электронами с образованием атомов водорода и гелия.

Затем, спустя примерно 1 млрд лет, когда температура снизилась примерно до −200 °С, под действием сил гравитации из газа атомов водорода и гелия стали формироваться первые звёзды и галактики.

Затем галактики стали объединяться в обособленные скопления. Первые звёзды умирали и обогащали космос тяжёлыми элементами, которые служили основой для формирования новых звёзд и планет.

Учёные считают, что до сих пор не обнаружено свыше 90% материи, из которой состоит Вселенная. Эту неизвестную материю, которую мы не можем пока увидеть даже с помощью самых современных приборов и установок, учёные называют *тёмной материей* или *тёмной энергией*. Когда мы поймём природу этой материи, то сможем ответить на многие вопросы происхождения Вселенной, которые до сих пор остаются открытыми.

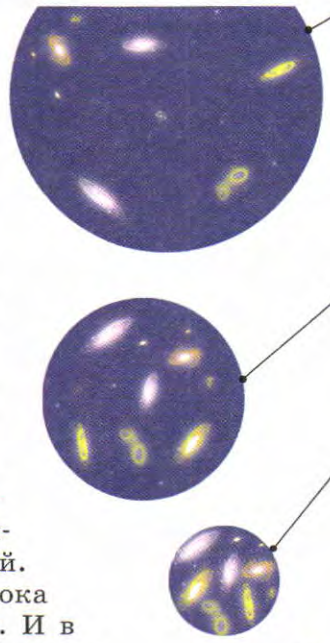
БУДУЩЕЕ ВСЕЛЕННОЙ Учёных, которые занимаются изучением Вселенной, называют космологами. Их интересует не только прошлое, но и будущее нашей Вселенной.

Некоторые из них склонны считать, что она будет всё время расширяться и остывать, в результате все звёзды погаснут, а Вселенная станет холодной и тёмной.

Другие космологи считают, что через какое-то время разбегание галактик остановится и начнётся обратное сжатие Вселенной. Вселенная будет сжиматься, пока опять не сожмётся в одну точку. И в итоге произойдёт новый Большой взрыв, который приведёт к рождению новой Вселенной, необязательно по своей структуре похожей на нашу.

Возможно, возраст Вселенной намного превышает 14 млрд лет, и жизнь её составляет бесконечную череду сжатий и растяжений...

Модели возможной эволюции Вселенной



ВОПРОСЫ:

- Как зародилась наша Вселенная согласно теории Большого взрыва?
- Что ждёт нашу Вселенную в будущем, по предположениям учёных?

57 СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Мы никогда не перестанем
искать,
И в итоге всех наших поисков
Вернёмся к исходной точке,
И увидим её словно впервые.

Томас Элиот.
«Маленький проказник»

Изучать Вселенную можно различными путями: наблюдая и изучая объекты, находящиеся за пределами нашей планеты, а также при помощи экспериментальных физических установок, позволяющих изучать материю на уровне атомов, атомных ядер и ещё глубже.

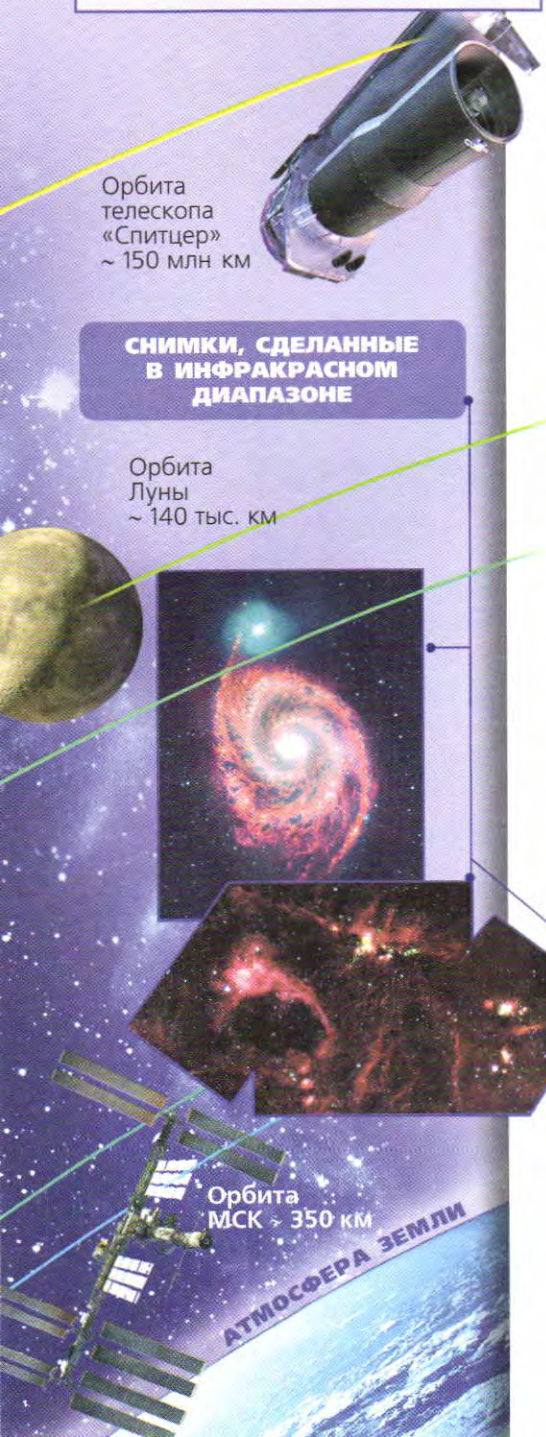
ОБЛАСТИ НАУКИ, ЗАНИМАЮЩИЕСЯ ИССЛЕДОВАНИЯМИ ВСЕЛЕННОЙ Для того чтобы лучше понять законы Вселенной, в которой мы живём, необходимо изучать окружающий нас мир как в масштабах галактик, звёзд, планет и т. п., так и на уровне атомов, протонов, нейтронов и т. д.

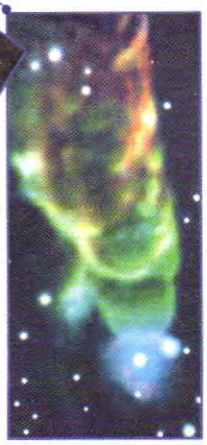
Науку, изучающую движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем, называют *астрономией*. В современной физике проблемами микромира занимается такая наука, как *физика микромира*.

В XX в. появилась новая область науки, называемая *астрофизикой*. Она изучает небесные тела, их системы и пространство между ними на основе исследования происходящих во Вселенной физических процессов и явлений. Астрофизики изучают не только небесные объекты самых разных размеров (от космических пылинок до Вселенной в целом), но и различные свойства самого космического пространства.

Космические объекты очень сложно наблюдать с Земли, так как земная атмосфера поглощает часть электромагнитного излучения, идущего из космоса, и отражает другие её виды обратно в космос. Так, например, бóльшая часть инфракрасного и ультрафиолетового излучений, а также рентгеновские и гамма-лучи космического происхождения недоступны для наблюдений с поверхности Земли.

Для того чтобы изучать этот спектр электромагнитных волн, существующих в космическом пространстве, необходимо проводить астрономические наблюдения за пределы атмосферы нашей планеты.





ИНФРАКРАСНЫЕ ОБСЕРВАТОРИИ Наши глаза способны воспринимать лишь небольшую часть электромагнитного спектра, поэтому бóльшая часть Вселенной остаётся невидимой для оптических приборов. Между тем наблюдения в инфракрасных лучах позволяют нам обнаруживать так называемые тёплые объекты, включая планетарные системы и межзвёздную пыль. Благодаря инфракрасным космическим телескопам учёным удаётся обнаруживать скрытые звёздные объекты и изучать такие процессы, как рождение звёзд и целых галактик.

КОСМИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП «ХАББЛ» Расположенные на Земле оптические телескопы сильно проигрывают в качестве изображения дальних космических объектов перед аналогичными телескопами, выведенными на околоземную орбиту. Так, в 1990 г. на орбиту Земли был выведен световой космический телескоп «Хаббл» (Hubble), названный в честь американского астронома Эдвина Хаббла. Телескоп был запущен в рамках совместной программы НАСА (Национальное управление США по аэронавтике и исследованию космического пространства) и Европейского космического агентства. Из-за отсутствия влияния земной атмосферы разрешающая способность у такого телескопа в 7–10 раз больше, чем у подобных телескопов, расположенных на Земле.

За 15 лет работы с помощью космического телескопа «Хаббл» получено 700 тыс. высококачественных изображений 22 тыс. небесных объектов: галактик, туманностей, звёзд, планет, включая экзопланеты (планеты, не принадлежащие Солнечной системе).

Благодаря космическому телескопу были расширены представления о строении и эволюции Вселенной, пересмотрены старые теории и построены новые, более точно объясняющие различные астрономические явления.

СНИМКИ, СДЕЛАННЫЕ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ

РЕНТГЕНОВСКИЕ ОБСЕРВАТОРИИ Рентгеновские лучи доносят до нас массу информации о процессах, происходящих во Вселенной. Поэтому в наше время существуют космические рентгеновские обсерватории для поиска и регистрации различных рентгеновских источников в космосе.

Сейчас с помощью рентгеновских обсерваторий учёные изучают звёзды и галактики. Так, нам стало известно многое о рождении, эволюции и смерти звёзд. А изучение далёких галактик показало, что их рентгеновское излучение связано с чёрными дырами, расположенными в центрах этих галактик.

СНИМКИ, СДЕЛАННЫЕ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ

АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ

КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Мы рассмотрели лишь некоторые космические телескопы и обсерватории, выведенные за пределы нашей планеты. Причём для получения изображения того или иного космического объекта учёные предпочитают комбинировать изображения, полученные посредством нескольких телескопов, с целью получения наиболее полного представления об изучаемом объекте.

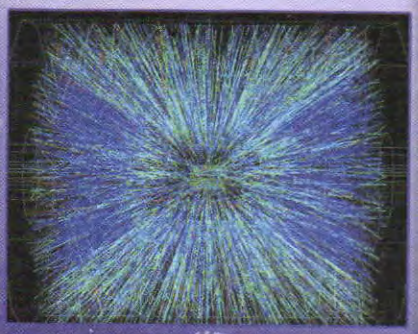
Перед вами изображение галактики M101, построенное на основе снимков, полученных с помощью рентгеновской обсерватории «Чандра», телескопа «Хаббл» и инфракрасного телескопа «Спитцер».

Программа организации НАСА «Великие обсерватории» объединяет возможности космического телескопа «Хаббл», инфракрасного телескопа «Спитцер» и рентгеновской обсерватории «Чандра», снимки которых доступны не только учёным, но и всем, кто интересуется астрономией.

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА МИКРОМИРА Одной из основных задач современной физики микромира является получение ответов на вопросы о том, что происходило в первые мгновения развития Вселенной, что является теми фундаментальными «кирпичиками материи», из которых состоит окружающий нас мир.

Для того чтобы изучать структуру материи на расстояниях, существенно меньших размеров протона, получать в лабораторных условиях температуру и плотность вещества, сравнимые с теми, которые были на ранних стадиях развития Вселенной, создаются гигантские физические установки, называемые *коллайдерами*. В коллайдерах сталкивают частицы и ядра, движущиеся со скоростями, близкими к скорости света, и обладающие огромными энергиями. В результате таких столкновений учёные надеются смоделировать такие условия, которые существовали в первые мгновения зарождения нашей Вселенной. Подобные установки требуют огромных интеллектуальных и материальных затрат, которые невозможны в рамках одного, даже самого богатого государства. Именно поэтому различные государства мира объединяют свои усилия и создают международные организации и сообщества, под эгидой которых учёные и инженеры разных стран совместно решают ряд сложных задач.

Визуализация столкновения протонов ядер золота при сверхвысоких энергиях



ЦЕРН Одной из таких организаций является Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН), расположенный недалеко от швейцарского города Женева.

Основным проектом на данный момент в ЦЕРНе является Большой адронный коллайдер (LHC), представляющий собой огромную физическую установку, расположенную под землёй. На этом коллайдере физики планируют вести поиск загадочной частицы, которую называют бозоном Хиггса. Если эта частица действительно будет обнаружена, то это позволит приблизиться к пониманию того, каким образом в первые мгновения после Большого взрыва образовались частицы, обладающие массой.

БНЛ Ещё одним крупнейшим мировым научным центром является Брукхейвенская национальная лаборатория, расположенная близ Нью-Йорка (США).

Базовой установкой этой лаборатории является Релятивистский коллайдер тяжёлых ядер (RHIC), в котором сталкивают ядра золота при огромных энергиях. Целью экспериментов на этом коллайдере являются поиск и изучение особого состояния вещества, называемого кварк-глюонной плазмой, которое существовало на ранней стадии развития Вселенной ещё до образования протонов, нейтронов и т. д.

ОИЯИ В России расположен ещё один из крупнейших мировых научных центров. Это Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ) в подмосковном городе Дубна.

Все вы знакомы с Периодической системой химических элементов Д. И. Менделеева. На данный момент известно 118 химических элементов (с 1-го по 118-й включительно). Учёных давно интересует вопрос: сколько всего может быть элементов во Вселенной?

Для поиска новых элементов в Объединённом институте ядерных исследований был создан комплекс сложной аппаратуры, сердцем которого является ускоритель заряженных частиц — *циклотрон*.

К настоящему времени учёными ОИЯИ были обнаружены элементы с порядковыми номерами 112, 113, 114, 115, 116, 117 и 118. Но какой элемент должен завершить таблицу Менделеева — это предмет будущих экспериментов на циклотроне.

Изучая курс физики с 7 по 9 класс, вы узнали о том, что в современной науке существует много нерешённых вопросов и проблем, ответ на которые пытаются найти физики всего мира. Для тех, кто свяжет своё будущее с изучением этой науки, всегда открыты пути для совершения новых открытий, проливающих свет на многие тайны нашей Вселенной.

