



ИНЖЕНЕРЫ
БУДУЩЕГО



ФИЗИКА

9

Часть 2

УГЛУБЛЁННЫЙ
УРОВЕНЬ





ФИЗИКА

ИНЖЕНЕРЫ БУДУЩЕГО

9 КЛАСС

Углублённый уровень

Учебник

В двух частях

Часть 2

Под редакцией Ю. А. Панебратцева

Допущено Министерством просвещения
Российской Федерации

МОСКВА
«ПРОСВЕЩЕНИЕ»
2024

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721.6
Ф50



Учебник и разработанное в комплекте с ним учебное пособие допущены к использованию при реализации основных образовательных программ начального общего, основного общего, среднего общего образования в соответствии с Приказом Министерства просвещения Российской Федерации № 858 от 21.09.2022 г. (в ред. Приказа Минпросвещения России № 119 от 21.02.2024 г.).

Авторы: В. В. Белага, Н. И. Воронцова, И. А. Ломаченков, Ю. А. Панебратцев

Физика : инженеры будущего : 9-й класс : углублённый уровень :
Ф50 учебник : в 2 частях / В. В. Белага, Н. И. Воронцова, И. А. Ломаченков, Ю. А. Панебратцев ; под ред. Ю. А. Панебратцева. — Москва : Просвещение, 2024.

ISBN 978-5-09-112672-3.

Ч. 2. — 224 с. : ил.

ISBN 978-5-09-112674-7.

Общая концепция учебно-методического комплекса, который включает печатные издания и электронные ресурсы, в том числе сайт поддержки УМК, разработана научными сотрудниками Объединённого института ядерных исследований, преподавателями Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и специалистами Госкорпорации «Росатом».

Учебники и пособия написаны коллективом авторов под руководством доктора физико-математических наук, профессора Ю. А. Панебратцева в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта основного общего образования, утверждённого Приказом Министерства просвещения Российской Федерации № 287 от 31.05.2021 г., и Федеральной рабочей программой по физике углублённого уровня от 18.05.2023 г.

Данный учебник продолжает предметную линию «Инженеры будущего» по физике, предназначенную для организации предпрофильной подготовки учащихся. Материал учебника выстроен в логике деятельностного подхода. Система заданий направлена на формирование важных компетенций, которые позволяют: научно объяснять природные и технологические явления; применять методы естественно-научного исследования и предлагать научные способы решения проблем; интерпретировать данные и использовать научные доказательства, представленные в различных формах. Помимо предметного содержания, в курсе заложено развитие представлений о сферах профессиональной деятельности, связанных с современным естествознанием.

УДК 373.167.1:53+53(075.3)
ББК 22.3я721.6

ISBN 978-5-09-112674-7 (ч. 2)
ISBN 978-5-09-112672-3

© АО «Издательство «Просвещение», 2024
© Художественное оформление.
АО «Издательство «Просвещение», 2024
Все права защищены

ВВЕДЕНИЕ

Слово «инженер» берёт своё начало от латинского *ingenium*, что означает «врождённая способность», «дарование», «ум», «изобретательность». Во все эпохи развития человечества инженерная деятельность была чрезвычайно важна, именно она обеспечивала соответствующее состояние техники и технологии, уклад жизни и способствовала техническому прогрессу. Сегодня профессия инженера является одной из наиболее востребованных, ведь с увеличением скорости изменений, происходящих практически во всех областях техники и технологий, растёт потребность в высококвалифицированных специалистах, способных не только производить и совершенствовать существующие технические устройства, но и создавать новые.

Курс физики является одним из ключевых курсов при подготовке специалистов, планирующих заниматься инженерной деятельностью. Физика изучает общие закономерности явлений природы, её понятия и законы лежат в основе всего естествознания.

Физика — это экспериментальная наука. Её законы основываются на фактах, установленных при помощи опытов. Открывая физические законы, человек применял их для своих целей: создал мощнейшие машины и механизмы, научился управлять внутриядерной энергией, вышел в космическое пространство. Работа технических устройств, с которыми человек сталкивается дома, на работе и на улице, без которых сегодня немыслима жизнь человечества, основана на правильном применении законов природы, изучаемых физикой.

Физика — точная наука и изучает количественные закономерности явлений, которые записываются в виде формул, поэтому физика «говорит» на языке математики.

Современная физика — это бурно развивающаяся наука, охватывающая многие области знаний человечества.

Материал учебника разделён на тематические главы, которые состоят из параграфов. В начале каждой главы приводятся высказывания великих учёных, отражающие суть содержания темы.

В тексте каждого параграфа важные для осмысления и запоминания термины и понятия выделены **жирным шрифтом** или *курсивом*.

Каждый параграф начинается с вводных рубрик «Новое в уроке» и «Повторим изученное». Рубрика «Новое в уроке» познакомит вас с основными вопросами, которые изучаются в параграфе. Рубрика «Повторим изученное» подскажет, что необходимо вспомнить из ранее изученного материала, чтобы усвоить новый.

Текст, содержащийся в рубрике «Важно!», отражает ключевые аспекты изучаемого материала, а также наиболее важные формулы, термины и физические законы.

Информация о традиционном эксперименте, на основе которого строится объяснение материала параграфа, выделена в рубрике «Исследование».

В рубрике «Это интересно» изучаемый материал иллюстрируется интересными историческими фактами и сведениями, примерами технических устройств и явлениями повседневной жизни.



В рубрике «**Применяем в профессии**» изучаемый материал дополняется примерами, которые могут быть использованы в инженерных профессиях.



Рубрика «**Сделай сам!**» поможет вам самостоятельно провести эксперименты по тематике изучаемого материала.



Увидеть взаимосвязь физики с другими учебными дисциплинами, которые вы изучаете в школе, поможет рубрика «**Межпредметные связи**». Эта рубрика является подсказкой, которая нацелит вас на выполнение следующих заданий:

- приведите дополнительные примеры использования понятий, моделей и законов физики в других областях знаний;
- подготовьте сообщение для своих одноклассников о связях между науками.

Рубрика «**Физика в жизни**» рассказывает о применении знаний, полученных в параграфе, в окружающем нас мире.

В конце каждого параграфа приведены «**Выводы**» к параграфу и «**Ключевые слова**» — основные понятия, новые термины, которые нужно запомнить и по которым можно осуществить поиск дополнительной информации в Интернете.

Завершают параграф «**Вопросы и задания**», ответы на которые помогут вам закрепить изученный материал и проверить свои знания.

В каждой главе содержатся параграфы: «Решение задач», «Лабораторные и исследовательские работы», «Кейс». В параграфе «**Решение задач**» рассматриваются примеры решения физических задач и приводятся «**Задачи для самостоятельного решения**», которые помогают закрепить и лучше понять изученный материал. Параграф «**Лабораторные и исследовательские работы**» содержит обязательные лабораторные работы, которые выполняются в классе, и практические работы-исследования, предназначенные для самостоятельного выполнения в классе или дома. «**Кейс**» включает проектно-исследовательское задание, в ходе выполнения которого решаются интересные, полезные и связанные с реальной жизнью задачи.

Завершает главу раздел «**Подведём итоги**», в котором приводятся основные выводы и идеи, содержащиеся в главе. Вопросы рубрики «**Вопросы для обсуждения**» носят проблемный характер и могут стать интересной темой для дискуссии. Возможные темы для сообщений приведены в рубрике «**Темы исследовательских и проектных работ**».

Желаем вам успехов на пути получения новых знаний!



математика



геометрия



география



биология/экология



технология



физкультура



химия

Глава 7

ЗВУК

..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...

Дж. Рэлей



§ 62 ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ. ИСТОЧНИКИ ЗВУКА

НОВОЕ В УРОКЕ

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

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- 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 воздействие на частицы, 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.

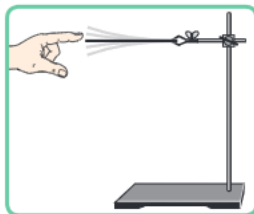
Одной из характеристик колебательного движения является *частота колебаний*. Оказывается, при частоте колебаний, превышающей 16 Гц, человеческое ухо начинает воспринимать их как звук. Мы способны слышать колебания в достаточно широком диапазоне частот — от 16 Гц до 20 кГц. Такие колебания называются **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, называется **акустикой** (от греч. *akustikos* — звуковой).

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ



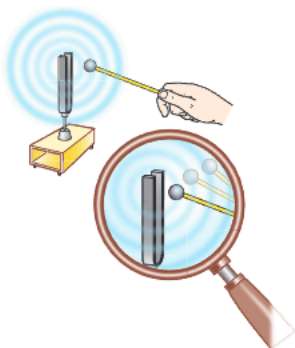
Зажмём в тисках металлическую линейку и приведём её конец в колебательное движение. Если правильно подобрать длину линейки, которая колеблется, то линейка начнёт издавать звук.

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* (производят объекты и явления природы — шелест листвы, голоса животных) и *искусственные* (изобрёл человек — звуки музыкальных инструментов, шум самолёта).

При изучении звуковых явлений часто используют искусственный источник звука — *камертон*.

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, незаметных для глаза, колебаний ветвей камертона. Поэтому, если поднести к звучащему камертону лёгкий шарик, то шарик начнёт отскакивать от него. Это происходит именно из-за колебаний ветвей камертона.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

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. Звук, издаваемый камертоном, было решено присвоить ноте «ля». Специальная комиссия, созданная музыкантами, постановила, что единый для всех стран камертон должен воспроизводить 440 колебаний в секунду при температуре воздуха 20 °С.

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 вертикальной плоскости. Если на свободном конце линейки закрепить иглу и привести её в соприкосновение с равномерно перемещающейся в горизонтальном направлении закопчённой пластинкой, то колеблющаяся игла будет оставлять на пластинке характерную волнообразную линию.

- ! Звуковые колебания — колебания в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц. Любой источник звука колеблется.
- ! Раздел физики, изучающий звуковые явления, называется акустикой.

ВЫВОДЫ

Звуковые колебания; акустика; источники звука

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие тела являются источниками звука? Назовите источники звука в природе, в быту и в технике.
2. Какие колебания называются звуковыми?
3. Во что превращается энергия звуковых колебаний, когда звук полностью прекращается?

§ 63 ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ. СКОРОСТЬ ЗВУКА

НОВОЕ В УРОКЕ

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

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

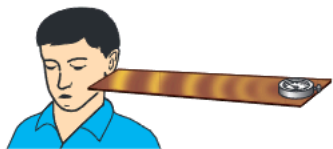
- Что такое колебания и волны?
- Что такое звуковые колебания?
- Какие виды волн вы знаете?
- Что такое скорость волны?

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

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗВУКА. Впервые установить экспериментально, передаётся ли звук в вакууме, удалось в 1660 г. английскому физику Роберту Бойлю. Для этого он использовал вакуумный насос, изобретённый им в 1657 г. и построенный вместе с Робертом Гуком. Бойль поместил под колокол 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 средах. 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.

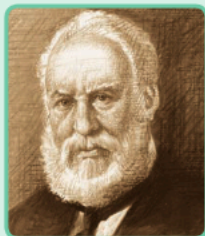
Если положить механические часы на один конец деревянной доски, а к другому концу доски приложить ухо, можно ясно услышать тиканье часов.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Многие изобретатели хотели разработать устройство, которое передавало бы звук человеческого голоса на большие расстояния. В 1667 г. Р. Гук обнаружил, что звук хорошо распространяется по туго натянутой бечёвке. В результате этого открытия были построены первые линии связи, которые представляли собой нити, натянутые между столбами на несколько десятков метров.

Одним из изобретателей телефона является А. Белл. В основе его изобретения лежит преобразование электрических сигналов в колебания упругой мембраны микрофона, в результате чего возникает звук.



Александр Белл
(1847—1922)

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 воздуху. Эти частицы передают колебания соседним частицам и т. д. От источника звука начинают распространяться 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.**

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

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

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 возникают в один и тот же момент времени, а запаздывание происходит из-за того, что скорость звука в воздухе много 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 v распространения звука можно определить, зная расстояние s до источника звука и измерив промежуток времени t между моментом возникновения звука и моментом, когда он доходит до нас:

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

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Скорость звука в воздухе впервые измерил в 1636 г. французский физик и математик М. Мерсенн, который использовал метод, предложенный Г. Галилеем. Находясь на определённом расстоянии от пушки, Мерсенн, заметив вспышку, подсчитывал удары пульса до того момента, пока до него не донесутся звуки выстрела. Разделив расстояние до пушки на измеренное время, Мерсенн получил скорость звука, равную 448 м/с. Из-за низкой точности измерения времени результат заметно отличается от современных значений.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Обычно гром воспринимается не как отдельный звук, а как несколько последовательных ударов — раскатов. Они возникают из-за того, что молния чаще всего имеет значительную длину, и звук от различных её точек доходит до наблюдателя не одновременно. Также раскаты грома возникают из-за отражения звука от облаков и от поверхности земли. Зная скорость звука, оценивают расстояние до места грозы. Так, если от момента вспышки молнии до слышимых раскатов грома прошло 9 с, то гроза находится от нас на расстоянии примерно 3 км. Как правило, гром слышен на расстоянии не более 15–20 км.

Скорость звука в воде впервые измерили в 1826 г. швейцарские физики Ж. К о л л а д о н и Я. Ш т у р м. Эксперимент проводился в Швейцарии на Женевском озере. Две лодки находились на расстоянии 13 365 м друг от друга. На одной лодке экспериментатор поджигал порох и одновременно ударял в колокол, опущенный в воду. На другой лодке звук колокола можно было услышать с помощью опущенной в воду трубы. Интервал времени между вспышкой света и приходом звукового сигнала был равен 9 с. Разделив расстояние между лодками на измеренное время, учёные определили скорость звука в воде. Она оказалась равной 1485 м/с.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 свойств 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.

С увеличением высоты над поверхностью Земли температура воздуха понижается, а сам воздух становится разреженным. Поэтому скорость звука в такой среде становится ниже, чем у поверхности Земли. На высоте более 3000 км над поверхностью Земли, где уже нет атмосферы, звуковые волны не распространяются.



Изготовьте переговорное устройство из двух бумажных стаканчиков, соединённых длинной капроновой нитью.

ПОМОЩНИК. Прodelайте отверстие в дне каждого стаканчика. Пропустите сквозь отверстия нить и закрепите концы нити в стаканчиках.

В эксперименте должны участвовать два человека. Каждый человек берёт в руки стаканчик и располагается на некотором расстоянии от другого так, чтобы нить натянулась. Один стаканчик используется как микрофон, а другой — прикладывается к уху. Исследуйте, как слышимость звука зависит от длины переговорного устройства, натяжения нити, погодных условий (сухой или влажный воздух).

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН. Одна из особенностей звуковых волн заключается в том, что каждая волна распространяется так, как если бы другой волны вовсе не было. Например, когда в оркестре одновременно звучат несколько музыкальных инструментов, наше ухо способно улавливать звучание каждого из них.

Как и для механических волн, для звуковых волн можно наблюдать явления взаимного усиления и ослабления волн, т. е. **интерференцию**. Заставим звучать камертон ударом резинового молоточка и будем его вращать за подставку, держа около уха. При этом можно заметить, что при одних положениях камертона звук усиливается, а при других — ослабляется. Причина данного явления заключается в следующем: поскольку частоты колебаний ножек камертона одинаковы, то обе ножки возбуждают звуковые волны одинаковой длины волны 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.

Для звуковых волн можно также наблюдать и явление **дифракции** — огибание волнами препятствий. 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 открыта настежь, то шум мешает работать. А как вы думаете, будет ли в комнате по-прежнему тихо, если дверь немного приоткрыть 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 проникает в комнату почти так же, как и при широко открытой двери.

- ! Звуковые волны являются продольными волнами сжатия и разрежения.
- ! Скорость распространения звуковых волн называется скоростью звука. В твёрдых телах и жидкостях скорость звука значительно больше, чем в воздухе.

ВЫВОДЫ

Звуковые волны; скорость звука; интерференция; дифракция

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВАИ ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

1. В каких средах может распространяться звук?
2. Какую волну представляют собой звуковые волны?
3. От чего зависит скорость звука?
4. О приближении поезда ещё до его появления можно узнать, приложив ухо к рельсу. Объясните почему.
5. Спортивный судья стоит на линии финиша. В какой момент он должен включить секундомер: когда увидит огонь от выстрела стартового пистолета или когда услышит звук выстрела? Ответ поясните.
6. Какие характеристики звуковой волны изменяются при переходе из одной среды в другую: частота звука, скорость распространения звука, длина волны? Ответ поясните.

§ 64 ОТРАЖЕНИЕ ЗВУКА. ЭХО

НОВОЕ В УРОКЕ

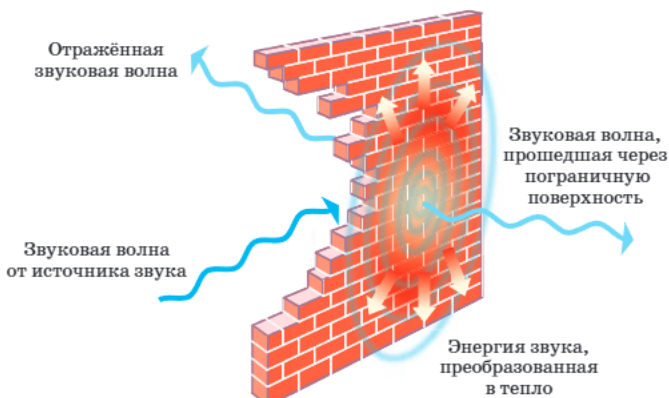
- Что такое отражение и поглощение звука.
- Как образуется эхо.
- Что такое реверберация.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

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

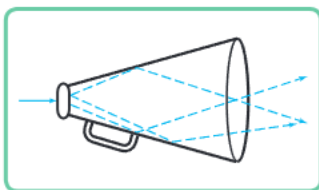
Что произойдёт, если на пути звуковой волны появится преграда, стена или какое-либо другое препятствие?

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 газов, входящих в состав воздуха, к другому, сгущение дойдёт до воздушного слоя, прилегающего к поверхности стены. Получив толчок, частицы этого слоя ударятся о стену, отразятся от неё и образуют новую волну сгущения, бегущую в обратном направлении. Этот процесс называется *отражением звука*. В большинстве случаев плоские твёрдые поверхности отражают около 95 % звука. Например, известно, что толстая гранитная стена отражает 99 % звука.



ФИЗИКА В ЖИЗНИ

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.



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, сжатого у 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 она более 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 связано с *поглощением звука*.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

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 называются *звукопоглощающими*. Звукопоглощающими материалами в обычном жилом помещении могут быть ковры, портьеры 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 $\frac{1}{15}$ 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 $t > \frac{1}{15}$ с.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 $\frac{1}{15}$ с.

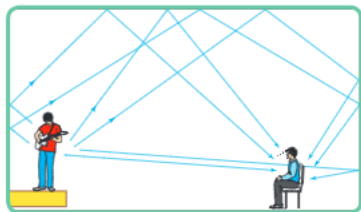
Определим, с какого расстояния можно услышать эхо. Произнесённый звук должен пройти расстояние до стены, отразиться от неё и вернуться обратно, т. е. пройти двойное расстояние не меньше чем за $\frac{1}{15}$ с. Так как значение скорости звука в воздухе известно ($v = 340$ м/с), то это расстояние составляет

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

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 возни-

кает 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 отражения 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 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 называется **реверберацией**. В пустых помещениях реверберация приводит к возникновению гулкости.



Эффект увеличения длительности звука из-за его отражения от различных препятствий называется **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. Наука, занимающаяся проблемой наилучшей слышимости в закрытых помещениях, называется **архитектурной акустикой**.

Выводы

- ! Звуковая волна, падающая на границу двух сред, отражается и поглощается.
- ! Поглощение звука — ослабление звуковой волны при прохождении через какую-либо среду; при этом энергия звуковой волны превращается в тепловую.
- ! Отражённая звуковая волна, воспринимаемая наблюдателем отдельно от первоначального звука, называется эхом.
- ! Эффект увеличения длительности звука из-за его отражения от различных препятствий называется реверберацией.

Ключевые слова

Отражение звука; поглощение звука; эхо; реверберация

и вопросы задания

1. Что такое отражение звука?
2. Как возникает эхо?
3. Почему в горах можно услышать многократное эхо? Может ли возникнуть эхо в степи?
4. Почему звук в помещении бывает гулким?
5. Почему в пустом зрительном зале звук кажется громче (раскатистее), чем в зале, заполненном зрителями?

ГРОМКОСТЬ ЗВУКА. § 65

ВЫСОТА И ТЕМБР ЗВУКА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Основные характеристики звука — громкость, высота и тембр.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

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

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

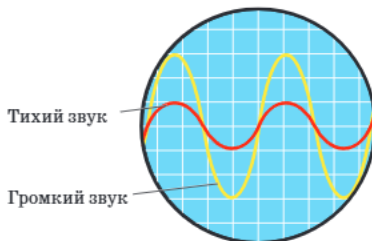
ГРОМКОСТЬ ЗВУКА. Для того чтобы выяснить, от какой характеристики звуковой волны зависит громкость звука, вновь обратимся к опыту с камертоном. Чем сильнее мы ударим молоточком по камертону, тем громче будет звук, который мы слышим. Поднеся лёгкий шарик к ветви камертона, легко заметить, что чем громче 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 при отсутствии звука. Этот избыток или недостаток давления называется *звуковым*.

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

Самый слабый звук, который может уловить человеческое ухо, называется *порогом слышимости*. У разных людей порог слышимости может различаться. В таблице перечислены некоторые звуки с оценкой их звукового давления.



Источник	Уровень звукового давления, дБ
Порог слышимости	0
Шелест листьев	10
Шёпот	20

Окончание

Источник	Уровень звукового давления, дБ
Обычный разговор	50—60
Оживлённое уличное движение	70
Пылесос	80
Движение грузовых товарных вагонов	90
Движение вагонов метро	95
Оркестр, раскаты грома	100
Рок-концерт	110
Болевой порог	130
Взлёт реактивного самолёта	140
Разрыв барабанной перепонки	160



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Известны работы А. Белла по определению порога слышимости. В 1890 г. он основал Ассоциацию глухих и слабослышащих, 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 (от 10^{-12} до 10 Вт/м^2)!

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Один и тот же звук может восприниматься разными людьми как имеющий разную громкость. Одним из факторов, влияющих на слышимость человеческого уха, является возраст.

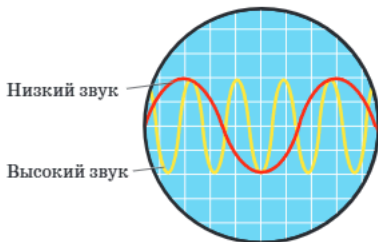
ВЫСОТА ЗВУКА. Ещё одной характеристикой звука является *высота звука*. Мы легко различаем низкий голос (бас) и высокий (сопрано). Различные струны гитары, скрипки и виолончели издают звуки разной высоты.

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 большая частота колебаний.

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

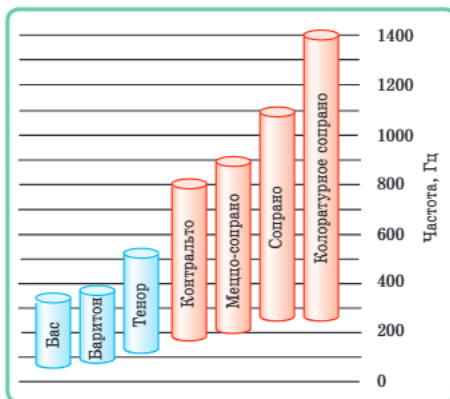
Восприятие громкости звука нашим ухом зависит не только от амплитуды, но и от



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. 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. Наряду с физическими характеристиками звука для его восприятия важны также физиологические особенности человеческого организма.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Певческие женские и мужские голоса принято классифицировать в зависимости от их частотного диапазона. Среди мужских голосов различают бас (низкий), баритон (средний) и тенор (высокий), среди женских — контральто (низкий), меццо-сопрано (средний) и сопрано (высокий).

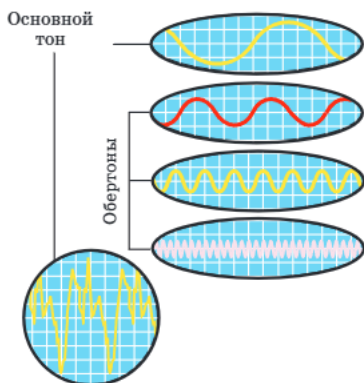


МУЗЫКАЛЬНЫЙ ТОН. Колебания камертона близки к гармоническим. Они медленно затухают, и отклонение от периодичности у них невелико. Звук, издаваемый камертоном или другим гармонически колеблющимся телом, называется *музыкальным тоном*, или *чистым тоном*, или просто *тоном*.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Было установлено, что если частота одного звука в 2 раза превышает частоту другого звука, то эти звуки воспринимаются нами как очень похожие. Поэтому все музыкальные звуки было решено разделить на интервалы, называемые **октавами**. В музыке октава состоит из 12 разных звуков (поэтому в каждой октаве на фортепиано 7 белых и 5 чёрных клавиш). Звуки, разделённые одной октавой, называются одной и той же нотой. Каждой ноте в октаве соответствует своя частота звука. Например, ноте «ля» первой октавы соответствует частота 440 Гц, а ноте «ля» второй октавы — частота 880 Гц.

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. Составляющая наибольшего периода (т. е. наименьшей частоты) называется **основным тоном**. Именно основной тон и определяет высоту сложного звука. Остальные составляющие сложного звука называются **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**.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Частота основного тона мужского голоса обычно ниже, чем у женских голосов. Например, при обычной речи частота мужского голоса, как правило, находится в пределах от 85 до 155 Гц, а женского — в пределах от 165 до 255 Гц.

При речи высота голоса одного и того же человека постоянно меняется.

▶ ЭТО ИНТЕРЕСНО

В становление и развитие акустики неоценимый вклад внёс Д. У. 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. Идеи Рэлей легли в основу современной *теории колебаний* и до сих пор используются специалистами, работающими не только в области акустики, но и в любой области физики, имеющей дело с колебаниями.

ВЫВОДЫ

- ! Громкость звука зависит от амплитуды колебаний, а высота звука — от их частоты.
- ! Сложный звук состоит из основного тона и обертонов. Набор всех обертонов создаёт уникальную окраску, или тембр звука.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Громкость звука; высота звука; музыкальный тон; тембр

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. От чего зависит громкость звука?
2. От чего зависит высота звука? Связана ли высота звука с периодом, частотой, скоростью распространения звуковых колебаний? Ответ поясните.
3. От чего зависит тембр звука?
4. Кто чаще машет крыльями при полёте: комар или муха? Объясните свой ответ.

РЕЗОНАНС В АКУСТИКЕ § 66

НОВОЕ В УРОКЕ

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

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

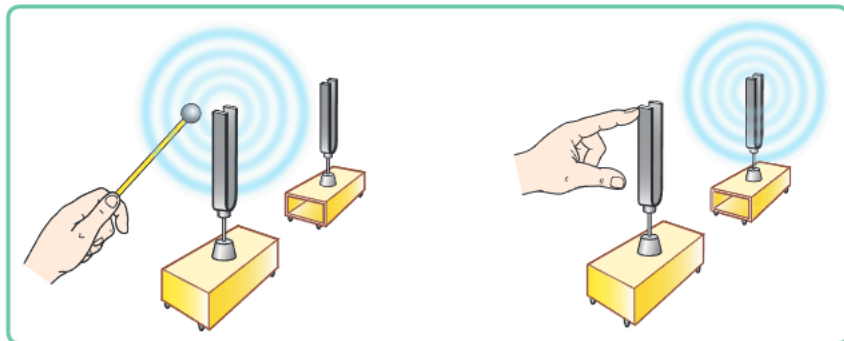
ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

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

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ

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 струны, которые могут войти в резонанс с гармоническими колебаниями — основным и обертонами, входящими в состав спетой нами ноты.

ИССЛЕДОВАНИЕ

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. Наиболее громкое звучание воздушного столба наступает, когда собственная частота его колебаний совпадает с частотой колебаний камертона. Это и есть условие резонанса.

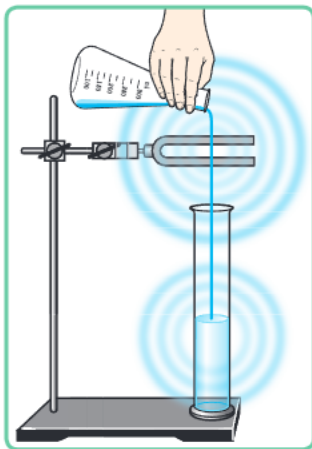
Такой закрытый с одного конца сосуд называется **резонатором**.

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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Г. Гельмгольц — немецкий физик, математик, физиолог и психолог, положивший начало *акустике*. В своих исследованиях он использовал шаровые резонаторы, получившие впоследствии его имя. Резонатор представляет собой шар с двумя отверстиями; одно из них находится в короткой цилиндрической трубке, направляемой к источнику звука, а другое в небольшой конической трубке, вставляемой в ухо. Такие





Герман Гельмгольц
(1821—1894)



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.

Гельмгольц также создал модель уха, позволившую изучить характер воздействия звуковых волн на орган слуха.

РЕЗОНАТОРЫ ГОЛОСА. Человеческий голос возникает от колебаний голосовых связок при прохождении через них воздуха из лёгких. 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 во время пения Ф. И. Шаляпина из-за резонанса дрожали (резонировали) хрустальные подвески люстр.

- ! Акустический резонанс возникает тогда, когда частота колебаний звуковых волн, идущих на звуковую систему, совпадает с собственной частотой этой системы.
- ! Резонатор — закрытый с одного конца сосуд или полый ящик, усиливающий звуковые колебания.

ВЫВОДЫ

Акустический резонанс; резонатор

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

И ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

1. Как возникает звуковой резонанс?
2. Для чего нужны резонаторы?
3. Приведите примеры резонаторов.
4. Для чего тугоухий человек, пытаясь услышать доносящиеся до него звуки, прикладывает руку к уху?
5. Почему при поднесении к уху морской раковины мы слышим звук, похожий на отдалённый шум моря?

§ 67 УЛЬТРАЗВУК И ИНФРАЗВУК В ПРИРОДЕ И В ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое ультразвук и инфразвук.
- Где в природе встречаются ультразвуки и инфразвуки.
- Где используется ультразвук и инфразвук.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое звуковые колебания?
- Колебания каких частот способен воспринимать человек?
- Какие тела являются источниками звука?

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

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

Колебания с частотой меньше 16 Гц называются **инфразвуком**.

Колебания с частотой более 20 кГц называются **ультразвуком**.

Инфразвук и ультразвук не воспринимаются человеческим ухом. 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. Ультразвук и инфразвук играют существенную роль в живой природе и в 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 распространяется на большие расстояния и может служить предвестником бурь, ураганов, цунами.

ВЛИЯНИЕ ИНФРАЗВУКА НА ЧЕЛОВЕКА. При больших амплитудах инфразвук ощущается как боль в ухе. В конце 60-х гг. XX в. французский исследователь В. 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 большие расстояния нашла практическое применение при определении мест сильных взрывов или положения стреляющего орудия, а также для предсказания стихийного бедствия — цунами.

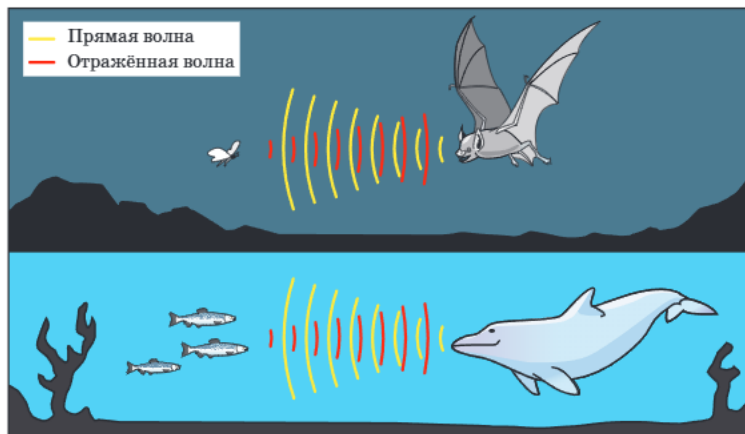
Перед учёными и инженерами стоит задача создания и усовершенствования специальных приборов, которые могут улавливать инфразвук. Одна из возможностей их применения — авиаотрасль. Зоны турбулентности в ясном небе невидимы и могут представлять опасность для самолётов и дискомфорт для пассажиров. Эти области являются источником инфразвука. Имея специальный инфразвуковой микрофон, пилоты могут заранее спланировать альтернативный безопасный маршрут и не попадать в зону турбулентности.



УЛЬТРАЗВУК В ПРИРОДЕ. Ультразвуки могут издавать и воспринимать такие животные, как дельфины, муравьи, летучие мыши и др.

Во время полёта летучие мыши посылают и улавливают ультразвуковые сигналы. Это помогает им ориентироваться в темноте, не наткнуться на окружающие предметы и даже охотиться. Летучие мыши определяют своё местоположение и расстояние до окружающих предметов по запаздыванию отражённого звукового сигнала. Они также могут ловить насекомых, воспринимая отражённую от добычи волну.

Дельфины тоже имеют свою систему ультразвуковых сигналов: эхолокационные (сонарные) сигналы служат для обследования обстановки, а «свист» — для коммуникации с сородичами. Дельфинов используют в пет-терапии (зоотерапии) для лечения людей при помощи ультразвукового сонара.



Муравьи 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.

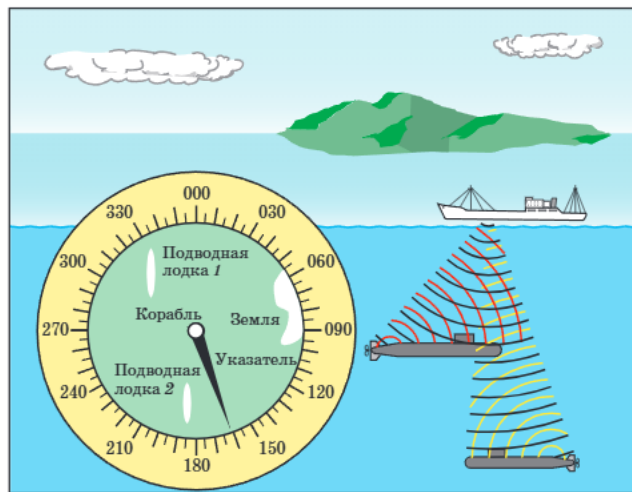
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАЗВУКА. Хотя о существовании ультразвука учёным было известно давно, практическое использование его в науке, технике и промышленности началось сравнительно недавно.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 применением подводных лодок в военных операциях во время Первой мировой войны.