ЦЕРН

В 1970 г. учёные ОИЯИ под руководством Георгия Николаевича Флёрова и группа американских учёных из Национальной лаборатории им. Лоуренса Беркли независимо друг от друга открыли 105-й элемент таблицы Менделеева.
В честь г. Дубна, в котором расположен Объединённый институт ядерных исследований, 105-й элемент таблицы Менделеева получил название «дубний».

ВОПРОСЫ:

- Как зародилась наша Вселенная согласно теории Большого взрыва?
- Что ждёт нашу Вселенную в будущем, по предположениям учёных?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Вселенная — это всё, что существует: от атомов и молекул до огромных космических образований.
- Наше Солнце является лишь одной звездой из великого их множества, составляющего одну из галактик, именуемую Млечным Путём.
- Явление разбегания видимой Вселенной с нарастающей скоростью по мере удаления от локальной точки наблюдения получило название закона Хаббла.
- Звёзды представляют собой шаровидные небесные тела, состоящие из раскалённого газа, который выделяет свет, тепло и другие формы энергии.
- Теорию происхождения Вселенной называют теорией Большого взрыва.
- Изучать Вселенную можно двумя различными путями: наблюдая и изучая объекты, находящиеся за пределами нашей планеты, а также с помощью экспериментальных физических установок, позволяющих изучать материю на уровне атома, атомного ядра и ещё глубже.

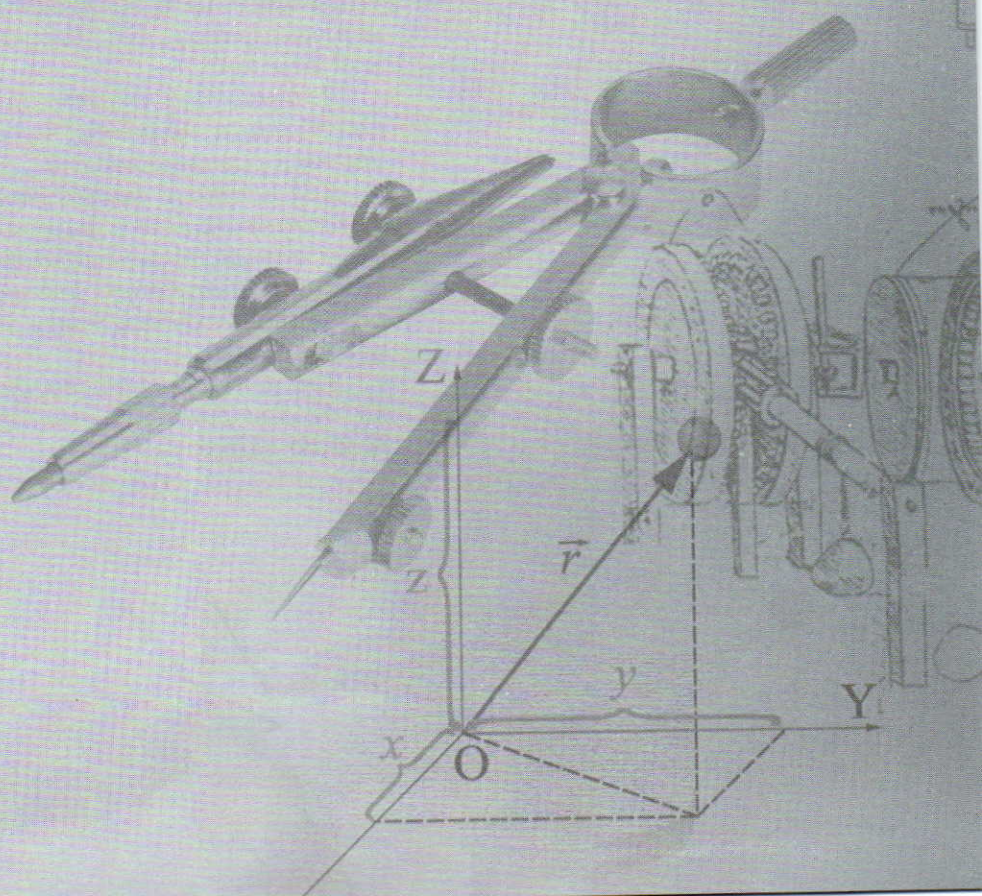
ВОПРОСЫ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ:

- Объясните, как данные, получаемые на современных ускорителях, могут быть использованы для изучения космических объектов и Вселенной.
- Можно ли утверждать, что возраст Вселенной точно известен, или же данное значение получено на основе определённых гипотез? Ответ обоснуйте.

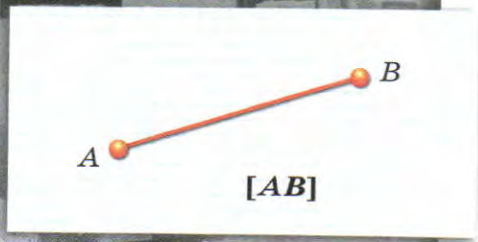
ВЕКТОРЫ В ФИЗИКЕ

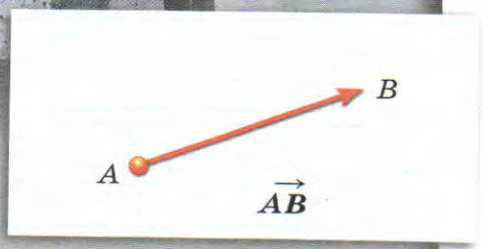
Приложение 1

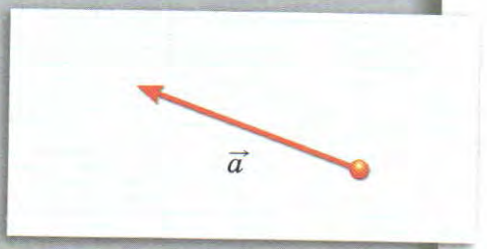
- ВЕКТОРЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СВОЙСТВА
- СЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ
- ВЫЧИТАНИЕ ВЕКТОРОВ
- ДЕЙСТВИЯ С ВЕКТОРАМИ И УГОЛ МЕЖДУ ВЕКТОРАМИ
- ПРОЕКЦИИ ВЕКТОРА НА КООРДИНАТНЫЕ ОСИ
- РАДИУС-ВЕКТОР
- РАДИУС-ВЕКТОР И ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ
- СИНУС И КОСИНУС УГЛА φ
- ГРАДУСЫ И РАДИАНЫ



ВЕКТОРЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И СВОЙСТВА Физические величины бывают векторными или скалярными. Скалярная физическая величина характеризуется числовым значением и не имеет направления.







Векторная величина характеризуется численным значением и направлением. Векторные величины обозначают в тексте буквами со стрелками (например, $\vec{v}$ или $\vec{F}_{тяж}$), а на чертежах стрелками. Понятие вектора является одним из важнейших как в физике, так и в математике.

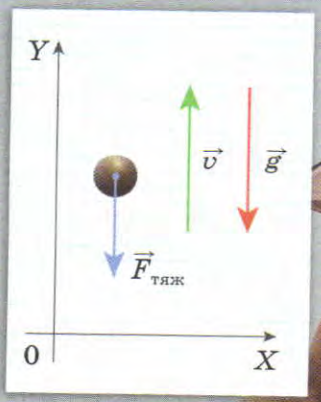
Вектором называется направленный отрезок. Один из концов отрезка, например A, называется началом, а другой, например B, — концом. Обозначают вектор либо указанием концов отрезка, причём сперва указывают начало вектора, либо строчной латинской буквой со стрелкой над ней.

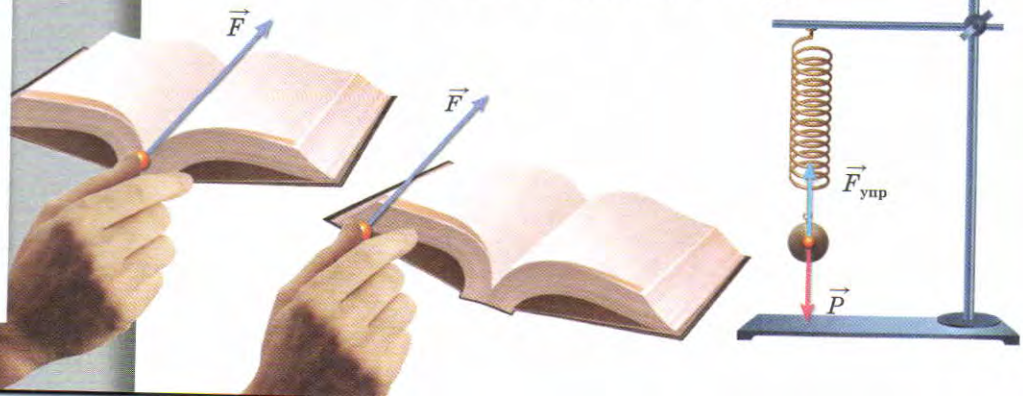
Длиной (значением или модулем) вектора называется длина отрезка, изображающего вектор. Модуль вектора обозначается $|\vec{a}|$, или $|\vec{AB}|$ по модулю.

Два вектора называются равными, если они одинаково направлены и равны по модулю. Однако в физике этим определением надо пользоваться с осторожностью, так как, например, две равные силы, приложенные к различным точкам тела, могут приводить к различным результатам.

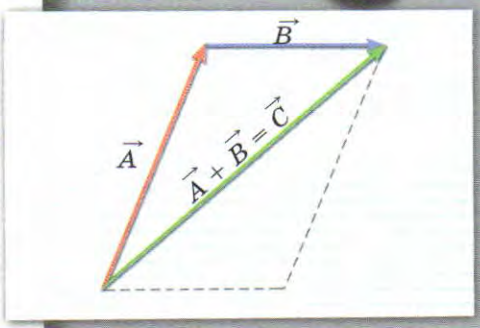
Два вектора называются противоположными, если их длины равны и они противоположно направлены. Можно записать:

$$\vec{AB} = -\vec{BA}, \text{ или } \vec{P} = -\vec{F}_{упр}.$$





СЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРОВ Сложение и вычитание скалярных величин осуществляется достаточно просто. Так, если к массе, равной 2 кг, прибавить массу, равную 3 кг, получится масса, равная 5 кг. При действиях с векторными величинами необходимо учитывать не только их значения, но и направления.

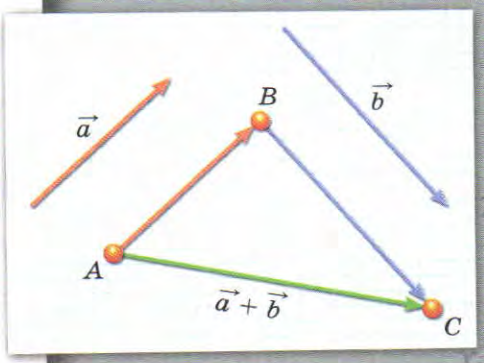


Сложение векторов часто необходимо для решения широкого круга физических задач. Так, например, когда на тело действуют две силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, то можно найти одну силу — их равнодействующую $\vec{R}$, которая заменит эти две силы и произведёт такое же действие на тело. При этом силы следует складывать векторно:

$$\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

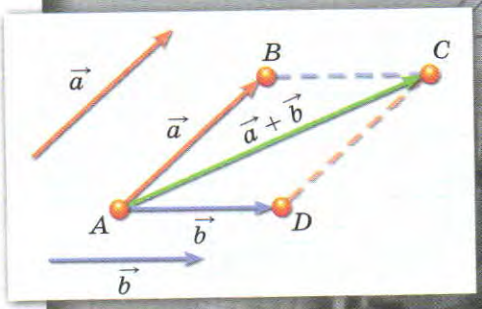
Другой пример: если, для того чтобы попасть в некоторую точку, надо пройти сначала A километров в одном направлении и затем B километров в другом направлении, то в этой конечной точке можно оказаться, пройдя C километров в третьем направлении. В этом случае также можно записать, что

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B}.$$



Итак, суммой двух векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется такой вектор $\vec{c}$, который обозначается $\vec{c} = \vec{a} + \vec{b}$ и получается следующим образом: от произвольной точки A откладывается вектор $\vec{AB} = \vec{a}$, после чего от точки B откладывается вектор $\vec{BC} = \vec{b}$. Вектор $\vec{AC}$ называют суммой векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$:

$$\vec{AC} = \vec{a} + \vec{b}.$$

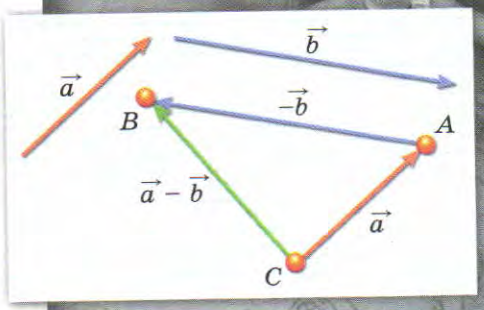


Это правило сложения векторов называется *правилом треугольника*.

Для сложения двух векторов можно воспользоваться *правилом параллелограмма*: для векторов с общим началом их сумма изображается диагональю параллелограмма, построенного на этих векторах.

Для любых векторов справедливо:

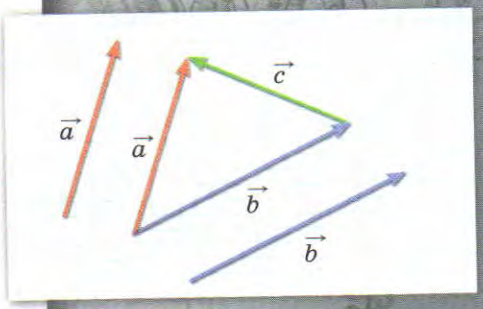
$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}.$$



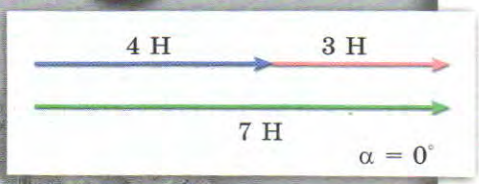
ВЫЧИТАНИЕ ВЕКТОРОВ Вычитание векторов можно представить как сложение с отрицательным вектором, т. е. $\vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b})$. Здесь $-\vec{b}$ является вектором, противоположным вектору $\vec{b}$.