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. Уровень ультразвука свыше 120 Дб при длительном воздействии отрицательно влияет на здоровье человека.

ЭХОЛОКАЦИЯ. Способ определения местоположения тел по отражённым от них ультразвуковым сигналам называется эхолокацией (от лат. *localis* — местный, т. е. определение места с помощью эха). При этом расстояние до объекта определяется по времени между излучением звукового сигнала и приёмом эха. Эхолокация широко используется в мореплавании.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Исследование дна первыми эхолокационными приборами занимало весьма большое время. Они направляли сигнал в какую-либо точку пространства и по задержке ответа определяли её удалённость, зная скорость перемещения сигнала в данной среде. В настоящее время для решения этой проблемы используются приборы, испускающие сигналы различной частоты, что в разы сокращает процесс эхолокации.

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.

Применение гидролокаторов самое разнообразное. На подводных лодках гидролокаторы используют в качестве навигационных приборов. На рыбопромысловых судах они нужны для обнаружения косяков рыб. Биологи с помощью гидролокаторов изучают звуки, издаваемые морскими обитателями.

ЭТО ИНТЕРЕСНО



Идея эхолота возникла независимо у нескольких учёных в СССР, Германии, Франции и США. Благодаря эхолотам специалисты смогли определить сложный рельеф дна океана — горные хребты, рифовые зоны, вулканы, впадины. На основании этих измерений были составлены карты с рельефом дна Мирового океана. При помощи эхолота в 1957 г. с советского судна «Витязь» удалось обнаружить Марианскую впадину и измерить в ней максимальную глубину Мирового океана — 11 022 м.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ. Для обнаружения и определения различных повреждений в деталях машин используется прибор *ультразвуковой дефектоскоп* (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.



Колебания с частотой меньше 16 Гц называются инфразвуком.



Колебания с частотой более 20 кГц называются ультразвуком.



Ультразвук и инфразвук играют существенную роль в живой природе и в технике.

ВЫВОДЫ

Инфразвук; ультразвук

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

И ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

1. Какие колебания называются: инфразвуком; ультразвуком?
2. Где в природе встречаются ультразвук и инфразвук?
3. Где используется ультразвук и инфразвук?

§ 68 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

- **ЗАДАЧА 1.** Определите длину звуковой волны, возбуждаемой человеческим голосом, обладающим частотой 170 Гц. Скорость звука примите равной 340 м/с.

Дано:

$$\begin{aligned} v &= 170 \text{ Гц} \\ v &= 340 \text{ м/с} \end{aligned}$$

λ — ?

Решение.

$$\text{Длина волны } \lambda = vT = \frac{v}{\nu}.$$

$$\lambda = \frac{340 \text{ м/с}}{170 \text{ 1/с}} = 2 \text{ м}.$$

Ответ: 2 м.

- **ЗАДАЧА 2.** Эхолотатор подводной лодки обнаружил цель спустя 3 с после отправки ультразвукового сигнала. На каком расстоянии от лодки находилась цель, если скорость звука в воде равна 1500 м/с?

Дано:

$$\begin{aligned} t &= 3 \text{ с} \\ v &= 1500 \text{ м/с} \end{aligned}$$

s — ?

Решение.

Посланный с лодки сигнал должен дойти до цели, отразиться от неё и вернуться обратно на лодку, т. е. пройти двойное расстояние за время t : $2s = vt$.

$$\text{Следовательно, } s = \frac{vt}{2}.$$

$$s = \frac{1500 \text{ м/с} \cdot 3 \text{ с}}{2} = 2250 \text{ м}.$$

Ответ: 2250 м.

- **ЗАДАЧА 3.** Мальчик бросил камень в глубокий колодец и услышал всплеск воды через 3 с. Определите глубину колодца. Скорость звука принять равной 330 м/с. Начальную скорость камня примите равной нулю.

Дано:

$$\begin{aligned} t &= 3 \text{ с} \\ v &= 330 \text{ м/с} \end{aligned}$$

h — ?

Решение.

Время, которое прошло с момента броска камня, $t = t_k + t_a$, где t_k — время, которое понадобилось камню, чтобы достичь дна колодца; t_a — время, в течение которого звук от удара камня о дно распространялся до наблюдателя.

Поскольку по условию задачи начальная скорость камня равна нулю, пренебрегая значением высоты над колодцем, на которую был поднят камень при броске, получим

$$h = \frac{gt_k^2}{2} \Rightarrow t_k = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

$$\text{В то же время } h = vt_a \Rightarrow t_a = \frac{h}{v}.$$

Поэтому $t = \sqrt{\frac{2h}{g}} + \frac{h}{v}$, или $\frac{h}{v} + \sqrt{\frac{2h}{g}} - t = 0$ — квадратное уравнение относительно \sqrt{h} .

Корнями уравнения будут $\sqrt{h} = \frac{-v\sqrt{\frac{2}{g}} \pm \sqrt{v^2\frac{2}{g} + 4tv}}{2}$.

Поскольку значение h не может быть отрицательным, то удовлетворяющим условию задачи решением может быть только $\sqrt{h} = \frac{-v\sqrt{\frac{2}{g}} + \sqrt{v^2\frac{2}{g} + 4tv}}{2}$.

Следовательно, $h = \left(\frac{-v\sqrt{\frac{2}{g}} + \sqrt{v^2\frac{2}{g} + 4tv}}{2} \right)^2$.

Установим наименование полученной величины:

$$[h] = \left(\frac{\frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \frac{\text{с}}{\sqrt{\text{м}}} + \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \cdot \frac{\text{с}^2}{\text{м}} + \text{с} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}} \right)^2 = \text{м}.$$

Полученное наименование соответствует наименованию единиц измерения расстояния. Подставив числовые значения, получим

$$h = \left(\frac{330 \cdot \sqrt{\frac{2}{10}} + \sqrt{330^2 \cdot \frac{2}{10} + 4 \cdot 3 \cdot 330}}{2} \right)^2 \approx 41 \text{ (м)}.$$

Ответ: ≈ 41 м.

○ ЗАДАЧА 4. Самолёт летит горизонтально на высоте 8000 м с постоянной скоростью 850 км/ч. На каком расстоянии от наблюдателя будет самолёт, когда наблюдателю будет казаться, что самолёт находится у него над головой? Скорость звука в воздухе 330 м/с.

Дано:

$$h = 8000 \text{ м}$$

$$v = 850 \text{ км/ч}$$

$$v_{\text{зв}} = 330 \text{ м/с}$$

$s = ?$

СИ

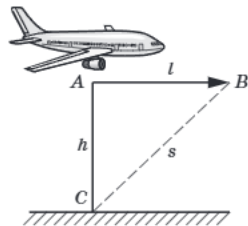
$$236,1 \text{ м/с}$$

Решение.

За время t распространения звука из точки A в точку C (расстояние h) самолёт переместится из точки A в точку B (расстояние l).

$$h = v_{\text{зв}} t, \quad t = \frac{h}{v_{\text{зв}}}.$$

$$l = vt = v \frac{h}{v_{\text{зв}}}.$$



Расстояние s найдём по теореме Пифагора:

$$s = \sqrt{h^2 + l^2} = \sqrt{h^2 + h^2 \left(\frac{v}{v_{\text{ав}}}\right)^2} = h \sqrt{1 + \left(\frac{v}{v_{\text{ав}}}\right)^2}.$$

$$s = 8000 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{236,1}{330}\right)^2} = 9837 \text{ (м)}.$$

Ответ: 9837 м.

Задачи для самостоятельного решения

- 1 В воде распространяется ультразвуковая волна с частотой 30 кГц и длиной волны 5 см. Определите, за какой промежуток времени волна преодолет расстояние 3 км.
- 2 Сравните скорости распространения звуковых волн с длинами волн 17 и 30 м в двух различных средах, если соответствующие им частоты равны 20 и 50 Гц. О каких средах идёт речь?
- 3 Во сколько раз изменится длина звуковой волны при переходе звука из железа в воздух? Скорость звука в воздухе — 330 м/с, в железе — 5850 м/с.
- 4 Предположим, вы услышали удар грома через 8,2 с после того, как увидели вспышку молнии. На каком расстоянии вы находитесь от места удара молнии? Нужно ли вам для решения задачи знать значение скорости света? Почему?
- 5 Аквалангист, находящийся вблизи поверхности воды, слышит звучание камертона, находящегося на берегу. Частота колебаний камертона составляет 440 Гц. Определите, какой частоты звук слышит аквалангист.
- 6 Дельфин в морской воде излучает звуковую волну, направленную на дно океана, при глубине 1500 м. Сколько времени пройдёт, прежде чем он услышит эхо? Скорость звука в воде — 1540 м/с.
- 7 Скорость ультразвука в тканях человека составляет около 1500 м/с. Чему равна длина волны ультразвука с частотой 2,4 МГц? В медицинских ультразвуковых установках используются звуковые волны в диапазоне от 1 до 20 МГц. Какой диапазон длин волн соответствует этому диапазону частот?
- 8 Спасательный самолёт летит горизонтально с постоянной скоростью в поисках терпящей бедствие лодки. Когда самолёт находится прямо над лодкой, люди на лодке подают звуковой сигнал. К тому времени, когда звуковой датчик самолёта принимает звук сигнала, самолёт преодолел расстояние, равное половине его высоты над водоёмом. Определите скорость самолёта и его высоту, если известно, что звук достиг самолёта через 2 с с момента подачи сигнала. Скорость звука в воздухе примите равной 335 м/с.



Практические работы-исследования

Изучаем звуковые волны

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КАМЕРТОНА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Простые гармонические колебания, которые вы изучали при помощи математического и пружинного маятников, можно наблюдать и в акустике.

Цель работы

Исследовать колебания камертона с помощью электронного осциллографа.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования вам понадобятся камертон, резиновый молоточек, микрофон и осциллограф.

Осциллограф является измерительным прибором, используемым при настройке и ремонте радиоаппаратуры, а также в научных исследованиях. Особенно удобен осциллограф для исследования быстропеременных периодических процессов, например электрических и механических колебаний.

В данной работе используется микрофон от трубы для изучения волновых процессов. При помощи микрофона звуковые колебания, идущие от камертона, преобразуются в электрические. При этом амплитуда сигнала, поступающего с микрофона на осциллограф, пропорциональна амплитуде колебаний ветвей камертона.

- Подключите микрофон к осциллографу.
- Ударом молоточка возбудите колебания ветвей камертона. Наблюдайте на экране осциллографа осциллограмму звуковых колебаний.



- Перемещая микрофон вблизи звучащего камертона, опытным путём определите такое его положение, при котором амплитуда сигнала на экране осциллографа будет наибольшей. Сделайте вывод.
- Пронаблюдайте зависимость амплитуды сигнала, а также зависимость времени затухания колебаний от силы удара молоточка по ветви камертона. Сделайте вывод.
- Зарисуйте характерный вид изображений на экране осциллографа (осциллограммы).

- По шкале осциллографа определите период звуковых колебаний (это расстояние между двумя соседними максимумами или минимумами осциллограммы). Временной масштаб (горизонтальная шкала) определите на экране осциллографа.
- Зная период колебаний, найдите их частоту.

НАБЛЮДЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЗВУКОВОГО РЕЗОНАНСА

Звуковые явления относятся к механическим колебаниям. В процессе выполнения работы вы сможете убедиться в том, что в результате механических колебаний могут возникать звуковые волны и даже наблюдаться явление резонанса.

Цель работы

На опыте наблюдать явление звукового резонанса.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования вам понадобятся чистый стеклянный бокал с тонкими стенками и вода.
- Наполните половину бокала водой.
- Намочите подушечку указательного пальца и с лёгким нажимом проведите ею по кромке бокала. Добейтесь того, чтобы бокал начал издавать звук.
- Исследуйте зависимость высоты звука от количества налитой в бокал жидкости.
- Исследуйте зависимость высоты звука от формы бокала.
- Сделайте выводы.



БУТЫЛОЧНЫЙ КСИЛОФОН

На уроке физики, посвящённом изучению звуковых волн, учитель попросил учащихся объяснить, почему при осторожном наливании воды в бутылку возникает звук, тон которого повышается по мере наполнения сосуда. Выслушав ответы учащихся, учитель объяснил наблюдаемое явление как результат колебаний воздушного столба в сосуде. При этом изменение тона звука обусловлено увеличением частоты колебаний, поскольку при повышении уровня воды происходит уменьшение длины воздушного столба в сосуде. На основе этого явления можно воспроизвести целый музыкальный звукоряд, используя несколько бутылок, в которые налито разное количество воды.

Изготовьте и вы простейший музыкальный инструмент — ксилофон и посмотрите, как он работает.



Научная справка

Если фортепианная струна совершает 261 колебание за одну секунду, в результате возникает звук частотой 261 Гц. Человеческое ухо воспринимает его как ноту *до* первой октавы. Нота *ре* обладает частотой 294 Гц, *ми* — 330 Гц, *фа* — 349 Гц, *соль* — 392 Гц, *ля* — 440 Гц, *си* — 494 Гц, а *до* следующей октавы имеет частоту 512 Гц.

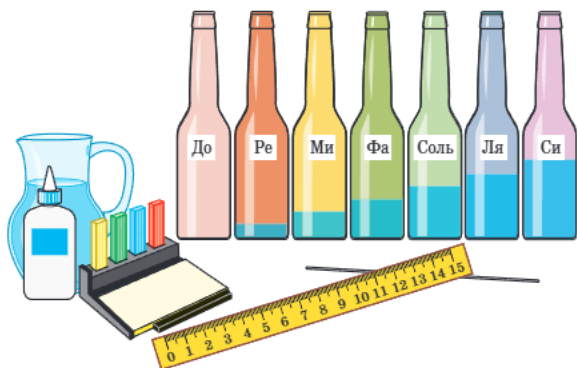


Для получения привычного нам звукоряда (*до, ре, ми, фа, соль, ля, си*) надо диапазон частот, приходящийся на октаву, поделить на 12 равных интервалов (полутонов). Тогда мы получим аналог чёрных и белых клавиш пианино.

Отношение длин волн для нот, соответствующих белым клавишам, начиная с ноты *до* (первой октавы), равно соответственно $1 : \frac{8}{9} : \frac{4}{5} : \frac{3}{4} : \frac{2}{3} : \frac{3}{5} : \frac{8}{15}$.

Этапы выполнения задания

- В качестве оборудования вам понадобятся семь одинаковых стеклянных бутылок (из-под лимонада, воды, сока или молока), вода, линейка, металлическая палочка, бумага, маркер, клей, фортепиано (при наличии).
- Расставьте бутылки в ряд, подготовьте воду.
- Наливая в бутылки нужное количество воды, можно изготовить из них аналог ксилофона или клавиш фортепиано одной октавы.



- Первую бутылку оставьте пустой, она будет предназначена для извлечения звука, соответствующего первой ноте. Частота колебаний в этом случае будет зависеть как от материала, из которого изготовлена бутылка, так и от её высоты. Поэтому нельзя утверждать, что звук, издаваемый этой бутылкой, соответствует именно ноте *до* первой октавы.
- Налейте воду во вторую бутылку так, чтобы отношение длины воздушного столба над водой к длине воздушного столба в пустой бутылке было $\frac{8}{9}$, что соответствует второй ноте.
- Аналогично наполните оставшиеся бутылки в соотношениях, указанных выше (используйте линейку).
- Используя маркер, бумагу, клей, промаркируйте бутылки, указав соответствующую ноту.
- Если в вашем распоряжении есть фортепиано и вы обладаете музыкальным слухом, то можно провести более тонкую настройку созданного вами ксилофона, добавляя или отливая воду из бутылок.
- Испытайте полученный музыкальный инструмент.

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Звуковые колебания — колебания в диапазоне частот от 16 Гц до 20 кГц. Любой источник звука колеблется.
- Раздел физики, изучающий звуковые явления, называется акустикой.
- Звуковые волны являются продольными волнами сжатия и разрежения.
- Скорость распространения звуковых волн называется скоростью звука. В твёрдых телах и жидкостях скорость звука значительно больше, чем в воздухе.
- Отражённая звуковая волна, воспринимаемая наблюдателем отдельно от первоначального звука, называется эхом.
- Эффект увеличения длительности звука из-за его отражения от различных препятствий называется реверберацией.
- Громкость звука зависит от амплитуды колебаний, а высота звука — от их частоты.
- Сложный звук состоит из основного тона и обертонов. Набор всех обертонов создаёт уникальную окраску, или тембр звука.
- Акустический резонанс возникает тогда, когда частота колебаний звуковых волн, идущих на звуковую систему, совпадает с собственной частотой этой системы.
- Резонатор — закрытый с одного конца сосуд или полый ящик, усиливающий звуковые колебания.
- Колебания с частотой меньше 16 Гц называются инфразвуком. Колебания с частотой более 20 кГц называются ультразвуком.
- Ультразвук и инфразвук играют существенную роль в живой природе и в технике.

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?

Темы исследовательских и проектных работ

- Звуки природы.
- Звук на службе у человека.
- Звук и среда.
- Самые необычные звуки.
- Индивидуальность музыкальных инструментов.
- Музыкальный резонанс.
- Архитектурная акустика.
- Живые эхолокаторы.
- Кто слышит инфразвук.
- Влияние инфразвука на человека.

Глава 8

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

...Мой прибор, при дальнейшем усовершенствовании его, может быть применён к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией.

А. С. Попов



§ 70 ПЕРЕМЕННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое переменный ток.
- Что такое генератор переменного тока.

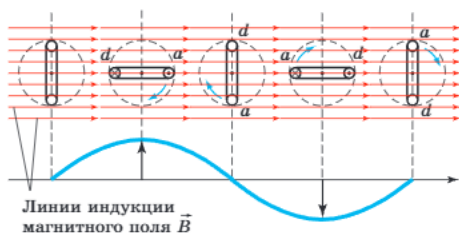
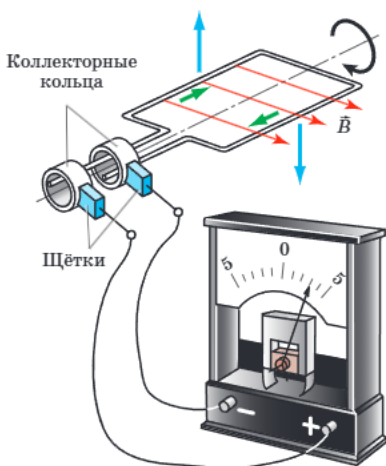
ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое магнитный поток?
- Что такое электромагнитная индукция?
- При каких условиях возникает электромагнитная индукция?
- Что такое турбина?

Открытие М. Фарадея 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, проволоочной рамки и миллиамперметра. Рамка находится в магнитном поле и подключена к чувствительному миллиамперметру.

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



ИССЛЕДОВАНИЕ

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 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.

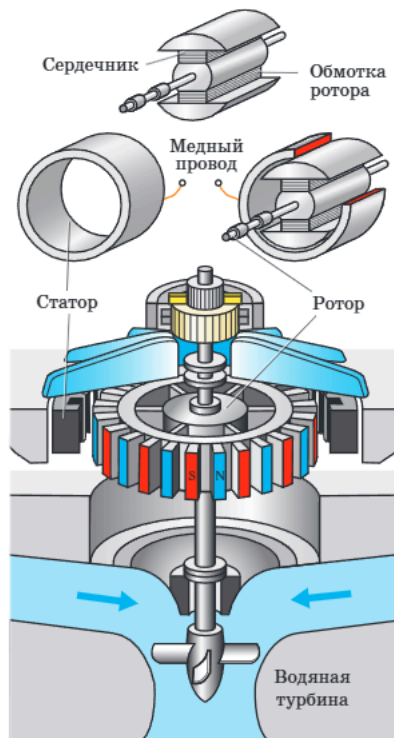
Электрический ток, значение и направление которого периодически меняются, называется **переменным током**.

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

В настоящее время переменный ток получают в основном с помощью **электро-механических 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 навивкой на него обмоткой, по которой проходит 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 период колебаний электромагнитного тока составляет 0,02 с и через каждые 0,01 с направление тока меняется на противоположное.

Поскольку скорость вращения гидротурбины мала, роторы современных гидрогенераторов имеют несколько пар полю-



сов. Применение многополюсных генераторов позволяет в определённых пределах варьировать частоту переменного тока.

▶ ЭТО ИНТЕРЕСНО

Английский физик Д. Бернал, один 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 путём. 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 — магнитогидродинамические), 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.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Переменный ток широко используется на транспорте, в промышленности, в быту и является на сегодняшний день более распространённым, чем постоянный. Это объясняется тем, что переменный ток можно передавать на большие расстояния под высоким напряжением, в результате чего значительно снижаются тепловые потери. Осуществить такую передачу энергии в случае постоянного тока не представляется возможным. Поэтому электростанции производят именно переменный электрический ток.

ВЫВОДЫ

- ! Переменный ток — это электрический ток, значение и направление которого периодически меняются.
- ! Стандартная частота переменного тока равна 50 Гц.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Переменный ток; генератор переменного тока

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

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

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ТРАНСФОРМАТОР § 71



НОВОЕ В УРОКЕ

- Чем обусловлены потери электрической энергии при её передаче на большие расстояния.
- Почему передачу электрической энергии выгодно осуществлять при высоком напряжении.
- Что такое трансформатор и для каких целей он предназначен.
- Что такое коэффициент трансформации.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как формулируется закон Джоуля—Ленца?
- Что такое мощность тока и как она вычисляется?
- В чём заключается явление электромагнитной индукции?

Электрическая энергия в нашей стране зачастую производится в местах, весьма удалённых от больших городов и крупных производств. Поэтому передача электрической энергии на большие расстояния является актуальной задачей.

ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. При передаче электрической энергии на расстояние неизбежно происходят потери энергии вследствие нагревания проводов. Эти потери в соответствии с законом Джоуля—Ленца прямо пропорциональны квадрату силы тока в линии электропередачи:

$$Q = I^2 R t, \quad (1)$$

где R — сопротивление линии.

Сопротивление двухпроводной линии длиной l и площадью поперечного сечения провода S рассчитывается по формуле

$$R = \rho \frac{2l}{S}, \quad (2)$$

где ρ — удельное сопротивление металлического проводника.

При большой протяжённости линии передачи потери энергии могут быть весьма значительными. Уменьшить потери энергии за счёт уменьшения сопротивления линии не представляется возможным, поскольку увеличение поперечного сечения проводов потребовало бы большого расхода металла и чрезмерно утяжелило бы провода.

Поэтому для уменьшения потерь остаётся единственная возможность — уменьшать силу тока. Чтобы при уменьшении силы тока в несколько раз передаваемая мощность оставалась неизменной, необходимо во столько же раз повысить напряжение в линии.

Если полезная нагрузка работает при напряжении U , то потребляемая ею мощность $P = UI$.

Поскольку $I = P/U$, то с учётом формул (1) и (2) потери мощности ΔP на линии составляют

$$\Delta P = \frac{Q}{t} = \frac{2\rho l P^2}{S U^2}. \quad (3)$$

Как видно из формулы (3), при заданной мощности нагрузки P мощность тепловых потерь уменьшается обратно пропорционально квадрату напряжения. Если

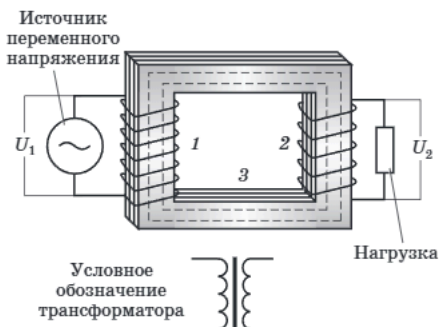
передача электроэнергии осуществляется под большим напряжением, порядка нескольких сотен тысяч вольт, то потери мощности удаётся свести к минимуму.

Вместе с тем многие потребители электроэнергии рассчитаны на гораздо меньшее напряжение, например 220 или 380 В. Поэтому необходимы устройства, способные понижать или повышать напряжение переменного тока практически без потерь мощности.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Современные генераторы переменного тока вырабатывают электрическую энергию с напряжением, не превышающим 15—20 кВ. Для уменьшения потерь эту энергию необходимо передавать под напряжением порядка 250—500 кВ.

ТРАНСФОРМАТОР. Повышение и понижение напряжения переменного тока осуществляется с помощью *трансформаторов*. Для практических целей трансформатор впервые применил российский учёный П. Н. Яблочков и усовершенствовал в дальнейшем другой российский учёный И. Ф. Усагин.



Трансформатор состоит из двух катушек (обмоток) изолированной проволоки, которые надеты на общий железный *сердечник* 3 в виде рамки. Обмотка 1, которая подключается к источнику переменного напряжения, называется *первичной*. Обмотка 2, к которой подключается какое-либо устройство, потребляющее электроэнергию, называется *вторичной*.

Принцип работы трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции. Изменяющийся во времени магнитный поток, создаваемый переменным током в витках первичной обмотки, практически без потерь проходит внутри сердечника и создаёт в витках вторичной обмотки переменный индукционный ток.

Пусть первичная обмотка состоит из N_1 витков, а вторичная — из N_2 витков. Тогда для амплитудных значений напряжений можно записать:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k. \quad (4)$$

Величина k называется коэффициентом трансформации. При $k > 1$ трансформатор называется *понижающим*, при $k < 1$ — *повышающим*.

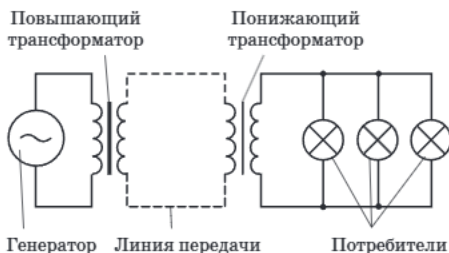
Если выводы вторичной обмотки разомкнуты, то такой режим работы трансформатора называется *холостым*.

Рабочим режимом трансформатора является режим, когда вторичная обмотка подключена к нагрузке. При этом мощность $P_2 = I_2 U_2$, потребляемая нагруженной вторичной обмоткой, почти равна мощности $P_1 = I_1 U_1$, подводимой к первичной обмотке: $I_2 U_2 \approx I_1 U_1$. Следовательно, токи в обмотках нагруженного трансформатора обратно пропорциональны напряжениям на обмотках:

$$I_2 / I_1 \approx U_1 / U_2.$$

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Чтобы уменьшить потери энергии при передаче на большие расстояния между генераторами и линиями электропередачи (ЛЭП), устанавливают повышающие трансформаторы. Переданная по ЛЭП электроэнергия не может быть непосредственно использована потребителями. Поэтому на месте потребления устанавливаются понижающие трансформаторы, где напряжение понижается до значения, приемлемого для работы промышленного и бытового оборудования. Современные трансформаторы, предназначенные для преобразования переменных токов больших мощностей, обладают рекордно высоким КПД — до 98—99%!



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Трансформатор стал одним из первых устройств, использующих явление электромагнитной индукции. Изобретателем трансформатора считается русский учёный и изобретатель П. Н. Яблочков. В 1876 г. он получил патент на трансформатор с разомкнутым сердечником, который он использовал в своей системе освещения. Первичные обмотки индукционных катушек были подключены к источнику переменного тока. Вторичные обмотки можно было подключить к нескольким «электрическим свечам» (дуговым лампам). При таком подключении цепь не разрывалась при потухании одной лампы, и другие «свечи» продолжали гореть. Изобретение Яблочкова в дальнейшем было усовершенствовано другими учёными.

! В линиях передачи электроэнергии на большие расстояния используются трансформаторы — устройства, с помощью которых осуществляется повышение и понижение напряжения переменного тока.

ВЫВОД

Передача электрической энергии; трансформатор

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Можно ли многократно уменьшить потери электроэнергии путём уменьшения сопротивления линии электропередачи?
2. Во сколько раз уменьшатся потери на нагревание проводов при повышении напряжения в 10 раз?
3. На каком явлении основана работа трансформатора?
4. В чём заключается различие режима холостого хода и режима нагрузки работы трансформатора?

§ 72 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

НОВОЕ В УРОКЕ

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

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Какое поле называется электрическим?
- В чём заключались опыты Фарадея?
- В чём заключается сущность явления электромагнитной индукции?

Вы знаете, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции возникает индукционный ток. Однако остался невыясненным 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, поскольку электроны движутся хаотически. 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.

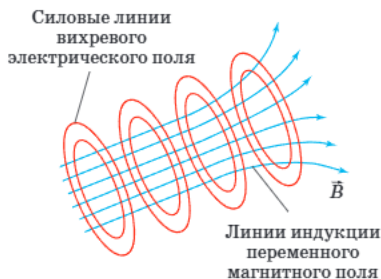


Джеймс Клерк Максвелл
(1831—1879)

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 электрическими 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 называются **вихревыми**. При этом неважно, есть ли проводящий контур или его нет. Наличие проводника лишь помогает обнаружить возникающее вихревое электрическое поле.



ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ 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*.

ВАЖНО

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.

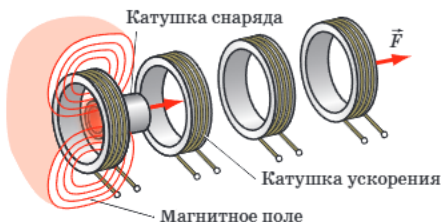
Сам Максвелл твёрдо верил в существование электромагнитного поля, хотя экспериментальное подтверждение этого факта было получено лишь спустя 22 года.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

«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».

Дж. Максвелл

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ. 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.



Электромагнитная пушка катушечного типа состоит из ствола (на рисунке не показан) с рядом неподвижных катушек ускорения. На эти катушки последовательно подаётся напряжение, что приводит к возникновению в них электрического тока, порождающего электромагнитное 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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Кристиан Беркеленд, профессор физики в университете Осло, за период с 1901 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 Осло, он достигал разгона снаряда массой 10 кг до скорости примерно 100 м/с.

Ускорители частиц учёные применяют для фундаментальных и прикладных исследований в различных областях науки. В современных ускорителях ускорение заряженных частиц происходит в результате взаимодействия частиц с переменным электромагнитным полем.

ВЫВОДЫ

- ! Изменяющееся со временем магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, а изменяющееся со временем электрическое поле порождает переменное магнитное поле.
- ! Взаимосвязанные и порождающие друг друга переменные электрическое и магнитное поля образуют единое электромагнитное поле.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Индукционное электрическое поле; электромагнитное поле; вихревое поле; электромагнитная пушка

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Как возникает индукционное поле?
2. Какое электрическое поле называется вихревым?
3. Возможно ли опытное обнаружение вихревого электрического поля? Приведите примеры.
4. В чём заключается главная идея теории Максвелла?

КОНДЕНСАТОРЫ § 73

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое конденсатор.
- Что такое электрическая ёмкость.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое электрическое поле?
- Что такое энергия электрического тока?

Люди научились накапливать различные виды энергии для дальнейшего использования. Например, вода, удерживаемая плотиной, обладает запасом потенциальной энергии. При падении вниз вода заставляет вращаться лопасти турбины, которые приводят в движение генератор для выработки электроэнергии. Вы уже знаете, что для накопления электрической энергии используются аккумуляторы. Но существует ещё один тип устройств — *конденсаторы*. Изучим, что они собой представляют и как работают.

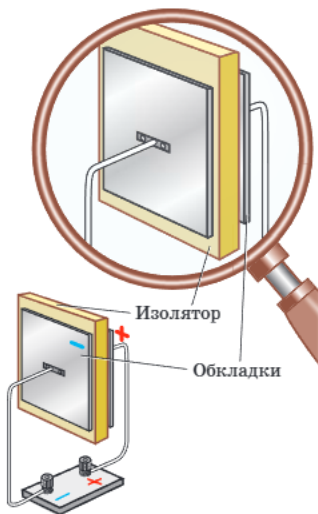
КОНДЕНСАТОР. Конденсатор — это устройство, позволяющее накапливать электрические заряды и энергию электрического поля (от лат. *condensation* — накопление).

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

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 $-q$. Этот процесс называется *зарядкой конденсатора*.

Силовые линии электрического поля заряженного конденсатора начинаются на положительно заряженной обкладке и оканчиваются на отрицательно заряженной. В результате электрическое поле практически полностью сосредоточено внутри конденсатора.

Если к выводам обкладок заряженного конденсатора подключить электрическую лампочку, то будет наблюдаться кратковременная вспышка света. При этом происходит *разрядка конденсатора*. Это свидетельствует о том, что заряженный конденсатор обладает запасом электрической энергии.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

В 1745 г. в Голландии в Лейденском университете учёные под руководством Питера ван Мушенбрука создали прибор, названный *лейденской банкой*, который мог накапливать и хранить электрический заряд. Учёные хотели зарядить воду в стеклянной банке, которую держали в руке. Вода заряжалась с помощью цепочки, один конец которой соединялся с электрической машиной, а другой — опускался в воду.



После зарядки банка могла долго хранить заряд. Если кто-то прикасался к цепочке, то получал удар током, т. е. в цепочке возникал кратковременный электрический ток. После этого банку надо было снова заряжать.

Независимо от голландских учёных подобное устройство создал немецкий физик Эвальд фон Клейст.

Лейденская банка являлась первым простейшим конденсатором.



Как вы знаете, обычные источники электрического тока (батарейки, аккумуляторы) запасают электрическую энергию за счёт происходящих в них химических процессов. Далее эта энергия постепенно используется для совершения работы электрическим током в цепи. Конденсатор же при разрядке способен отдавать энергию за очень короткое время. Это означает, что мощность разряда конденсатора может быть весьма большой.



Свойство конденсаторов очень быстро отдавать накопленную энергию при разрядке широко используется на практике. Например, лампа-вспышка фотоаппарата питается током разрядки конденсатора, который заряжается от специальной батареи. По аналогичному принципу работает и газоразрядная трубка лазера: вспышка трубки осуществляется при разрядке батареи конденсаторов. Наиболее широкое применение конденсаторы находят в радиотехнике.