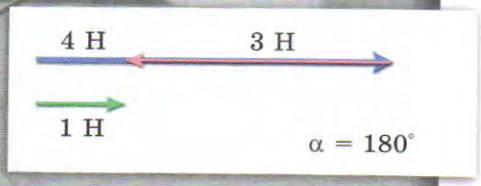
Разностью векторов $\vec{a}$ и $\vec{b}$ называется такой вектор $\vec{c}$, сумма которого с вектором $\vec{b}$ равна вектору $\vec{a}$. Разность векторов обозначается

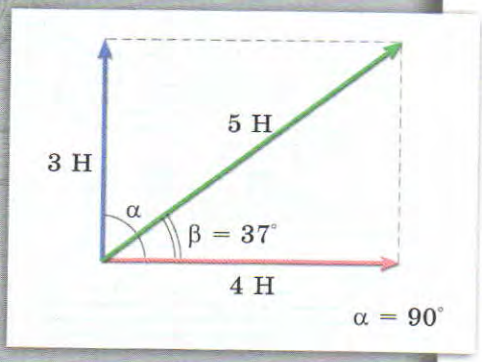
$$\vec{c} = \vec{a} - \vec{b} = \vec{a} + (-\vec{b}).$$

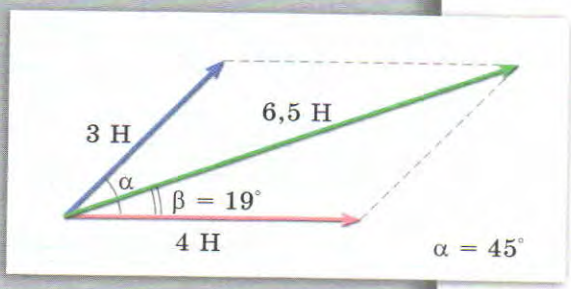


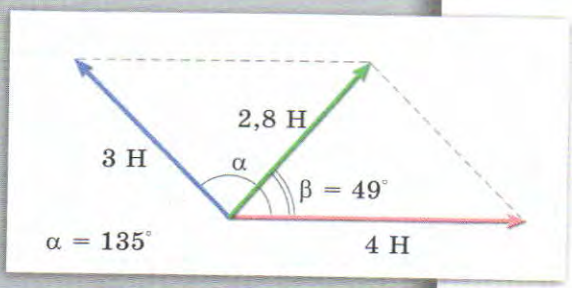
На практике, для того чтобы изобразить вектор, являющийся разностью двух векторов, также используют *правило треугольника*. Сначала векторы изображаются исходящими из одной точки (при этом двигать их можно только при помощи параллельного переноса). Затем проводится отрезок так, чтобы получился треугольник. Вектор, начало которого совпадает с концом вектора $\vec{b}$, а конец — с концом вектора $\vec{a}$, и будет их разностью.











ДЕЙСТВИЯ С ВЕКТОРАМИ И УГОЛ МЕЖДУ ВЕКТОРАМИ

Результат как сложения, так и вычитания одних и тех же векторов зависит от угла между ними. В качестве примера рассмотрим, чему может быть равна равнодействующая двух сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, значения которых равны соответственно 4 и 3 Н, в зависимости от угла между этими силами.

Если силы (векторы) $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ направлены в одну и ту же сторону (вдоль одной прямой), то угол α между ними составляет 0°. В этом случае направление равнодействующей силы $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ совпадает с направлением этих сил, а её модуль равен:

$$R = F_1 + F_2 = 4 + 3 = 7 \text{ Н}.$$

Если силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ направлены в противоположные стороны, то угол α между ними составляет 180°. В этом случае направление равнодействующей силы $\vec{R}$ совпадает с направлением большей по модулю силы $\vec{F}_1$. При этом, для того чтобы обозначить противоположное направление сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, записывают:

$$R = F_1 - F_2.$$

Модуль равнодействующей в этом случае равен:

$$R = F_1 - F_2 = 4 - 3 = 1 \text{ Н}.$$

Пусть угол α между силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ является прямым. Тогда вектор $\vec{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$ является гипотенузой треугольника, и его длину можно найти по теореме Пифагора:

$$R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{25} = 5 \text{ Н}.$$

Прямоугольный треугольник со сторонами 3, 4 и 5 был известен ещё в глубокой древности, и его называют египетским треугольником. Сумма чисел 3 + 4 + 5 = 12 уже с того времени использовалась как единица кратности при построении прямых углов с помощью верёвки, размеченной узлами на 3/12 и 7/12 её длины.

При помощи транспортира найдём угол β между направлениями сил $\vec{F}_1$ и $\vec{R}$, который составляет 37°.

Если угол α между силами $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ составляет 45°, то равнодействующую силу можно построить, используя либо правило треугольника, либо правило параллелограмма. Тогда модуль равнодействующей силы $R = 6{,}5$ Н, а угол β между направлениями сил $\vec{F}_1$ и $\vec{R}$ составляет 19°.

Аналогично $R = 2{,}8$ Н при α = 135°, а угол β между направлениями сил $\vec{F}_1$ и $\vec{R}$ составляет 49°.

В последних двух примерах длину вектора $\vec{R}$ и величину угла β можно определить, например, при помощи линейки и транспортира. Однако такой способ нельзя применять для решения большинства практических задач. Существует математический аппарат, позволяющий решать такие задачи при помощи различных формул.

ПРОЕКЦИИ ВЕКТОРА НА КООРДИНАТНЫЕ ОСИ Любое механическое движение является относительным, поэтому его изучение невозможно без указания *системы отсчёта* — тела отсчёта, связанной с ним системы координат, а также способа измерения времени движения (часов).

Система координат позволяет при решении физических задач использовать не только координаты начала и конца вектора, но и его *проекции* на оси координат.

Если опустить перпендикуляры из начала и конца вектора $\vec{a}$ на координатную ось, то получится отрезок a_x, который называется проекцией вектора.

При этом проекцию вектора на ось считают положительной, если координата конца вектора оказывается больше координаты его начала.

В противном случае проекцию считают отрицательной.

Если вектор и ось параллельны, то длина вектора равна его проекции на эту ось.

Часто требуется находить проекции вектора на координатные оси.

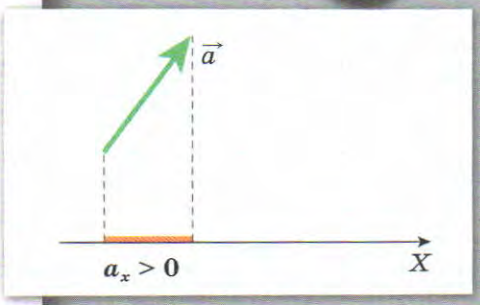
Если (x_0, y_0) и (x, y) — координаты начала и конца вектора, то его проекции на оси абсцисс и ординат будут равны:

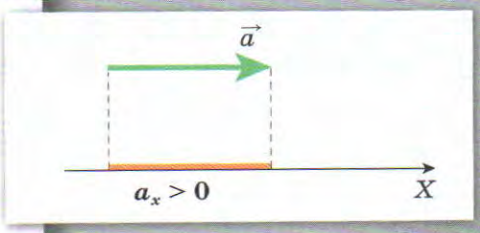
$$a_x = x - x_0;$$

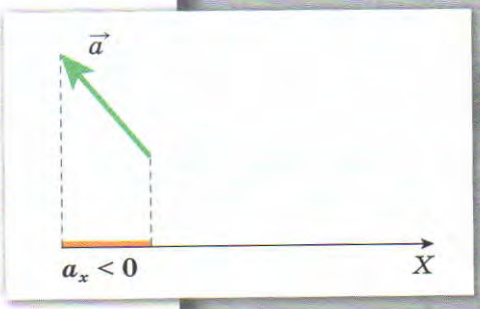
$$a_y = y - y_0.$$

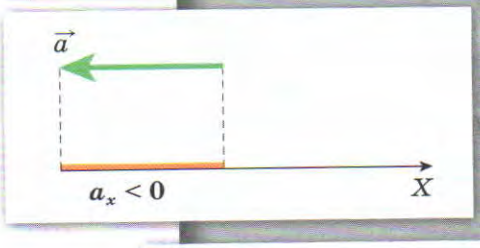
Зная проекции вектора, можно найти его длину (модуль) по теореме Пифагора:

$$a^2 = a_x^2 + a_y^2.$$









РАДИУС-ВЕКТОР В математике и физике важную роль играет понятие вектора, начало которого совпадает с началом координат.

Радиус-вектором ($\overrightarrow{OM}$) называется направленный отрезок, соединяющий начало координат O и точку M с произвольными координатами. Радиус-вектор принято обозначать $\vec{r}$ (или $r(M)$).

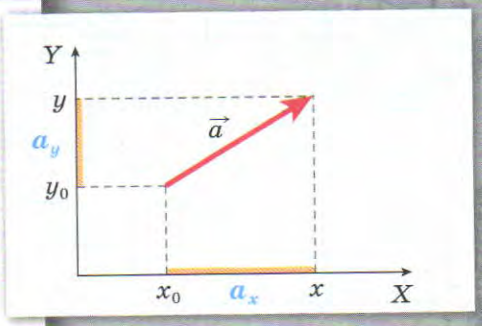
Из рисунка видно, что координаты x и y точки M являются проекциями радиус-вектора $r(M)$ на координатные оси:

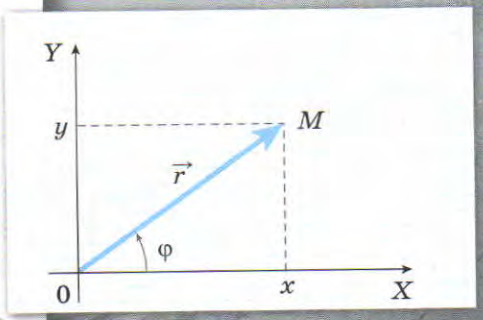
$$r^2 = r_x^2 + r_y^2 = x^2 + y^2.$$

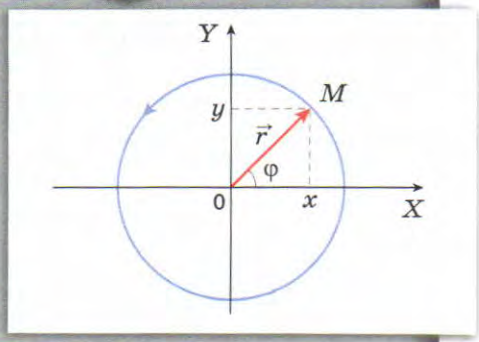
Положение любой точки M на плоскости определяется её координатами x и y.

Из рисунка видно, что мы также можем однозначно определить положение этой точки, если будем знать длину радиус-вектора, концом которого является эта точка, и положение этого радиус-вектора относительно осей координат.

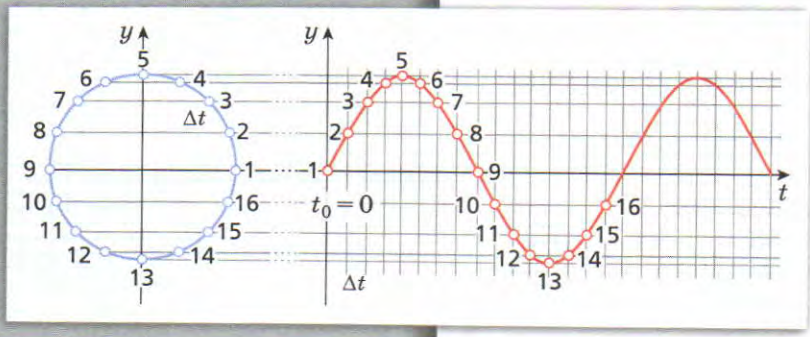
Для определения положения радиус-вектора относительно системы координат достаточно знать угол φ между ним и осью OX.







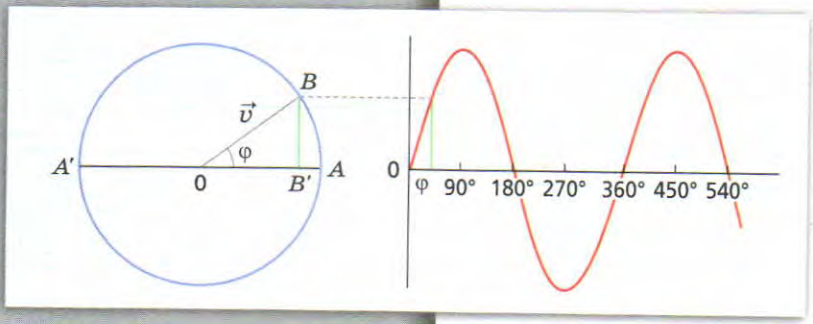
РАДИУС-ВЕКТОР И ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ На координатной плоскости рассмотрим окружность радиуса r с центром в начале координат. Можно считать, что угол φ образован вращением некоторого подвижного радиус-вектора длиной r в направлении против движения часовой стрелки. При этом в качестве начального положения радиус-вектора выбирают такое его положение, когда его направление совпадает с положительным направлением оси OX. При своём вращении подвижный радиус-вектор описывает углы от 0 до 360°.



Если радиус-вектор, совершив один оборот, продолжает вращаться, то угол φ продолжает увеличиваться. Так, после двух полных оборотов величина угла станет равной

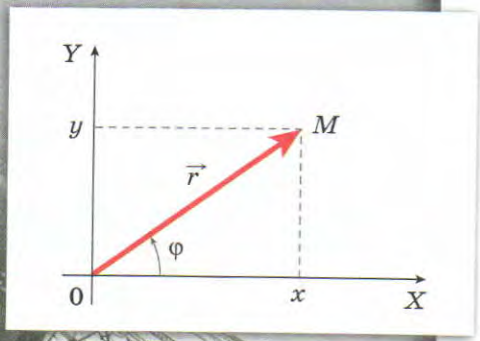
$$360^\circ + 360^\circ = 720^\circ \text{ и т. д.}$$

Построим график зависимости значения координаты y радиус-вектора от времени. Видно, что если зафиксировать положения конца радиус-вектора через равные промежутки времени и построить точки так, как показано на рисунке, то, соединив их плавной линией, получим кривую, называемую *синусоидой*.



Аналогичный график получится, если по горизонтальной оси откладывать угол поворота радиус-вектора φ.

СИНУС И КОСИНУС УГЛА φ Пусть радиус-вектор $\vec{r} = \overrightarrow{OM}$ образует угол φ с осью OX, причём точка M имеет координаты x и y.



Синусом угла φ называется отношение ординаты y к длине r радиус-вектора $\overrightarrow{OM}$:

$$\sin\varphi = \frac{y}{r}.$$

Косинусом угла φ называется отношение абсциссы x к длине r радиус-вектора $\overrightarrow{OM}$:

$$\cos\varphi = \frac{x}{r}.$$

Таким образом, если известны длина радиус-вектора и угол φ, то проекции радиус-вектора на оси координат определяются по формулам

$$x = r\cos\varphi,$$
$$y = r\sin\varphi.$$

Из курса математики известно, что $\sin\varphi$ и $\cos\varphi$ зависят только от величины угла φ и не зависят от длины радиус-вектора r.

ГРАДУСЫ И РАДИАНЫ Из геометрии известно, что отношение длины дуги l, на которую опирается угол φ, к радиусу r окружности не зависит от величины радиуса. Поэтому это отношение может быть характеристикой и мерой данного угла:

$$\varphi = \frac{l}{r}.$$

Такая мера называется *радианной мерой угла* и используется наравне с *угловой* (величиной угла, выраженной в градусах).

Говорят, что угол равен определённому числу радиан. Так как длина всей окружности радиуса r равна $2\pi r$, то всей окружности соответствует угол $2\pi r/r = 2\pi$ радиан.

Поскольку вся окружность содержит 360°, то один радиан соответствует

$$\frac{360^\circ}{2\pi} = \frac{180^\circ}{\pi} \text{ градусов},$$

$$1 \text{ рад} = \frac{180^\circ}{\pi} \approx 57^\circ.$$

И наоборот,

$$1^\circ = \frac{\pi}{180^\circ} \text{ рад}.$$

Таким образом, можно записать следующие формулы перехода от градусного измерения к радианному и от радианного измерения к градусному:

$$\varphi = \frac{\pi\varphi^\circ}{180^\circ} \text{ рад} \quad \text{и} \quad \varphi^\circ = \frac{180^\circ}{\pi}\varphi.$$

Обозначение «рад» при записи часто опускают и вместо, например, $180^\circ = \pi$ рад пишут: $180^\circ = \pi$.

ГРАДУСЫ	РАДИАНЫ	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$
0	0	0	1
30	$\pi/6$	$1/2$	$\sqrt{3}/2$
45	$\pi/4$	$\sqrt{2}/2$	$\sqrt{2}/2$
60	$\pi/3$	$\sqrt{3}/2$	$1/2$
90	$\pi/2$	1	0
180	π	0	-1
270	$3\pi/2$	-1	0
360	2π	0	1

ЗНАЧЕНИЯ СИНУСОВ И КОСИНУСОВ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ УГЛОВ

Для решения практических задач можно использовать таблицы синусов и косинусов для различных углов. При этом, если посмотреть на значения в радианах достаточно малых углов и значения соответствующих им синусов, то видно, что для таких углов эти значения очень близки, а при округлении до второго порядка после запятой они совпадают. Поэтому можно записать, что для небольших углов

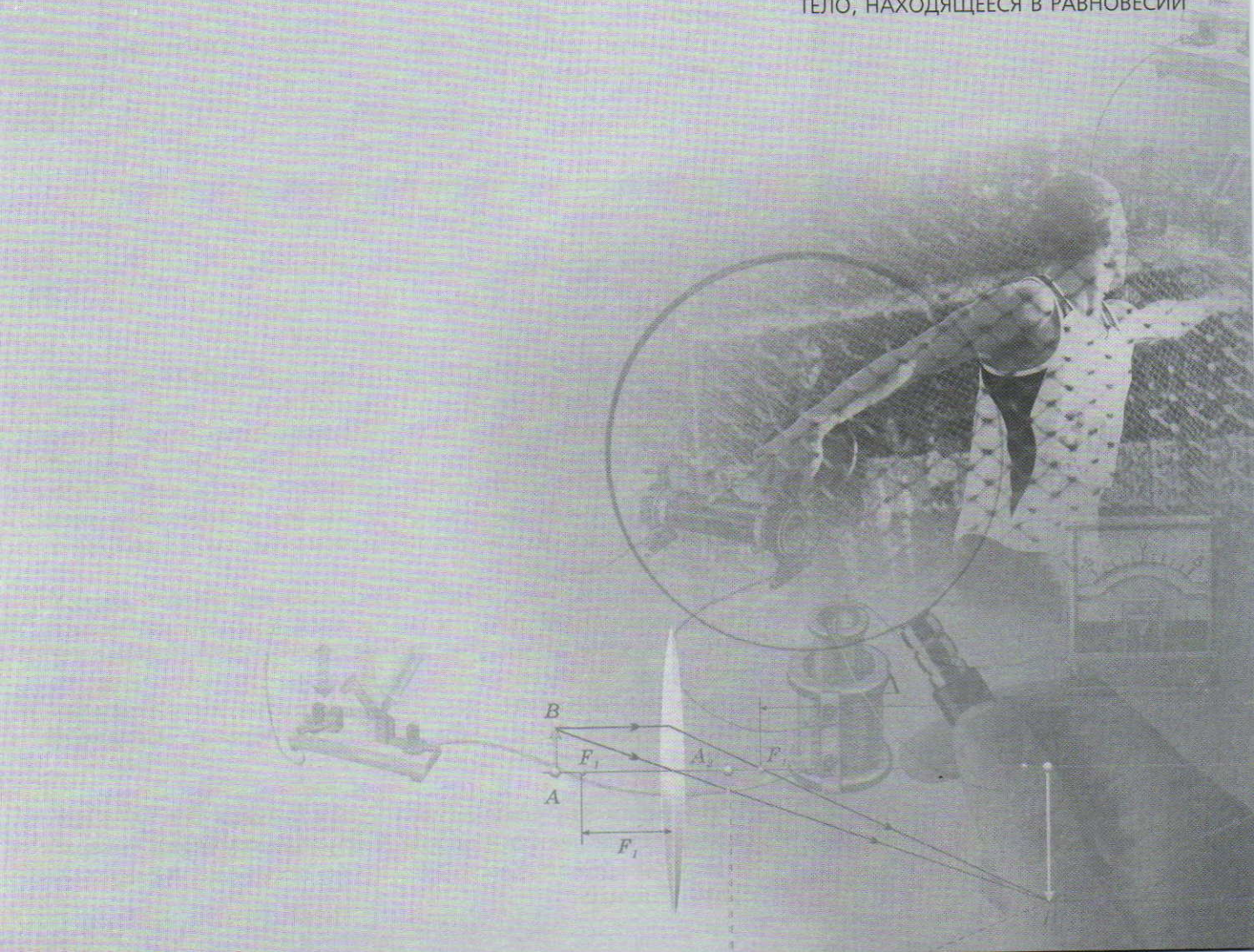
$$\sin\varphi \approx \varphi.$$

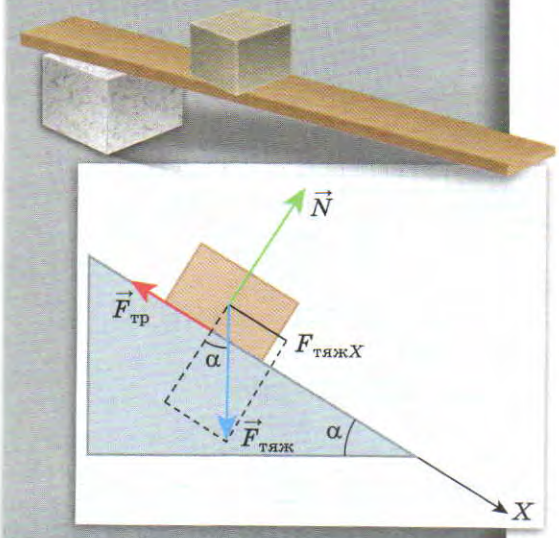
ГРАДУСЫ	РАДИАНЫ	$\sin\varphi$
1	0,017453	0,017452
2	0,034907	0,034899
3	0,052360	0,052336
4	0,069813	0,069756
5	0,087266	0,087156
6	0,104720	0,104528
7	0,122173	0,121869
8	0,139626	0,139173
9	0,157080	0,156434
10	0,174533	0,173648
11	0,191986	0,190809
12	0,209440	0,207912
13	0,226893	0,224951
14	0,244346	0,241922
15	0,261799	0,258819

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕКТОРОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Приложение 2

- ТЕЛО, НАХОДЯЩЕЕСЯ В ПОЛОЖЕНИИ РАВНОВЕСИЯ НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ
- ДВИЖЕНИЕ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ
- ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ОДНОИМЁННО ЗАРЯЖЕННЫХ ШАРИКОВ, ПОДВЕШЕННЫХ НА НИТЯХ
- ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ
- ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ
- ПОДВЕШЕННОЕ НА ДВУХ ШНУРАХ ТЕЛО, НАХОДЯЩЕЕСЯ В РАВНОВЕСИИ





ТЕЛО, НАХОДЯЩЕЕСЯ В ПОЛОЖЕНИИ РАВНОВЕСИЯ НА НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ Пусть на наклонной плоскости с углом $\alpha = 15^\circ$ лежит деревянный брусок массой 200 г. Брусок не движется относительно наклонной плоскости, т. е. находится в состоянии равновесия. Определим силу трения, действующую на этот брусок.

Свяжем систему отсчёта с Землёй (инерциальная система отсчёта). Направим ось OX вдоль наклонной плоскости вниз. Брусок покоится, т. е. его ускорение $\vec{a} = 0$. Изобразим силы, действующие на брусок: сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$, сила трения $\vec{F}_{тр}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$. Почему брусок не движется вниз под действием силы тяжести? Этому препятствует сила трения. Запишем второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_{тр} + \vec{N} = m \cdot \vec{a}.$$

В проекциях на ось OX получим

$$F_{тяжX} + F_{трX} + N_X = m \cdot a_X.$$

Поскольку сила реакции опоры $\vec{N}$ перпендикулярна поверхности наклонной плоскости, то $N_X = 0$. Направление силы трения противоположно направлению оси OX, поэтому $F_{трX} = -F_{тр}$.

Согласно рисунку $F_{тяжX} = mg \sin\alpha$. Учитывая, что $a_X = 0$, получаем

$$mg \sin\alpha - F_{тр} = 0,$$
$$F_{тр} = mg \sin\alpha.$$

Установим наименование полученной величины:

$$\left[F_{тр}\right] = кг \cdot \frac{м}{с^2} = Н.$$

Подставив числовые значения, получим

$$F_{тр} = 0{,}2 \cdot 9{,}8 \cdot 0{,}26 = 0{,}51\ Н.$$

ДВИЖЕНИЕ ПО НАКЛОННОЙ ПЛОСКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ Пусть по наклонной плоскости движется тележка массой 270 г. Её движение обусловлено действием силы тяжести. Рассмотрим движение тележки с учётом того, что *силы трения малы и ими можно пренебречь*. Ответим на вопрос: с каким ускорением движется тележка по наклонной плоскости, угол наклона α которой составляет 30°?

Свяжем систему отсчёта с Землёй. Направим ось OX вдоль наклонной плоскости по направлению движения тележки. Обозначим ускорение, с которым движется тележка, $\vec{a}$. Так как силой трения мы пренебрегаем, то можно сказать, что на тележку действуют две силы: сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$ и сила реакции опоры $\vec{N}$. Согласно второму закону Ньютона

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{N} = m \cdot \vec{a}.$$

Запишем это уравнение в проекциях на ось OX. Поскольку сила реакции опоры $\vec{N}$ перпендикулярна поверхности наклонной плоскости, то её проекция на ось OX будет равна 0.

Тогда $F_{тяжX} = m \cdot a_X$, откуда

$$a_X = \frac{F_{тяж}}{m}.$$

Согласно рисунку $F_{тяжX} = mg \sin\alpha$. Получаем

$$a = a_X = g \sin\alpha.$$

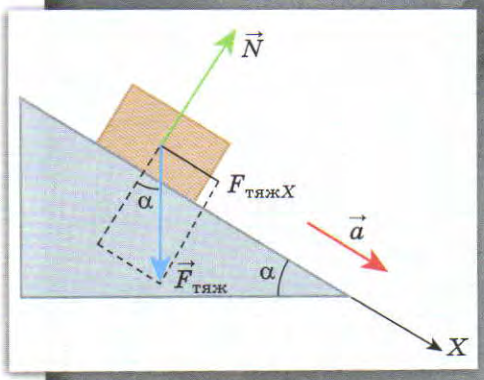
Установим наименование полученной величины:

$$[a] = \frac{м}{с^2}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$a = 9{,}8 \cdot 1/2 = 4{,}9 \text{ м/с}^2.$$

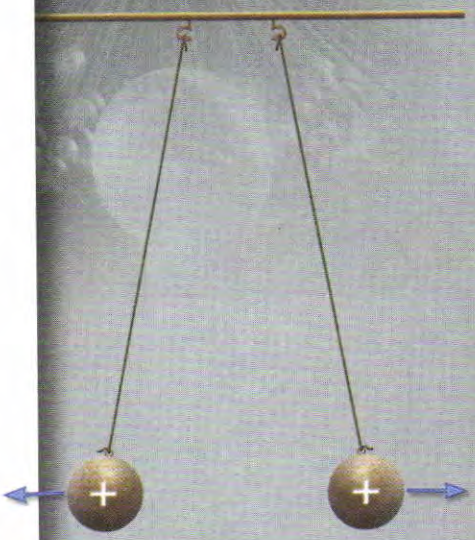
Таким образом, ускорение, с которым движется тележка, составляет 4,9 м/с².