В электрических схемах для конденсаторов используется специальное условное обозначение.



ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЁМКОСТЬ. Способность конденсатора накапливать и хранить определённый запас электрической энергии характеризуется физической величиной, которая называется **электрической ёмкостью** или просто **ёмкостью** конденсатора.

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

$$q \sim U.$$

Коэффициент пропорциональности обозначается буквой C и является *электрической ёмкостью* конденсатора.

ВАЖНО

Если обозначить величины: заряд — q , напряжение — U , ёмкость конденсатора — C , то **заряд** между обкладками конденсатора рассчитывается по формуле

$$q = CU.$$

Как показывают опыты, ёмкость плоского конденсатора тем больше, чем меньше расстояние между его обкладками и чем больше площадь каждой из них. Также

электроёмкость зависит от диэлектрических свойств среды между обкладками конденсатора.

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

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

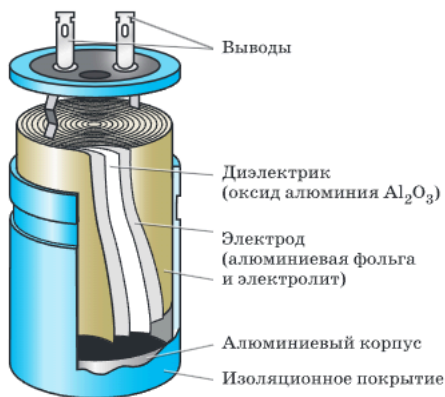
$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

1 фарад (1 Ф) — это очень большая величина. На практике большинство конденсаторов имеют ёмкость, измеряемую дольными единицами: *микрофарад* (1 мкФ = 10^{-6} Ф), *нанофарад* (1 нФ = 10^{-9} Ф) и *пикофарад* (1 пФ = 10^{-12} Ф).

УСТРОЙСТВО И ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ.

В целях увеличения ёмкости и уменьшения размеров металлические обкладки конденсаторов обычно изготавливают в виде тонкой фольги. При этом в качестве диэлектрика используют парафиновую бумагу, слюду, керамику и т. д. Современные конденсаторы могут иметь несколько чередующихся слоёв диэлектрика и металлической фольги, которые скручены и упакованы в компактный цилиндр.

Значительного повышения ёмкости за счёт уменьшения расстояния между обкладками удаётся достичь в так называемых *электролитических конденсаторах*, в которых слоем изолятора служит очень тонкая плёнка оксида алюминия (Al_2O_3), наносимая на фольгу. Свёрнутую в рулон фольгу помещают в герметичный корпус, куда заливают электролит. Особенность электролитических конденсаторов заключается в том, что их включение в цепь осуществляется с учётом полярности. Этого не требуется при использовании бумажных, слюдяных или керамических конденсаторов.



⚠ Конденсатор — это устройство, позволяющее накапливать электрические заряды и энергию электрического поля.

⚠ Электрическая ёмкость — это физическая величина, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд.

ВЫВОДЫ

Конденсатор; электрическая ёмкость

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

1. Что такое конденсатор?
2. От чего зависит электрическая ёмкость конденсатора?
3. Приведите примеры технических устройств, в которых применяют конденсаторы.
4. Может ли разряд конденсатора представлять опасность для человека?

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

§ 74 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое электромагнитные колебания.
- Что такое колебательный контур, из каких элементов он состоит.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое электрический ток?
- Что такое электрическое поле?

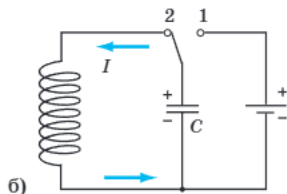
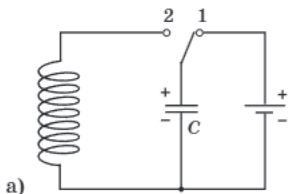
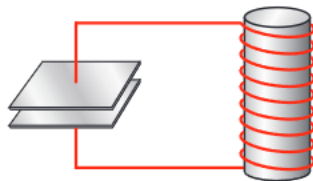
Вы уже знаете, что для возникновения механических волн необходимы колебания. Например, колебания поплавка приводят к возникновению волны на поверхности воды, колебания голосовых связок приводят к возникновению звуковых волн и т. д. Вместе с тем существует другой класс колебаний, не являющихся механическими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

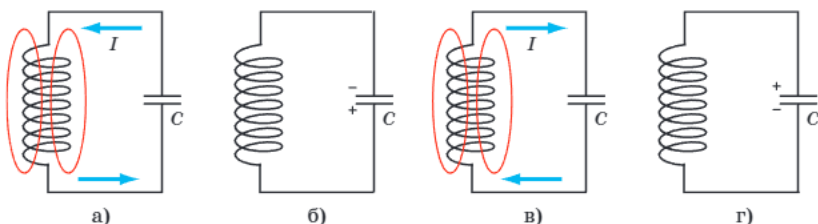
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ. На предыдущих уроках вы познакомились с переменным током, вырабатываемом на электростанциях. Частота этого тока равна 50 Гц, и её называют **промышленной частотой**. Однако в телефонных проводах, например при передаче звука, идёт ток, изменяющийся в соответствии с частотой передаваемых звуковых колебаний. Как правило, частоты этих колебаний лежат в пределах от 50 Гц до 10 кГц. Изменения тока носят колебательный характер. Такого рода колебания называются **электромагнитными колебаниями**.

Электромагнитные колебания, соответствующие звуковым частотам, называются колебаниями **звуковой** или **низкой частоты**. Радиопередачи и телевидение основаны на применении токов с частотами в миллионы и сотни миллионов герц. Такие колебания называются электромагнитными колебаниями **высокой частоты**.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР. Для получения электромагнитных колебаний используется специальное устройство, которое называется **колебательным контуром**. **Колебательный контур** — это электрическая цепь, состоящая из катушки и конденсатора.

Зарядим конденсатор от источника тока, в результате чего между его обкладками возникнет электрическое поле (рис. а). Затем с помощью ключа замкнём конденсатор на катушку, состоящую из нескольких витков проволоки (рис. б).





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 (рис. а).

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. Для того чтобы движущиеся заряды начали перезаряжать конденсатор, на них должно действовать электрическое поле, способствующее накоплению одноимённых зарядов на пластинах конденсатора.

Возникновение электрического поля, обеспечивающего поддержание тока в цепи, обусловлено особыми свойствами изменяющегося магнитного поля. Об этих свойствах магнитного поля вы узнаете в старших классах школы.

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 (рис. б).

Далее явление повторится в обратном порядке: конденсатор начнёт разряжаться, энергия электрического поля будет преобразовываться в энергию магнитного поля (рис. в), и катушка вновь перезарядит конденсатор (рис. г). В последующий момент конденсатор опять будет разряжаться.

Повторение процессов означает, что заряды в контуре будут совершать колебания, переходя с одной обкладки конденсатора 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 прохождении тока проводники нагреваются, на это расходуется энергия контура.

Таким образом, в колебательном контуре возникает *переменный ток*. Частота этого тока зависит от ёмкости конденсатора, от числа витков и размеров катушки.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

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

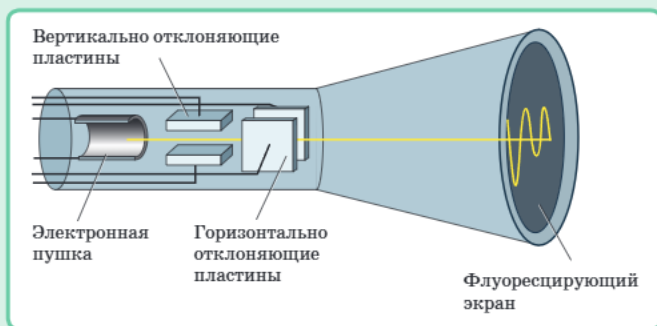
Обычно электромагнитные колебания в цепи затухают за малые доли секунды, и наблюдать их непосредственно невозможно, поскольку мы не можем видеть ни перезарядки конденсатора, ни колебаний силы тока в катушке. Поэтому для изучения подобных быстропеременных процессов используют специальные устройства — *электронные осциллографы*. Движение электронного луча осциллографа по экрану позволяет наблюдать временную развёртку исследуемых колебаний.



 ЭТО ИНТЕРЕСНО



Основной частью электронного осциллографа является **электронно-лучевая трубка** (ЭЛТ). Она представляет собой стеклянную трубку, из которой откачан воздух. Внутри трубки находится электронная пушка, вырабатывающая пучок электронов, и две пары взаимно перпендикулярных отклоняющих пластин. Электронный пучок пролетает по трубке и попадает на флуоресцирующий экран. В результате на экране высвечивается яркая точка.

Когда на вертикально отклоняющие пластины подаётся постоянное напряжение, пучок электронов притягивается к положительно заряженной пластине, а световое пятно на экране смещается вверх. Если на пластины подаётся переменное напряжение, то световое пятно будет колебаться вверх и вниз, смещаясь на своё амплитудное значение от центра экрана. Если частота колебаний сигнала равна 50 Гц, то за одну секунду световое пятно совершит 50 полных колебаний. Вследствие инерции зрения на экране будет видна прямая вертикальная линия. Подача напряжения на горизонтально отклоняющие пластины вызывает отклонение электронного пучка в горизонтальном направлении. В результате на экране возникнет временная развёртка колебаний — кривая, которая называется *осциллограммой*.



В настоящее время широко используются цифровые осциллографы.

ВЫВОДЫ

-  Колебательный контур — это электрическая цепь, состоящая из катушки и конденсатора. Используется для получения электромагнитных колебаний.
-  После зарядки конденсатора в колебательном контуре возникает переменный ток.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Колебательный контур; конденсатор; электрическая ёмкость

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. Какие колебания называются колебаниями высокой частоты?
2. Что такое колебательный контур?
3. В каких устройствах используются колебательные контуры?
4. Назовите общие и отличительные черты, присущие механическим и электромагнитным колебаниям.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ. § 75

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН



НОВОЕ В УРОКЕ

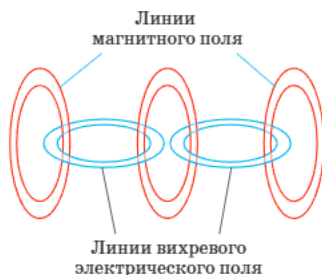
- Что такое электромагнитные волны.
- Что такое шкала электромагнитных волн.

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 было переменным?

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое напряжённость электрического поля?
- Что такое магнитная индукция?
- Что такое поперечные волны?
- Каковы основные характеристики волн?

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.



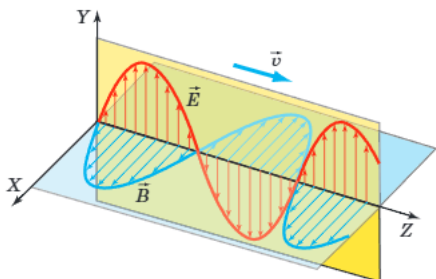
Процесс распространения переменного электромагнитного поля, порождённого колеблющейся заряженной частицей, и представляет собой **электромагнитную волну (ЭМВ)**. Колебательное движение всегда является ускоренным. Следовательно, **для получения электромагнитных волн нужны ускоренно движущиеся заряды.**

В отличие от звуковых волн, которые могут распространяться только в среде, согласно *теории Максвелла*, **электромагнитные волны 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.

Силовой характеристикой электрического поля является его напряжённость \vec{E} , которая 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.** 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**.

Джеймс 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 ν колебаний и скоростью c распространения определяется такой же формулой, как и для механических волн:

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

ВАЖНО

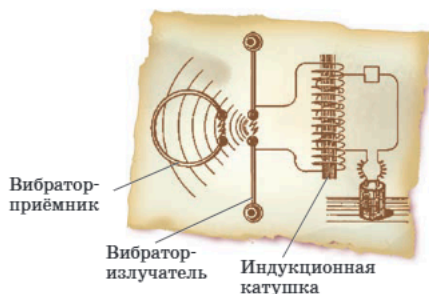
Если обозначить величины: частота колебаний — ν , скорость распространения электромагнитной волны — c , то **длину электромагнитной волны** рассчитывают по формуле

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

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



Генрих Герц
(1857—1894)



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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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

Г. Герц

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН. Длины электромагнитных волн могут быть очень разными — от 10^{-12} м до 10^6 м. Весь диапазон электромагнитных волн называется **спектром электромагнитных излучений**. Отдельные части этого спектра принято различать либо по длине волны, либо по частоте. Спектр электромагнитных излучений включает в себя радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи и гамма-лучи.

Тип ЭМВ	Длина волны, м	Частота волны, Гц
Радиоволны	$> 10^{-3}$	$< 3 \cdot 10^{11}$
Инфракрасное излучение	$7,8 \cdot 10^{-7} - 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{11} - 4,3 \cdot 10^{14}$
Видимый свет	$3,8 \cdot 10^{-7} - 7,8 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$
Ультрафиолетовое излучение	$10^{-8} - 3,8 \cdot 10^{-7}$	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$
Рентгеновские лучи	$5 \cdot 10^{-12} - 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{16} - 6 \cdot 10^{19}$
Гамма-лучи	$< 5 \cdot 10^{-12}$	$> 6 \cdot 10^{19}$

Радиоволны имеют наибольшую длину волны и могут распространяться на большие расстояния. Радиоволны применяются в радиосвязи и телевидении, мобильной телефонной связи и т. д.

Диапазон радиоизлучения, примыкающий к инфракрасному, часто называют *микроволнами*. Его также называют *сверхвысокочастотным* (СВЧ) излучением, так как у него самая большая частота в радиодиапазоне. Микроволны используют в радиолокации, радионавигации, системах спутникового телевидения, радиоастрономии, средствах космической связи и т. д. Микроволны также нашли своё применение в СВЧ-печах для нагревания пищи.

Инфракрасное излучение имеет длину волны от нескольких миллиметров до микрометров. Этот тип излучения человек ощущает кожей как тепло. Оно применяется в волоконной оптике, в пультах от телевизоров для переключения каналов, в приборах ночного видения, которые позволяют нам видеть в темноте. Инфракрасные тепловизоры и сканеры применяются в медицине, энергетике, науке, а также службах спасения.

Волны *видимой части* электромагнитного спектра может видеть человеческий глаз. На использовании видимого света основано устройство всех оптических приборов. Искусственные источники излучения видимого света (осветительные приборы) применяют для освещения улиц и помещений.

Ультрафиолетовое излучение — невидимое для глаза электромагнитное излучение с длиной волны меньшей, чем у фиолетового света. Это излучение в основном приходит на Землю от Солнца. Как известно, воздействие солнечного света на кожу вызывает загар. Однако длительное воздействие ультрафиолетового излучения губительно для организмов и вызывает сильные ожоги. От большей части ультрафиолетового излучения Солнца нас защищает озоновый слой. Ультрафиолетовые волны применяют в медицине для обеззараживания инструментов и оборудования, так как оно способно убивать бактерии и микроорганизмы.

Рентгеновские лучи имеют более короткую длину волны, чем ультрафиолетовое излучение. Они широко применяются в медицине при диагностике переломов и различных заболеваний внутренних органов. Рентгеновские лучи проникают сквозь мягкие ткани организма, но поглощаются более плотными тканями, включая костную. На вокзалах и в аэропортах применяют рентгеновские сканеры багажа.

Гамма-лучи — самые короткие по длине волны электромагнитные волны. Они способны проникать даже сквозь металл, поэтому с их помощью можно обнаружить микротрещины в металлических конструкциях. Гамма-лучи также используются в медицинских процедурах для уничтожения раковых клеток.

ВЫВОДЫ

- ! Процесс распространения переменного электромагнитного поля представляет собой электромагнитную волну.
- ! Для получения электромагнитных волн нужны ускоренно движущиеся заряды.
- ! Электромагнитные волны являются поперечными. Направление распространения электромагнитной волны перпендикулярно направлениям колебаний векторов напряжённости электрического поля и магнитной индукции.
- ! Электромагнитные волны могут распространяться не только в среде (газах, жидкостях и твёрдых телах), но и в вакууме.
- ! В вакууме скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света.
- ! Весь диапазон электромагнитных волн называется спектром электромагнитных излучений.

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

Электромагнитная волна; поперечные волны; шкала электромагнитных волн; скорость электромагнитных волн

И ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

1. В каком случае электрические заряды являются источниками электромагнитных волн?
2. Какие физические величины характеризуют электромагнитную волну?
3. Какие виды излучения включает в себя весь диапазон электромагнитных волн?
4. Какую роль электромагнитные волны играют в нашей жизни?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА § 76



НОВОЕ В УРОКЕ

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

- В чём заключается основная идея радиосвязи.
- Где используются радиоволны.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Опыты Герца.
- Что такое электромагнитные колебания?

РАДИОСВЯЗЬ. Появление возможности передачи и приёма электромагнитных волн на расстояние привело к возникновению целого ряда средств связи, без которых немислима наша сегодняшняя жизнь. Способ передачи аудио- или видеосигналов на расстояние с помощью радиоволн называется **радиосвязью**. Радиосвязь широко используется в радиовещании, телевидении, мобильной телефонии и т. д.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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. 7 мая 1895 г. Попов сделал доклад на заседании Русского физико-химического общества в Петербурге и продемонстрировал свои приборы в действии. При помощи созданных им генератора и приёмника Попов передал первую в мире беспроводную телеграмму (радиограмму) на расстояние 250 м. Первая радиограмма содержала всего два слова: «Heinrich Hertz». Поэтому в нашей стране 7 мая отмечается День радио.



Александр Степанович Попов
(1859—1905)



Гульельмо Маркони
(1874—1937)

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 во многих странах именно Маркони считается изобретателем радио. В 1901 г. Маркони осуществил 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.



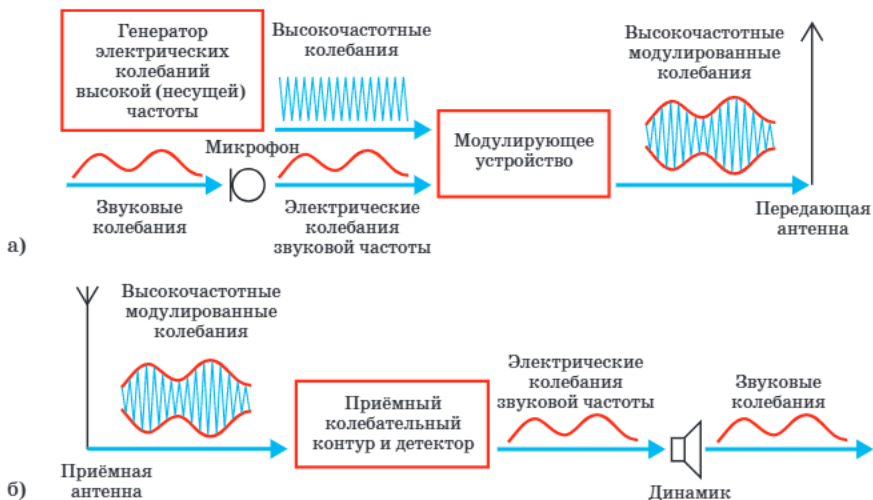
Радиоприёмник А. С. Попова

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.

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

Электромагнитные волны излучаются передающей антенной, в которой высокочастотные колебания возбуждаются с помощью специального генератора. Такие колебания получили название **несущих**. Если в цепь передающей антенны включить микрофон и произносить перед ним звуки, то колебания мембраны микрофона будут преобразовывать звуковые волны в электрические сигналы в виде переменного тока, частота которого совпадает с частотой звуковых колебаний. Этот ток будет изменять амплитуду несущих высокочастотных колебаний в соответствии с амплитудой звуковых колебаний. Это преобразование называется **амплитудной модуляцией**. Модулированный сигнал при помощи **передающей антенны** излучается в пространство (рис. а).



Приёмник, настроенный на частоту передающей станции, улавливает радиоволну и превращает её в электрический сигнал (рис. б). Следует подчеркнуть, что принятый приёмником модулированный высокочастотный сигнал не может непосредственно вызвать колебания мембраны громкоговорителя со звуковой частотой. Поэтому, прежде чем электромагнитные колебания возникнут в цепи телефона или громкоговорителя, необходимо предварительно из высокочастотных модулированных колебаний выделить сигнал звуковой частоты. Такой процесс преобразования частотных характеристик сигнала называется **детектированием** или **демодуляцией**. Громкоговоритель (динамик) преобразует электрические сигналы в звуковые волны.

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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Главный принцип телевидения (формирование изображения последовательным сканированием) был предложен в 1880 г. независимо двумя учёными: американцем В. Е. Сойером и французом М. Лебланом. В 1884 г. немецкий инженер П. Нипков изобрёл диск, впоследствии названный *диск Нипкова*, с помощью которого изображение преобразовывалось в электрический сигнал. В 1922 г. шотландский инженер Д. Л. Бэрд, используя диск Нипкова, начал разрабатывать телевизионное оборудование и в 1926 г. в Лондоне продемонстрировал первые распознаваемые изображения человеческих лиц. В 1933 г. американский инженер российского происхождения В. К. Зворыкин разработал систему цветного телевидения с использованием электронно-лучевой трубки (кинескопа), которая долгое время являлась основной частью телевизоров и мониторов. Первый пульт дистанционного управления был создан в 1950 г.

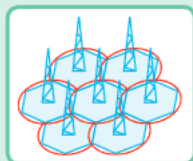
СОТОВАЯ СВЯЗЬ. Для передачи звуковых сигналов при помощи мобильных телефонов используются радиоволны высокой частоты, называемые *ультракороткими*. Эти сигналы расходятся по всему миру благодаря релейным станциям и искусственным спутникам Земли. В сеть мобильной телефонной связи входит множество антенн 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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 мобильную связь называют также *сотовой*.



КОСМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ. Радиосвязь, которая использует космические объекты, находящиеся за пределами земной атмосферы, называется **космической связью**. Впервые космическая связь была осуществлена 12 апреля 1961 г. во время полёта в космос Юрия Гагарина.

Одним из видов космической связи является **спутниковая связь**. Спутниковая связь осуществляется между наземными станциями, а в качестве ретрансляторов используются искусственные спутники Земли.

РАДИОЛОКАЦИЯ. В 1922 г. американские исследователи А. Тейлор и Л. Янг обнаружили, что посылаемые их передатчиком радиоволны отражаются от судна, плывущего по реке. Позднее было обнаружено отражение радиоволн от самолёта. Это открытие позволило разработать метод использования радиолокация для обнаружения движущихся объектов.

Радиолокация — это обнаружение и точное определение местонахождения различных объектов с помощью радиоволн. Устройства, с помощью которых осуществляют радиолокацию, называются **радиолокаторами**. Широко распространённое название радиолокатора — **радар (RADAR)** является аббревиатурой английских слов *Radio Detection And Ranging* — обнаружение и определение дальности с помощью радиоволн.

Радиолокаторы имеют следующий принцип работы. От передатчика на антенну отдельными импульсами подаются электрические сигналы высокой частоты. Вращающаяся антенна испускает импульсы радиоволн и направляет их на цель. После каждого импульса передатчик выключается, а радиолокатор переходит в режим приёма. Радиоволны, которые отражаются от цели, принимаются антенной, и на экранах приборов отображается объект. Расстояние до цели определяется по времени прихода обратного сигнала. После этого приёмник выключается и вновь включается передатчик.

Вывод

! Радиоволны используются для радиовещания, телевидения, сотовой и космической связи, радиолокации и многого другого.

Ключевые слова

Радиосвязь; радио; телевидение; сотовая связь; космическая связь; спутниковая связь; радиолокация

Вопросы и задания

1. В чём заключается основная идея радиосвязи?
2. Где используются радиоволны?
3. Можно ли осуществить радиосвязь между двумя подводными лодками, находящимися на глубине в Мировом океане?
4. Объясните, почему устойчивый приём телевизионной передачи возможен только в условиях прямой видимости.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ § 77



- **ЗАДАЧА 1.** Трансформатор, содержащий в первичной обмотке 800 витков, повышает напряжение с 110 до 330 В. Определите коэффициент трансформации и количество витков во вторичной обмотке трансформатора.

Дано:
 $N_1 = 800$
 $U_1 = 110 \text{ В}$
 $U_2 = 330 \text{ В}$

 $k = ?$
 $N_2 = ?$

Решение.
 Коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2};$$

$$k = \frac{110}{330} = 0,3.$$

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} N_1; \quad N_2 = \frac{330}{110} \cdot 800 = 2400.$$

Ответ: 0,3; 2400.

- **ЗАДАЧА 2.** Какой заряд накапливается на каждой пластине конденсатора ёмкостью 6 мкФ, если конденсатор подключён к батарее 12 В?

Дано:
 $C = 6 \text{ мкФ}$
 $U = 12 \text{ В}$

 $q = ?$

СИ
 $6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$

Решение.
 Заряды на обкладках конденсатора пропорциональны напряжению между ними:
 $q = CU;$
 $q = 6 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 12 \text{ В} = 72 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} = 72 \text{ мкКл}.$

Ответ: 72 мкКл.

- **ЗАДАЧА 3.** Длина электромагнитной волны, излучаемой радиопередатчиком, равна 2 м. Определите частоту волны.

Дано:
 $\lambda = 2 \text{ м}$
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$

 $\nu = ?$

Решение.
 Для решения задачи используем взаимосвязь длины волны со скоростью её распространения и частотой:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}.$$
 Отсюда находим частоту: $\nu = \frac{c}{\lambda};$

$$\nu = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2 \text{ м}} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Гц} = 150 \text{ МГц}.$$

Ответ: 150 МГц.

- **ЗАДАЧА 4.** Радиолокатор посылает импульсы, частота следования которых равна 2000 Гц. Длительность импульса 1 мкс. Определите наибольшее и наименьшее расстояния, на которых радиолокатор может обнаружить объект.

Дано:
 $\nu = 2000$ Гц
 $\tau = 1$ мкс
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с

$L_{\min} - ?$
 $L_{\max} - ?$

СИ
 10^{-6} с

Решение.

Для того чтобы отражённый от объекта импульс был зафиксирован на экране приёмного устройства, необходимо, чтобы он пришёл не ранее, чем через 1 мкс, но не позже, чем через время, равное периоду колебаний $T = \frac{1}{\nu}$, после начала отправки прямого импульса.

Отсюда следует, что минимальное расстояние

$$L_{\min} = \frac{c\tau}{2}; \quad L_{\min} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \cdot 10^{-6} \text{ с}}{2} = 150 \text{ м.}$$

Для максимального расстояния получим

$$L_{\max} = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2\nu};$$

$$L_{\max} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{2 \cdot 2000 \text{ Гц}} = 7,5 \cdot 10^4 \text{ м} = 75 \text{ км.}$$

Ответ: 150 м; 75 км.

- **ЗАДАЧА 5.** Трансформатор, первичная обмотка которого состоит из 160 витков, подключён в цепь с напряжением 220 В. Сила тока в первичной обмотке 2,7 А. К вторичной обмотке трансформатора, содержащей 40 витков, подключена полезная нагрузка сопротивлением 5 Ом. Какой будет сила тока во вторичной обмотке и КПД трансформатора, если сопротивление вторичной обмотки 0,5 Ом?

Дано:
 $N_1 = 160$
 $N_2 = 40$
 $U_1 = 220$ В
 $I_1 = 2,7$ А
 $R_n = 5$ Ом
 $R_{06} = 0,5$ Ом

$I_2 - ?$
 $\eta - ?$

Решение.

В режиме холостого хода $\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$,

откуда $U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1}$.

$$U_2 = 220 \cdot \frac{40}{160} = 55 \text{ В.}$$

В рабочем режиме с подключённой нагрузкой:

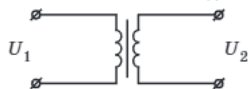
$$U_2 = U_n + U_{06}.$$

По закону Ома $U_2 = I_2 R_n + I_2 R_{06}$.

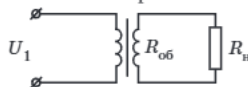
$$\text{Поэтому } I_2 = \frac{U_2}{R_n + R_{06}} = \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{U_1}{R_n + R_{06}},$$

$$I_2 = \frac{40}{160} \cdot \frac{220 \text{ В}}{5 \text{ Ом} + 0,5 \text{ Ом}} = 10 \text{ А.}$$

Режим холостого хода



Рабочий режим



КПД трансформатора можно найти по формуле:

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{A_{\text{з}}} \cdot 100\% = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \cdot 100\%.$$

$$\eta = \frac{10 \text{ А} \cdot 55 \text{ В}}{2,7 \text{ А} \cdot 220 \text{ В}} \cdot 100\% \approx 92,6\%.$$

Ответ: 10 А; 92,6%.

Задачи для самостоятельного решения

- 1 Какая мощность теряется в линии электропередачи под напряжением 35 кВ при передаче мощности 5 МВт на расстояние 10 км по медным проводам с площадью поперечного сечения 25 мм²? Удельное сопротивление меди $0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.
- 2 Сравните напряжения во вторичной обмотке трансформаторов, если один трансформатор содержит 100 витков в первичной обмотке и 1000 витков во вторичной обмотке, а другой трансформатор содержит 200 витков в первичной обмотке и 1500 витков во вторичной обмотке. Напряжение в первичной обмотке одинаково и равно 120 В.
- 3 Первичная обмотка понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $k = 5$ включена в сеть переменного тока с напряжением 380 В. Определите напряжение на нагрузке трансформатора и сопротивление нагрузки, если сопротивление вторичной обмотки 0,5 Ом, ток в ней — 10 А. Чему равен КПД этого трансформатора?
- 4 Определите ёмкость конденсатора, если при максимально допустимом напряжении 120 В на его обкладках можно накопить заряд 48 мКл.
- 5 На корпусе конденсатора указано 600 пФ, 400 В. Можно ли использовать конденсатор для накопления заряда 50 нКл?
- 6 На какой частоте суда передают сигнал бедствия SOS, если по международному соглашению длина волны должна быть равной 600 м?
- 7 Первая радиограмма *Heinrich Hertz* была передана А. С. Поповым в 1895 г. на расстояние 250 м. За какое время радиосигнал прошёл это расстояние?
- 8 Определите расстояние до объекта, если между отправкой импульса и его возвращением в радиолокатор прошло 200 мкс.
- 9 Радиолокатор посылает 3000 импульсов за 1 с. Определите дальность действия радиолокатора.
- 10 Радиолокатор самолёта обнаружил цель на расстоянии 150 км. Чему должен быть равен при этом минимальный временной интервал между импульсами, посылаемыми локатором?

§ 78 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

Практическая работа

Наблюдение явления электрического резонанса

Колебательные процессы можно встретить в различных разделах физики. Ранее при помощи осциллографа и камертона вы изучили звуковые колебания. В этом опыте исследуем электромагнитные колебания и попробуем наблюдать явление электрического резонанса.

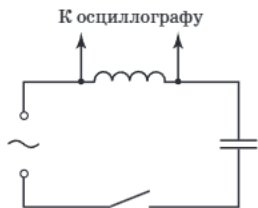
В реальном колебательном контуре свободные электромагнитные колебания являются быстро затухающими, поскольку элементы контура обладают сопротивлением R . Поэтому изучение резонансных характеристик контура можно осуществить только при наличии вынужденных колебаний, которые являются незатухающими. Источником вынуждающей силы, поддерживающей указанные колебания, является генератор, к которому подключается колебательный контур.

Цель работы

С помощью осциллографа наблюдать явление электрического резонанса в реальном колебательном контуре.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования вам потребуются генератор звуковых колебаний (из набора оборудования кабинета физики), осциллограф, катушка, содержащая большое число витков (например, одна из обмоток разборного трансформатора), конденсатор для цепей переменного тока, коммутационная плата.
- С помощью коммутационной платы соберите цепь, состоящую из генератора, катушки и конденсатора. Подключите выход с нагрузки R к осциллографу. В качестве нагрузки может быть использована обмотка самой катушки.
- Включив генератор, наблюдайте переменный сигнал на экране осциллографа.
- Установив определённый уровень амплитуды сигнала с генератора и уровень усиления сигнала на экране осциллографа, плавно изменяйте частоту генератора, постоянно контролируя амплитуду сигнала на экране. Добейтесь такого положения ручки регулятора частоты, при котором амплитуда сигнала на экране осциллографа будет максимальной. Данная частота является резонансной частотой.
- Измените резонансные параметры контура. Для этого введи́те в объём катушки стальной сердечник и наблюдайте за изменением амплитуды сигнала на экране осциллографа.
- Повторите опыт по определению резонансной частоты при изменённых параметрах колебательного контура.
- Сделайте вывод.



НЕОБЫЧНЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

После того как на уроке физики учитель объяснил учащимся важность и значение опытов Г. Герца для проверки теории Максвелла, ученики попросили учителя рассказать о современных методах измерения скорости распространения электромагнитных волн. «На сегодняшний день, — сказал учитель, — существует целый ряд таких методов, наиболее точными из которых являются интерференционные эксперименты. Вместе с тем можно предложить несколько необычный способ оценки скорости распространения электромагнитных волн, который несложно осуществить буквально в домашних условиях».

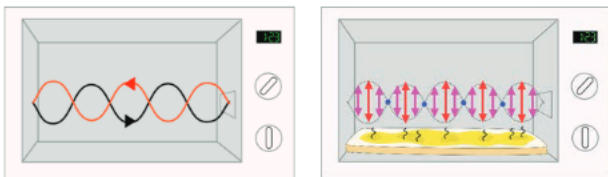
Воспользовавшись научной справкой, проведите и вы все необходимые измерения.

Научная справка

Одним из видов электромагнитных волн являются микроволны. Микроволны могут вырабатываться микроволновой печью. Проходя через пищу, микроволновое излучение вызывает её нагрев. Зная частоту и длину волны, можно вычислить скорость этой волны.

Источником микроволн в микроволновой печи является *магнетрон*, который обычно расположен справа. Волны от магнетрона попадают в корпус микроволновой печи и отражаются от противоположной стенки. В результате возникает интерференция волн, движущихся в противоположных направлениях. Вершины и впадины волн соответствуют областям максимального нагрева, а в местах, где амплитуда колебаний равна нулю, нагрев отсутствует. Именно поэтому в микроволновых печах устанавливают вращающиеся тарелки, для того чтобы нагрев пищи был равномерным.