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ОДНОИМЁННО ЗАРЯЖЕННЫХ ШАРИКОВ, ПОДВЕШЕННЫХ НА НИТЯХ Рассмотрим вопрос о том, с какой силой взаимодействуют два небольших одинаковых заряженных шарика массой по 50 г. Для упрощения задачи будем считать, что нити являются *невесомыми*, *непроводящими* и *нерастяжимыми*.

Так как знаки зарядов одинаковы, между шариками действуют силы отталкивания, и нити отклоняются от вертикального положения. Пусть угол α между нитью и вертикалью составляет 6°.

Так как мы рассматриваем одинаковые шары, достаточно изобразить на рисунке силы, действующие на один из шаров (для другого шара ситуация будет аналогичной).



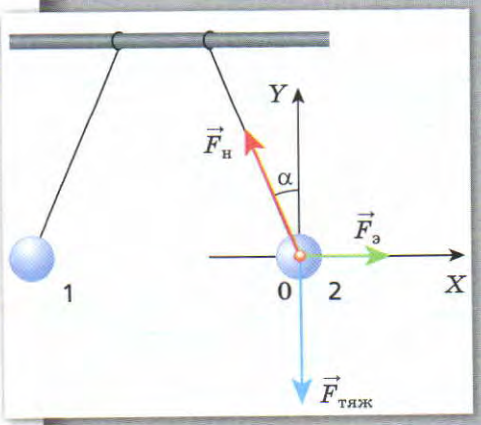
На шар действуют следующие силы: сила тяжести $\vec{F}_{тяж}$, сила со стороны нити $\vec{F}_н$, электрическая сила $\vec{F}_э$. Поскольку шары заряжены одинаково, то под действием электрической силы они будут взаимно отталкиваться, причём согласно третьему закону Ньютона с силами, равными по модулю. Поэтому для решения задачи достаточно найти значение силы $\vec{F}_э$, действующей на один из двух шаров.

Выберем систему отсчёта, связанную с Землёй. Согласно второму закону Ньютона

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_н + \vec{F}_э = m\vec{a}.$$

Шары покоятся относительно земли, следовательно, ускорение каждого из них $\vec{a} = 0$. Поэтому

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_н + \vec{F}_э = 0.$$



Можно записать:

$$F_{тяжX} = 0,\ F_{тяжY} = -mg,$$
$$F_{нX} = -F_н \sin\alpha,\ F_{нY} = F_н \cos\alpha,$$
$$F_{эX} = F_э,\ F_{эY} = 0.$$

Поэтому в проекциях на оси OX и OY получим систему уравнений:

$$\begin{cases} F_э - F_н \sin\alpha = 0, \\ F_н \cos\alpha - mg = 0. \end{cases}$$

Мы получили систему двух линейных уравнений с двумя неизвестными. Выразим из второго уравнения величину $F_н$:

$$F_н = \frac{mg}{\cos\alpha}.$$

Подставив $F_н$ в первое уравнение, получим

$$F_э = mg\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}.$$

Установим наименование полученной величины:

$$[F_э] = кг\cdot\frac{м}{с^2} = Н.$$

Для численного решения задачи учтём, что

$$m = 50\ г = 5\cdot10^{-2}\ кг,\ \alpha = 6^\circ \approx 1{,}1\cdot10^{-1}\ рад.$$

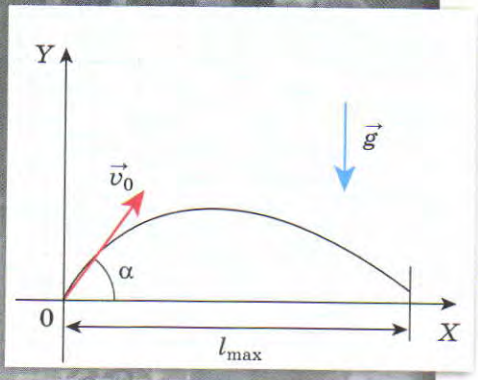
Подставив числовые значения, получим

$$F_э = 5\cdot10^{-2}\cdot9{,}8\cdot\frac{\sin(0{,}11)}{\cos(0{,}11)} \approx 5{,}4\cdot10^{-2}\ Н = 54\ мН.$$

Таким образом, сила, с которой взаимодействуют шары, составляет ≈ 54 мН.

ДВИЖЕНИЕ ТЕЛА, БРОШЕННОГО ПОД УГЛОМ К ГОРИЗОНТУ

Рассмотрим ситуацию, в которой человек бросает мяч под углом к горизонту. Пусть совершено три броска, причём в первый раз мяч брошен под углом $\alpha = 30^\circ$ к горизонту, второй раз — под углом 45°, а третий — под углом 60°. Ответим на вопрос: чему равна дальность полёта мяча в каждом из этих трёх случаев? При этом начальную скорость мяча во всех случаях будем считать одинаковой и равной 25 м/с.



Обозначим начальную скорость, с которой тело (мяч) брошено под углом к горизонту, $\vec{v}_0$. Для решения задачи выберем систему отсчёта, связанную с Землёй. Ось OX направим горизонтально по направлению полёта мяча, ось OY — вертикально вверх.

Поскольку высота подъёма мяча много больше роста человека, можно считать, что проекции на ось OY начального положения мяча и положения мяча в точке падения равны нулю.

Допустим, что $x_0 = 0$, $t_0 = 0$.

Тогда, уравнение движения мяча будет иметь вид

$$\vec{s} = \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a}t^2}{2},\ \text{где}\ \vec{a} = \vec{g}.$$

Дальность полёта мяча l_{max} из уравнения движения может быть определена по формуле

$$l_{max} = s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t_п^{\ 2}}{2},$$

где s_x — это проекция перемещения за время полёта мяча $t_п$.

Поскольку $a_x = g_x = 0$, а $v_{0x} = v_0\cdot\cos\alpha$, то

$$l_{max} = v_0 t_п\cdot\cos\alpha.$$

Время полёта можно определить, учитывая, что в момент падения проекция перемещения на ось OY будет равна нулю: $s_y = 0$, т. е.

$$0 = v_{0y}t_п + \frac{a_y t_п^{\ 2}}{2}.$$

Но $a_y = -g$, $v_{0y} = v_0 \cdot \sin\alpha$. Получим

$$v_0 t_п \cdot \sin\alpha - \frac{g t_п^{\ 2}}{2} = 0.$$

Решая данное квадратное уравнение, получаем два корня:

$$t_п = 0$$

(соответствует начальному положению мяча)

и

$$t_п = \frac{2v_0 \cdot \sin\alpha}{g}.$$

Сравним полученное время $t_п$ со временем $t_{под}$, затраченным телом на подъём до наивысшей точки траектории. Поскольку в этой точке $v_y = 0$, то

$$v_y = v_{0y} - g t_{под} = 0.$$

Следовательно,

$$v_0 \cdot \sin\alpha - g t_{под} = 0, \quad t_{под} = \frac{v_0 \cdot \sin\alpha}{g}.$$

Таким образом, время подъёма до наивысшей точки траектории равно половине полного времени полёта. Отсюда следует, что время от момента, когда тело достигает максимальной высоты, до момента падения тела равно времени $t_{под}$.

Получим выражение для дальности полёта тела:

$$l_{max} = \frac{2v_0^{\ 2} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha}{g}.$$

Установим наименование полученной величины:

$$[l_{max}] = \frac{м^2}{с^2} \cdot \frac{с^2}{м} = м.$$

Подставив числовые значения, получим для $\alpha = 30^\circ$:

$$l_{max1} = \frac{2 \cdot 625 \cdot 0{,}87 \cdot 0{,}5}{9{,}8} \approx 55{,}23\ м;$$

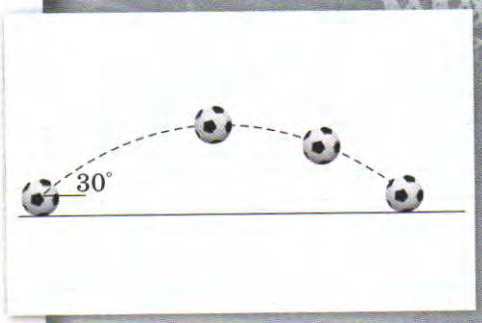
для $\alpha = 45^\circ$:

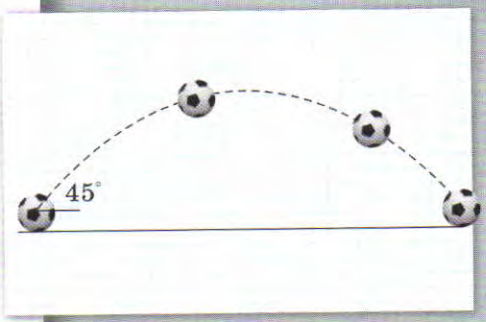
$$l_{max2} = \frac{2 \cdot 625 \cdot 0{,}71 \cdot 0{,}71}{9{,}8} \approx 63{,}78\ м;$$

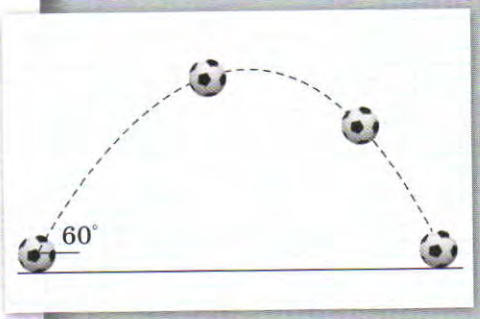
для $\alpha = 60^\circ$:

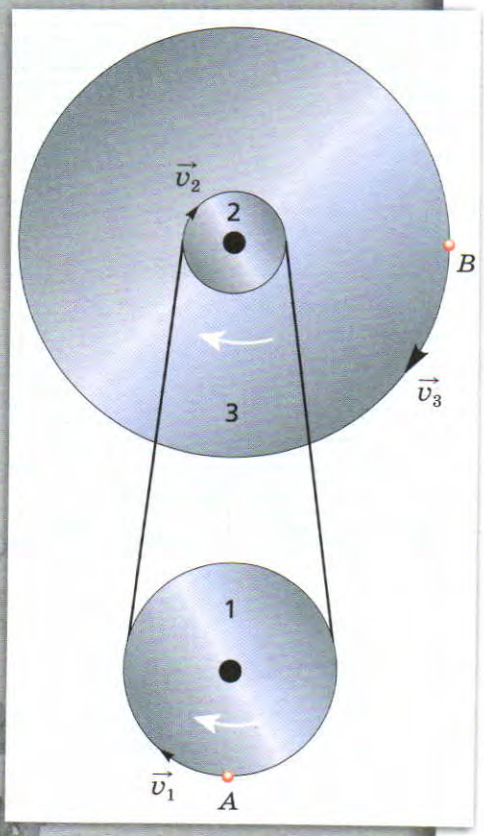
$$l_{max3} = \frac{2 \cdot 625 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}87}{9{,}8} \approx 55{,}23\ м.$$

Таким образом, наибольшая дальность полёта мяча 63 м 78 см соответствует броску, совершённому под углом к горизонту, равному 45°.









ДВИЖЕНИЕ ПО ОКРУЖНОСТИ В настоящее время в различных отраслях промышленности широко используют шкивы, являющиеся необходимой частью многих механизмов. *Шкивом* называется колесо, имеющее ободок или маленькую канавку по длине окружности. Основное применение шкива — ременная передача.

Пусть шкив ***1*** приводит во вращение шкив ***3*** при помощи ременной передачи и шкива ***2***, жёстко закреплённого на шкиве ***3***. Найдём скорость, с которой движется точка B шкива ***3*** относительно оси шкива, если скорость точки A относительно оси шкива ***1*** составляет 1 м/с. Будем считать, что ремень движется без проскальзывания. Пусть $R_1 = 15$ см, $R_2 = 6$ см, $R_3 = 30$ см.

Рассмотрим этот механизм. Поскольку шкивы ***2*** и ***3*** скреплены друг с другом, то периоды их обращения должны быть равны: $T_2 = T_3$. Шкивы ***1*** и ***2*** связаны ременной передачей, причём при вращении шкива ***1*** ремень не проскальзывает, следовательно, все точки поверхности шкива ***2***, соприкасающиеся с ремнём, вращаются с той же по модулю скоростью, что и точка A поверхности шкива ***1***:

$$\upsilon_2 = \upsilon_1 = \upsilon_A.$$

Скорость вращения точек на поверхности шкива может быть определена по формуле

$$\upsilon = \frac{2\pi R}{T},$$

где T — период вращения; R — радиус шкива.