Расстояние между двумя соседними участками нагрева в микроволновой печи равно половине длины волны.



Этапы выполнения задания

- В качестве оборудования вам понадобится микроволновая печь, легко нагревающиеся продукты (плитка шоколада, сыр, сосиска или яичный белок и т. д.), плоская тарелка или деревянная доска, линейка.
- Выньте вращающуюся тарелку с приводом из микроволновой печи.
- Положите на тарелку или доску плитку шоколада. Вместо шоколада можно использовать ломтики сыра, сосиску или размазанный по тарелке белок от яйца. Продукты должны быть разложены в виде полосы длиной не менее 15 см. Поставьте тарелку в центр микроволновой печи.
- Включите нагрев и внимательно следите за состоянием продуктов. Примерно через 10—30 с (время зависит от мощности прибора) выключите печь. На продуктах должны быть видны области нагрева.

- Выньте тарелку из микроволновой печи. Измерьте расстояние между двумя соседними областями нагрева с помощью линейки. Это расстояние равно половине длины волны.
- На задней стенке микроволновой печи найдите частоту микроволнового излучения, производимого печью. Обычно она составляет около 2450 МГц.
- Вычислите скорость распространения микроволн, используя значение частоты и измеренное значение длины волны.
- Сравните свой ответ с известным значением скорости света. Сделайте вывод. Сможете ли вы предложить способы увеличения точности измерения?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Переменный ток — это электрический ток, значение и направление которого периодически меняются.
- В линиях передачи электроэнергии на большие расстояния используются трансформаторы — устройства, с помощью которых осуществляется повышение и понижение напряжения переменного тока.
- 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.
- Конденсатор — это устройство, позволяющее накапливать электрические заряды и энергию электрического поля.
- Электрическая ёмкость — это физическая величина, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд.
- Колебательный контур — это электрическая цепь, состоящая из катушки и конденсатора.
- Процесс распространения переменного электромагнитного поля, порождённого колеблющейся заряженной частицей, представляет собой электромагнитную волну.
- Электромагнитные волны являются поперечными. Направление распространения электромагнитной волны перпендикулярно направлениям колебаний векторов напряжённости электрического поля и магнитной индукции.
- Электромагнитные волны могут распространяться не только в среде (газах, жидкостях и твёрдых телах), но и в вакууме. В вакууме скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света.
- Радиоволны используются для радиовещания, телевидения, сотовой и космической связи, радиолокации и многого другого.

Вопросы для обсуждения

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

Темы исследовательских и проектных работ

- Переменный электрический ток: плюсы и минусы.
- Никола Тесла и электромагнетизм.
- Для чего нужны трансформаторы.
- Для чего нужны конденсаторы.
- Первое радио. История и применение.
- Радиосвязь вчера, сегодня и завтра.
- Применение источников электромагнитных колебаний в технике.

Глава 9

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

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

Архимед



§ 79 СВЕТ. ИСТОЧНИКИ СВЕТА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что изучается в разделах «Геометрическая оптика» и «Волновая оптика».
- Что такое источники света.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Какие световые явления встречаются в природе и в 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 в. благодаря работам Дж. Максвелла и Г. Герца, которые доказали, что свет имеет электромагнитную природу. 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.

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

Геометрическая оптика — это 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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Представление о световых лучах возникло ещё в античной науке. Е в к л д, 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 Дж. Максвеллом, удалось в конце XIX в. найти простое объяснение целого ряда явлений, непонятных до тех пор.



Жизнь на Земле существует благодаря энергии солнечного света. Эта энергия используется растениями в процессе фотосинтеза. Когда солнечный свет попадает в клетки растений, запускается серия химических реакций, в результате которых из молекул углекислого газа и воды образуются молекулы кислорода и сложных органических веществ — *углеводов*. Выделение кислорода в атмосферу имеет важное значение для поддержания жизни на нашей планете. А образующиеся в реакции фотосинтеза углеводы содержат больше энергии, чем исходные вещества (вода и углекислый газ).

Растения являются источником пищи для человека и других организмов. Растения также играют важную роль в образовании таких видов топлива, как уголь, нефть, торф, природный газ. Эти полезные ископаемые образуются в результате разложения остатков растений и животных, которые существовали миллионы лет назад. Таким образом, содержащаяся в топливе энергия первоначально была получена за счёт энергии солнечного света.

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 *люминесцентные* (от лат. *lumen* — свет). В тепловых источниках свет возникает в результате нагревания тел до высокой температуры, а в люминесцентных — 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 люминесцентных источников света, часто называемых холодным светом, являются лампы дневного света, свечение экранов телевизоров и т. д.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

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. В их создание большой вклад внесли русские учёные П. Н. Яблочков, В. Н. Чиголев, А. Н. Лодыгин и др. С начала XX в. электрические лампы начали 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 начали 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 в различных электронных устройствах и приборах, а также 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, машины, 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.

Выводы

- ! Раздел физики, в котором изучают световые явления, называется оптикой.
- ! Геометрическая оптика — раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света, основываясь на представлении о световых лучах.
- ! Тела, от которых исходит свет, называются источниками света.

Ключевые слова

Оптика; геометрическая оптика; волновая оптика; свет; источники света

Вопросы и задания

1. Что изучают в разделах геометрической оптики и волновой оптики?
2. Какие виды источников света вы знаете?
3. Почему видны тела, не являющиеся источниками света?

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА § 80



НОВОЕ В УРОКЕ

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.

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

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что изучает геометрическая оптика?
- Что такое источники света?

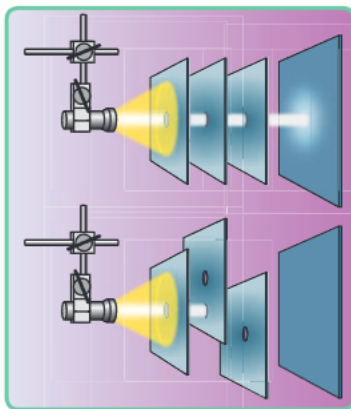
ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА. Почему мы не видим предметы, находящиеся за углом здания, за деревом, за другими препятствиями? Почему мы не видим источник света, если перед ним поставить непрозрачное тело? Для ответа на эти вопросы проведём следующий опыт.

ИССЛЕДОВАНИЕ

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.

Свет распространяется прямолинейно.

Закон распространения света сформулирован в первых дошедших до нас сочинениях по оптике, принадлежащих древнегреческому математику Евклиду.



ВАЖНО

Закон прямолинейного распространения света

Свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.

Так же как в воздухе, свет распространяется прямолинейно и в прозрачных твёрдых телах, и в жидкостях.

СВЕТОВОЙ ЛУЧ. Описывая световые явления, Евклид основывался на понятии *световых лучей*.

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.

Различают *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.

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

ЭТО ИНТЕРЕСНО

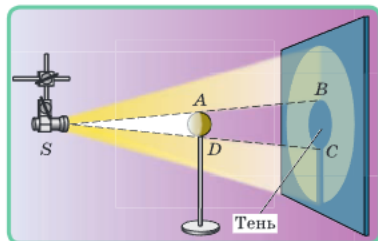
Понятие светового луча возникло из закона прямолинейного распространения света. Существует мнение, что само понятие прямой линии возникло из оптических наблюдений. Древние греки и египтяне использовали закон прямолинейного распространения света для установления колонн по одной прямой. Колонны располагались так, чтобы из-за ближайшей к глазу колонны не были видны все остальные.

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

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

ИССЛЕДОВАНИЕ

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.



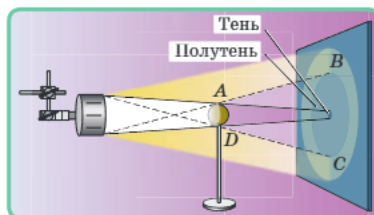
Тень — это область экрана, в которую не попадают лучи света от источника. Чёткая тень получается только от источника света, размеры которого много меньше расстояния от него до экрана. Такой источник света называется *точечным*.

Точечный источник света — это модель реального источника света, размеры которого намного меньше расстояния, на котором оценивается его действие. Точечный источник — светящаяся точка, излучающая свет по всем направлениям одинаково.

Обозначим точечный источник света буквой *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*. Аналогично строится точка *C*.

ИССЛЕДОВАНИЕ

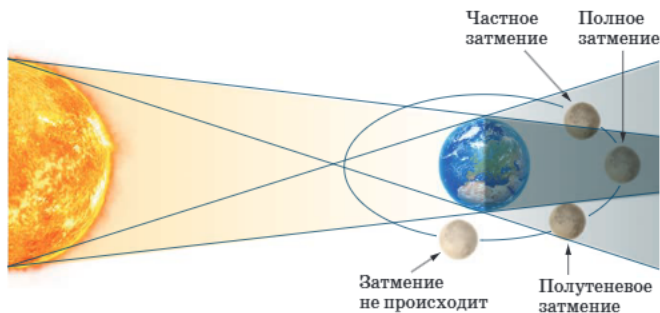
Если в качестве источника света использовать большую лампу, размеры которой сравнимы с расстоянием до экрана, то вокруг тени на экране образуется частично освещённое пространство — полутень.



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*.

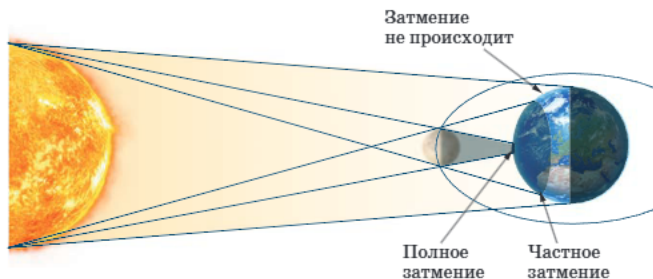
Во время **лунного затмения** Луна попадает в тень, отбрасываемую Землёй. Если вся Луна находится в области полной тени от Земли, наблюдается *полное лунное затмение*. Если Луна погружена в тень не вся, то наблюдается *частное лунное затмение*. Если Луна попадает только в область полутени, то происходит *полное или частное полутеневое затмение*.



Лунное затмение

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Во время полного лунного затмения Луна продолжает оставаться видимой и приобретает тёмно-красный оттенок. Её освещают рассеянные и преломлённые в земной атмосфере солнечные лучи. А красный цвет Луны объясняется тем, что красные лучи проходят сквозь атмосферу Земли, испытывая меньшее рассеяние и поглощение, чем другие цвета, входящие в состав солнечного света.



Солнечное 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, и затмение будет *частным*. В остальных местах Земли затмения не будет.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

При полном солнечном затмении солнечный диск полностью закрывается Луной. Благодаря этому на Солнце можно увидеть протуберанцы и солнечную корону, что в обычных условиях является затруднительным. Астрономы в эти короткие периоды тщательно исследуют солнечную корону и ближайшие окрестности Солнца. Так, в 1868 г. во время полного солнечного затмения в Индии французский учёный Пьер Жансен впервые исследовал хромосферу Солнца и открыл новый химический элемент, который впоследствии назвали в честь Солнца *гелием*.

ВЫВОДЫ

- ❗ Закон прямолинейного распространения света: свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.
- ❗ Точечный источник света — это модель реального источника света, размеры которого намного меньше расстояния, на котором оценивается его действие.
- ❗ Тень — это область экрана, в которую не попадают лучи от источника. Полутень — это область, в которую попадает свет от части источника света.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Световой луч; закон прямолинейного распространения света; тень; полутень; точечный источник света; солнечное затмение; лунное затмение

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Что такое световой луч?
2. Как формулируется закон прямолинейного распространения света?
3. Что такое тень и полутень?
4. Почему происходят солнечные и лунные затмения?
5. Необходимо ли для распространения света наличие среды? Ответ поясните.

ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА § 81

НОВОЕ В УРОКЕ

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 прямолинейного распространения света, был известен ещё Евклиду и Архимеду, а во II в. Клавдий Птолемей проверил его экспериментально.

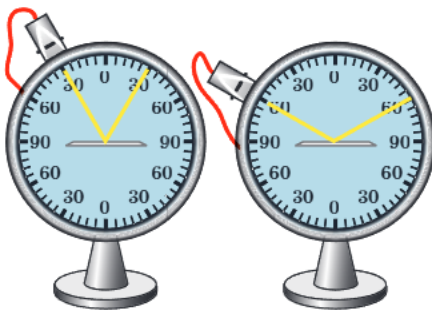
- Что такое луч падающий и луч отражённый.
- Как формулируются законы отражения света.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

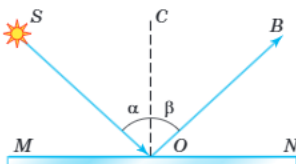
- Что такое источники света?
- Что такое световой луч?
- Что такое точечные источники света?

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 называется *падающим лучом*. Луч OB — *отражённый луч*. Из точки O падения луча проведём перпендикуляр OC к поверхности MN . Угол между падающим лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча называется *углом падения* (угол α). Угол между отражённым лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча называется *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 на поверхности оптического диска. Во-вторых, **угол падения светового луча всегда равен углу отражения**.

ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА. Проведённый опыт позволяет сформулировать закон отражения света. Закон отражения света упоминается в знаменитом труде Евклида «Оптика» наряду с основами геометрии, которая сегодня носит название *евклидова геометрия*.

ВАЖНО**Закон отражения света:**

- 1) луч падающий и луч отражённый лежат в одной плоскости с перпендикуляром к отражающей поверхности, составленным в точке падения луча;
- 2) угол падения равен углу отражения:

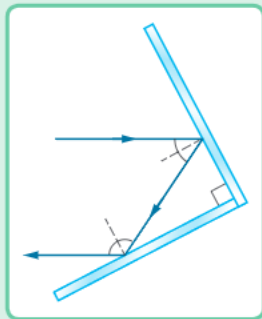
$$\alpha = \beta.$$



Если луч света падает на одну из взаимно перпендикулярных отражающих поверхностей, то, отразившись от второй поверхности, луч уходит обратно параллельно первоначальному лучу. Интересно, что это свойство не зависит от угла падения.

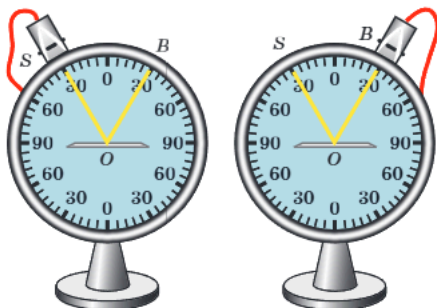
Это явление используется в простейшем устройстве, которое называется *угловой отражатель* и предназначено для отражения света в обратном направлении. Угловые отражатели широко используются в устройстве катафотов (световозвращателей), которые устанавливают на велосипеды, мотоциклы, дорожные знаки. Когда свет фар автомобиля попадает на катафот, он начинает ярко светиться, что делает его заметным для водителей. Подобный принцип лежит в основе светоотражающей ткани, применяемой для безопасности пешеходов и велосипедистов.

Во время миссии «Аполлон» астрономы разместили на поверхности Луны угловые отражатели. Лазерные сигналы, посылаемые с Земли, отражаются от них и возвращаются обратно на Землю. Измерение промежутка времени между моментом включения лазерного сигнала до момента возвращения отражённого сигнала позволило с высокой точностью (до 40 см) определять расстояние между поверхностями Земли и Луны. При этом было обнаружено, что расстояние от Земли до Луны постепенно увеличивается — примерно на 4 см в год.



ОБРАТИМОСТЬ СВЕТОВЫХ ЛУЧЕЙ. Из закона отражения света следует свойство световых лучей, которое называется *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 .

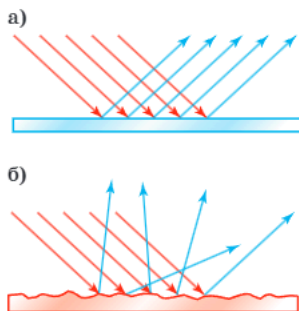
Другими словами, **луч, идущий по пути отражённого луча, отражается затем по пути падающего.**



ЗЕРКАЛЬНОЕ И РАССЕЯННОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА.

Если пучок параллельных световых лучей падает на гладкую плоскую поверхность, то отражённые лучи будут также параллельны друг другу (рис. а). Такое отражение называется **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 (рис. б). 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 называется **рассеянным** или **диффузным**.



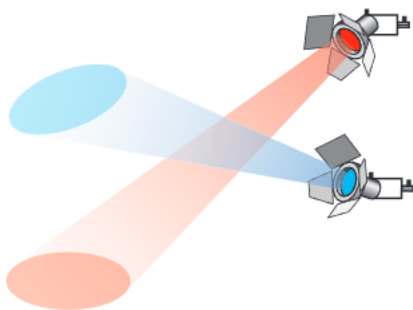
ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Рассеянное освещение считается наиболее комфортным для наших глаз. Такой свет равномерно освещает все поверхности и не создаёт резких теней. Принцип действия ламп рассеянного света заключается в том, что свет проходит через полупрозрачный или матовый плафон и рассеивается по всему помещению. Кроме того, рассеянный свет получается при отражении лучей света от потолка, пола и стен.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Когда свет от Солнца или Луны отражается от покрытой рябью поверхности моря или озера, образуется световая дорожка. Это происходит потому, что водная поверхность находится в постоянном движении и разные участки отражают свет под разными углами. Все отдельные отражения складываются в одну длинную дорожку.

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, проведём 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.

ВЫВОДЫ

- ! 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.
- ! Отражение света может быть зеркальным или рассеянным (диффузным) в зависимости от того, гладкая поверхность или нет.
- ! Закон независимости распространения света: световые пучки, пересекаясь, не влияют друг на друга.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Оптический диск; отражение света; зеркальное отражение; рассеянное отражение; независимость распространения света

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Сформулируйте закон отражения света.
2. Что такое обратимость световых лучей?
3. В чём различие между зеркальным и рассеянным отражением света?
4. Сформулируйте закон независимости распространения света.
5. Объясните, почему классная доска иногда может отсвечивать.

ПЛОСКОЕ ЗЕРКАЛО § 82

НОВОЕ В УРОКЕ

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»).

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

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Закон отражения света.
- Признаки равенства треугольников.

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

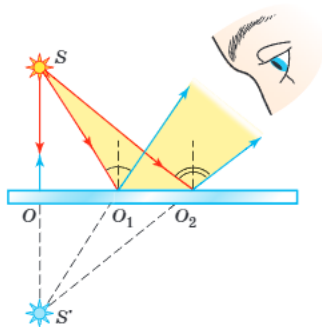
В древности зеркала делали из листов полированного металла, обычно меди или бронзы. Такие зеркала, как правило, давали нечёткие изображения, потому что они были не идеально плоскими и рассеивали падающий на них свет. Современные зеркала изготавливаются из плоских листов стекла с нанесённым на них тонким отражающим покрытием из серебра или алюминия на задней поверхности. Стекло защищает покрытие и позволяет сделать его идеально плоским.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Во время раскопок, проводившихся в одной из провинций Китая, археологи обнаружили бронзовый котёл, внутренняя поверхность которого была хорошо отполирована. Этот факт очень удивил учёных, так как для приготовления пищи такая тщательная полировка не требуется. Налив в котёл воду, археологи увидели, что поверхность жидкости стала чётко отражать предметы. Это было древнее зеркало китайской принцессы, жившей около 2500 лет назад.

Когда предмет находится перед зеркалом, то кажется, что за зеркалом находится такой же предмет. То, что мы видим за зеркалом, называется **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 называется **мнимым**, так как оно получается в результате пересечения не реальных лучей света, а их воображаемых продолжений.

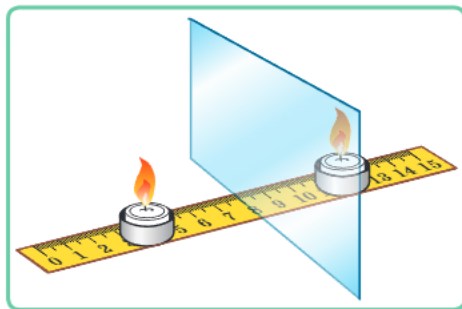
Если изображение получено пересечением реальных световых лучей, то оно называется **действительным**.

Пользуясь признаками равенства треугольников, можно доказать, что

$$\triangle SOO_1 = \triangle S'O_1O \text{ и } SO = S'O.$$

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

ИССЛЕДОВАНИЕ



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. Нам кажется, что отражение свечи располагается за стеклом. 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 незажённой 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.

Для того чтобы построить изображение предмета в плоском зеркале, обязательно использовать два или более луча. Например, для построения изображения стрелки AB достаточно опустить перпендикуляры из точек A и B на зеркало и про-

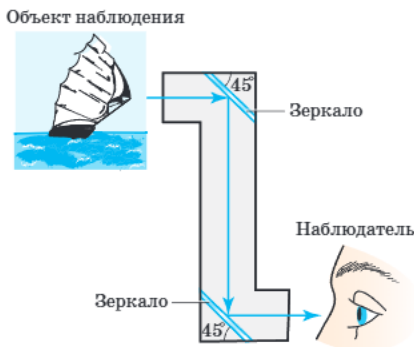
длину их соответственно на расстояния AM и BN . Получим стрелку A_1B_1 , симметричную стрелке AB относительно поверхности зеркала. Стрелка A_1B_1 и будет искомым изображением.

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. неперевернутым; равным по размеру самому предмету; находящимся на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним; симметричным самому предмету.**

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.

Простейший 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.



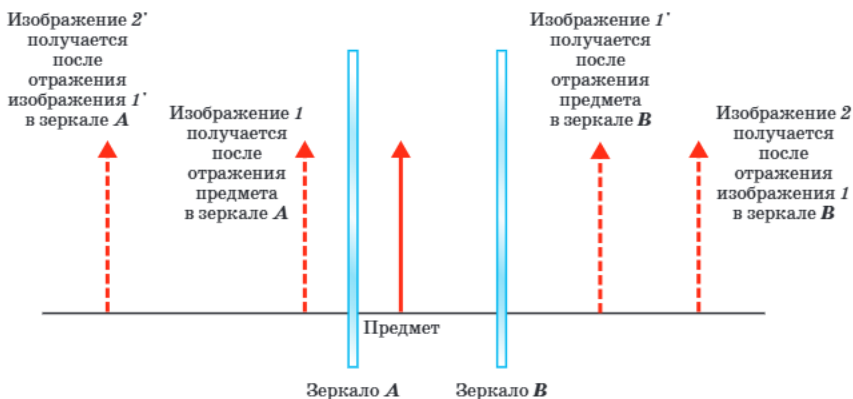
ЭТО ИНТЕРЕСНО

В древности люди старались найти зеркалам практическое применение. В 280 г. до н. э. на острове неподалёку от Александрии был воздвигнут Фаросский маяк — одно из семи чудес света. Гигантские размеры маяка поражали — его высота была примерно 120 м. Наверху маяка горел костёр, а вокруг была установлена целая система зеркал, которые усиливали свет и отражали его в сторону моря. Благодаря системе зеркал свет маяка был виден за несколько километров, указывая кораблям в ночное время безопасный вход в гавань.

МНОГОКРАТНОЕ ОТРАЖЕНИЕ. Целый ряд изображений можно получить при использовании комбинации двух и более зеркал. В этом случае изображение, получаемое в одном зеркале, является предметом для другого зеркала.

Если два зеркала разместить параллельно друг другу, то изображение, возникающее в первом зеркале, отразится во втором зеркале. В свою очередь, полученное

изображение отразится опять в первом зеркале и т. д. Таким образом получается множество изображений, которые расположены на одной прямой, перпендикулярной обоим зеркалам. Эту последовательность изображений можно увидеть в одном из зеркал, если заглянуть в него со стороны.



Если два зеркала расположены под прямым углом друг к другу, то получается всего три изображения. Сначала предмет отражается в каждом из зеркал. Каждое из полученных изображений отражается в другом зеркале, в результате чего получаются вторичные изображения, которые совпадают.



Если изменять угол между зеркалами, то можно получить разное количество изображений одного и того же предмета. При этом точки предмета будут расположены на окружностях, центр которых расположен в точке пересечения зеркал. Например, если расположить два зеркала под углом 45° друг к другу, то получится семь изображений предмета.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

На основе принципов многократного отражения в зеркалах работает оптическая игрушка *калейдоскоп*. Калейдоскоп состоит из трёх длинных зеркал, зеркальные стороны которых обращены друг к другу, образуя призму. Зеркала вставлены в трубку, один конец которой закрыт двойным стеклом (между стёклами насыпаны мелкие цветные элементы), а на другом конце находится окуляр (крышка с отверстием для наблюдения). Наблюдатель через окуляр видит симметричный цветной узор, образованный многократным отражением цветных предметов в зеркалах. При вращении трубки вокруг своей оси цветные элементы пересыпаются и образуется новый узор.

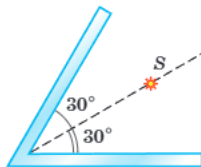
- ! Плоская поверхность, зеркально отражающая свет, называется плоским зеркалом.
- ! Изображение предмета в плоском зеркале: мнимое, прямое, равное по размеру самому предмету, симметричное самому предмету, находится на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним.

ВЫВОДЫ

Плоское зеркало; перископ

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВАИ ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

1. Что такое плоское зеркало?
2. Каковы свойства изображения, получаемого при помощи плоского зеркала?
3. Опишите принцип работы перископа.
4. Объясните, для чего у вагонов трамвая, троллейбуса, автобуса справа и слева от водителя помещают зеркала. Каким образом проводится настройка зеркал заднего вида?
5. Два плоских зеркала расположены под углом 60° друг к другу. Светящаяся точка находится между зеркалами на биссектрисе угла. Сколько изображений этой точки будет в системе зеркал? Сделайте соответствующее построение изображений.



§ 83 ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое преломление света.
- Что такое оптическая плотность.
- Как формулируется закон преломления света.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Закон прямолинейного распространения света.
- Закон отражения света.
- Закон независимости световых лучей.

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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 В. Снеллиус, экспериментально открывший его в 1621 г. Сам учёный свой труд не опубликовал, о чём известно из сочинений Рене Декарта, независимо сформулировавшего тот же закон в 1637 г.

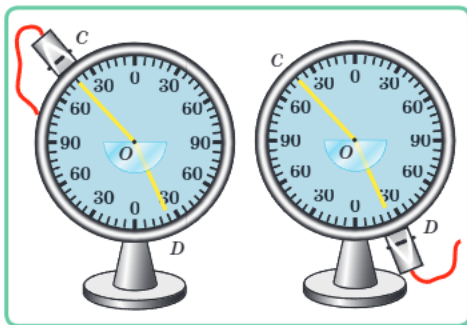


Виллброрд Снеллиус
(Снелл) (1580—1626)

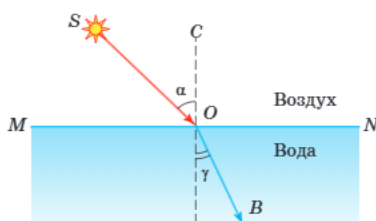
ИССЛЕДОВАНИЕ

Проведём опыт, используя оптический диск, в центре которого установлен стеклянный полуцилиндр. В отличие от опыта с зеркальной пластиной, световой луч, попадая

на границу раздела воздух—стекло, частично отражается, а также 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 называется **преломлённым лучом**. Из точки O падения луча проведём перпендикуляр OC к поверхности раздела двух сред.



Угол между падающим лучом и перпендикуляром к поверхности раздела двух сред в точке падения луча называется **углом падения** (угол α).

Угол между преломлённым лучом и перпендикуляром к отражающей поверхности в точке падения луча называется **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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Из-за преломления и отражения света ледяными кристаллами в верхних слоях атмосферы можно наблюдать такое оптическое явление, как гало. Оно представляет собой светящееся кольцо вокруг яркого источника света, чаще всего солнца или луны.



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.

ПОКАЗАТЕЛЬ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СРЕДЫ. Показатель преломления среды относительно вакуума называется *абсолютным показателем преломления среды* или просто *показателем преломления среды*.

При этом показатель преломления вакуума принимается тождественно равным единице.

Абсолютный показатель преломления среды n_1 равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v_1 в данной среде:

$$n_1 = \frac{c}{v_1}.$$

Относительный показатель преломления второй среды относительно первой равен отношению скоростей света в тех средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

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, но 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*.

ВАЖНО

Закон преломления света (закон Снеллиуса):

- 1) луч падающий, луч преломлённый и перпендикуляр, проведённый к границе раздела двух сред в точке падения луча, лежат в одной плоскости;
- 2) при этом отношение синуса угла падения α к синусу угла преломления γ есть величина постоянная для двух сред и равная отношению показателей преломления второй среды относительно первой:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}.$$



Изучите явление преломления света.

ПОМОЩНИК. Вам потребуется стеклянный прозрачный стакан, вода, подсолнечное масло, стеклянная палочка.

Налейте в стакан воды на половину объёма. В тот же стакан аккуратно налейте подсолнечное масло примерно такого же объёма.

В результате жидкости образуют два слоя.

Теперь опустите в стакан стеклянную палочку. Что вы наблюдаете?

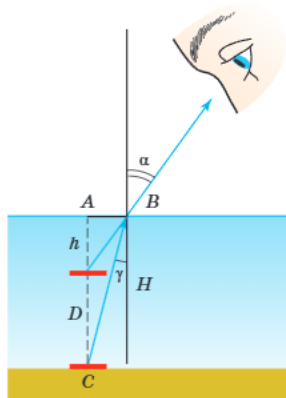
Объясните, почему стекло стало невидимым в масле, но в то же время его видно в воде.

Можно усложнить опыт. В стакан на треть налейте глицерин, затем такую же часть воды и подсолнечное масло. Жидкости в стакане будут располагаться слоями. Также опустите в стакан стеклянную палочку. Объясните наблюдаемое явление.

ВИДИМАЯ ГЛУБИНА ВОДОЁМА. Когда мы пытаемся на глаз оценить глубину водоёма или сосуда с водой, необходимо учитывать, что из-за преломления света глубина кажется нам меньше, чем есть на самом деле.

Например, преломлённый луч CB попадает в глаз наблюдателя. Но глаз проецирует точку C в точку D , и это приводит к кажущемуся эффекту «приподнятия дна». Таким образом, глубина водоёма кажется нам равной $h < H$.

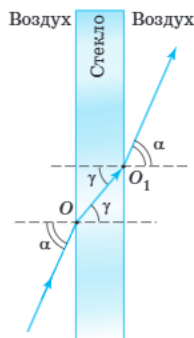
Это явление было впервые описано Евклидом. Наблюдатель размещает сосуд (кубок) с лежащим на его дне предметом (кольцом) таким образом, чтобы края сосуда не позволяли увидеть ни дно, ни этот предмет. Затем, не меняя направление взгляда, в сосуд начинают наливать воду, и через некоторое время предмет становится видимым.

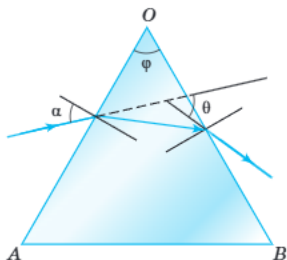


ПРОХОЖДЕНИЕ ЛУЧА ЧЕРЕЗ СТЕКЛЯННУЮ ПЛАСТИНУ. Пусть свет падает на плоскую стеклянную пластину из воздуха в точку O под углом α . Обозначим угол преломления γ . Тогда угол падения луча OO_1 , приходящего внутри пластины в точку O_1 , тоже окажется равным γ , поскольку эти углы являются накрест лежащими.

Тогда, по принципу обратимости световых лучей, угол преломления для луча, выходящего из пластины на воздух, равен α .

Таким образом, при прохождении через плоскопараллельную пластину направление луча не меняется, луч лишь смещается в сторону.





ПРОХОЖДЕНИЕ ЛУЧА ЧЕРЕЗ ТРЕУГОЛЬНУЮ ПРИЗМУ. Луч, проходя сквозь треугольную призму, преломляется два раза — на гранях AO и OB . Угол φ между этими гранями называется **преломляющим углом призмы**. Угол отклонения луча θ зависит от показателя преломления материала, из которого сделана призма, от преломляющего угла призмы φ и от угла падения α .

ВЫВОДЫ

- ! **Абсолютный показатель преломления** среды n_1 равен отношению скорости света c в вакууме к скорости света v_1 в данной среде: $n_1 = \frac{c}{v_1}$.
- ! **Относительный показатель преломления** второй среды относительно первой равен отношению скоростей света в тех средах, на границе между которыми происходит преломление: $n_{21} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$.
- ! **Закон преломления света:** луч падающий, луч 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 и равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Преломление света; оптическая плотность среды; показатель преломления среды

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. Что такое преломление света?
2. Что характеризует оптическая плотность?
3. Как формулируется закон преломления света?
4. Любой водоём с прозрачной водой всегда кажется мельче, чем есть на самом деле. Объясните, почему это происходит.
5. Между горящей свечой и глазом наблюдателя поместили плоскопараллельную пластину. Найдите построением, где будет находиться изображение свечи.

ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА § 84

НОВОЕ В УРОКЕ

Когда свет переходит из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, например из воды в воздух, то его угол преломления больше, чем угол падения. Как будет вести себя свет, когда угол преломления достигнет 90° ?

- Что такое полное отражение света.
- Что такое волоконная оптика.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

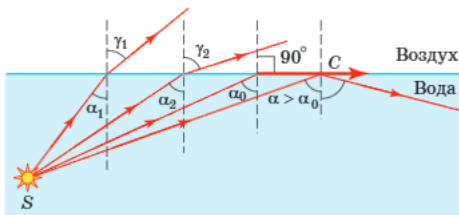
- Закон преломления света.
- Что такое оптическая плотность среды?

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА. Рассмотрим ситуацию, когда свет переходит из среды с показателем преломления n_1 в среду с показателем преломления n_2 , при этом $n_1 > n_2$. По закону Снеллиуса

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}.$$

Так как относительный показатель преломления двух сред — величина постоянная, то чем больше угол падения, тем больше угол преломления. Таким образом, увеличивая угол падения, можно добиться ситуации, при которой угол преломления становится равным 90° и преломлённый луч начинает «скользить» вдоль границы раздела двух сред. Этот угол падения (α_0) называется **предельным углом**.

Итак, при предельном угле падения угол преломления равен 90° .



Значение предельного угла можно найти из закона Снеллиуса:

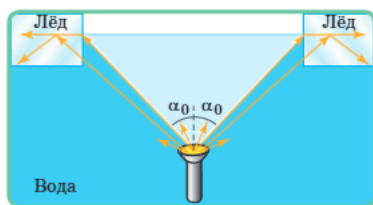
$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1}.$$

Если угол падения превышает предельный угол (луч SC), то, согласно закону преломления, $\sin \gamma$ должен стать больше 1, но этого не может быть. Поэтому если угол падения больше предельного, то преломление отсутствует и весь свет отражается от границы раздела двух сред. Это явление получило название **полного отражения** или **полного внутреннего отражения**.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Найдём предельный угол для границы вода—воздух:

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,00}{1,33} = 0,75, \quad \text{т. е. } \alpha_0 = 49^\circ.$$

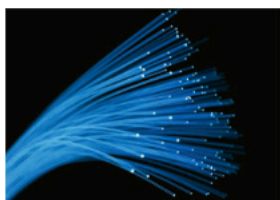
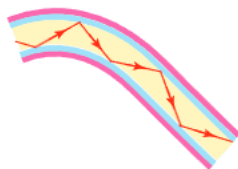
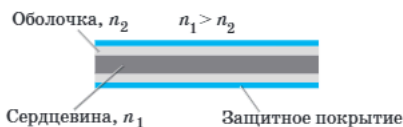


Следовательно, если через прорубь в прозрачном льду реки мы наблюдаем за светом фонаря водолаза, то увидать свет нам удастся только тогда, когда фонарь будет находиться в пределах конуса с углом при вершине (это прорубь), равном $2\alpha_0$.

Следует ещё раз подчеркнуть, что явление полного отражения возникает только при переходе из среды с большим показателем преломления в среду с меньшим показателем преломления (например, из воды в воздух или из стекла в воздух).

ВОЛОКОННАЯ ОПТИКА. Явление полного внутреннего отражения света используется, например, в **волоконной оптике** — технологии передачи света по тонким нитям из прозрачных материалов.

Оптическое волокно (световод) состоит из светопередающей сердцевины с показателем преломления n_1 , оболочки с показателем преломления n_2 (при этом $n_1 > n_2$) и защитного покрытия. Оболочка препятствует рассеянию света, а внешнее покрытие (полимерное, металлическое и др.) предохраняет световод от внешних воздействий.



Диаметр волокон может достигать нескольких микрон. Световод может состоять из одного волокна или из пучка волокон, изготовленных из стекла или пластика. Свет, распространяясь по тонкому волокну, испытывает полное внутреннее отражение от стенок.

Даже при изгибе световода предельный угол обычно не превышает, поэтому свет передаётся по световоду практически без потерь.

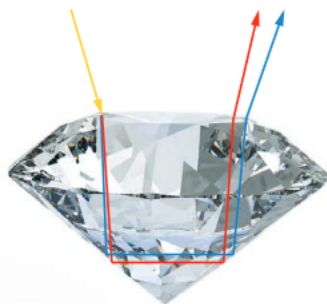
ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛНОГО ОТРАЖЕНИЯ. Световоды нашли применение в медицинской технике. При введении в тело пациента они передают изображение органа или поражённого участка на внешнюю телекамеру, исключая тем самым необходимость исследования с помощью хирургических методов. Например, введя световод через пищевод пациента, врач может обследовать его желудок. По одним волокнам посылаётся свет для освещения желудка, а по другим идёт отражённый свет. В таком световоде волокна должны быть строго параллельны, чтобы изображение получилось чётким.

Световоды также используют в автомобилях для подачи света от общего источника к различным приборным панелям.

Оптоволоконные кабели используются для организации *оптоволоконной связи*. В отличие от обычных систем связи, оптоволоконная связь имеет большую про-

пускную способность и меньшие потери энергии, что позволяет передавать информацию на значительные расстояния. Оптоволоконная связь широко используется для связи компьютеров, передачи телефонных сигналов, интернета, кабельного телевидения и т. д., в том числе между континентами. При этом электрические сигналы с помощью оптических передатчиков преобразуются в оптические, которые передаются по оптоволокну, а затем оптические приёмники обратно преобразуют принятый оптический сигнал в электрический.

Явление полного внутреннего отражения используют также при огранке бриллиантов. В бриллианте, у которого соблюдены пропорции, луч света, входящий через верхние грани, дважды полностью отражается от боковых граней и, выходя наружу, попадает в глаз наблюдателя. Благодаря этому свойству бриллиант не пропускает свет «насквозь», в отличие от большинства имитаций.

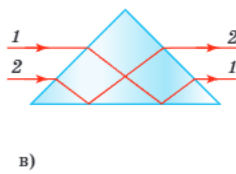
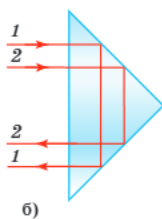
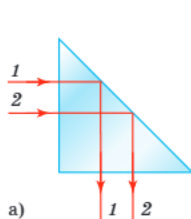
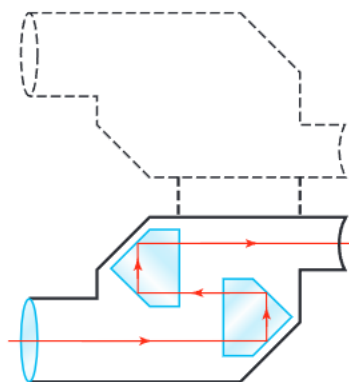


ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА В ПРИЗМАХ. Полное внутреннее отражение света в призмах используется во многих оптических приборах. Для стекла предельный угол составляет около 42° , поэтому в стеклянной прямоугольной призме можно повернуть световой луч на 90° или на 180° . Это используется, например, в биноклях, камерах-обскурах, зрительных трубах и т. д.

Например, если луч света падает на одну из граней призмы перпендикулярно, отклонения не происходит. При этом на вторую грань свет падает под углом 45° , что больше предельного угла для стекла, и поэтому происходит полное отражение (рис. а). Такая призма поворачивает луч света на 90° .

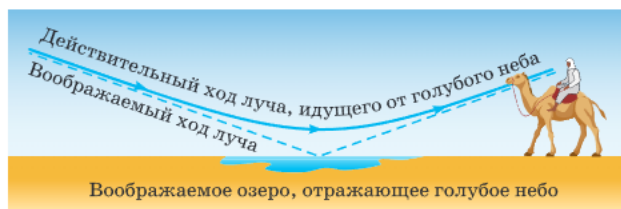
В случае, показанном на рисунке б, луч света в призме дважды испытывает полное внутреннее отражение. Таким образом, призма разворачивает луч света на 180° .

Призма также может использоваться для инвертирования световых лучей (рис. в). Так, верхний луч 1 после выхода из призмы становится нижним, а нижний луч 2 — верхним.



МИРАЖИ. Когда солнечный свет достаточно сильно нагревает поверхность земли, слой воздуха над землёй также нагревается и становится менее плотным. Его показатель преломления становится меньше, чем у холодного воздуха над ним. В результате можно наблюдать атмосферное оптическое явление — *мираж*.

Наверняка вы видели самый простой мираж — лужу на раскалённом асфальте. В этом случае в приповерхностном слое воздуха происходит полное отражение и световые лучи преломляются вверх. Наблюдатель видит отражение неба, похожее на отражение от воды. Но приблизиться к этой «воде» нельзя, так как по мере приближения наблюдателя к миражу он будет отдаляться.



Как сделать монету невидимой?

ПОМОЩНИК. Вам потребуется стеклянный прозрачный стакан, вода, монета. Положите монету на стол. Сверху на монетку поставьте пустой стакан. Вы можете наблюдать монету, глядя через стакан. Теперь налейте в стакан воду. Видна ли монета под каким-то углом зрения? Объясните наблюдаемое явление. Сделайте рисунок.

Выводы

- ❗ Если угол падения больше предельного угла, возникает явление полного отражения.
- ❗ Волоконная оптика основана на применении явления полного отражения. Мираж — это отражение света от тёплого слоя воздуха над горячей землёй.

Ключевые слова

Полное отражение; предельный угол

Вопросы и задания

1. Что такое полное внутреннее отражение света?
2. Что такое предельный угол полного внутреннего отражения?
3. При каком соотношении оптических плотностей сред происходит полное отражение света на их границе?
4. Если насаженный на палочку шарик для пинг-понга хорошенько закоптить и опустить в воду, то можно наблюдать любопытное явление: шарик в воде будет окружён прозрачной серебряной оболочкой. Почему это происходит?

ЛИНЗЫ § 85

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое линзы.
- Что такое оптическая ось и оптический центр линзы.
- Что такое оптическая сила линзы и какова её единица.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- 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) называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями.

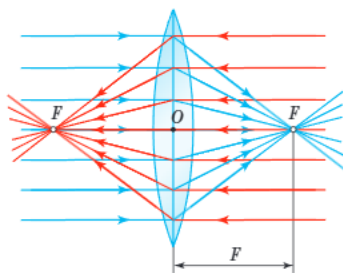
Линзы бывают двух видов: *выпуклые* и *вогнутые*. Линза, у которой края тоньше, чем середина, называется **выпуклой**. Линза, у которой края толще, чем середина, называется **вогнутой**.

Линзы использовались ещё в Древней Греции и в Римской империи для добывания огня с помощью солнечного света. К концу XIII в. относятся первые документальные свидетельства появления очков. До XVI в. пользовались очками только с выпуклыми линзами.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИНЗ. Прямая, проходящая через центры C_1 и C_2 сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называется **главной оптической осью** линзы.

Мы будем рассматривать линзы, толщина которых мала по сравнению с радиусами поверхностей. Такие линзы называются **тонкими**. Для этих линз вершины сферических поверхностей (точки O_1 и O_2) практически совпадают. Эта точка называется **оптическим центром** линзы (точка O).

Прямые, проходящие через оптический центр линзы и не совпадающие с главной оптической осью, называются **побочными оптическими осями**.

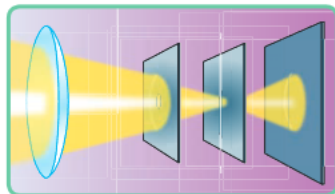


Направим на выпуклую линзу пучок лучей, параллельный главной оптической оси (см. рисунок внизу с. 91). После преломления в линзе эти лучи пересекутся в одной точке F , которая находится на главной оптической оси. Эта точка называется **фокусом** линзы. Если световой пучок пропустить через линзу с другой стороны, то будет наблюдаться та же картина. У каждой линзы два фокуса — по одному с каждой стороны.

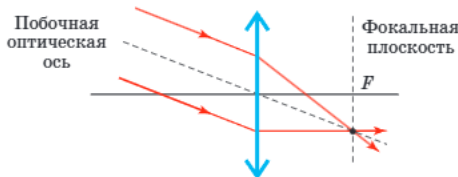
Расстояние от центра линзы до её фокуса называется **фокусным расстоянием** линзы и обозначается F .

ИССЛЕДОВАНИЕ

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.



Плоскость, проходящая через фокус линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной плоскостью** линзы. Лучи, параллельные любой побочной оптической оси, после преломления в линзе пересекаются в точке, лежащей в фокальной плоскости линзы.



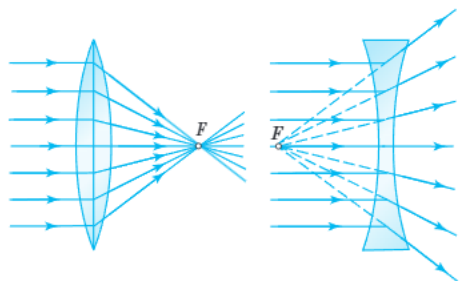
СОБИРАЮЩИЕ И РАССЕИВАЮЩИЕ ЛИНЗЫ. В зависимости от того, что происходит после преломления с пучком световых лучей, параллельных главной оптической оси линзы, линзы делят на *собирающие* и *рассеивающие*.

Пучок лучей, направленный на выпуклую линзу параллельно её главной оптической оси, после преломления сойдётся 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. Эта точка называется **мнимым фокусом**, а сама вогнутая линза — **рассеивающей**.

Общеприняты следующие условные обозначения:

1 — собирающая линза; 2 — рассеивающая линза.



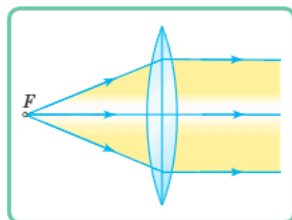
Собирающая линза

Рассеивающая линза

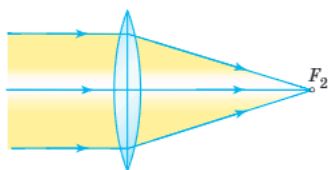
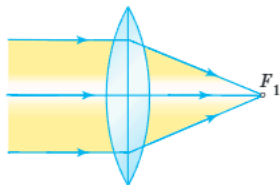


ИССЛЕДОВАНИЕ

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.



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, которая называется *оптической силой линзы*.

ВАЖНО

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.

Фокусное расстояние и оптическая сила собирающей линзы считаются *положительными величинами*.

Рассеивающие линзы обладают мнимым фокусом, поэтому их оптическая сила и фокусное расстояние считаются *отрицательными величинами*.

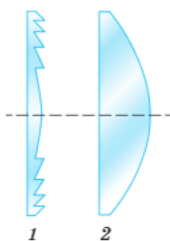
Если две или более тонких линз сложены вместе, то оптическая сила такой системы линз равна алгебраической сумме оптических сил каждой из линз:

$$D = D_1 + D_2 + \dots$$

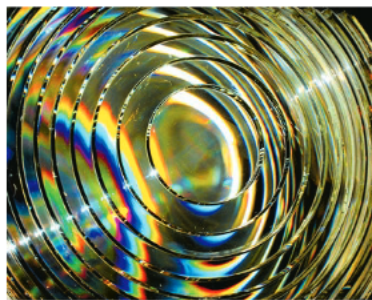
ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Обычно линзы и системы линз применяют для фокусировки света, а также для изменения его направления. В быту и в технике получили распространение так называемые **линзы Френеля**, которые получили своё название по имени французского физика Огюстена Френеля, впервые предложившего конструкцию этих линз для использования в маяках.

В отличие от собирающих или рассеивающих линз, линза Френеля представляет собой тонкий диск, изготовленный из стекла или прозрачного пластика, на поверхности которого нанесены концентрические канавки. Каждая канавка расположена немного под другим углом, чем предыдущая, однако все они имеют одинаковое фокусное расстояние. Их можно рассматривать как отдельные маленькие линзы. В результате параллельные световые лучи, проходящие через линзу Френеля, соединяются в фокусе, как у обычной линзы. Линзы Френеля позволяют не только получить увеличенные изображения различных объектов, но и улучшить качество визуализации.



Поперечное сечение
1) линзы Френеля;
2) обычной линзы



Линза Френеля

ВЫВОДЫ

- ! Линзой называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями.
- ! Линзы бывают двух видов: собирающие и рассеивающие.
- ! Фокус линзы — точка, в которой пересекаются лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси. Расстояние от линзы до её фокуса называется фокусным расстоянием линзы.

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

Линза; собирающая линза; рассеивающая линза; фокус линзы; фокусное расстояние линзы; оптическая сила

И ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

1. Что такое линзы?
2. Что такое оптическая ось, оптический центр и фокусное расстояние линзы?
3. Что такое оптическая сила линзы и какова её единица? Какой смысл имеет знак «+» или «-» в записи значения оптической силы?
4. Почему в тонкостенном стакане с водой предметы, например ложка, кажутся больше, чем есть на самом деле?

ИЗОБРАЖЕНИЕ, ПОЛУЧАЕМОЕ С ПОМОЩЬЮ ЛИНЗЫ § 86

НОВОЕ В УРОКЕ

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 можно увидеть 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 расположения линзы и предмета.

- Как вид изображения и его положение зависят от взаимного расположения предмета и линзы.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- 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?

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, то пересекаются в одной точке не сами лучи, а их продолжения. В этом случае получается *мнимое изображение*.

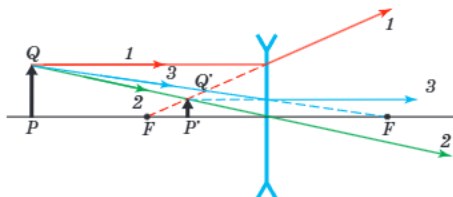
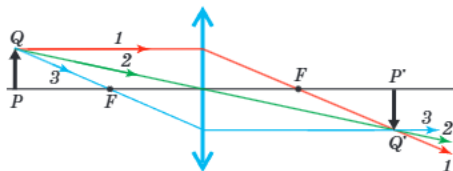
ВАЖНО

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.

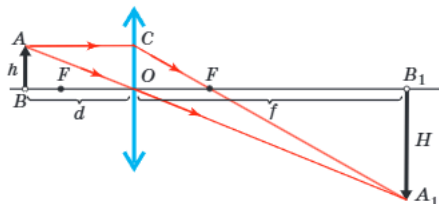
3) Луч, проходящий через фокус. После преломления этот луч идёт параллельно главной оптической оси.



Далее мы будем использовать при построении первые два из трёх перечисленных стандартных лучей. Точка пересечения этих лучей (или их продолжений) является изображением исходной точки.

ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ. Как связаны между собой расстояние от предмета до линзы d , расстояние от линзы до изображения f и фокусное расстояние F ?

Рассмотрим построение изображения A_1B_1 стрелки AB в собирающей линзе.



Треугольники AOB и A_1OB_1 подобны, следовательно,

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BO}{B_1O}.$$

Из подобия треугольников FOC и FB_1A_1 запишем:

$$\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FB_1}.$$

Учитывая, что $AB = OC$, получим

$$\frac{FO}{FB_1} = \frac{BO}{B_1O}.$$

Так как $FO = F$; $FB_1 = f - F$; $BO = d$; $B_1O = f$, то

$$\frac{F}{f - F} = \frac{d}{f}, \quad \text{или} \quad fF + dF = df.$$

Разделим обе части уравнения на произведение dfF и получим *формулу тонкой линзы*:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (1)$$

В формуле (1) принято считать $F > 0$ для собирающей линзы и $F < 0$ для рассеивающей. Говорят, что собирающие линзы имеют *действительный фокус*, а рассеивающие — *мнимый*.

Для действительного изображения $f > 0$, а для мнимого $f < 0$.

ВАЖНО

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},$$

где d — расстояние от предмета до линзы; f — расстояние от линзы до изображения; F — фокусное расстояние.

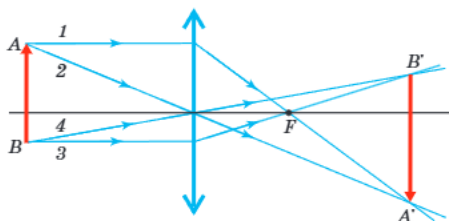
УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ. Отношение линейных размеров изображения к линейным размерам предмета называется **увеличением линзы**:

$$\Gamma = \frac{H}{h}.$$

Используя подобие треугольников AOB и A_1OB_1 (см. с. 96), можно записать:

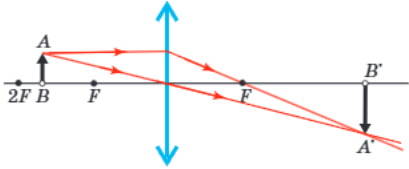
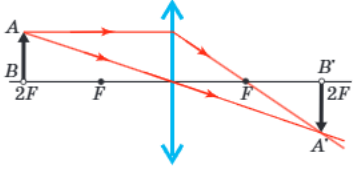
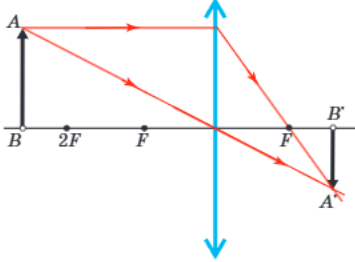
$$\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}.$$

ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ДАВАЕМОГО СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗОЙ. Чтобы построить изображение линейного предмета, например стрелки BA , необходимо построить изображение точки A , затем изображение точки B , после чего соединить полученные точки A' и B' . Отрезок будет являться изображением данного предмета.

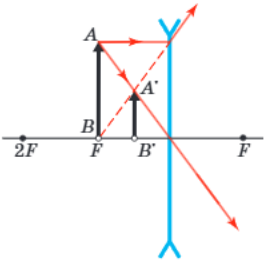
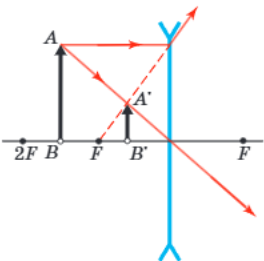
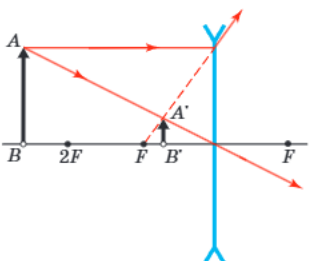


В зависимости от взаимного расположения предмета и линзы изображение будет различным: увеличенным или уменьшенным, прямым или перевёрнутым, действительным или мнимым. Обозначим расстояние от предмета до линзы буквой d , а фокусное расстояние буквой F .

Взаимное расположение предмета и линзы	Вид изображения
Предмет расположен между фокусом и линзой: $d < F$	<p>Изображение: мнимое, прямое, увеличенное</p>
Предмет находится в фокусе: $d = F$	<p>Изображения не будет</p>

Взаимное расположение предмета и линзы	Вид изображения
<p>Предмет расположен между фокусом и двойным фокусом: $F < d < 2F$</p>	 <p>Изображение: действительное, перевёрнутое, увеличенное</p>
<p>Предмет находится в двойном фокусе: $d = 2F$</p>	 <p>Изображение: действительное, перевёрнутое, равное предмету</p>
<p>Предмет расположен за двойным фокусом: $d > 2F$</p>	 <p>Изображение: действительное, перевёрнутое, уменьшенное</p>

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 предмета, от каждой точки которого на линзу падает расходящийся пучок лучей. Изображение, даваемое рассеивающей линзой, является *мнимым, прямым 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.

Взаимное расположение предмета и линзы	Вид изображения
<p>Предмет расположен между фокусом и линзой: $d < F$</p>	 <p>Изображение: мнимое, прямое, уменьшенное</p>
<p>Предмет расположен между фокусом и двойным фокусом: $F \leq d \leq 2F$</p>	 <p>Изображение: мнимое, прямое, уменьшенное</p>
<p>Предмет расположен за двойным фокусом: $d > 2F$</p>	 <p>Изображение: мнимое, прямое, уменьшенное</p>

Изучите свойства водяной линзы.



ПОМОЩНИК. Вам потребуется стеклянный прозрачный стакан, вода, лист бумаги и маркер.

Нарисуйте на бумаге две горизонтальные стрелки одна под другой, направленные в одну сторону (вправо или влево). Закрепите лист вертикально и посмотрите на

стрелки сквозь пустой стакан. Они будут немного искажаться из-за преломления света в стекле.

Налейте полстакана воды, чтобы одна стрелка была над поверхностью воды, а другая ниже поверхности воды. Объясните, почему направление нижней стрелки изменилось на противоположное. Наполните весь стакан водой. Объясните наблюдаемое явление.

ВЫВОДЫ

! В зависимости от взаимного расположения предмета и собирающей линзы изображение будет различным: увеличенным или уменьшенным, прямым или перевёрнутым, действительным или мнимым.

! Изображение, даваемое рассеивающей линзой, является мнимым, прямым уменьшенным и не зависит от взаиморасположения линзы и предмета.

**КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА**

Изображения, даваемые собирающей линзой; изображения, даваемые рассеивающей линзой; увеличение линзы

**ВОПРОСЫ
И ЗАДАНИЯ**

1. От чего зависит характер изображения, получаемого с помощью собирающей линзы?
2. Какое изображение даёт рассеивающая линза?
3. Может ли собирающая линза сформировать изображение предмета, если половина линзы заклеена бумагой?
4. Можно ли сфотографировать мнимое изображение, получаемое с помощью линзы?

ГЛАЗ КАК ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА § 87

НОВОЕ В УРОКЕ

- Строение глаза.
- Какие части глаза образуют оптическую систему.
- Что такое аккомодация.
- Что такое бинокулярное зрение.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

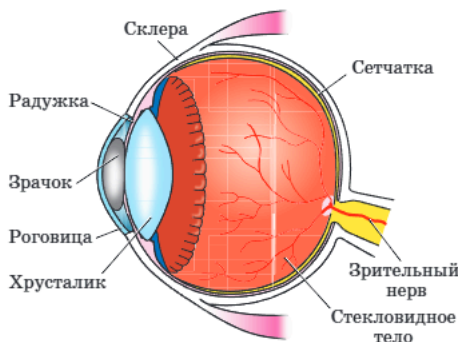
- Что такое линзы?
- Как вид изображения и его положение зависят от взаимного расположения предмета и линзы?

УСТРОЙСТВО ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА. Глаз человека является сложным оптическим прибором, состоящим из двух линз с переменным фокусным расстоянием.

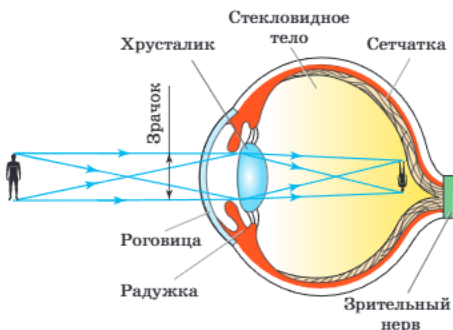
Глаз называют периферической частью органа зрения. Он состоит из глазного яблока, защитного аппарата глазного яблока (верхнее и нижнее веки, глазница) и придаточного аппарата глаза (слёзная железа, её протоки, а также глазодвигательный аппарат, состоящий из мышц).

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 делит внутреннюю часть 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*. Колбочки ответственны за цветное зрение, а палочки — за чёрно-белое.



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 перевернутым*.

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. Обработывая сигналы, мозг снова превращает изображение.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 перевернутым, а прямым. В начале эксперимента испытуемые, надев такие очки, видели все предметы перевернутыми, 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 исказили видимое ими окружение.

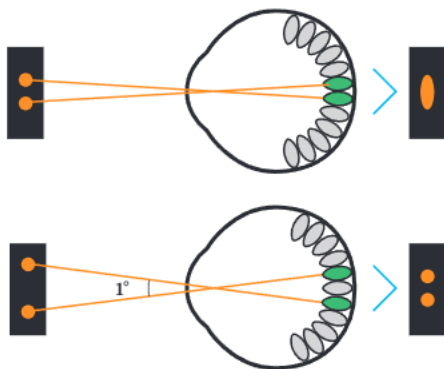
ОСТРОТА ЗРЕНИЯ. Если изображения двух точек будут попадать на одну фоторецепторную клетку (колбочку) глазного дна, мы будем воспринимать их как одну точку. Если расстояние между точками увеличится настолько, что их изображения попадут на две соседние рецепторные клетки, мы увидим линию, т. е. будем воспринимать их слитно.

Чтобы точки воспринимались отдельно, их изображения должны попадать на две рецепторные клетки, разделённые хотя бы ещё одной.

Острота зрения — это способность различать границы и детали видимых объектов. Острота зрения определяется по минимальному угловому расстоянию между двумя точками, при котором они воспринимаются раздельно. (*Угловое расстояние* между двумя точками на окружности равно углу, образованному двумя лучами, выходящими из центра окружности и проходящими через эти две точки.)

За норму, соответствующую остроте зрения 1,0, принимается такая разрешающая способность глаза, при которой две точки видны как отдельные, 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 это расстояние, тем больше разрешающая способность глаза.



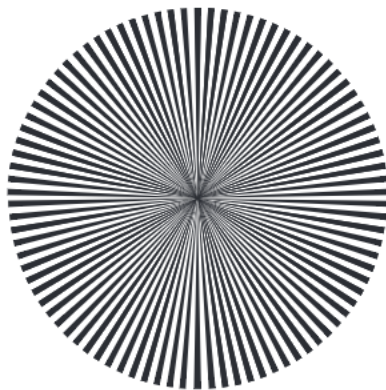
Две точки воспринимаются отдельно при минимальном угле 1°

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Для того чтобы проверить остроту зрения, можно воспользоваться *звездой Сименса*.

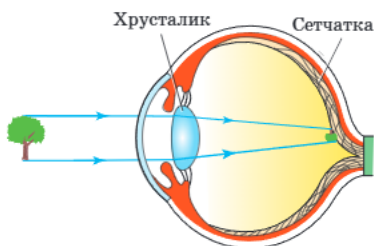
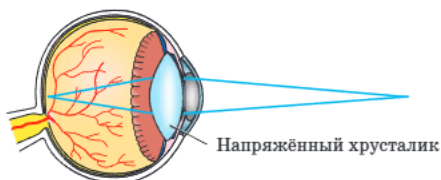
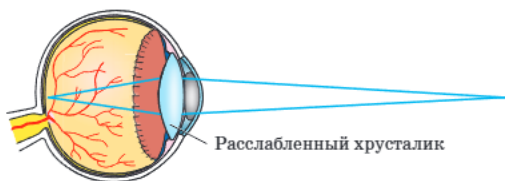
Если чёткость зрения неидеальна, то, не доходя до центра, лучи расплываются и начинают перекрываться между собой. На очень коротком участке они могут как бы слиться с фоном. Однако по мере дальнейшего продвижения к центру лучи вдруг снова оказываются чётко видны. При этом изображение превращается как 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.



АККОМОДАЦИЯ. Способность глаза приспособливаться к чёткому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза, называется *аккомодацией* (от лат. *accomodatio* — приспособление).

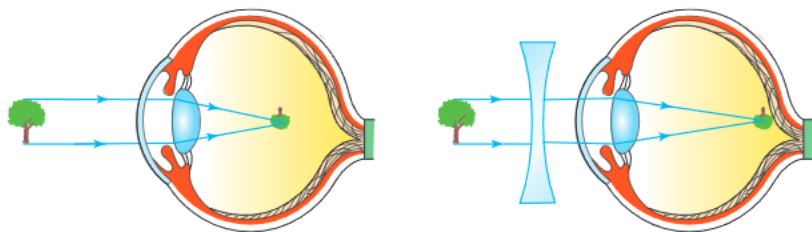
Когда человек смотрит на удалённые предметы, он не напрягает зрение, мышцы, удерживающие хрусталик, расслаблены, и изображение оказывается на сетчатке. Когда же человек переводит взгляд на близкие к нему предметы, изображение должно сместиться за сетчатку. Чтобы изображение не было размытым, глазные



Нормальное зрение

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 исправление близорукости рассеивающей линзой

Близорукость и дальнозоркость исправляют с помощью соответствующих линз. При близорукости, для того чтобы изображение отодвинулось от хрусталика

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.

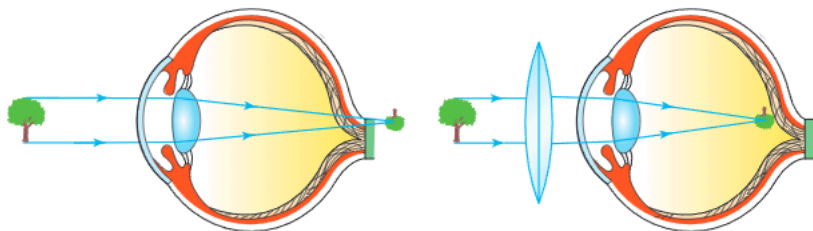
Нормальный глаз может длительно без особого напряжения рассматривать предметы, расположенные от него не ближе 25 см. Это расстояние называется **расстоянием наилучшего зрения**.

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.

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.



Дальнозоркость и исправление дальнозоркости собирающей линзой

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Известно, что древние греки и римляне заметили, что стеклянный шар, наполненный водой, может увеличивать предметы. Однако объясняли они это свойство действием воды, а не выпуклой формой поверхности. В 1266 г. английский философ Роджер Бэкон установил, что если положить на текст стеклянный шар, то буквы становятся больше и книгу легче читать. Считается, что первые очки были изготовлены итальянским физиком Сальвино Арматти в 1280 г. В 1508 г. Леонардо да Винчи впервые выдвинул идею о контактных линзах.

БИНОКУЛЯРНОЕ ЗРЕНИЕ. Наличие двух глаз позволяет сделать наше зрение *стереоскопическим* (или *бинокулярным*), т. е. 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.

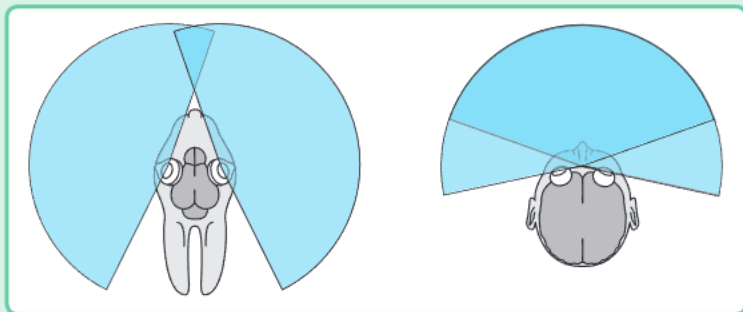
У большинства животных глаза расположены по разные стороны головы, поэтому они видят каждым глазом свою картину. Видимые ими предметы не отличаются рельефностью, к которой мы привыкли, но поле зрения гораздо обширнее.

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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Рыбы, насекомые, рептилии, птицы, зайцы 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, переполненной мелкими деталями и препятствиями. Их глаза переместились 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 видеть, например, сквозь листву, что находится перед ними.



ВЫВОДЫ

- ! Оптическая система глаза состоит из роговицы, передней камеры, заполненной водянистым веществом, хрусталика и стекловидного тела. Изображение предмета, возникающее на сетчатке глаза, является действительным, уменьшенным и перевёрнутым.
- ! Способность глаза приспосабливаться к чёткому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза, называется аккомодацией.
- ! Наиболее распространены два недостатка зрения — близорукость и дальность зрения. Их исправляют с помощью соответствующих линз.