Как следует из рисунка

$$\upsilon_2 = \frac{2\pi R_2}{T_2}.$$

Так как $\upsilon_2 = \upsilon_A$, то

$$T_2 = \frac{2\pi R_2}{\upsilon_A}.$$

Но $T_2 = T_3$ и $\upsilon_3 = \upsilon_B$, т. е.

$$T_3 = \frac{2\pi R_3}{\upsilon_B}.$$

Получим

$$\frac{2\pi R_3}{\upsilon_B} = \frac{2\pi R_2}{\upsilon_A}.$$

Следовательно,

$$\upsilon_B = \upsilon_A \cdot \frac{R_3}{R_2}.$$

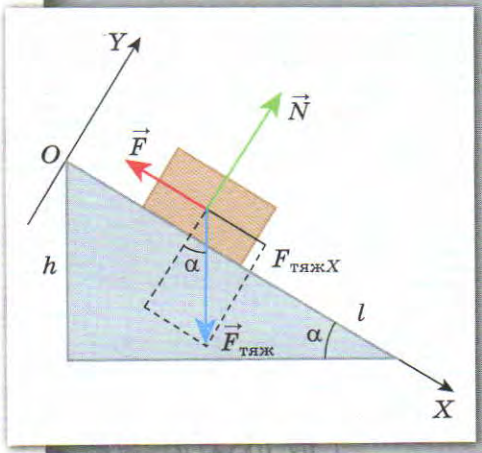
Установим наименование полученной величины:

$$[\upsilon_B] = \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Подставив значения, получим

$$\upsilon_B = 1 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-1}}{6 \cdot 10^{-2}} = 5 \text{ м/с}.$$

НАКЛОННАЯ ПЛОСКОСТЬ И ВЫИГРЫШ В СИЛЕ Груз массой m поднимают по наклонной плоскости длиной l и высотой h. Определим выигрыш в силе, получаемый благодаря использованию наклонной плоскости. Трением пренебречь.



Свяжем систему отсчёта с Землёй. Направим ось OX вдоль наклонной плоскости вниз, а ось OY перпендикулярно оси OX. Для того чтобы поднять груз по наклонной плоскости, необходимо подействовать на него с силой $\vec{F}$, направленной вверх вдоль наклонной плоскости.

Выигрыш в силе n показывает, во сколько раз значение приложенной силы при использовании простого механизма (наклонной плоскости) меньше силы, которую следовало бы приложить для преодоления силы тяжести, действующей на тело при его подъёме, т. е.

$$n = \frac{F_{тяж}}{F}.$$

Поскольку силой трения пренебрегаем, то второй закон Ньютона будет иметь вид

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{N} + \vec{F} = m\vec{a},$$

где $\vec{F}_{тяж}$ — сила тяжести, действующая на тело, $\vec{N}$ — сила реакции опоры, $\vec{F}$ — сила, действующая на тело. Допустим, что величина силы $\vec{F}$ такова, что груз поднимается равномерно, т. е. $\vec{a} = 0$.

Тогда

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{N} + \vec{F} = 0.$$

Поскольку в выбранной системе отсчёта

$$F_{тяжX} = mg \cdot \sin\alpha,$$
$$F_{тяжY} = -mg \cdot \cos\alpha,$$
$$N_X = 0,\ N_Y = N,$$
$$F_X = -F,\ F_Y = 0,$$

то в проекциях на оси OX и OY получим систему уравнений

$$\begin{cases} mg \cdot \sin\alpha - F = 0 \\ N - mg \cdot \cos\alpha = 0. \end{cases}$$

Из первого уравнения выразим

$$F = mg \cdot \sin\alpha.$$

По определению синуса

$$\sin\alpha = \frac{h}{l}.$$

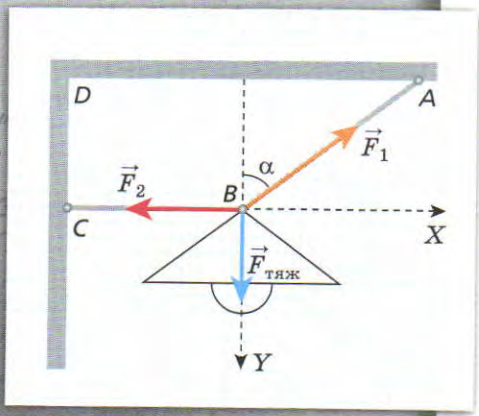
Тогда выигрыш в силе

$$n = \frac{F_{тяж}}{F} = \frac{mg}{mg \cdot \frac{h}{l}} = \frac{l}{h}.$$

Выигрыш в силе будет тем больше, чем больше длина наклонной плоскости по отношению к её высоте.

ПОДВЕШЕННОЕ НА ДВУХ ШНУРАХ ТЕЛО, НАХОДЯЩЕЕСЯ В РАВНОВЕСИИ Электрическая лампа массой 400 г подвешена на шнуре AB длиной 2 м и отведена в сторону посредством горизонтального шнура BC длиной 0,8 м. Определим значение сил, действующих со стороны шнуров на лампу, если расстояние DA равно 2 м.

Свяжем систему отсчёта с Землёй (инерциальная система отсчёта). Направим ось OX горизонтально, а ось OY вертикально так, как показано на рисунке. Лампа покоится, т. е. её ускорение $\vec{a} = 0$.



На лампу, подвешенную на двух шнурах, действуют следующие силы: $\vec{F}_{тяж}$ — сила тяжести, $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ — силы, действующие со стороны шнуров.

Запишем второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = m\vec{a}.$$

Так как в выбранной системе отсчёта $\vec{a} = 0$, то

$$\vec{F}_{тяж} + \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0.$$

Можно записать: $F_{тяжX} = 0$; $F_{тяжY} = mg$;

$$F_{1X} = F_1 \sin\alpha;\ F_{1Y} = -F_1 \cos\alpha;\ F_{2X} = -F_2,\ F_{2Y} = 0.$$

В проекциях на оси OX и OY получим систему уравнений:

$$\begin{cases} F_1 \sin\alpha - F_2 = 0, \\ mg - F_1 \cos a = 0. \end{cases}$$

Из второго уравнения выразим

$$F_1 = \frac{mg}{\cos\alpha}$$

и подставим в первое уравнение. Получим

$$F_2 = \frac{mg}{\cos\alpha} \cdot \sin\alpha.$$

Из определения синуса и косинуса следует, что

$$\sin\alpha = \frac{EA}{AB} = \frac{DA - BC}{AB},$$

$$\cos\alpha = \frac{EB}{AB} = \frac{\sqrt{AB^2 - (DA - BC)^2}}{AB}.$$

Получим

$$\sin\alpha = \frac{2 - 0{,}8}{2} = 0{,}6;$$

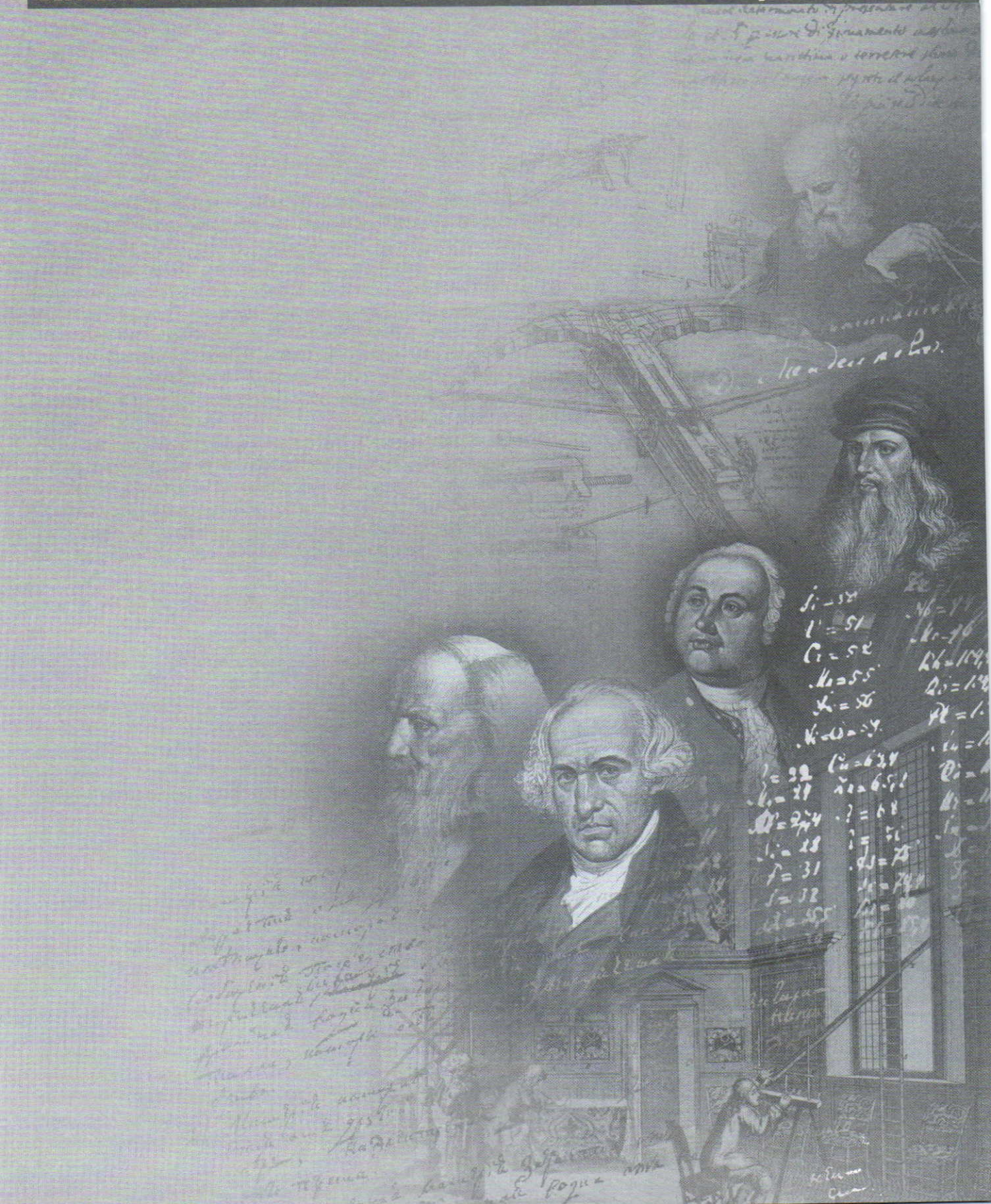
$$\cos\alpha = \frac{\sqrt{2^2 - (2 - 0{,}8)^2}}{2} = 0{,}8;$$

$$F_1 = \frac{0{,}4 \cdot 9{,}8}{0{,}8} = 4{,}9\ \text{Н};$$

$$F_2 = \frac{0{,}4 \cdot 9{,}8}{0{,}8} \cdot 0{,}6 = 2{,}9\ \text{Н}.$$

ИМЕНА В ИСТОРИИ ФИЗИКИ

Приложение 3



1500—1557

Никколо Тарталья. Итальянский математик.
Тарталья занимался математикой, механикой, баллистикой, геодезией. Он показал, что траектория полёта снаряда на всём протяжении есть кривая линия (парабола) и что наибольшая дальность полёта снаряда соответствует углу в 45°. В работе «Общий трактат о числе и мере» Тарталья привёл свои исследования по арифметике, алгебре и геометрии.

1571—1630

Иоганн Кеплер. Немецкий астроном, один из творцов астрономии нового времени. Открыл законы движения планет.
На основе наблюдений Тихо Браге и своих собственных Кеплер доказал, что планеты движутся не по круговым орбитам, а по эллиптическим, сформулировал три закона движения планет. Он высказал справедливые догадки о существовании между небесными телами тяготения и объяснил приливы и отливы земных океанов воздействием Луны. Составленные Кеплером «Рудольфовы таблицы» давали возможность вычислять для любого момента времени положение планет с высокой для той эпохи точностью.
В трактате «Дополнение к Виттело» Кеплер описал преломление света, рефракцию, создал теорию оптического изображения с учётом геометрического построения. Он также объяснил роль хрусталика в глазе и описал причины близорукости и дальнозоркости. Кеплер известен как конструктор телескопа (так называемая зрительная труба Кеплера), состоящего из двух двояковыпуклых линз.

1580—1626

Виллеброрд Снеллиус (Снелль, ван Снел ван Ройен). Голландский астроном и математик.
В 1621 г. Снеллиус экспериментально открыл закон преломления света. Также он предложил использовать метод подобия треугольников при проведении геодезических измерений. Этим методом он нашёл решение задачи Потенота — определение местоположения корабля, с которого видны три маяка, координаты которых известны.

1618—1663

Франческо Мария Гримальди. Итальянский физик и астроном.
В труде «Физическая наука о свете, цветах и радуге» Гримальди впервые описал открытое им явление дифракции света, а также подробно описал явления распространения света, отражения, преломления, изложил свои представления (правда, противоречивые) относительно природы света, разработал теорию цветов, считая цвет «модификацией света». Гримальди описал солнечный спектр, полученный с помощью призмы. Совместно с итальянским астрономом Дж. Риччиоли Гримальди определил величину поверхности Земли, составил карту Луны и ввёл название лунных образований, употребляющиеся по сей день.

Христиан Гюйгенс. Голландский математик, физик, астроном и механик.
Одним из важнейших открытий Гюйгенса было изобретение маятниковых часов. В своих трудах он описал конструкции часов и разработал теорию колебаний физических тел.
В работе «Трактат о свете» он изложил волновую теорию света, в которой дал описание механизмов распространения, отражения, преломления света. Для объяснения этих оптических явлений он предложил известный принцип, названный его именем (принцип Гюйгенса).
С помощью сконструированного им телескопа Гюйгенс обнаружил кольцо у Сатурна и его спутник Титан, определил период обращения Титана вокруг планеты.

1629—1695

Олаф (Оле) Кристенсен Рёмер. Датский астроном, первым измеривший скорость света.
Наблюдая за одним из спутников Юпитера Ио, Рёмер заметил, что его затмения наступают с некоторым запаздыванием, когда Земля находится дальше от Юпитера. Рёмер правильно объяснил это явление: задержка затмения равна времени, которое потребовалось свету, чтобы пройти расстояние, равное диаметру земной орбиты. Разделив это расстояние на время запаздывания, Рёмер получил значение скорости света.

1644—1710

Томас Юнг. Английский физик, врач, астроном и востоковед.
Юнг — один из создателей волновой теории света. Он впервые указал на усиление и ослабление звука при наложении звуковых волн (интерференции звука) и предложил принцип суперпозиции волн.
В 1801 г. он первый объяснил явление интерференции света, ввёл термин «интерференция», дал интерпретацию колец Ньютона. Юнг также выполнил первый эксперимент по наблюдению интерференции света, попытался объяснить дифракцию света. Разрабатывая теории цветового зрения, Юнг измерил длины волн разных цветов. В статье «Механизм глаза» он дал объяснение природе аккомодации, астигматизма и цветового зрения.