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

Глаз как оптическая система; аккомодация; острота зрения; близорукость; дальность зрения; бинокулярное зрение

И ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

1. Какие части глаза образуют оптическую систему?
2. Каким получается изображение на сетчатке глаза?
3. Что такое бинокулярное зрение?
4. Что такое аккомодация?
5. Что такое близорукость и дальность зрения?
6. В каком случае оптическая сила глаза больше: при рассматривании близко расположенных или удалённых предметов?
7. Чтобы лучше видеть, люди, страдающие близорукостью, прищуривают глаза. Объясните почему.
8. Как вы объясните поговорку «ночью все кошки серы»?

ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ § 88

НОВОЕ В УРОКЕ

Оптическими приборами называются 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.
- Устройство и принцип действия оптического микроскопа.
- Устройство и принцип действия оптического телескопа.
- Устройство и принцип действия линзы фотоаппарата.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое линзы?
- Как вид изображения и его положение зависят от взаимного расположения предмета и линзы?

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: в биологии, медицине и т. д.



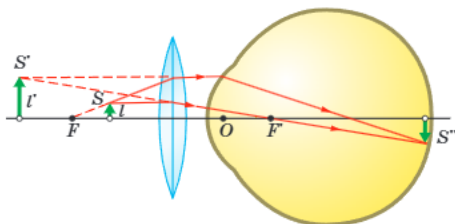
ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Лупа может быть использована как в промышленности, так и в быту. Например, настольные лупы используют часовщики, ювелиры, исследователи и преподаватели, а также некоторые врачи и биологи.

Как получается изображение предмета с помощью лупы? Расстояние от лупы до рассматриваемого предмета должно быть чуть меньше фокусного. Тогда изображение этого предмета оказывается *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 S' . Получившееся изображение



ности не существуют, так как мнимое изображение, полученное с их помощью, 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 попадают в глаз так, как если бы это изображение было реальным предметом.

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).

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

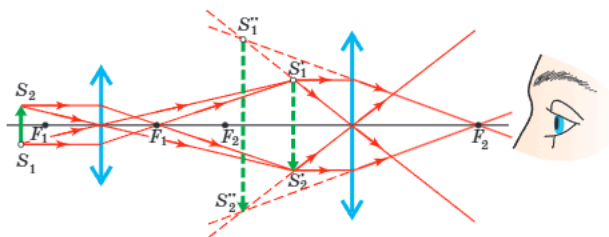
Микроскопы — незаменимое оптическое оборудование для таких областей человеческой деятельности, как медицина, биология, электроника и геология. С их помощью проводятся исследования, на результатах которых основываются научные открытия, определяется диагноз и разрабатываются новые лекарственные препараты.



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.

Большой предмет S_1S_2 располагается перед объективом микроскопа на расстоянии, немного большем фокусного расстояния F_1 объектива. После прохождения световых лучей через объектив получается действительное перевёрнутое изображение $S'_1S'_2$ предмета, которое находится между окуляром и его передним фокусом F_2 . Это изображение рассматривается глазом через окуляр как через лупу. Изображение $S''_1S''_2$ предмета, создаваемое окуляром, является *мнимым, увеличенным и перевёрнутым*.

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.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

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. Галилео 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.

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.

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*.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Телескопы играют огромную роль в астрономии. Г. Г а л и л е й, первый применивший зрительную трубу для наблюдения небесных тел, сделал ряд важных открытий, хотя его телескоп обладал увеличением всего в 30 раз и, с нашей точки зрения, давал весьма плохое качество изображения. Галилею удалось обнаружить четыре спутника Юпитера, пятна на Солнце и горы на поверхности Луны.

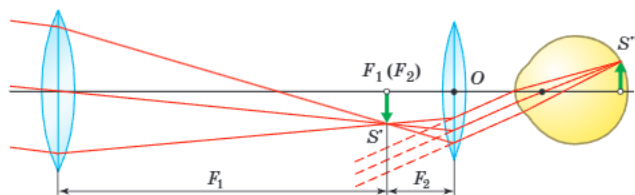
ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Современные телескопы представляют собой большие и сложные сооружения со множеством различных частей и механизмов. Большую роль в совершенствовании 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. Зрительная труба с собирающим окуляром называется *трубой Кеплера*. Труба изготовлена таким образом, что задний фокус F_1 объектива практически совпадает с передним фокусом окуляра F_2 . Линза объекти-

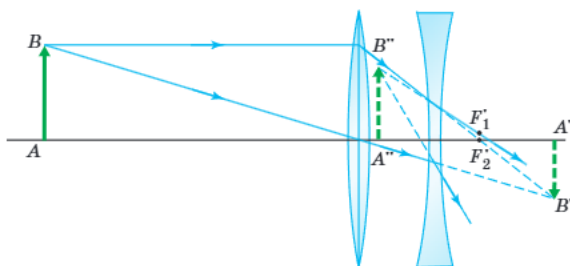
ва формирует действительное уменьшенное и перевёрнутое изображение бесконечно удалённого предмета в своей фокальной плоскости, которое рассматривается в окуляре, как в лупу. При этом из окуляра выходит параллельный пучок лучей, которые, попадая в глаз, сходятся на сетчатке; при этом формируется действительное изображение.

Поскольку изображение остаётся перевёрнутым, труба Кеплера неудобна для земных наблюдений и обычно предназначена для астрономических наблюдений.



ЗРИТЕЛЬНАЯ ТРУБА ГАЛИЛЕЯ. Зрительная труба с рассеивающим окуляром называется **трубой Галилея**. В этой трубе задние главные фокусы F_1' объектива и F_2' окуляра совпадают. Для построения первичного изображения предмета AB в линзе L_1 объектива достаточно построить изображение точки B предмета, поскольку точка A расположена на главной оптической оси системы. В этом случае было бы сформировано уменьшенное и перевёрнутое изображение $A'B'$. Однако преломлённые в линзе L_1 сходящиеся лучи падают на линзу L_2 и становятся расходящимися. В результате с помощью продолжений этих лучей строится мнимое, прямое и увеличенное изображение $A''B''$. Именно это изображение рассматривает глаз наблюдателя.

Труба Галилея нередко используется в обычном театральном бинокле.



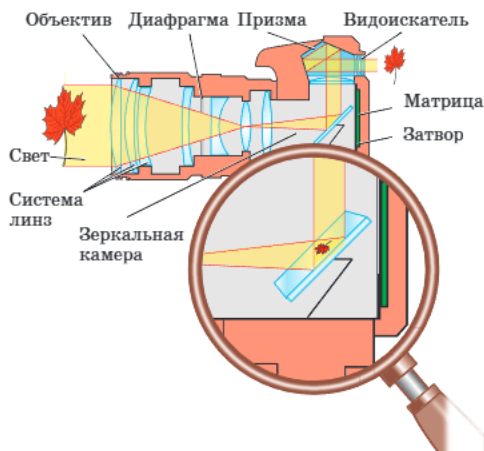
ФОТОАППАРАТ. Линзы являются главной частью ещё одного прибора — **фотоаппарата**, который позволяет получать изображения различных объектов на светочувствительной фотоплёнке или пластинке (в цифровых фотоаппаратах). В процессе фотографирования (от греч. *photys* — свет и *graphie* — письмо) линза проецирует 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.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

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 вплоть до 90-х гг. XX в.

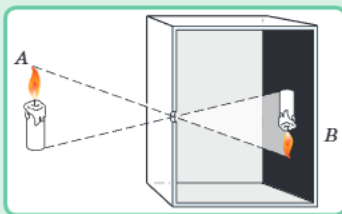
Основной частью фотоаппарата является *объектив* — линза или система линз. Он помещается в передней части светонепроницаемой камеры. Объектив можно плавно перемещать относительно плёнки для получения на ней чёткого изображения предмета. Во время фотографирования объектив открывают при помощи специального 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.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Ещё в 1515 г. великий Леонардо да Винчи описал, как можно получить изображение на стене в тёмной комнате, пропуская свет через отверстие в противоположной стене. Это устройство получило название «камера-обскура» (от лат. *camera obscura* — тёмная комната). Камера-обскура представляет собой ящик с маленькой дырочкой на передней стенке. Свет от объекта, проходя через отверстие, образует на задней стенке камеры действительное, перевёрнутое изображение. Если заднюю стенку камеры изготовить из матового стекла, то изображение можно зафиксировать, обведя его контуры.



ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Первый фотоснимок сделал в 1826 г. французский инженер Ж. Н. Ньепс, открывший способ сохранения полученного изображения путём обработки попадающего на стеклянную поверхность света асфальтовым лаком.

В 1835 г. английский физик У. 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 Дж. Кодака, который запатентовал первую фотоплёнку в виде рулона, а потом и фотокамеру «Кодак», сконструированную специально для фотоплёнки.

Первые цветные фотографии получил в 1902 г. С. М. Прокудин-Горский — русский химик и фотограф, издатель и изобретатель. Он использовал собственную технологию подготовки фотопластинок.

В 1907 г. братья Люмьер начали выпускать пластины для цветного фото.

Первый цифровой фотоаппарат выпустила в продажу компания Fujifilm в 1988 г.



Изготовьте камеру-обскуру.

ПОМОЩНИК. Вам потребуется картонная коробка шириной не менее 25 см, лист белой бумаги, ножницы, карандаш, скотч.

К одной из сторон внутренней части коробки с помощью скотча прикрепите лист белой бумаги. Это будет экран, на который проецируется изображение.

На противоположной стороне коробки сделайте два отверстия. Одно отверстие служит для поступления света в камеру. Его можно сделать, проткнув коробку иголкой или шилом, чтобы диаметр отверстия оказался не более 1 мм. Второе отверстие предназначено для просмотра изображения, чтобы заглянуть внутрь коробки на экран. Для этого на той же стороне коробки вырежьте квадрат со стороной 1—1,5 см. Отверстия должны быть расположены достаточно далеко друг от друга, чтобы свет попадал в камеру через малое отверстие, когда вы смотрите через смотровое отверстие.

Заклейте коробку скотчем. Проверьте, что лишний свет не попадает внутрь коробки через щели или края.

Камера-обскура готова. Рассмотрите изображение, появляющееся на экране в камере. Изображение будет более чётким, если находится в тёмной комнате, а маленькое отверстие направить на освещённый объект.

Выводы

- ! Оптическими приборами называются устройства, предназначенные для получения изображений различных объектов.
- ! Лупа, микроскоп, телескоп, фотоаппарат — оптические приборы.

Ключевые слова

Лупа; микроскоп; телескоп; фотоаппарат

и вопросы задания

1. В чём заключается принцип действия микроскопа?
2. В чём различия зрительной трубы Кеплера и зрительной трубы Галилея?
3. Из каких основных частей состоит фотоаппарат?
4. В очках или без очков должны смотреть в микроскоп люди, имеющие дефекты зрения? Ответ поясните.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ § 89



- **ЗАДАЧА 1.** Уличный фонарь висит на столбе высотой 5 м. Определите, какой длины тень будет отбрасывать фигура вертикально стоящего человека ростом 1 м 70 см, если он находится на расстоянии 3,3 м от основания столба.

Дано:
 $H = 5$ м
 $h = 1,7$ м
 $L = 3,3$ м
 $l = ?$

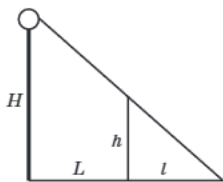
Решение.

Сделаем схематичный рисунок, где H — высота столба; h — рост человека; L — расстояние между фонарным столбом и человеком; l — длина тени человека.

Рассмотрим два подобных треугольника:

$$\frac{H}{h} = \frac{L + l}{l}.$$

$$l = \frac{hl}{H - h}; \quad l = \frac{1,7 \cdot 3,3}{5 - 1,7} = 1,7 \text{ (м)}.$$



Ответ: 1,7 м.

- **ЗАДАЧА 2.** Человек, идущий по улице, в лобовом стекле автомобиля увидел изображение Солнца. Под каким углом к горизонту наклонено лобовое стекло, если высота Солнца над горизонтом составляет 30° , а отражённый от стекла луч попадает в глаз наблюдателя в горизонтальном направлении? Сделайте чертёж.

Дано:
 $\alpha = 30^\circ$
 $\gamma = ?$

Решение.

Сделаем чертёж.

Угловая высота Солнца — это угол α между падающим лучом и горизонтальной линией.

Поскольку отражённые лучи идут в горизонтальном направлении, то угол α — это угол между падающим и отражённым лучами.

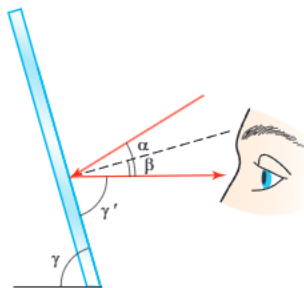
Тогда угол отражения β (угол между отражённым лучом и перпендикуляром к поверхности стекла): $\beta = \alpha/2$.

Угол $\gamma = \gamma'$, как скрепляющиеся углы при пересечении двух параллельных прямых третьей.

Согласно рисунку, $\gamma' + \beta = 90^\circ$, т. е. $\gamma + \alpha/2 = 90^\circ$.

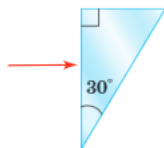
Следовательно, $\gamma = 90^\circ - \alpha/2$.

$$\gamma = 90^\circ - 30^\circ/2 = 75^\circ.$$



Ответ: 75° .

- **ЗАДАЧА 3.** Луч света падает перпендикулярно на грань прямоугольной стеклянной призмы, как показано на рисунке. Углы при основании призмы равны 30° и 60° . Определите, под каким углом луч света выходит из призмы. Показатель преломления стекла 1,5.



Дано:
 30° ; 60°
 $n = 1,5$
 $\gamma = ?$

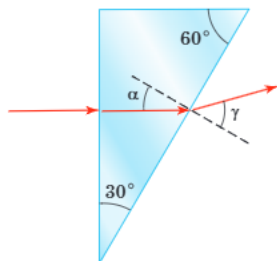
Решение.

Так как луч падает перпендикулярно грани призмы, то он проходит через границу воздух—стекло, не изменяя своего направления.

Далее луч падает на границу раздела стекло—воздух. Угол падения $\alpha = 30^\circ$. Найдём угол преломления. По закону Снеллиуса

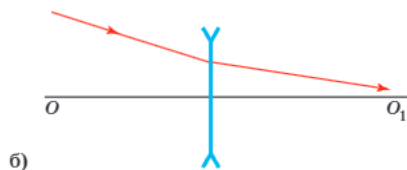
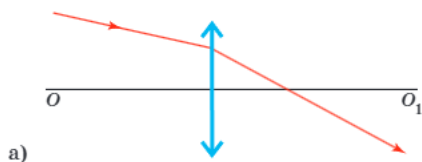
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{1}{n}; \quad \sin \gamma = n \sin \alpha.$$

$$\sin \gamma = 1,5 \cdot \sin 30^\circ = 0,75; \quad \gamma = 49^\circ.$$



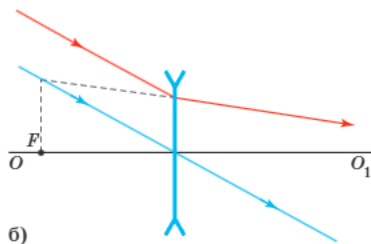
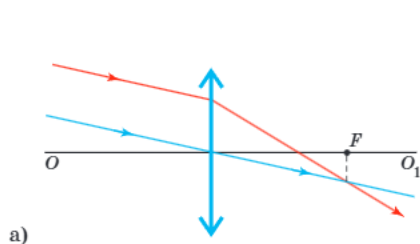
Ответ: 49° .

- **ЗАДАЧА 4.** На рисунках *a* и *б* даны положения главной оптической оси OO_1 , оптического центра собирающей и рассеивающей линз и ход произвольного луча. Найдите построением положения главных фокусов линз.



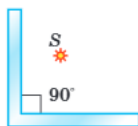
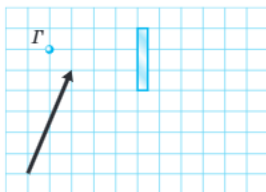
Решение.

Для каждого из случаев *a* и *б* проведём побочную оптическую ось, параллельную падающему лучу и проходящую через оптический центр линзы. Точка пересечения побочной оптической оси с преломлённым лучом (для собирающей линзы, рис. *a*) или с продолжением преломлённого луча (для рассеивающей линзы, рис. *б*) лежит в фокальной плоскости линзы. Опустив перпендикуляр из точки пересечения на оптическую ось, находим положение главного фокуса.

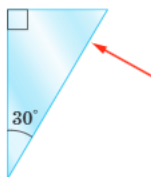


Задачи для самостоятельного решения

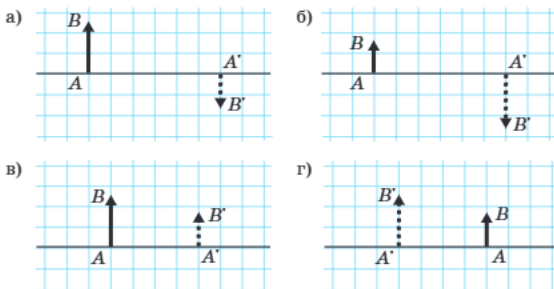
- 1 Определите, на какой высоте висит уличный фонарь, если тень от вертикально расположенной палки высотой 1 м имеет длину 0,8 м, а при перемещении на 1 м от фонаря вдоль направления тени длина тени увеличивается до 1,2 м.
- 2 В комнате на стене вертикально висит зеркало, причём так, что верхний край зеркала расположен на уровне верхней части головы человека ростом 176 см. Какой наименьшей длины может быть зеркало, чтобы человек видел себя во весь рост?
- 3 Перед небольшим зеркалом располагается предмет в виде стрелки (см. рисунок). Глаз наблюдателя находится в точке G . Покажите построением, какая часть предмета видна наблюдателю в зеркале.
- 4 Постройте изображение светящейся точки S в системе из двух зеркал, которые расположены под углом 60° , 90° , 120° друг к другу. Сколько изображений точки получается в каждом случае?



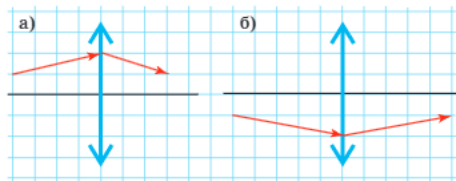
- 5 Сравните показатели преломления двух сред, если при угле падения $30,0^\circ$ угол преломления при переходе луча из воздуха для первой среды равен $18,7^\circ$, для второй — $11,9^\circ$. О каких средах идёт речь? Показатель преломления воздуха примите равным 1.
- 6 Аквалангисту, находящемуся под водой, кажется, что солнечные лучи падают под углом 60° к поверхности воды. Определите угловую высоту солнца над горизонтом.
- 7 Определите показатель преломления некоторого вещества, если предельный угол полного отражения для границы вещество—вода равен 33° . Определите, что это за вещество.
- 8 Луч света падает перпендикулярно на основание прямоугольной стеклянной призмы, как показано на рисунке. Углы при основании призмы равны 30° и 60° . Нарисуйте ход лучей в призме. Определите, под каким углом луч света выходит из призмы. Показатель преломления стекла 1,4.



- 9 Определите в каждом случае тип линзы, её местоположение и положение её фокусов, если задано расположение главной оптической оси, предмета и его изображения.



- 10 С помощью построений определите положение фокусов линз, изображённых на рисунках а и б. Какая линза и во сколько раз обладает большим фокусным расстоянием, а какая — большей оптической силой?



- 11 Предмет высотой 4 см находится на расстоянии 30 см от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием 10 см. Определите расстояние до изображения и размер получаемого изображения.
- 12 Предмет находится на расстоянии 2 м от экрана. На каком расстоянии от предмета нужно поставить собирающую линзу, чтобы получить на экране изображение предмета, увеличенное в 3 раза? Чему равно фокусное расстояние линзы?
- 13 Как следует расположить две линзы, одна из которых рассеивающая, а другая собирающая, чтобы параллельные лучи, проходя через них, оставались параллельными?

Цель работы

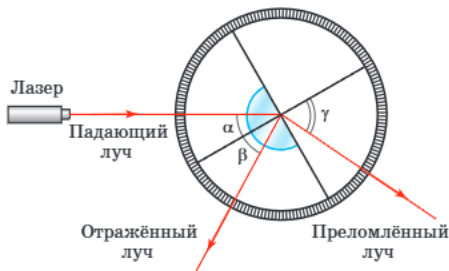
Опытным путём проверить законы отражения и преломления света, определить показатель преломления стекла и измерить предельный угол полного отражения для границы стекло—воздух.

Оборудование и материалы

Оптическая скамья, оптический столик, снабжённый круговой шкалой в градусной мере от 0° до 360° , стеклянный полуцилиндр с матовой нижней поверхностью, лазер.

Ход работы

- Соберите установку. Поместите на оптическую скамью оптический столик и лазер. Включите лазер, убедитесь, чтобы его луч скользил по поверхности оптического столика.



- Поместите на оптический столик стеклянный полуцилиндр так, чтобы середина плоской поверхности полуцилиндра совпала с центром диска. При этом луч лазера направьте на боковую поверхность полуцилиндра перпендикулярно его поверхности, т. е. по радиусу.
- В целях проверки закона отражения для каждого угла падения α измерьте угол отражения β . Для проверки закона преломления для каждого угла падения α измерьте угол преломления γ . Записывайте результаты в таблицу в своей тетради.

№ опыта	α	β	γ	n	$n_{\text{ср}}$	$n_{\text{табл}}$	α_0	$\alpha_{0\text{табл}}$

- Охарактеризуйте, как изменяются интенсивности отражённого и преломлённого лучей по мере увеличения угла падения луча на полуцилиндр. Сформулируйте вывод.

- Вычислите отношение синуса угла падения к синусу угла преломления и найдите показатель преломления стекла n . Вычислите среднее значение показателя преломления стекла $n_{\text{ср}}$. Сравните полученную вами величину с табличным значением показателя преломления для стекла.
- Поверните столик вокруг вертикальной оси таким образом, чтобы как можно точнее определить значение угла падения α_0 , при котором преломлённый луч полностью исчезает.
- Сравните измеренную вами величину предельного угла для стекла с табличным значением. Сформулируйте вывод.

Лабораторная работа № 8

Определение фокусного расстояния и оптической силы собирающей линзы. Получение изображения с помощью линзы

Цель работы

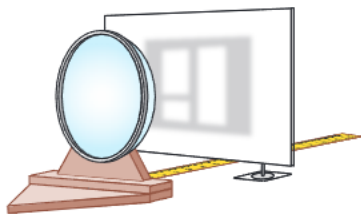
Определить фокусное расстояние и оптическую силу собирающей линзы, получить изображения предметов с помощью собирающей линзы.

Оборудование и материалы

Собирающая линза, экран, линейка, лампочка на подставке с колпачком, источник тока, ключ, соединительные провода.

Ход работы

- Расположите линзу между окном и экраном. Перемещая экран, получите на нём чёткое изображение окна (или какого-либо удалённого предмета).
- Измерьте расстояние между линзой и экраном. Это и есть фокусное расстояние линзы.
- Зарисуйте ход лучей через линзу.
- Вычислите оптическую силу линзы.
- Соберите электрическую цепь, состоящую из источника тока, лампочки и ключа.
- Наденьте на лампочку колпачок, снабжённый прорезью в виде буквы «Г». Лампочка будет служить объектом.
- Поместите объект за двойным фокусом линзы ($d > 2F$). Перемещая экран, получите на нём чёткое изображение предмета. Измерьте расстояние f от линзы до изображения.
- Переместите объект на расстояния $d = 2F$ и $F < d < 2F$.
- В каждом случае получите чёткое изображение объекта на экране. Измерьте расстояние f от линзы до изображения.
- Проверьте, выполняется ли формула тонкой линзы для измеренных вами значений.
- Результаты опытов запишите в таблицу в своей тетради. Сформулируйте вывод.



№	F , см	d , см	f , см	Характер изображения

Практическая работа-исследование

Изучаем оптические явления

НАБЛЮДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕНИ И ПОЛУТЕНИ

Чтобы убедиться, что свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно, необходимо изучить явление образования тени и полутени.

Цель работы

Наблюдать явление образования тени и полутени.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать источник тока, ключ, две лампочки от карманного фонаря, экран, предмет (шарик на подставке).
- Соберите электрическую цепь, состоящую из источника тока, ключа и одной лампочки от карманного фонаря.
- Расположите предмет между источником света и экраном и замкните цепь ключом. Наблюдайте образование тени на экране. Зарисуйте ход лучей в своей тетради и покажите область тени.
- Исследуйте, как изменяются размеры тени, при следующих действиях:
 - не изменяя положения экрана и источника света, перемещайте предмет, приближая или удаляя его от источника света;
 - не изменяя положения предмета и источника света, перемещайте экран, приближая или удаляя его от предмета;
 - не изменяя положения экрана и предмета, перемещайте источник света, приближая или удаляя его от предмета;
 - не изменяя положения экрана и предмета, перемещайте источник света вправо или влево. Что при этом происходит с тенью?
- Запишите результаты наблюдений в таблицу в своей тетради.

№ опыта	Положение источника света	Положение предмета	Положение экрана	Тень
1	Не изменяется	Приближается к источнику света	Не изменяется	

- Разомкните электрическую цепь. Рядом с первой лампочкой подключите вторую.
- Расположите предмет между источниками света и экраном и замкните цепь ключом. Наблюдайте образование тени на экране. Зарисуйте ход лучей в данном опыте и покажите область тени и полутени.
- Как изменяются области тени и полутени: если увеличивать расстояние между лампочками; уменьшать расстояние между лампочками?
- Сделайте вывод.

САМОДЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП

Рассказав учащимся на уроке о принципах работы оптических приборов, учитель кратко коснулся истории создания микроскопа. Принято считать, что первый двухлинзовый микроскоп создал в 1590 г. голландский оптик Г. Янсен. Несколько позднее конструированием микроскопов занялся и Г. Галилей, хотя свои важнейшие астрономические открытия он сделал с помощью телескопа, т. е. другого оптического прибора. Учитель рассказал, что самый простой однолинзовый микроскоп создал в 1674 г. голландский натуралист А. Левенгук, который благодаря высокому мастерству изготовления линз сумел добиться почти стократного увеличения.

Попытайтесь создать самодельный микроскоп.

Научная справка

Микроскоп используется для получения увеличений больших, чем может давать одна линза, например лупа. В простейшем случае микроскоп состоит из двух линз: короткофокусного объектива с фокусным расстоянием F_1 и окуляра, фокусное расстояние F_2 которого больше F_1 .

Как формируется изображение в микроскопе, вы изучили в § 88. Как показывает более детальное рассмотрение, увеличение микроскопа зависит также от расстояния между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра.

Этапы выполнения задания

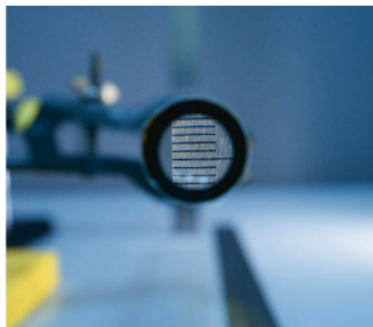
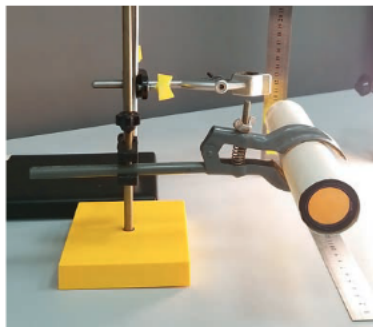
- В качестве оборудования можно использовать две собирающие линзы с известными фокусными расстояниями, вмонтированные в оправы и снабжённые подставками (из набора «Оптика»), линейку с миллиметровыми делениями, лист белой бумаги.
- На лежащую на столе линейку установите соосно две линзы.
- Линейку с миллиметровыми делениями закрепите вертикально в лапке штатива. Установите эту линейку вблизи фокальной плоскости объектива.
- Изменяя расстояние между задним фокусом объектива и передним фокусом окуляра, наблюдайте деления линейки одним глазом через линзы, а другим — непосредственно.
- Установите линзы на таком расстоянии друг от друга, чтобы увеличение делений шкалы линейки было наибольшим.
- Сверните лист бумаги трубочкой и вставьте его между линзами. Это будет тубус микроскопа.
- Определите увеличение микроскопа. Увеличение микроскопа равно отношению ширины a одного деления на шкале линейки, увеличенного микроскопом, к ширине a_0 этого деления без увеличения: $n = \frac{a}{a_0}$,

где $a = \frac{\text{диаметр линзы, мм}}{\text{количество видимых делений при увеличении, шт.}}$; $a_0 = 1 \text{ мм}$.

- Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу в своей тетради.

Диаметр линзы, мм	Количество видимых делений при увеличении, шт.	a , мм	a_0 , мм	n

- Сделайте вывод.



КЕЙС

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Раздел физики, в котором изучают световые явления, называется оптикой. Геометрическая оптика — раздел оптики, в котором изучают законы распространения света, основываясь на представлении о световых лучах.
- Тела, от которых исходит свет, называются источниками света.
- Закон прямолинейного распространения света: свет в однородной прозрачной среде распространяется прямолинейно.
- Точечный источник света — это модель реального источника света, размеры которого намного меньше расстояния, на котором оценивается его действие. Тень — это область экрана, в которую не попадают лучи от источника. Полутень — это область, в которую попадает свет от части источника света.
- 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.
- Плоская поверхность, зеркально отражающая свет, называется плоским зеркалом.
- Изображение предмета в плоском зеркале: мнимое, прямое, равное по размеру самому предмету, симметричное самому предмету, находится на таком же расстоянии за зеркалом, на каком предмет расположен перед ним.
- Закон преломления света: 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 и равная отношению показателю преломления второй среды относительно первой.
- Если угол падения больше предельного угла, возникает явление полного внутреннего отражения.

- Линзой называется прозрачное тело, ограниченное с двух сторон сферическими поверхностями. Поверхности линз бывают выпуклые и вогнутые; одна сторона может быть плоской.
- Фокус линзы — точка, в которой пересекаются лучи, падающие на линзу параллельно главной оптической оси. Расстояние от линзы до её фокуса называется фокусным расстоянием линзы.
- В зависимости от взаимного расположения предмета и собирающей линзы изображение будет различным: увеличенным или уменьшенным, прямым или перевернутым, действительным или мнимым.
- Изображение, даваемое рассеивающей линзой, является мнимым, прямым уменьшенным и не зависит от взаиморасположения линзы и предмета.
- Оптическая система глаза состоит из роговицы, передней камеры, заполненной водянистым веществом, хрусталика и стекловидного тела. Изображение предмета, возникающее на сетчатке глаза, является действительным, уменьшенным и перевернутым.
- Способность глаза приспособляться к чёткому различению предметов, расположенных на разных расстояниях от глаза, называется аккомодацией.
- Наиболее распространены два недостатка зрения — близорукость и дальнозоркость. Их исправляют с помощью соответствующих линз.
- Оптическими приборами называются устройства, предназначенные для получения изображений различных объектов.

Вопросы для обсуждения

- ❓ Что будет больше — облако или его тень на поверхности земли?
- ❓ При каких условиях съёмки отверстие диафрагмы фотоаппарата должно быть большим, а при каких малым?
- ❓ 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?

Темы исследовательских и проектных работ

- Живые источники света.
- Холодный свет.
- Загадки полярного сияния.
- Солнечные и лунные затмения.
- Оптические чудеса.
- Миражи.
- Как мы видим.
- Использование линз.
- Самые большие линзы.
- История фотоаппарата.

Глава 10

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

Солнечный свет состоит из лучей различной преломляемости.

И. Ньютон



§ 91 СКОРОСТЬ СВЕТА. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА

НОВОЕ В УРОКЕ

- В чём заключается астрономический метод определения скорости света.
- Каково значение скорости света.
- Каковы лабораторные методы определения скорости света.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- 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 A и B с фонарями располагались на вершинах двух холмов на расстоянии нескольких километров друг от друга. В некоторый момент наблюдатель A открывал свой фонарь и в этот же момент начинал отсчёт времени. Другой наблюдатель, увидев свет, посылал световой сигнал своим фонарём обратно наблюдателю A . Когда первый наблюдатель видел свет фонаря B , он тотчас заканчивал отсчёт времени. При этом временной интервал между посылкой и приёмом сигнала наблюдатель A 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.



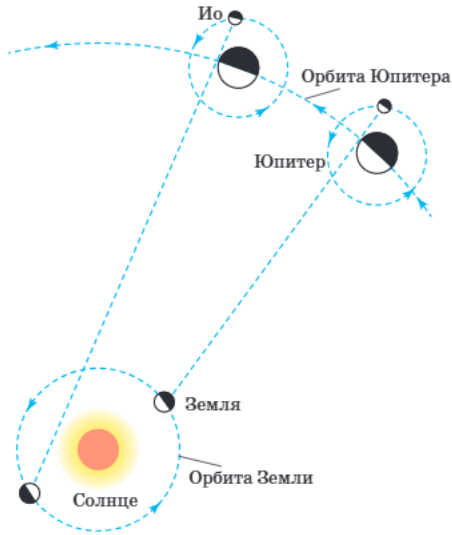
Олаф Рёмер
(1644—1710)

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА.

Впервые определить скорость света удалось в 1676 г. датскому астроному Олафу 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.

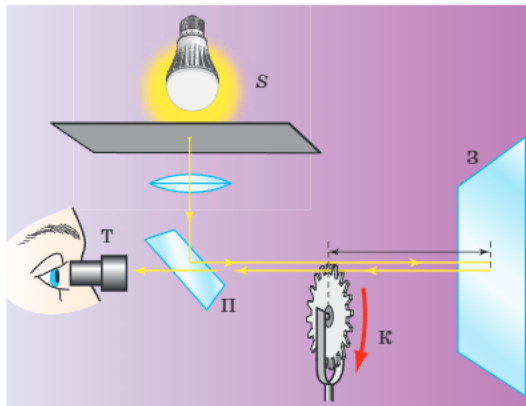
Промежуток времени между двумя последовательными появлениями спутника составил 42 ч 28 мин 36 с.

Свои первые измерения Рёмер провёл в то время, когда положение 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 появления Ио после его выхода из тени Юпитера 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.



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 *A* выполняло вращающееся зубчатое колесо, а роль наблюдателя *B* — плоское зеркало.

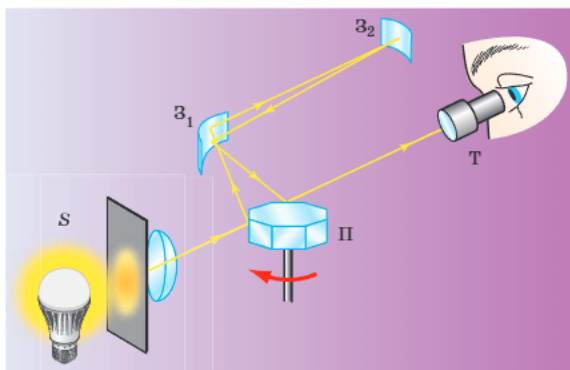
Узкий световой пучок от источника *S* после отражения от полупрозрачной пластинки *П* направлялся на кромку вращающегося зубчатого колеса *К*. Пройдя в прорезь между зубцами, свет падал на отдалённое зеркало *З* и, отразившись, возвращался назад. Если за время движения светового луча от колеса до зеркала и обратно на месте прежней прорези появлялась новая прорезь, то наблюдатель в зрительной трубе *T* 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.



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 в 1879 и 1926 гг. выполнил американский физик А. Майкельсон. Световой пучок от источника S направлялся на грань призмы Π и после отражения падал на вогнутое зеркало Z_1 , установленное на горе. Отражённый от этого зеркала луч направлялся на такое же зеркало Z_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 $299\,796$ км/с, которое лишь незначительно отличается от общепринятого сегодня:

$$c = 299\,792 \text{ км/с.}$$



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Напомним, что скорость света в среде зависит от свойств среды. Например, скорость света в воде 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.

Вывод

! Скорость света в вакууме: $c \approx 300\,000$ км/с = $3 \cdot 10^8$ м/с.

Ключевые слова

Скорость света; метод Галилея; астрономический метод определения скорости света; метод Физо; метод Майкельсона

Вопросы и задания

1. На чём основан астрономический метод определения скорости света?
2. В чём заключаются преимущества лабораторных методов определения скорости света?
3. Как скорость света зависит от показателя преломления среды?

РАЗЛОЖЕНИЕ БЕЛОГО СВЕТА НА ЦВЕТА. ДИСПЕРСИЯ СВЕТА § 92

НОВОЕ В УРОКЕ

- Каков состав белого света.
- Как зависит преломление света от цвета светового луча.
- Чем обусловлен цвет тела.
- Что такое дисперсия света.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое световой луч?
- Что такое преломление света?

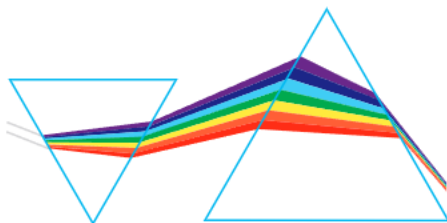
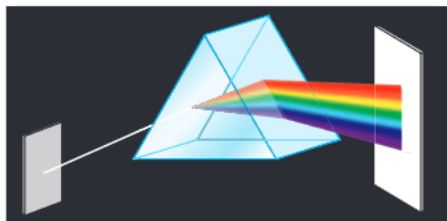
Мы привыкли видеть окружающий нас мир красочным и обычно не задумываемся над вопросом: а что же такое цвет тел? Можем ли мы рассматривать цвет как одно из основных свойств материальных объектов?

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. И. 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?

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 им казался.

Между тем Ньютон нашёл простой и убедительный способ доказательства справедливости своего вывода. Для этого он на пути пучка, прошедшего через призму, поместил вторую призму, повернутую на 180° относительно первой. При этом вторая призма действовала как собирающая линза: вышедший из неё пучок в точке схождения лучей становился белым.

▶ ЭТО ИНТЕРЕСНО

«...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 влияет 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 преломляется пучок световых лучей фиолетового цвета, в наименьшей — красного цвета.

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 фиолетовые лучи имеют 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).

ЯВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ ВОКРУГ НАС. Одним из наиболее известных примеров дисперсии света является *радуга*. Её можно увидеть в небе после дождя или глядя на водопад, если солнце находится за спиной у наблюдателя. В обоих этих случаях воздух наполнен мельчайшими каплями воды. Солнечные лучи, падая на капельки воды, преломляются на её поверхности, а затем отражаются от внутренней поверхности и при выходе из капли в воздух преломляются ещё раз.

Угол преломления у красных лучей меньше, чем у фиолетовых, поэтому красные лучи попадают в глаз наблюдателя от капелек, находящихся на большей высоте. Именно поэтому верхняя дуга радуги всегда красная, а нижняя — фиолетовая. Все капли одного и того же цвета наблюдатель видит под одним и тем же углом, поэтому радуга имеет форму дуги окружности.

В основе сверкания бриллиантов лежат явления полного внутреннего отражения и дисперсии. Бриллианты — это огранённые и отшлифованные алмазы, имеющие большой показатель преломления.

Предельный угол полного внутреннего отражения у бриллиантов составляет 25° . Падающий на драгоценный камень свет испытывает многократное отражение

от внутренних граней, прежде чем выйдет наружу. При этом луч света внутри бриллианта проходит достаточно большой путь для разделения цветов. Именно поэтому мы видим яркий блеск и радужные переливы цвета.

ЦВЕТА́. Окружающий нас мир выглядит 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?

Свет, попадая на предмет, частично поглощается, а частично отражается, вот этот отражённый свет и видит наш глаз.

Рассмотрим опыт, в котором 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.

Итак, **цвет предмета определяется количеством поглощённого и рассеянного света, которым этот объект освещается.** А способность отражать и поглощать свет определяется физическими свойствами вещества, из которого состоит тело, и зависит от его молекулярной структуры.

Помидор кажется нам красным, потому что он рассеивает волны, лежащие в красной области спектра, и поглощает все остальные волны спектра. Наличие хлорофилла в растениях приводит к тому, что они рассеивают волны из зелёной области спектра и поглощают остальные.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Голубой цвет дневного неба обусловлен тем фактом, что лучи из синей части спектра солнечного света рассеиваются в атмосфере более интенсивно, чем лучи из остальной части видимого спектра.

Цвет предмета и цвет источника света связаны следующим образом:

- только если есть источник света, мы видим цвет предмета. Без источника света мы не различаем цветов (в тёмной комнате все предметы кажутся нам тёмными);
- цвет предмета зависит от цвета источника света. Если источник освещения синего цвета, то все освещаемые этим светом предметы будут иметь только синие, чёрные и серые цвета;
- цвет предмета зависит от молекулярной структуры вещества, из которого он состоит.

В процессе восприятия цвета предмета участвует не только сам предмет, но и глаз человека, смотрящего на этот предмет, а также мозг, обрабатывающий информацию, полученную через глаза. В сетчатке человеческого глаза находятся рецепторы: колбочки и палочки. Колбочки отвечают за восприятие цвета, палочки, в свою очередь, за сумеречное зрение. Например, ночью мы не видим цвета, потому что работают палочки, а днём работают и колбочки, и палочки.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

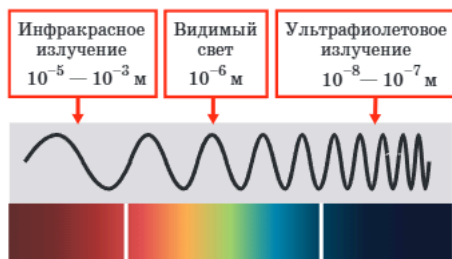


Одним из способов демонстрации того, что красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, голубой, синий и фиолетовый цвета при сложении образуют белый цвет, является использование вращающегося диска *Ньютона*. Этот диск разделён на секторы, окрашенные в цвета радуги. По мере увеличения скорости вращения диск начинает казаться белым. Или, точнее, серовато-белым, так как краски отражают не вполне чистые цвета.

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 0,75 мкм (красный свет).

Электромагнитные волны с длинами волн менее 0,4 мкм и примерно до 10 нм называются **ультрафиолетовым излучением** (см. § 75). Этот вид излучения не воспринимается глазом, но оказывает сильное химическое и биологическое действие.

Электромагнитные волны с длинами волн от 0,75 мкм до примерно 2 мм называются **инфракрасным излучением**. Оно испускается нагретыми телами, и часто его называют *тепловым излучением*.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Инфракрасное излучение было открыто в 1800 г. английским астрономом У. Гершелем. Разложив солнечный свет в спектр с помощью призмы, Гершель поместил чувствительный термометр сразу за красной полосой видимого на экране спектра и обнаружил увеличение показаний прибора. Это говорило о том, что на термометр воздействовало излучение, не видимое человеческим глазом.

Вскоре после открытия инфракрасного излучения немецкий физик И. В. Риттер открыл ультрафиолетовое излучение. В 1801 г. он обнаружил, что невидимое излучение за пределами фиолетовой части спектра разлагало хлорид серебра быстрее, чем видимый свет. Это означало, что обнаруженное излучение обладает большой химической активностью.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Для того чтобы увидеть белый цвет, не обязательно использовать все семь цветов спектра, на которые разлагается белый свет. Можно направить на экран одновременно три пучка света разных цветов: красный, зелёный и синий, подобрав угол отклонения пучков так, чтобы цветные пятна на экране частично перекрывали одно другое, а центральная часть освещалась всеми тремя пучками света. При наложении красного и зелёного цвета образуется жёлтый цвет, при наложении синего и зелёного — голубой, а при наложении синего и красного — пурпурный. При наложении всех трёх цветов получается белый цвет.



Красный, синий и зелёный цвета называются *основными*.

Жёлтый, голубой и пурпурный цвета называются *вторичными*.

При формировании цвета на компьютере часто пользуются цветовой моделью RGB (*Red—Green—Blue*), основными цветами которой являются красный, зелёный и синий.

- ! Дисперсия — зависимость показателя преломления среды от цвета световых лучей.
- ! Цвет предмета определяется количеством поглощённого и рассеянного света, которым этот объект освещается. Способность отражать и поглощать свет определённых частот определяется физическими свойствами вещества и зависит от его молекулярной структуры.
- ! Длины волн видимого света заключены в интервале от 0,4 мкм (фиолетовый свет) до примерно 0,75 мкм (красный свет).
- ! Электромагнитные волны с длинами волн от 10 нм до 0,4 мкм называются ультрафиолетовым излучением.
- ! Электромагнитные волны с длинами волн от 0,75 мкм до 2 мм называются инфракрасным излучением.

ВЫВОДЫ

Дисперсия; цветá; радуга; видимое излучение; инфракрасное излучение; ультрафиолетовое излучение

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. В чём заключается сущность опыта Ньютона по пропусканию солнечного света через призму?
2. Из каких цветов состоит спектр солнечного света?
3. Что такое дисперсия света?
4. От чего зависят и чем обусловлены цвета тел?
5. Как вы думаете, какими будут казаться читателю буквы текста, напечатанные красным цветом, если он рассматривает текст через зелёный светофильтр?
6. Объясните, почему при рассматривании предмета через призму вокруг него виден радужный ободок.

§ 93 ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

НОВОЕ В УРОКЕ

- В чём состоит опыт Юнга.
- Как выглядит интерференционная картина в опыте Юнга.
- Как объясняются цвета тонких плёнок.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое интерференция механических волн?
- Что такое дифракция механических волн?

Изучая законы геометрической оптики, а также вопросы, связанные с измерением скорости света и явлением дисперсии света, мы ничего не говорили о его природе.

ДВЕ ТЕОРИИ О ПРИРОДЕ СВЕТА. В XVII—XVIII вв. существовали две теории о природе света. Согласно одной из них, приверженцем которой являлся И. Ньютон, свет — это поток особых частиц, называемых *корпускулами*. Другой теории света в XVII в. придерживался Х. Гюйгенс. Согласно его представлениям, свет — это *волны*, которые распространяются в особой среде — мировом эфире, заполняющем всё пространство. Представления Гюйгенса на протяжении XVIII в. поддерживали Л. Эйлер, М. В. Ломоносов и Б. Франклин. И только в начале XIX в. в работах О. Френеля и Т. Юнга была достоверно обоснована *волновая природа света*.

ОПЫТ ЮНГА. Одной из характерных особенностей всех волновых процессов является интерференция. Однако все попытки обнаружить интерференцию света от двух независимых источников не увенчались успехом. Включение дополнительного источника приводило лишь к увеличению освещённости, но никакой интерференционной картины не возникало.

Английский учёный Т. Юнг в 1802 г. осуществил удивительно простой и изящный опыт по интерференции 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 , разделялся на два пучка посредством щелей S_1 и S_2 .

В соответствии с корпускулярной теорией Ньютона на экране, установленном за ширмами, должны были появиться две полосы. Однако вместо этого на экране появился ряд светлых полосок, разделённых тёмными промежутками. Самым удивительным было то, что прямо напротив промежутка между щелями S_1 и S_2 на экране образовалась центральная светлая полоска, симметрично которой расположились другие полоски.

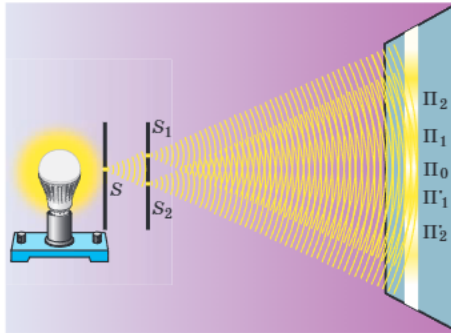
Это свидетельствовало о том, что свет огибает препятствия так, как предсказывала волновая теория Гюйгенса. Характерную картину чередования на экране максимумов и минимумов освещённости можно объяснить, если допустить, что



Томас Юнг
(1773—1829)

свет состоит из волн. Светлые полосы Π_0 , Π_2 , Π'_2 и т. д. образуются волнами, исходящими из щелей S_1 и S_2 , которые взаимно усиливают друг друга. Тёмные полосы Π_1 , Π'_1 и т. д. создаются волнами, которые взаимно гасят друг друга.

Таким образом, при разделении светового пучка на два пучка получаются взаимно усиливающие (или ослабляющие) друг друга световые волны, которые интерферируют.

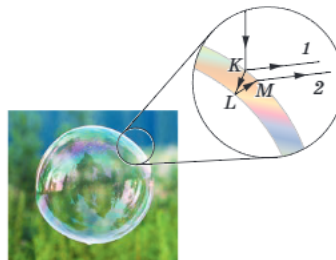


ФИЗИКА В ЖИЗНИ

На интерференции света основан метод получения трёхмерных изображений, который называется **голографией**. Для получения голограммы используют *лазеры* — приборы, создающие мощные световые пучки определённого цвета. Когда записывают голограмму, лазерный пучок разделяют на два одинаковых луча. Один луч освещает объект и, отражаясь, попадает на фотопластинку. Второй луч попадает прямо на фотопластинку. Когда эти лучи встречаются, они интерферируют и на пластинке можно увидеть чередование тёмных и светлых полос — интерференционную картину. Если эту фотопластинку осветить светом лазера, который использовался при записи голограммы, то мы увидим объёмное изображение объекта.

ЦВЕТА ТОНКИХ ПЛЁНОК. Наблюдая игру красок мыльных пузырей, едва ли вы задумываетесь над тем, что это результат явления *интерференции* света.

Если смотреть сбоку, то сильно увеличенное сечение пленки, образующей стенку мыльного пузыря, 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 KLM укладывается нечётное число полуволн, то будет *тёмная* полоса.



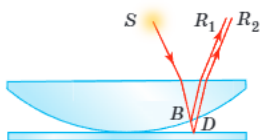
ИССЛЕДОВАНИЕ

Рассмотрим опыт, который несложно осуществить даже в домашних условиях. На проволоочную рамку, которую предварительно окунали 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.



Исследовать характер изменения окраски мыльного пузыря, помещённого в стеклянную банку.

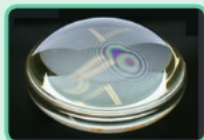
ПОМОЩНИК. Приготовьте литровую банку с полиэтиленовой крышкой. Налейте в банку небольшое количество мыльной воды. Прорежьте шилом отверстие в центре крышки. Возьмите трубочку от сока и вставьте её в отверстие крышки. Выдуйте небольшой мыльный пузырь и осторожно опустите его в банку, закрыв при этом крышку. 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.



КОЛЬЦА НЬЮТОНА. Примером интерференции являются так называемые *кольца Ньютона*. Для наблюдения колец Ньютона монохроматический свет направляют на плосковыпуклую линзу, установленную на тщательно отполированной пластинке.

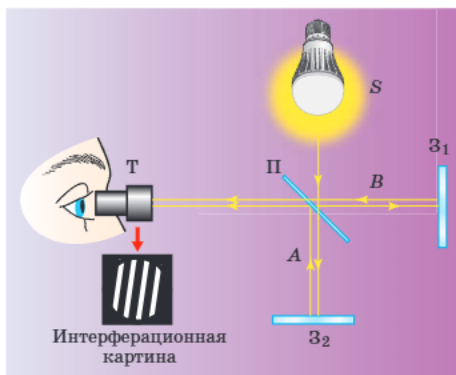
На рисунке S — падающая световая волна, R_1 и R_2 — волны, отражённые в точках B и D , т. е. на границах раздела сред стекло—воздух. На опыте наблюдается результат интерференции отражённых волн R_1 и R_2 в виде концентрических колец.

ЭТО ИНТЕРЕСНО



Несмотря на название, первым кольца Ньютона обнаружил Роберт Бойль, а через два года независимо от него Роберт Гук. Сам Ньютон подробно исследовал это явление и обнаружил закономерности в расположении и окраске колец в зависимости от кривизны линзы, однако объяснить эти закономерности на основе корпускулярной теории света он не смог. Объяснить этот опыт удалось Томасу Юнгу благодаря использованию волновой теории света.

ИНТЕРФЕРОМЕТР. На основе явления интерференции основан принцип действия такого прибора, как *интерферометр*. Интерферометры существуют для звуковых и электромагнитных волн (в том числе для радиоволн различной длины и световых волн). Принцип действия всех интерферометров одинаков и заключается в следующем. Пучок света с помощью того или иного устройства разделяется на два или большее количество пучков. Эти пучки проходят различные пути, после чего встречаются и образуют интерференционную картину.



Интерферометры имеют широкое применение. Например, акустические и радиоинтерферометры используются для измерения скорости распространения волн, измерения расстояния между двумя излучателями волн и т. д. С помощью оптических интерферометров можно измерять длины световых волн, показатели преломления прозрачных поверхностей и т. д.

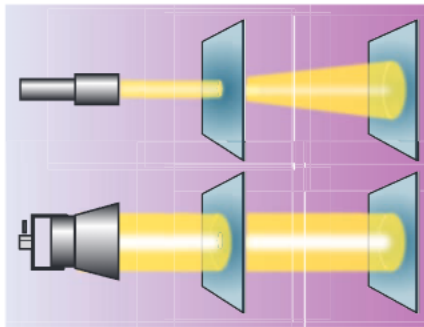
ДИФРАКЦИЯ СВЕТА. Рассмотренные опыты по интерференции света убедительно свидетельствуют о его волновых свойствах. Поэтому для света должна также наблюдаться и *дифракция*, которая присуща любому волновому процессу. Но в отличие от дифракции механических волн, наблюдать дифракцию света намного сложнее. 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 (см. рисунок).

Опыты также показали, что если диаметр отверстия (размер щели) в ширине достаточно велик, а расстояние от щели 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 тем, что свет — *волна*.



Франческо Гримальди
(1618—1663)



Рассмотренный выше опыт Юнга по интерференции света явился также и классическим опытом по *дифракции* света. Именно вследствие дифракции из щелей выходили два световых пучка, которые частично перекрывались, в результате чего и наблюдалась интерференционная картина.



Таким образом, на основе опыта Т. Юнга продемонстрировал два важнейших свойства света — интерференцию и дифракцию световых волн. Кроме того, опираясь на результаты своего опыта, Юнг впервые получил достаточно точную оценку длины световой волны. Последовательную теорию дифракции света развил в своих работах современник Юнга французский учёный О. Френель.



Явление дифракции света накладывает определённые ограничения на разрешающую способность микроскопов и телескопов. Действие оптических приборов описывается законами геометрической оптики, согласно которым увеличение микроскопа или телескопа зависит от фокусных расстояний объектива и окуляра этих приборов. Однако если при помощи микроскопа пытаться рассмотреть два близко расположенных объекта малых размеров, то вследствие того, что свет огибает препятствия, картина получится размытой. В результате мы не сможем различить детали объекта, размеры которого меньше длины волны света, используемого в микроскопе.

Таким образом, длина волны света играет ключевую роль в определении разрешающей способности микроскопа.

ВЫВОДЫ

-  Свет имеет волновую природу. При распространении света проявляются его волновые свойства — интерференция и дифракция.
-  Радужные цвета тонких плёнок, кольца Ньютона — следствие интерференции света.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Интерференция света; дифракция света; опыт Юнга; кольца Ньютона; интерферометр

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какой главный вывод сделал Юнг на основе своего опыта?
2. Объясните, как образуются чередующиеся светлые и тёмные полосы в эксперименте Юнга.
3. Почему при освещении мыльной плёнки жёлтым светом мы не наблюдаем радужной окраски?
4. Почему дифракцию света наблюдать труднее, чем дифракцию механических волн?
5. После дождя можно видеть радужные полосы от тонких слоёв нефтепродуктов, масла, керосина на поверхностях луж. Чем объясняются наблюдаемые цветные полосы?
6. Чем объяснить расцветку крыльев насекомых: жуков, мух, стрекоз? Почему меняется окраска крыльев насекомого, если рассматривать их под разными углами?
7. Для изготовления искусственных перламутровых пуговиц на поверхность наносят мельчайшую штриховку, после чего пуговицы приобретают радужную окраску. Объясните, почему это происходит.

ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. § 94

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ПРИРОДА СВЕТА

НОВОЕ В УРОКЕ

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?

- 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.

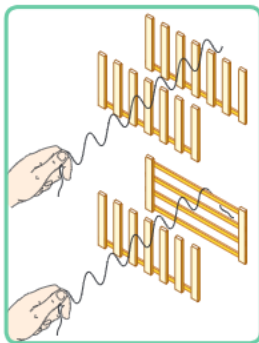
ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое продольная и поперечная волны?
- Что такое электромагнитные волны?

ПЛОСКОСТЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ. 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. Какой же волной является свет: поперечной или продольной?

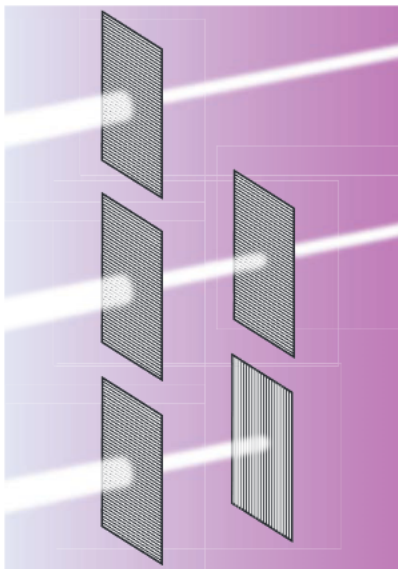
ИССЛЕДОВАНИЕ

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 щелям препятствия.

Плоскость, в которой происходят колебания (в нашем примере — упругого шнура), называется **плоскостью поляризации**. Опыт показывает, что вертикально поляризованная волна пройдёт через вертикальную щель и погасится при прохождении через горизонтальную щель.



Подчеркнём, что поляризация может существовать только у поперечных волн, а у продольных — не может. В продольных волнах колебания совершаются в направлении их распространения, и никакой ориентацией щели эти волны погасить нельзя.

ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. 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 *оптической осью фильтра*.

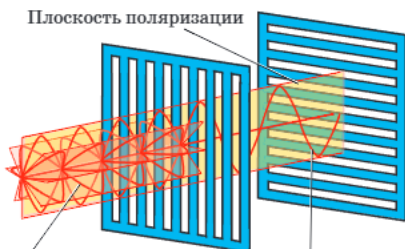
Если солнечный луч направить перпендикулярно плоскости фильтра, то на первый взгляд не произойдёт ничего существенного: свет проходит при любой

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 оптической 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**.

Примером естественного поляризационного фильтра может служить кристалл турмалина — минерала зелёного цвета.



Естественный свет Плоскополяризованный свет

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА. Свет может быть как *поляризованным*, так и *неполяризованным*. Если колебания происходят одновременно во многих плоскостях, то такой неполяризованный свет называется *естественным светом*. Примером источника неполяризованного света является обычная лампа накаливания.

Поляризовать неполяризованный свет можно, например, при помощи поляроидной плёнки. *Поляроид* дей-

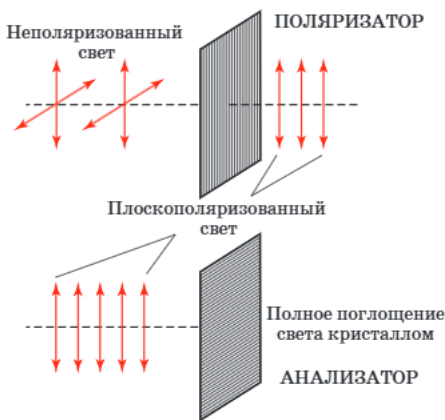
ствует как набор параллельных щелей, почти без потерь пропуская свет одной поляризации (соответствующее направление называется *осью поляроида*) и почти полностью поглощая свет, поляризованный в перпендикулярной плоскости.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Большой вклад в изучение поляризации света внёс французский физик Э. Малюс. В 1808 г. он открыл явление поляризации света при отражении от прозрачных тел. Малюс придерживался теории Ньютона о корпускулярной природе света. Поэтому он предположил, что частицы света имеют полюсы, как магниты. В естественном свете полюсы ориентированы беспорядочно, а после отражения от какой-либо поверхности они приобретают определённую ориентацию. Такой «упорядоченный» свет Малюс назвал поляризованным (от лат. слова «полюс»).

Полярироид можно использовать в качестве *поляризатора* для получения плоскополяризованного света из неполяризованного, так как полярироид пропускает только компоненту волны с поляризацией, параллельной его оси.

Полярироид можно также использовать в качестве *анализатора*, когда требуется установить, поляризован ли свет и в какой плоскости он поляризован. Полярироид-анализатор пропускает одно и то же количество света независимо от ориентации своей оси, если свет не поляризован. Но если свет поляризован, то при вращении поляриоида интенсивность пропускаемого света максимальна, когда плоскость поляризации параллельна оси поляриоида, и минимальна, когда она перпендикулярна оси поляриоида.



ФИЗИКА В ЖИЗНИ

В результате отражения солнечного света от различных поверхностей (например, от дорожного полотна, водной поверхности, снега) возникают блики. Чтобы защитить глаза от ослепляющих бликов, используют *поляризационные очки*. В отличие от обычных солнечных очков, на линзы поляризационных очков нанесены специальные поляризационные плёнки, которые не пропускают отражённый от поверхностей неполяризованный свет. Хорошие поляризационные очки способны задерживать до 95 % падающего на них неполяризованного света. Они используются спортсменами, водителями, туристами.

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 электромагнитного поля — *электродинамики*. Максвелл теоретически доказал возможность существования электромагнитных волн, способных распространяться в пустоте (в вакууме), и определил их скорость. Из теории Максвелла также следовало, что электромагнитные волны являются поперечными.

Экспериментальное открытие Г. Герцем электромагнитных волн подтвердило основные положения электромагнитной теории Максвелла. Измеренная Герцем скорость электромагнитных волн оказалась равной скорости света, что позволило сделать вывод о том, что *свет — это электромагнитная волна*. При этом Герц опытным путём доказал, что электромагнитным волнам присущи явления отражения, преломления, интерференции и дифракции.



Человеческий глаз не способен различать, поляризован свет или нет. Однако некоторые насекомые, например пчёлы, обладают способностью воспринимать поляризацию света и использовать её для ориентации в пространстве. Поляризованный свет помогает им определять направление к источнику света и находить путь к улью даже в условиях плохой видимости.



Выводы

- ❗ Свет имеет электромагнитную природу.
- ❗ Свет может распространяться в вакууме.
- ❗ Скорость света равна скорости распространения электромагнитных волн.
- ❗ Световые волны являются поперечными.
Световая волна, у которой направления колебаний хаотически меняются во времени, называется естественным или неполяризованным светом. При прохождении естественного света через поляризационный фильтр он становится поляризованным, в котором направление колебаний совпадает с направлением оптической оси фильтра.
- ❗ Свету присущи все свойства электромагнитных волн: отражение, преломление, дисперсия, интерференция, дифракция.

Ключевые слова

Поляризация света; поляририд; плоскость поляризации; естественный свет; поляризационный фильтр

Вопросы и задания

1. Какие опыты позволяют утверждать, что световые волны являются поперечными?
2. Нужна ли особая среда для распространения света?
3. Какие следствия теории Максвелла позволяют утверждать, что свет является электромагнитной волной?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ § 95



- **ЗАДАЧА.** Показатель преломления для алмаза равен 2,42, а для рубина 1,76. Сравните скорости распространения света в указанных веществах. На сколько процентов скорость света в алмазе отличается от скорости света в рубине?

Дано:
 $n_a = 2,42$
 $n_p = 1,76$

$\frac{v_p}{v_a} = ?$

$\eta = ?$

Решение.

Показатель преломления характеризует, во сколько раз скорость света в веществе меньше скорости света в вакууме:

$$n = \frac{c}{v}.$$

Поэтому $v = \frac{c}{n}$.

$$\text{Следовательно, } \frac{v_p}{v_a} = \frac{c/n_p}{c/n_a} = \frac{n_a}{n_p}; \quad \frac{v_p}{v_a} = \frac{2,42}{1,76} \approx 1,38.$$

Определим, на сколько процентов скорость света в алмазе отличается от скорости света в рубине:

$$\eta = \frac{v_p - v_a}{v_p} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{n_p}{n_a}\right) \cdot 100\%;$$

$$\eta = \left(1 - \frac{1,76}{2,42}\right) \cdot 100\% \approx 27\%.$$

Отв е т: скорость света в рубине больше скорости света в алмазе в 1,38 раза; на 27%.

Задачи для самостоятельного решения

- 1 Определите, сколько времени понадобится, чтобы свет, излучённый Солнцем, достиг Венеры; Юпитера. Считайте, что планеты движутся по круговым орбитам, причём радиус орбиты Венеры примите равным 108 млн км, Юпитера — 780 млн км.
- 2 Показатель преломления стекла для красных лучей (759 нм) равен 1,510, а для фиолетовых (397 нм) — 1,531. Определите скорости распространения красных и фиолетовых лучей в стекле.
- 3 Длина волны световых лучей жёлтого цвета в вакууме составляет 580 нм. Чему равна длина волны световых лучей жёлтого цвета в воде? Показатель преломления воды 1,33.
- 4 Длина волны световых лучей красного цвета в воде равна длине волны световых лучей зелёного цвета в воздухе. Какой цвет увидит человек под водой, если вода освещена красным светом?

§ 96 ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ

Практическая работа

Наблюдение дифракции световой волны лазера на металлической линейке

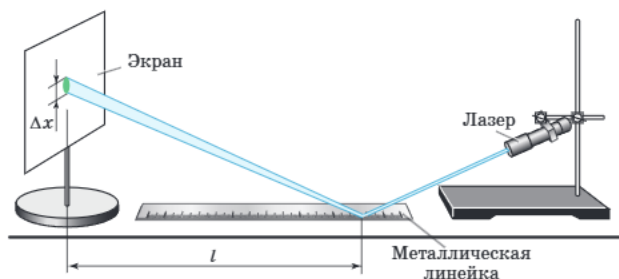
Дифракцию можно наблюдать и в «домашних условиях», имея лазерную указку и металлическую линейку с делениями. Необходимо правильно расположить лазер относительно поверхности линейки, и на экране мы увидим дифракционную картину.

Цель работы

Наблюдать и изучить некоторые закономерности образования дифракционной картины при дифракции световой волны лазера на рисках шкалы линейки.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования можно использовать полупроводниковый лазер (лазерная указка), металлическую линейку с миллиметровыми делениями и чётко очерченными рисками (или лазерный диск), линейку, мерную ленту.
- С помощью штатива, снабжённого зажимом с поворачивающейся лапкой, закрепите лазер таким образом, чтобы луч падал на риски линейки под большим углом. Установите такой угол падения луча, чтобы на шкале линейки образовалось протяжённое пятно длиной 2—2,5 см.



- На пути луча, отражённого от линейки, установите экран, на котором наблюдайте дифракционную картину.
- С помощью линейки измерьте расстояние Δx между соседними дифракционными максимумами на экране.
- Измерьте расстояние от места падения луча на линейку до экрана l .
- Повторите указанные выше измерения при различных положениях экрана (не менее 5—6 измерений).

- Постройте график зависимости расстояния между соседними максимумами Δx от расстояния между экраном и местом падения луча на линейку l . Качественно опишите эту зависимость.
- Сделайте выводы.

Практическая работа

Изучение поляризованного света

В природе поляризация может возникать при отражении от поверхностей или при прохождении через некоторые кристаллы (например, кристаллы исландского шпата или турмалина).

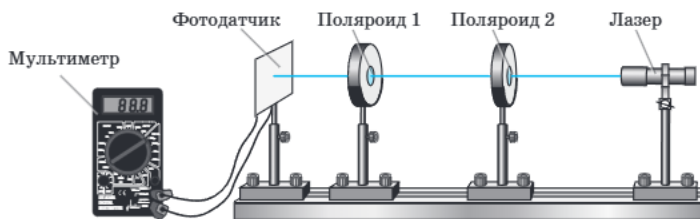
В этом опыте мы используем два кристалла турмалина, один поляризует пучок света от лазера, а второй, в зависимости от взаимной ориентации первого и второго кристаллов, меняет интенсивность света. Для того чтобы провести измерения и построить необходимые графики, мы используем фотометрический датчик и присоединённый к нему цифровой микроамперметр.

Цель работы

Получить поляризованный свет и исследовать особенности поляризованного излучения.

ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования потребуются: полупроводниковый лазер (лазерная указка), фотометрический датчик, мультиметр, два поляризатора.
- Закрепите на оптической скамье лазер, один из полароидов и фотометрический датчик, соединённый с мультиметром. Включите лазер, проверьте попадание лазерного пучка в центр фотодатчика.
- Включите мультиметр в режиме измерения силы тока и установите предел измерения силы фототока на 2000 μA диапазона ДСА.