1773—1829

Йозеф Фраунгофер. Немецкий физик, знаменитый оптик.
В 1814 г. Фраунгофер (независимо от У. Волластона) описал тёмные линии в солнечном спектре, названные впоследствии его именем. Подобные линии он обнаружил и в спектрах Луны, Марса, Венеры. Он первым разделил звёзды на три спектральные группы. Проведённое им исследование стало основой для определения температуры звезды. Он ввёл существенное усовершенствование в технологии изготовления линз, сконструировал спектрометр, ахроматический микроскоп, который не давал радужного ореола вокруг изображения, и другие оптические приборы.

1787—1826

1791—1867

Майкл Фарадей. Английский физик и химик, основоположник учения об электромагнитном поле.

Фарадей занимался исследованием связи между электрическими и магнитными явлениями, в результате которого было открыто явление электромагнитной индукции — возникновение электрического тока в проводнике при изменении магнитного потока через контур проводника. Он доказал тождественность известных тогда видов электричества: «животного», «магнитного», термоэлектричества, электричества, возникающего от трения, гальванического электричества.

Фарадей проводил эксперименты по исследованию прохождения тока через растворы кислот, солей и щелочей, результатом которых стало открытие законов электролиза (законы Фарадея).

1804—1891

Вильгельм Эдуард Вебер. Немецкий физик, основные работы которого посвящены электромагнетизму, а также акустике, теплоте и молекулярной физике.

Изучая электромагнитные явления, Вебер теоретически вывел закон взаимодействия движущихся зарядов, в котором учитывались не только знаки и величина зарядов, но и относительная скорость их перемещения. Он определил скорость света, исходя из отношения заряда конденсатора в электростатических и магнитных единицах. Полученное им значение совпадало со скоростью света, вычисленной из оптических опытов Арман Физо.

Также Вебер изобрёл ряд физических приборов, в частности электродинамометр. Его именем названа единица магнитного потока.

1811—1899

Роберт Вильгельм Бунзен. Знаменитый немецкий химик-экспериментатор.

В 1859 г. Бунзен вместе с другим немецким химиком Густавом Кирхгофом, изучая спектры пламени, окрашенные парами разных металлических солей, разработал метод спектрального анализа. С помощью этого метода они открыли два новых химических элемента: цезий и рубидий.

Бунзен является изобретателем ряда лабораторных приборов. Горелка, названная его именем, служила источником света в ранних исследованиях по спектральному анализу.

1821—1894

Герман Гельмгольц. Немецкий физик, математик, физиолог и психолог, положивший начало акустике.

Гельмгольц активно занимался изучением физиологии зрения и слуха. Он создал теорию резонанса, построил модель уха, позволившую изучить характер воздействия звуковых волн на орган слуха, разработал математическую теорию для объяснения оттенков звука с помощью обертонов.

Для изучения глазного дна Гельмгольц изобрёл офтальмоскоп и офтальмометр — для измерения радиуса кривизны роговой оболочки. С помощью этих приборов он изучал преломление лучей в глазу.

Густав Роберт Кирхгоф. Знаменитый немецкий физик.
Кирхгоф вместе с другим немецким химиком Робертом Бунзеном разработал метод спектрального анализа. С помощью этого метода они открыли два новых химических элемента: цезий и рубидий. Кирхгоф объяснил происхождение фраунгоферовых линий в солнечном спектре, высказал предположение, что Солнце состоит из раскалённой жидкой массы, окружённой атмосферой пара.
Кирхгоф также занимался изучением теплового излучения тел и открыл один из его законов. Он ввёл понятие «абсолютно чёрного тела» и предложил его модель — полость с небольшим отверстием.
Кирхгоф открыл закономерности в протекании электрического тока в разветвлённых электрических цепях (законы Кирхгофа).

1824—1887

Джеймс Клерк Максвелл. Английский физик, создатель классической электродинамики, один из основателей статистической физики.
Самым большим научным достижением Максвелла считается созданная им теория электромагнитного поля. Он сформулировал её в виде системы уравнений (уравнения Максвелла), описывающих основные закономерности электромагнитных явлений. Максвелл пришёл к выводу, что свет является электромагнитной волной и показал связь между оптическими и электромагнитными явлениями.
Он занимался исследованиями по физиологии и физике цветного зрения и колориметрии, создал один из первых приборов для количественного измерения цвета, получившего название диска Максвелла.

1831—1879

Вильгельм Конрад Рентген. Немецкий физик, первый лауреат Нобелевской премии по физике за открытие лучей, названных его именем.
Занимаясь исследованием катодных лучей, Рентген заметил, что разрядная трубка, обёрнутая чёрной бумагой, не пропускающей обычный свет, испускала неизвестное излучение, которое засвечивало пластинку, а также вызывало свечение экрана, покрытого слоями бария. Это излучение Рентген назвал Х-лучами. Он исследовал их свойства, показал, что они могут отражаться, поглощаться, ионизировать воздух, а также обладали большой проникающей способностью. В последующем эти лучи были названы рентгеновскими лучами.

1845—1923

Александр Грехэм Белл. Американский физик-изобретатель, основоположник телефонии.
Белл сформулировал основные идеи построения телефона и получил патент на своё изобретение — телефон. Он основал Ассоциацию глухих и плохо слышащих, которая действует до сих пор.
Белл был первым учёным, который количественно определил чувство слуха. Он обнаружил, что диапазон громкости, нормально воспринимаемой человеком, составляет 13 порядков.

1847—1922

1847—1923

Александр Николаевич Лодыгин. Русский электротехник, создатель лампы накаливания.

Работы по созданию электрооборудования летательных аппаратов привели Лодыгина к изобретению лампы накаливания. В своих первых опытах с лампами Лодыгин производил накаливание током железной проволоки, затем угольного стержня, помещённого в стеклянный баллон. Срок службы первых ламп был всего 30–40 мин.

Дальнейшие усовершенствования (включение нескольких стержней, выкачивание воздуха из колпака) позволили увеличить срок службы лампы до 700–1000 ч.

1847—1894

Павел Николаевич Яблочков. Учёный, изобретатель, получил первый в мире патент на изобретение электрической лампы.

Главное изобретение Яблочкова, получившее название «свечи Яблочкова», представляло собой первую модель дуговой лампы без регулятора.

Свеча Яблочкова оказалась проще, удобнее и дешевле в эксплуатации, чем угольная лампа А. Н. Лодыгина. Лампу Яблочкова в Европе современники называли «русским светом», в России — «русским солнцем».

1852—1908

Антуан Анри Беккерель. Французский физик, лауреат Нобелевской премии по физике, один из первооткрывателей радиоактивности.

Беккерель обнаружил, что некоторые соли урана вызывают почернение фотопластинок, завёрнутых в светонепроницаемую чёрную бумагу или металлическую фольгу. Это явление самопроизвольного испускания солями урана лучей особой природы впоследствии было названо радиоактивностью.

Беккерель (независимо от П. Кюри) обнаружил физиологическое действие радиоактивного излучения, а также его способность ионизировать газ. В честь учёного названа единица радиоактивности — беккерель.

1856—1943

Никола Тесла. Югославский физик, инженер, изобретатель в области электротехники и радиоэлектроники.

Тесла открыл явление вращающегося магнитного поля, на основе которого построил электрические генераторы переменного тока. Он также сконструировал высокочастотный трансформатор (трансформатор Тесла).

Тесла исследовал возможность беспроволочной передачи сигналов на большие расстояния. В 1899 г. он публично продемонстрировал лампы и двигатели, работающие на высокочастотном токе без проводов.

Тесла сконструировал несколько радиоуправляемых самоходных механизмов, изобрёл электрический счётчик, частотомер и др. В честь учёного названа единица магнитной индукции — тесла.

Генрих Рудольф Герц. Выдающийся немецкий физик. Его работы сыграли огромную роль в развитии науки и техники и обусловили возникновение беспроволочного телеграфа, радио и телевидения.

Герц экспериментально доказал существование электромагнитных волн и исследовал их свойства (отражение от зеркал, преломление в призмах и т. д.). Электромагнитные волны Герц получал с помощью изобретённого им вибратора (вибратор Герца). Он также предложил метод обнаружения электромагнитных волн с помощью резонатора (резонатор Герца).

Герц подтвердил выводы теории Максвелла о том, что скорость распространения электромагнитных волн в воздухе равна скорости света, установил тождественность основных свойств электромагнитных и световых волн.

1857—1894

Макс Планк. Выдающийся немецкий физик, один из основоположников квантовой теории, лауреат Нобелевской премии по физике.

Планк предположил, что излучение испускается отдельными порциями, или квантами. Он получил формулу, которая детально воспроизвела весь спектр излучения абсолютно чёрного тела, ввёл фундаментальную постоянную (постоянная Планка).

Гипотеза Планка о прерывистом характере излучения абсолютно чёрного тела сразу же получила экспериментальное подтверждение и явилась основой для построения совершенно новой теории — квантовой физики.

1858—1947

Пьер Кюри. Французский учёный-физик, лауреат Нобелевской премии по физике, один из первых исследователей радиоактивности.

Пьер Кюри занимался изучением радиоактивности вместе со своей женой Марией. Они открыли новый химический элемент — полоний, а затем — радий, обнаружили сложный характер излучения радия, изучили его действие на вещество и предложили методы получения радия.

1859—1906

Александр Степанович Попов. Выдающийся русский учёный, изобретатель радио.

Попов построил первый в мире радиоприёмник — «прибор для обнаружения и регистрирования электрических колебаний». В качестве источника электромагнитных колебаний Попов пользовался вибратором Герца. 7 мая 1895 г. Попов на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге и продемонстрировал в действии свои приборы связи. Это был день рождения радио.

Зимой 1899–1900 гг. приборы радиосвязи Попова выдержали серьёзный экзамен, они были успешно применены при спасении броненосца «Генерал-адмирал Апраксин», потерпевшего аварию у острова Гогланд (Финляндия). Незадолго до этого Попов построил приёмник нового типа, который принимал телеграфные сигналы на наушник на расстоянии 45 км.

1859—1905

1867—1934

Мария Склодовская-Кюри. Выдающийся физик и химик польского происхождения, дважды лауреат Нобелевской премии, занималась исследованием радиоактивности.

Мария занималась изучением радиоактивности вместе со своим мужем Пьером Кюри. Они открыли новый химический элемент — полоний, а затем — радий, обнаружили сложный характер излучения радия, изучили его действие на вещество и предложили методы получения радия.

Совместно с французским физиком А. Дебьерном Мария получила металлический радий, определила его атомный вес, установила его физические и химические свойства и место в периодической системе элементов.

Кюри установила влияние радиоактивного радия на человеческий организм, высказала предположение, что радий можно использовать в медицине, например для лечения опухолей. Марии принадлежат работы в области радиологии и рентгенологии.

1868—1953

Нильс Хенрик Давид Бор. Датский физик, исследовал строение атомов и испускаемое ими излучение, лауреат Нобелевской премии по физике.

Бор создал свою теорию строения атома на основе предложенных им постулатов (утверждений). Это была первая квантовая модель атома, положившая начало новой эре в атомной теории. Согласно этой теории в атоме существуют стационарные орбиты, двигаясь по которым электрон не излучает энергию. Однако электрон может перейти с одной стационарной орбиты на другую, при этом атом испускает или поглощает квант электромагнитного излучения, равный разности энергий атома в стационарных состояниях.

Теория Бора позволила объяснить целый ряд сложных вопросов строения атома, чего не в состоянии была сделать классическая физика.

Бор внёс большой вклад в развитие ядерной физики. Он является одним из создателей теории деления атомного ядра — процесса, сопровождаемого выделением огромного количества энергии, которая используется в современных атомных электростанциях.

1874—1937

Гульельмо Маркони. Выдающийся итальянский инженер-электрик и изобретатель радио, лауреат Нобелевской премии по физике за вклад в развитие беспроволочной телеграфии.

Маркони получил патент на применение электромагнитных волн для беспроводной связи.

Схема приёмника Маркони была такой же, как и схема приёмника Попова, но благодаря большим материальным ресурсам и энергии Маркони добился широкого практического применения нового способа связи. В 1898 г. он осуществил радиосвязь через Ла-Манш, а в 1901 г. — через Атлантический океан. Этот первый трансатлантический сеанс радиосвязи опроверг утверждения некоторых физиков о том, что радиоволны вследствие искривления земной поверхности будут распространяться на расстояние лишь до 300 км.

Отто Ган. Немецкий химик, изучал расщепление урана, лауреат Нобелевской премии по химии.
Ган совместно с Лизе Майтнер исследовал проблему испускания электронов из радиоактивных ядер (бета-распад) и идентифицировал несколько ранее неизвестных радиоактивных продуктов, полученных в процессе трансформации.
Совместно с Фрицем Штрассманом Ган обнаружил, что бомбардировка урана нейтронами приводит к образованию более лёгких элементов с выделением огромного количества энергии.
Он выступал с публичными предостережениями об опасности, которую несёт атомная бомба. Ган объединил многих физиков, страшившихся последствий совершенствования ядерного оружия.

1879—1968

Эдвин Хаббл. Знаменитый американский астроном.
Основные труды Хаббла посвящены изучению галактик, они положили начало современной внегалактической астрономии.
Он предложил подразделить наблюдаемые туманности на внегалактические (галактики) и галактические (газопылевые).
Хаббл обнаружил на фотографиях некоторых ближайших галактик звёзды, из которых они состоят, чем доказал, что наша Галактика — не единственная звёздная система во Вселенной.
В 1929 г. учёный обнаружил, что галактики разлетаются со скоростью, пропорциональной расстоянию между ними (закон Хаббла).
В честь Хаббла назван астероид № 2069, открытый в 1955 г., а также знаменитый космический телескоп «Хаббл», выведенный на орбиту в 1990 г.

1904—1968

Фриц Штрассман. Немецкий физик и химик, изучал процессы ядерного деления.
Научные труды Штрассмана посвящены ядерной химии, ядерному делению, изучению радиоактивных изотопов урана и тория.
Совместно с немецким химиком Отто Ганом Штрассман открыл деление ядер урана в результате бомбардировки их нейтронами, дал химическое доказательство процессу деления.

1902—1980

Георгий Антонович (Джордж) Гамов. Российский и американский физик-теоретик, астрофизик и популяризатор науки.
Гамов предложил модель «горячей Вселенной» — уточнение теории Большого взрыва, согласно которой эволюция Вселенной начинается с состояния плотной горячей плазмы, состоящей из элементарных частиц, и в дальнейшем расширяется.
Её основаниями стали представления о расширении Вселенной, данные о современной распространённости элементов и оценки возраста Вселенной.

1904—1968

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вот и пройдена последняя глава учебника, заканчивается третий год изучения физики и завершается курс физики в основной школе. В этом году вы продолжили изучение многих физических явлений, с которыми познакомились в предыдущие два года, а также получили представление о новых, ранее вам незнакомых явлениях и процессах.

За три года вы познакомились со всеми основными разделами физики. Вы узнали о физических явлениях и законах, как вблизи поверхности Земли, так и в далёком космосе. Вы смогли узнать о том, как гений Ньютона впервые связал движение тел вблизи поверхности Земли и движение планет единым законом — законом Всемирного тяготения. Это было первое великое обобщение в истории физики, которое в конечном итоге привело к современному пониманию картины окружающего мира.

За период изучения физики вы узнали о природе электрических и магнитных явлений и их взаимосвязи, а также об электромагнитном поле и электромагнитных волнах. На основе экспериментальных работ Фарадея и других выдающихся физиков того времени Максвеллом была создана единая электромагнитная теория, ставшая вторым великим обобщением в истории физики. Эта теория стала основой технического прогресса человечества в конце XIX—начале XX вв. Подчеркнём ещё раз, что свет, который излучают Солнце и звёзды, имеет электромагнитную природу.

Вы получили представления об основах строения вещества и узнали о таких фундаментальных кирпичиках мироздания, как атомы и молекулы. Вы также познакомились с тепловыми явлениями и процессами, связанными с переходами вещества из одного агрегатного состояния в другое. Эти открытия привели к созданию теплового двигателя и определили развитие промышленности и техники в XIX в.

Мы только приоткрыли вместе с вами дверь в мир квантовых явлений. Современный мир, который движется к использованию достижений нанотехнологий, уже сейчас трудно представить без компьютеров, мобильных телефонов, телевидения и сложных медицинских устройств. Всё это базируется на достижениях квантовой физики.

Вы имеете теперь представления о строении атома и атомного ядра. Если электрон и атомное ядро связывают электромагнитные силы, то внутри ядра протоны и нейтроны вместе удерживает новый вид фундаментальных взаимодействий — сильные взаимодействия. Эти взаимодействия значительно превышают гравитационные и электромагнитные силы, но действуют на очень маленьких расстояниях внутри атомного ядра. Атомная и ядерная физика определила прогресс человечества в XX в, который иногда называют «веком атома».

Мы рассказали вам о Вселенной, о звёздах и далёких галактиках. Основные фундаментальные законы физики едины и работают от маленьких расстояний внутри атома до огромных масштабов Вселенной. Мириады звёзд, существующих во Вселенной, являются теми «термоядерными котлами», в кото-

рых из простейших частиц вещества рождаются атомы различных химических элементов, которые являются строительным материалом природы, окружающей нас. Именно эти элементы формируют сложные молекулы, из которых состоят, в том числе, и живые организмы.

При дальнейшем изучении физики вы узнаете о последнем, четвёртом типе фундаментальных взаимодействий, называемом слабым взаимодействием. Этот вид взаимодействий, хотя и назван слабым, определяет физические процессы на расстояниях много меньших размеров атомного ядра, и, как это ни парадоксально, является источником процессов, определяющих эволюцию звёзд. По-видимому, именно это имел в виду английский поэт Томас Элиот, написавший строки:

Мы никогда не перестанем искать
И в итоге всех наших поисков
Вернёмся к исходной точке
И увидим её словно впервые.

С достижениями в области физической науки также связаны надежды на решения разнообразных проблем, стоящих сегодня перед человечеством. Это — проблемы в области экологии, проблемы новых источников энергии, проблемы медицинской диагностики и многое другое.

В ближайшем будущем вам предстоит выбор предметов для дальнейшего изучения и выбор будущей профессии. Нам бы очень хотелось, чтобы вы продолжили изучение физики в старшей школе на новом, более глубоком уровне. Тем более, что именно сейчас перед физикой открылся новый горизонт интереснейших проблем, связанных с разгадкой таких тайн природы, как чёрные дыры, тёмная энергия, тёмная материя и другие интригующие загадки пространства и времени.

Знание физики также необходимо современным инженерам, программистам, врачам, биологам и даже архитекторам. Это стало особенно важным сейчас, когда многие достижения современных технологий рождаются на стыке различных наук.

Нам бы хотелось закончить этот учебник цитатой стихотворения нашего великого соотечественника М. В. Ломоносова:

Открылась бездна звезд полна;
Звездам числа нет, бездне дна.

Удачи вам в этом нелёгком, но очень интересном деле изучения физики!

ПРЕДМЕТНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аккомодация *89*
Акустика *42*
Амплитуда колебаний *29, 102*
Астрономия *140*
Астрофизика *140*
Атом *112, 118*
Атомная электростанция *128*
Атомный реактор *128*

Бинокулярное зрение *89*
Близорукость *91*

Вселенная *22, 132, 138*
— возраст *138*
— расширяющаяся *133*
Волны *36, 102, 106*
— звуковые *44, 48, 71*
— поперечные *37, 109*
— продольные *37, 44*
— радио *70, 136*
— сейсмические *39*
— упругие *37*
— электромагнитные *68, 109*
Высота звука *47*
Высота подъёма тела, брошенного
— вертикально вверх *9*
— горизонтально *11*
— под углом к горизонту *13*

Галактика *132, 141*
Гелиоцентрическая система мира *23*
Генератор переменного тока *63*
Глаз *88*
Гравитация *22, 124*
Громкость звука *46, 49*

Дальнозоркость *91*
Дальность полёта тела, брошенного
— горизонтально *11*
— под углом к горизонту *13*
Движение
— колебательное *26*
— криволинейное *10, 17*
— периодическое *26*
— по окружности *14*
— прямолинейное *8*
Дефект массы *124*
Дефектоскопия *53*
Деформация *37*
Дисперсия *101, 114*
Дифракция *106, 107*
Длина волны *38, 69, 103, 106*

Закон
— всемирного тяготения *18*
— Гука *27*
— независимости распространения света *79*
— отражения света *78*
— преломления света *83*
— прямолинейного распространения света *76*
— сохранения энергии *33*
— Хаббла *133*
Затмение *77*
Звезда *134, 140*
— белый карлик *23*
— красный гигант *135*
— нейтронная *23, 135*
— рождение *134*
— сверхновая *135*
— эволюция *134*

ПРЕДМЕТНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Излучение
— абсолютно чёрного тела *116*
— видимое *137, 142*
— гамма *121, 137*
— инфракрасное *109, 137, 142*
— радиоактивное *121*
— рентгеновское *113, 137, 142*
— ультрафиолетовое *109, 137*
— электромагнитное *136, 140*
Изображение
— действительное *80, 87*
— мнимое *80, 87*
— перевёрнутое *87*
— прямое *81, 87*
Изотоп *123*
Индукция
— магнитного поля *56, 68*
— электромагнитная *61*
Интерференция *103, 105*
Инфразвук *43, 52*
Искусственный спутник Земли *20*

Камертон *42*
Квант *117, 118*
Квантовая гипотеза Планка *117*
Коллайдер *142*
Колебания
— вынужденные *26, 34*
— высокой частоты *66*
— гармонические *32*
— затухающие *33*
— звуковые *42*
— низкой частоты *66*
— свободные *26*
— собственные *33, 35*
— электромагнитные *66*
Колебательный контур *66*
Конденсатор *66*
Красное смещение *137*
Критическая масса *127*

Линза *84*
— вогнутая *84*
— выпуклая *84*
— рассеивающая *85, 87, 94*
— собирающая *85, 87, 92*
Лупа *92*
Луч
— катодный *112*
— отражённый *78*
— падающий *78, 82*
— преломлённый *82*
— световой *76, 79, 100, 135*

Магнитный поток *58*
Маятник *26, 28*
Микроскоп *93*
Модель
— атома Бора *118*
— атома планетарная *118*
— развития Вселенной *139*
— ядра протонно-нейтронная *122*

Напряжённость электрического поля *66*
Нейтрон *122, 125, 129*
Нуклид *122*
Нуклон *122*

Обертон *47*
Обратимость световых лучей *79*

Объектив *93, 94, 95*
Окуляр *93, 94*
Оптика *74, 102*
Оптическая ось линзы *84*
Оптическая плотность среды *83*
Оптическая сила линзы *85*
Оптический центр линзы *84, 86*
Опыт
— Кюри *120*
— Ньютона *100*
— Томсона *112*
— Фарадея *60*
— Франка и Герца *119*
— Юнга *104*
Осциллограмма *33*
Отражение
— звука *48*
— света *78*
— зеркальное *79*
— рассеянное *79*

Парабола *10*
Парсек *133*
Период
— колебаний *28, 39, 103*
— математического маятника *30*
— пружинного маятника *32*
— обращения *16*
Перископ *81*
Планета *23, 132*
Плоское зеркало *80*
Поглощение звука *48*
Показатель преломления *83, 99, 101*
Поле
— вихревое *65*
— индукционное электрическое *64*
— однородное магнитное *58*
— неоднородное магнитное *58*
— электромагнитное *64*
Положение равновесия *27, 32*
Полутень *77*
Поляризационный фильтр *108*
Постулат *118*
Правило
— буравчика *57*
— левой руки *56*
Преломление света *82, 101*
Принцип сложения движений *10*
Природа света *74, 109*
— волновая *102*
— корпускулярная *102*
Протон *122, 125*

Радиоактивность *120*
Радиосвязь *70*
Радиус Шварцшильда *135*
Разность хода *103*
Расстояние наилучшего видения *89*
Реакция
— деления *126*
— термоядерная *127, 134*
— синтеза *127*
— ядерная *125*
Реверберация *48*
Резонанс *35*
— акустический *50*
Резонатор *50*

Световой год *133*
Светоносный эфир *109*
Сила
— Ампера *56*
— вынуждающая *34*

— тяжести *19, 23*
— электромагнитная *124*
— ядерная *124*
Синусоида *33*
Скорость
— звука *44*
— искусственного спутника *20*
— линейная *17*
— мгновенная *14*
— первая космическая *20*
— проекция *13*
— распространения волны *39*
— света *44, 69, 98, 136*
— тела, брошенного вертикально вверх *8*
— тела, брошенного горизонтально *11*
— тела, брошенного под углом к горизонту *13*
— тела при движении по окружности *14, 17*
Спектр *100, 114, 115, 136*
Спектральный анализ *116*
Спектроскопия *116*

Телескоп *94*
— Галилея *94*
— инфракрасный *140*
— Кеплера *94*
— оптический *140*
— рентгеновский *141*
Тембр звука *46*
Тень *77*
Теория Большого взрыва *138*
Ток *61, 62*
Тон *47*
Траектория движения тела *10, 12*
Туманность *132, 141*

Угол
— отражения *78*
— падения *78, 82*
— преломления *82*
Ультразвук *43, 53*
Уравнение движения тела *9, 11*
Ускорение
— свободного падения *8, 19, 23*
— центростремительное *15, 17*

Физика микромира *140*
Фокус линзы *84, 85, 86*
Фокусное расстояние *84, 86*
Фотоаппарат *85*
Фотон *118*

Цвет
— тела *101*
— тонких плёнок *105*
Циклотрон *143*

Частицы *121*
Частота
— излучения *117, 136*
— колебаний *29, 39, 69*
— обращения *16*
Чёрная дыра *23, 135, 141*
Число
— зарядовое *122*
— массовое *122*

Экзопланета *133*
Электролиз *113*
Электромагнитная пушка *65*
Электрон *112, 118*
Энергия
— кванта *117*
— связи *124*
Эхо *48*
Эхолокация *53*

Учебное издание

Серия «Академический школьный учебник»

Белага Виктория Владимировна
Ломаченков Иван Алексеевич
Панебратцев Юрий Анатольевич

Физика
9 класс
Учебник для общеобразовательных учреждений

Руководитель Центра «Сферы» *А. В. Сильянова*
Выпускающий редактор *В. В. Жумаев*
Художественный редактор *С. Г. Куркина*
Компьютерная вёрстка *Э. В. Ленчевской*
Художественное оформление *О. В. Поповича*, *С. В. Ермолина*, *Э. В. Ленчевской*, *С. Г. Куркиной*, *И. В. Шорниковой*, *С. Н. Аминевой*, *А. Г. Куркина*, *К. С. Бихтемирова*, *А. Г. Ширшова*
Дизайн обложки *О. В. Поповича*, *В. А. Прокудина*
Технический редактор *С. Н. Терехова*
Корректоры *Л. С. Вайтман*, *Н. В. Бурдина*

Налоговая льгота — Общероссийский классификатор продукции ОК 005-93—953000. Изд. лиц. Серия ИД № 05824 от 12.09.01.
Подписано в печать с оригинал-макета 04.02.11. Формат 84×108 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookCSanPin. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 23,55.
Тираж 15 000 экз. Заказ № 27857 (Sm–Sm).

Открытое акционерное общество «Издательство «Просвещение».
127521, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Открытое акционерное общество «Смоленский полиграфический комбинат».
214020, г. Смоленск, ул. Смольянинова, 1.