- Вращая поляризатор, найдите такое его положение, которое соответствует максимальному прохождению света через поляризатор. Это положение должно соответствовать максимальному значению силы тока на экране мультиметра. Найденный максимум определяет положение оптической оси кристалла.
- Между лазером и поляризатором установите на оптическую скамью ещё один поляризатор. Вращая второй поляризатор, добейтесь максимального фототока. В этом случае оптические оси кристаллов параллельны.
- Понаблюдайте, как изменяется фототок I , измеряемый мультиметром, при изменении интенсивности света, падающего на фотодатчик. Для этого, вращая

первый поляризатор, снимите зависимость $I(\alpha)$ при изменении угла α от 0° до 360° с шагом 30° . Результаты измерений занесите в таблицу в своей тетради.

- По данным таблицы постройте график зависимости $I(\alpha)$.
- Сделайте выводы.

ДОМАШНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ПОЛЯРИЗОВАННЫМ СВЕТОМ

Рассказав учащимся на уроке физики о свойствах поляризованного света, учитель привёл пример практического использования так называемых поляроидов, которые представляют собой тонкие плёнки кристаллов минерала герпатита, нанесённых на прозрачную основу из пластика или оргстекла. Если на фары и ветровые стёкла автомобилей нанести такие поляроиды, то при встречном движении автомобилей в тёмное время суток будет устранён слепящий свет фар, что очень важно с точки зрения безопасности движения. Аналогичное действие оказывают также поляризационные очки, которые полностью пропускают свет только с определённой ориентацией плоскости поляризации световой волны. В этой связи представляют интерес простые опыты по наблюдению свечения ЖК-экранов мониторов, телевизоров или смартфонов с помощью поляризационных очков.

Проведите и вы несколько опытов с поляризованным светом.

Научная справка

В настоящее время поляризованный свет широко используется для изучения распределения механических напряжений в ответственных узлах и деталях машин и механизмов. Для этих целей из прозрачного пластика изготавливают модель детали (желательно плоскую) и подвергают её нагрузке. Картину распределения напряжений в виде разноцветных полос рассматривают в поляризованном свете и выявляют тем самым места локализаций наибольших нагрузок.

Этапы выполнения задания

- В качестве оборудования вам понадобятся поляризационные очки, ЖК-экран, предметы из прозрачного пластика (например, линейка из оргстекла, футляра для CD-диска и т. п.).
- Известно, что ЖК-экраны излучают поляризованный свет. Поэтому возьмите поляризационные очки и посмотрите через них на включённый ЖК-экран. Для удобства наблюдения настройте экран устройства, чтобы он стал светлым.
- Вращая очки, определите такое их положение относительно экрана, когда изображение на мониторе сквозь очки станет тёмным или практически полностью исчезнет. В этом случае ось поляризации очков оказывается перпендикулярной оси поляризации поляризационного света от экрана, т. е. свет не будет проходить через очки.
- Зафиксируйте это положение очков.
- Между очками и экраном поместите любой прозрачный предмет.
- Внимательно рассмотрите распределение зон с радужной окраской на поверхности предмета. Появление таких участков может свидетельствовать о существовании локальных дефектов в образце, например неоднородностей в его структуре, наличие микротрещин и т. п.
- Повторите предыдущий опыт при том же расположении предмета между очками и экраном, но подвергнув при этом образец деформации сжатия (растяжения, изгиба, кручения).

Изменилась ли картина распределения разноцветных полос на поверхности образца? Если картина изменилась, то с чем это может быть связано?

- Проведите аналогичные опыты для разных расстояний между очками и экраном и расстояний между очками и предметом. Изменился ли характер распределения и интенсивность разноцветных полос?
- Чем объясняется возникновение разноцветных полос при прохождении поляризованного света через прозрачные предметы?
- Сделайте вывод.



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Скорость света в вакууме: $c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с.
- Дисперсия — зависимость показателя преломления среды от цвета световых лучей.
- Свет имеет волновую природу. При распространении света проявляются его волновые свойства: интерференция и дифракция.
- Радужные цвета тонких плёнок, кольца Ньютона — следствие интерференции света.
- Световые волны являются поперечными.
- 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?

Темы исследовательских и проектных работ

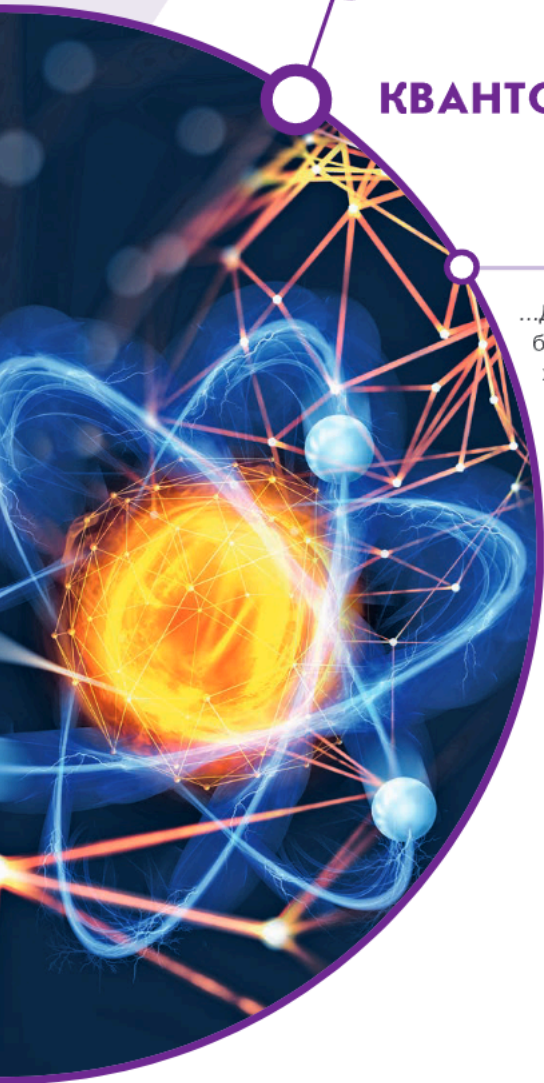
- Как измерить скорость света.
- Открытие светового спектра.
- Световая волна.
- Просветление оптики.
- Радужные плёнки в природе и в технике.
- Поляризационные фильтры.
- Свет в различных средах.

Глава 11

КВАНТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

...Должно разумом достигать потаённого безмерной малостью вида, меры, движения и положения первоначальных частиц, смешанные тела составляющих.

М. В. Ломоносов



§ 97 ОПЫТЫ С КАТОДНЫМИ ЛУЧАМИ. ОТКРЫТИЕ ЭЛЕКТРОНА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое катодные лучи.
- Как был открыт электрон.
- Что такое рентгеновское излучение.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- 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.

ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ В РАЗВИТИИ УЧЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОНЕ. Законы электролиза, установленные М. Фарадеем в 1836 г., послужили отправной точкой в обосновании идеи о дискретности электричества. Экспериментируя с различными электролитами, Фарадей показал, что масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна значению совокупного заряда, прошедшего через раствор.

Тщательно выполненные опыты позволили Фарадею установить, что для выделения одинакового числа частиц любого вещества необходим один и тот же совокупный заряд. 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.

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. Дж. Томсон. В своих опытах Томсон использовал разрядные трубки, из которых откачивался воздух. При создании высокого напряжения между положительным электродом (*анодом*) и отрицательным электродом (*катодом*) в разрядной трубке возникал электрический ток, регистрируемый амперметром. Томсон установил, что этот ток создаётся зарядами, движущимися от катода к аноду.

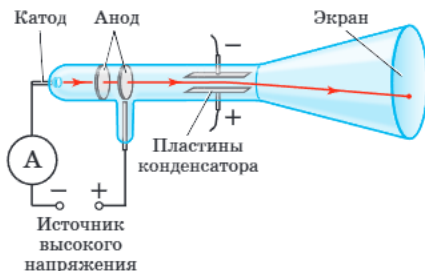
Если в аноде сделать узкое отверстие, то сформированный пучок заряженных частиц можно направить в правую часть трубки, обладающую большими гео-

метрическими 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 отрицательно заряженные 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**.



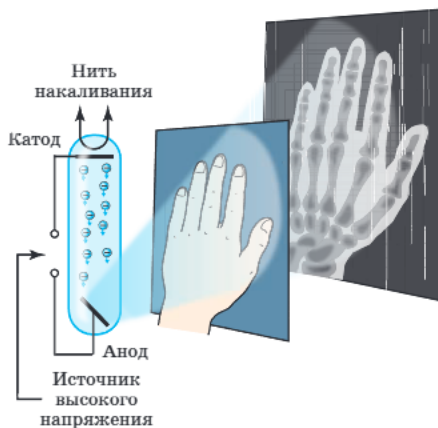
ЭТО ИНТЕРЕСНО

Впервые термин «электрон» ввёл в 1891 г. ирландский физик и математик Дж. Стоуней, который на основе опытов Фарадея по электролизу высказал идею о дискретности электрического заряда.

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. В 1895 г., за два года до открытия электрона, немецкий физик В. Рентген, изучавший газовые разряды, сделал 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.



Вильгельм Рентген
(1845—1923)



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*.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Рентгеновское излучение обладает целым рядом удивительных свойств, которые позволяют получить информацию о внутренних органах человека без операции. Однако вскоре после его открытия обнаружилось вредное биологическое действие рентгеновского излучения. Оказалось, что оно вызывает ожоги кожи, злокачественные опухоли и может вызвать разрушение и мутации клеток ДНК. Учёные обнаружили, что опасного воздействия излучения можно избежать, если уменьшить время и дозу излучения, применяя свинцовые экраны и средства дистанционного управления.



Кроме медицинских рентгеновских аппаратов, рентгеновские лучи широко применяются в *дефектоскопии*. По степени поглощения излучения можно узнать о состоянии вещества, наличии в нём дефектов. Рентгеновские дефектоскопы позволяют определить качество сварных швов при сварке трубопроводов и корпусов кораблей.

ВЫВОДЫ

- ! В 1897 г. Дж. Томсон открыл частицы, являющиеся носителями электрического заряда — электроны, а также оценил отношение заряда частицы к её массе.
- ! В 1895 г. В. Рентген обнаружил излучение, которое потом назвали рентгеновским.
- ! Рентгеновское излучение представляет собой электромагнитные волны, которые излучают электроны при торможении в результате столкновения с веществом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электрон; открытие электрона; рентгеновские лучи

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. Что такое катодные лучи?
2. К какому выводу пришёл Томсон на основе своих опытов?
3. Что установил Фарадей на основе анализа опытов по электролизу?
4. Что такое рентгеновское излучение?

ИЗЛУЧЕНИЕ И СПЕКТРЫ § 98

НОВОЕ В УРОКЕ

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 полосу, называемую *спектром*.

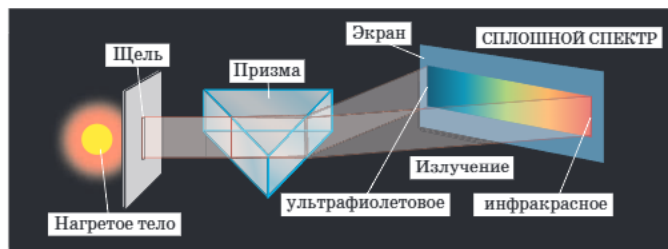
- Что собой представляют сплошной и линейчатые спектры испускания и поглощения.
- Что такое спектральный анализ.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое преломление света?
- Что такое спектр?
- Что такое дисперсия света?

СПЛОШНОЙ СПЕКТР. 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 (см. § 75). Излучение в области длин волн, лежащих за красной областью спектра, называется *инфракрасным*. Инфракрасные лучи испускают все нагретые тела, например горячая печь. Перед фиолетовой областью видимого спектра располагается *ультрафиолетовое* излучение, обладающее сильным физиологическим воздействием.



Поскольку в спектрах нагретых тел нет пустых промежутков, то такие спектры являются *непрерывными*. По-другому они называются *сплошными*. Такие спектры дают твёрдые тела, жидкости, а также плотные газы.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Только 9% энергии солнечного излучения несут с собой ультрафиолетовые лучи, 44% энергии приходится на видимую часть спектра, остальные 47% своей энергии Солнце посылает нам в виде инфракрасных лучей.



Роберт Бунзен
(1811—1899)

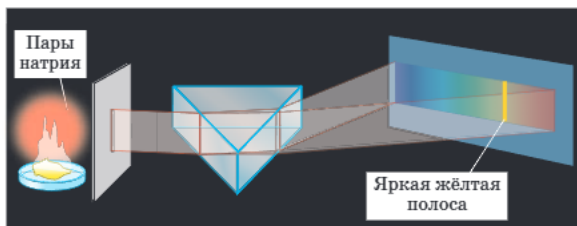


Густав Кирхгоф
(1824—1887)

ЛИНЕЙЧАТЫЕ СПЕКТРЫ. После изобретения Р. Бунзеном в середине XIX в. специальной газовой горелки в изучении спектров излучения веществ наметился 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.

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.



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.



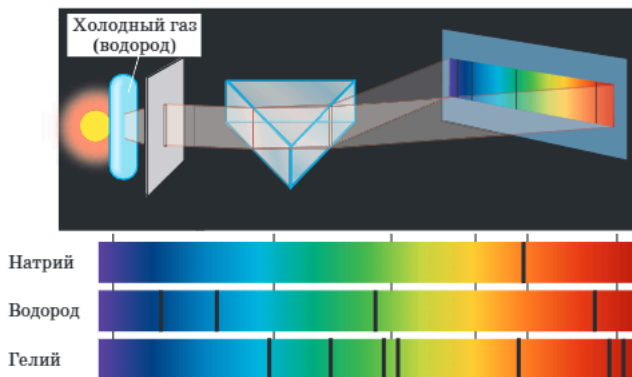
Линейчатые спектры испускания

Таким образом, спектры испускания паров металлов и газов, находящихся в атомарном состоянии, представляют собой набор отдельных цветных линий на чёрном фоне. Такие спектры получили название **линейчатые спектры 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, установленном за призмой, будет наблюдаться сплошной спектр, перерезанный тёмными линиями. Эти линии называются **линиями поглощения**, а сам спектр — **линейчатым спектром 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.



Линейчатые спектры поглощения

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ. Анализ линейчатых спектров излучения и поглощения позволяет расшифровать состав излучающего вещества. Метод определения химического состава вещества по его спектру называется **спектральным анализом**.

Метод спектрального анализа был разработан в 1859 г. Р. Бунзеном и Г. Кирхгофом, что ознаменовало появление нового раздела физики — **спектроскопии**, в котором изучаются спектры электромагнитного излучения. Прибор для спектрального анализа называется **спектроскопом**.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Впервые линейчатый спектр поглощения наблюдал в 1802 г. английский врач и химик У. Х. 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 свойств призмы, 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)

С помощью спектрального анализа излучения 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.

Например, используемые в лазерной спектроскопии лазеры с перестраиваемой частотой позволяют обнаружить отдельные атомы элемента при концентрации порядка 100 атомов на 1 см^3 объёма газа.

С помощью спектрального анализа было открыто 25 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».



ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 приходится наиболее интенсивные линии спектра. Поэтому одни звёзды кажутся нам красными, а другие — белыми или голубыми.

ВЫВОДЫ

- ! Спектр, состоящий из отдельных цветных линий на чёрном фоне, называется линейчатым спектром испускания.
- ! Сплошной спектр, перерезанный тёмными линиями, называется линейчатым спектром поглощения.
- ! Метод определения химического состава вещества по его спектру называется спектральным анализом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сплошной спектр; линейчатый спектр испускания; линейчатый спектр поглощения; спектральный анализ

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. Какие тела излучают сплошные спектры, а какие — линейчатые?
2. Что такое спектральный анализ?
3. Какого типа спектр получится от следующих источников: пламя свечи, спираль электроплитки, лампа дневного света, лазерная указка, неоновая лампа?
4. Объясните, как по спектру излучения сплава и яркости его спектральных линий можно узнать о составе сплава.

КВАНТОВАЯ ГИПОТЕЗА ПЛАНКА § 99

НОВОЕ В УРОКЕ

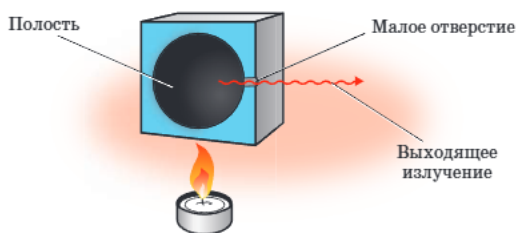
Изучение закономерностей испускания и поглощения электромагнитного излучения нагретыми телами сыграло большую роль в становлении теории, описывающей законы микромира. Эти законы оказались во многом непохожими на законы классической физики.

- Что такое абсолютно чёрное тело и его излучение.
- Что такое квант излучения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое спектр?
- Что собой представляют сплошной и линейчатые спектры испускания и поглощения?

ИЗЛУЧЕНИЕ АБСОЛЮТНО ЧЁРНОГО ТЕЛА. Как показали измерения, спектр излучения тел, нагретых до одной и той же температуры, различен для разных веществ. Однако если внутри образца сделать полость и соединить её с внешним пространством при помощи малого отверстия, то спектральный состав излучения из отверстия уже не будет зависеть от вещества.

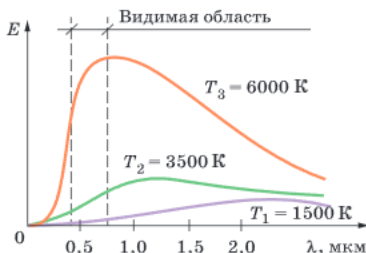


Это излучение получило название **излучение абсолютно чёрного тела**. Смысл столь необычного названия можно понять на основе следующего мысленного опыта.

Вместо того чтобы нагревать полость изнутри, будем освещать её снаружи узким световым пучком. В этом случае независимо от вещества образца 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 чем больше при данной температуре тело излучает, тем лучше оно поглощает энергию при этой 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.**



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.

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 необычное *предположение* о том, что **излучение испускается отдельными порциями, или квантами**.



Макс Планк
(1858—1947)

ВАЖНО

Энергия кванта излучения 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 новой теории — *квантовой физики*.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

«...Квант действия должен был играть в физике фундаментальную роль. Появление его возмещало нечто совершенно новое, дотоле неслыханное, что, казалось, требовало преобразования самых основ нашего физического мышления...»

М. Планк

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В начале XX в. большинство физиков считали, что гипотеза о квантах является лишь искусственным математическим приёмом. Многие физики, в том числе и сам Планк, продолжали искать более обоснованное объяснение излучения абсолютно чёрного тела. Однако вскоре выяснилось, что существуют и другие физические явления, которые на атомном уровне также хорошо согласуются с гипотезой М. Планка (о них вы узнаете в старших классах).

Новая теория существенно отличалась от прежних представлений о природе электромагнитных волн, ранее все волновые процессы считались непрерывными. Это поставило под сомнение применимость классической физики для описания процессов, происходящих в микромире. Таким образом, открытие Планка определило направление развития физики на XX век и далее, а также послужило толчком к созданию новой физической теории — *квантовой физики*.

Несмотря на то что квантовая физика — это сложный раздел физики, объясняющий физические процессы внутри атома (на расстояниях порядка 10^{-10} м), трудно сейчас найти какую-нибудь область нашей жизни, где не применялись бы достижения этого раздела физики. Мобильные телефоны, планшетные компьютеры, телевизоры с жидкокристаллическими экранами, лазерные диски, современная электроника на основе интегральных микросхем, применение в медицине лазеров, томографов, радиоизотопов — всё это примеры использования квантовой физики в технических устройствах.

- ! Абсолютно чёрное тело — это физическое тело, которое при любой температуре поглощает всё падающее на него электромагнитное излучение во всех диапазонах.
- ! Зависимость энергии излучения абсолютно чёрного тела от длины волны имеет особенность: существует длина волны λ_m , на которую приходится максимум испускаемой энергии.
- ! Согласно Планку, излучение испускается отдельными порциями, или квантами.

ВЫВОДЫ

Абсолютно чёрное тело; излучение абсолютно чёрного тела; квант, энергия кванта

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

1. Что такое абсолютно чёрное тело? Какова особенность его спектра испускания?
2. В чём заключается суть квантовой гипотезы Планка?
3. Как вы думаете, если квант излучения обладает энергией, то способен ли он воздействовать на тела, например, оказывать на них давление?

И
ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

§ 100 МОДЕЛИ СТРОЕНИЯ АТОМА. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

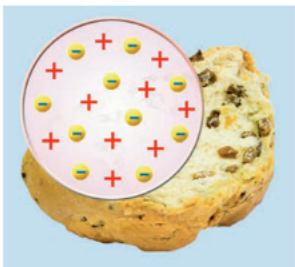
НОВОЕ В УРОКЕ

- В чём заключалась основная цель опытов Резерфорда.
- В чём суть планетарной модели атома Резерфорда.
- Как формулируются постулаты Бора, лежащие в основе его модели атома.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Из каких частиц состоят все вещества и что такое атом?
- Как взаимодействуют между собой заряженные частицы?
- Что представляют собой линейчатые спектры испускания и поглощения?

Конец XIX — начало XX в. ознаменовались целым рядом выдающихся открытий в области строения вещества. Один только факт открытия электрона означал, что эта частица каким-то образом входит в состав атомов, которые, по-видимому, сами являются составными объектами.



МОДЕЛЬ АТОМА ТОМСОНА. Одну из первых моделей строения атома предложил в 1903 г. английский физик Дж. Томсон, который является автором открытия электрона. В модели Томсона, получившей название *пудинговой*, атом представляет собой положительно заряженный шар, заряд которого равномерно распределён по всему объёму. В этот шар вкраплены электроны, как изюминки в пудинг.

Однако дальнейшие исследования показали, что модель атома Томсона категорически противоречила результатам опытов по изучению распределения положительного заряда внутри атома.



Эрнест Резерфорд
(1871—1937)

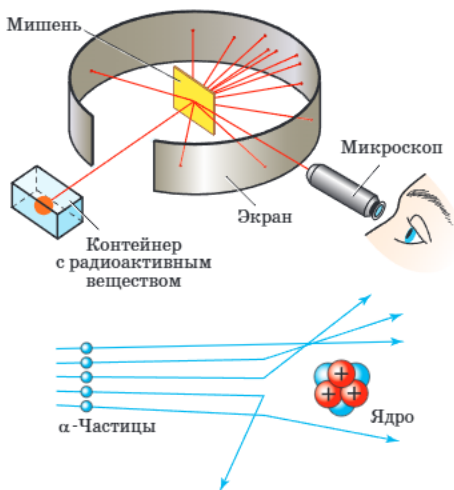
ОПЫТЫ РЕЗЕРФОРДА. Классические опыты по проверке характера распределения заряда атома были осуществлены в 1911 г. английским физиком Э. Резерфордом вместе с сотрудниками. В опытах тонкие мишени из металлической фольги облучали узким пучком быстрых положительно заряженных частиц. Этими частицами были полностью ионизированные атомы гелия, которые испускали соли урана и радия. Они называются *α-частицами*. Быстрые *α-частицы* бомбардировали мишень. После прохождения мишени они попадали на экран, покрытый слоем сернистого цинка. При этом в местах соударения *α-частиц* с экраном возникали крохотные вспышки света, которые наблюдались с помощью микроскопа. Поворотная платформа позволяла перемещать экран и микроскоп по кругу

вокруг мишени, тем самым измеряя угол отклонения *α-частиц* от первоначального отклонения.

При постановке опыта предполагалось, что α -частицы, проходя через тонкий слой вещества мишени, будут отклоняться только на малые углы. Ведь электроны, масса которых очень мала по сравнению с массой α -частиц, не могут существенно повлиять на траекторию α -частицы. Действительно, как показали опыты, подавляющее число α -частиц пронизывало тонкую мишень практически без отклонения от первоначального прямолинейного направления.

При этом оказалось, что некоторые из α -частиц отклонялись на углы, большие 90° , а в отдельных случаях α -частицы отклонялись в направлении, противоположном первоначальному направлению пучка.

Эти результаты оказались совершенно неожиданными для Резерфорда и требовали осмысления. Действительно, чтобы при взаимодействии с атомом вещества α -частица была отброшена назад, она должна была столкнуться с неким массивным и очень малым по размеру образованием внутри атома.



ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА. Опираясь на результаты многочисленных измерений, Резерфорд пришёл к заключению, что единичные акты рассеяния α -частиц на большие углы можно объяснить, только если предположить, что положительный заряд в атоме не распределён равномерно по его объёму, как в модели Томсона, а локализован в центре атома в очень малой области пространства, много меньшей размеров самого атома. В этой области — *атомном ядре* — сосредоточена практически вся масса атома.



Согласно расчётам Резерфорда, для объяснения опытов по рассеянию α -частиц необходимо допустить, что диаметр ядра должен быть порядка 10^{-15} м. При этом электроны атома движутся вокруг ядра подобно тому, как обращаются планеты вокруг Солнца. Поэтому *модель атома Резерфорда* часто называют *планетарной моделью*.

НЕДОСТАТКИ ПЛАНЕТАРНОЙ МОДЕЛИ АТОМА. Согласно законам электродинамики, электроны, движущиеся с ускорением вокруг ядра атома, излучают электромагнитные волны. Поэтому их энергия должна уменьшаться. В результате через малое время (10^{-8} с) 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 опытными данными говорило о том, что **к явлениям микромира законы классической физики неприменимы**.

Дополнительным аргументом в пользу такого заключения служило то обстоятельство, что планетарная модель никак не объясняла, почему каждому химическому элементу соответствуют определённые линейчатые спектры испускания и поглощения и почему положение линий в этих спектрах совпадают.

МОДЕЛЬ АТОМА БОРА. В 1913 г. датский учёный Н. Бор, исходя из планетарной модели атома, попытался объяснить возникшие противоречия. Бор отчётливо понимал, что законы классической физики по своей сути приспособлены для описания непрерывных процессов. Однако дискретный характер спектральных линий, испускаемых атомами химических элементов, свидетельствовал о том, что внутриатомным процессам свойственна определённая прерывистость. Бор, оставаясь в рамках представлений, что движение электронов происходит по выделенным траекториям, выдвинул два предположения, которые назвал *постулатами*.



Нильс Бор
(1885—1962)

ВАЖНО

Постулаты Бора

1. Атом может находиться только в особых стационарных (квантовых) состояниях, каждому из которых соответствует определённая энергия E_n (n — номер состояния). Находясь в стационарных состояниях, атом не излучает и не поглощает энергию.
2. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения, энергия которого равна разности энергий атома в этих стационарных состояниях:

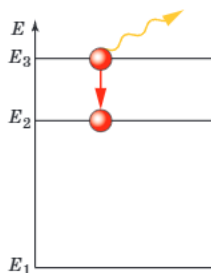
$$h\nu = E_m - E_n,$$

где ν — частота излучения, h — постоянная Планка.

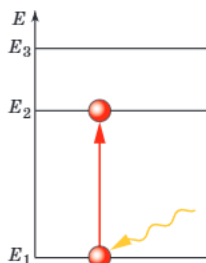
Впоследствии квант излучения получил название **фотон**.

Согласно первому постулату Бора, **электрон в атоме может находиться не на любых орбитах, а лишь на стационарных уровнях, где излучения не происходит**.

При переходе электрона с орбиты, на которой он имеет более высокую энергию, на орбиту с более низкой энергией *фотон излучается*. Если электрон переходит из состояния с меньшей энергией в состояние с большей энергией, то *фотон поглощается*.



Излучение фотона



Поглощение фотона

Модель Бора позволила объяснить происхождение линейчатых спектров веществ. Появление спектральных линий Бор объясняет переходом электронов из одного стационарного состояния в другое. Даже простейший атом водорода с одним

электроном имеет сложный спектр. Бор показал, что наблюдающиеся на опыте спектральные линии в точности связаны с порядковыми номерами возможных орбитальных переходов электрона в атоме водорода.

СПЕКТР УРОВНЕЙ ЭНЕРГИИ АТОМА ВОДОРОДА. Атом имеет наименьшую энергию, когда электрон движется по первой стационарной орбите ($n = 1$):

$$E_1 = -13,6 \text{ эВ.}$$

В атомной и ядерной физике в качестве единицы энергии, кроме джоуля, используется внесистемная единица *электрон-вольт* (эВ).

1 эВ — это энергия, которую приобретает электрон, ускоренный в электрическом поле напряжением 1 В.

Работа электрического поля по переносу электрического заряда равна $A_{\text{эл}} = qU$.

Заряд электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Тогда $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.



При переходе на другие орбиты атом поглощает фотоны, и, следовательно, его энергия увеличивается.

На рисунке показаны значения энергии, соответствующие различным состояниям атома водорода, когда электрон находится на орбитах $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

По второму постулату Бора можно вычислить частоту поглощаемого или испускаемого излучения:

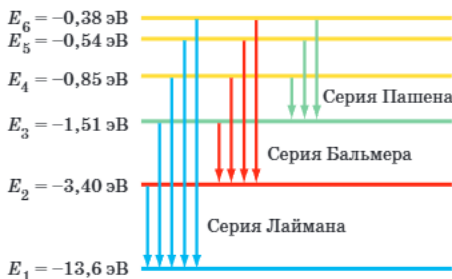
$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}. \text{ Эта частота полно-}$$

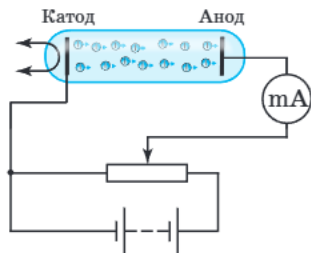
стью согласуется с измеренным линейчатым спектром атома водорода. Спектральные линии группируются в серии по номеру орбиты n и названы в честь учёных, которые их открыли. Например, *серия Лаймана* описывает ряд спектральных линий, которые образуются при переходе электрона с любой орбиты на первую или, наоборот, с первой орбиты на остальные. Линии спектра *серии Бальмера* образуются при переходе электрона на вторую орбиту или со второй орбиты на любую другую. Также известны *серия Пашена* для $n = 3$, *серия Брэкетта* для $n = 4$ и т. д.

Неправильно думать, что один электрон атома водорода способен излучать всю серию спектральных линий. Когда этот электрон переходит с одной орбиты на другую, он излучает только один фотон. Когда мы рассматриваем несколько атомов водорода, то **в различных атомах электроны переходят на разные орбиты, и мы получаем весь линейчатый спектр.**

ОПЫТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СУЩЕСТВОВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ СОСТОЯНИЙ. Согласно расчёта положения спектральных линий атома водорода по модели Бора с опытными данными свидетельствовало о существовании стационарных состояний атома. Вместе с тем потребовались дополнительные эксперименты, которые могли непосредственно подтвердить или опровергнуть этот главный постулат теории Бора.

Такие опыты осуществили в 1913 г. немецкие физики Дж. Франк и Г. Герц. В 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, увеличивалась. Однако при некотором определённом значении напряжения происходило резкое уменьшение силы тока в цепи анода. Последнее означало, что электроны, получившие определённый запас кинетической энергии, практически полностью теряли её в результате столкновений с атомами ртути.

При этом большая 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.

Таким образом, опыты Франка и Герца показали, 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 носят только дискретный характер**.

Обобщая сказанное выше, можно утверждать, что опыты Франка и Герца явились прямым доказательством справедливости основных положений теории Бора.

Выводы

- ! Согласно модели атома Резерфорда, практически вся масса атома сосредоточена в атомном ядре, вокруг которого вращаются электроны.
- ! 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.
- ! Опыты Франка и Герца доказали справедливость основных положений теории Бора.

Ключевые слова

Модель атома Томсона; модель атома Резерфорда; модель атома Бора; опыты Резерфорда; опыты Франка и Герца

и вопросы задания

1. К каким выводам о строении атома пришёл Резерфорд на основе результатов своих опытов?
2. Какие недостатки имела планетарная модель атома Резерфорда?
3. Сформулируйте постулаты Бора.
4. Объясните, как с точки зрения теории Бора можно объяснить совпадение спектров испускания и поглощения некоторых веществ, например газов.
5. Сколько квантов с различной энергией может испустить атом водорода, если его электрон находится на третьем энергетическом уровне?

РАДИОАКТИВНОСТЬ § 101

НОВОЕ В УРОКЕ

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.

- Что такое радиоактивность.
- Что такое радиоактивное излучение.
- Какие частицы входят в состав радиоактивного излучения.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое атом?
- Какие частицы входят в состав атома и в состав атомного ядра?

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.

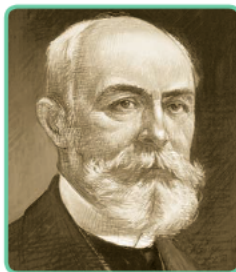
В это время уже было известно явление *люминесценции* — свечения ряда веществ, возникающего после их облучения солнечными лучами. Экспериментируя с солями урана, Беккерель завернул фотопластинку в плотную чёрную бумагу, положил на неё сверху маленький кусочек урановой соли и выставил всё это на солнечный свет.

После проявления фотопластинки на ней обнаружилось тёмное пятно на том месте, где лежал кусочек 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.

ОПЫТЫ КЮРИ. Многие учёные стали повторять опыты Беккереля, в том числе супруги Мария и Пьер Кюри. Они пытались проверить, есть ли среди веществ, не исследованных Беккерелем, такие, которые обладают таинственными свойствами урана.

В одном из первых экспериментов поиски велись с помощью электроскопа. Известно, что воздух — изолятор, поэтому



Антуан Беккерель
(1852—1908)



Мария Склодовская-Кюри (1867—1934)



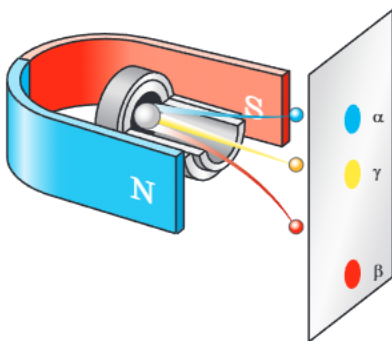
Пьер Кюри
(1859—1906)

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*. Для описания подобных явлений М. Кюри предложила термин *радиоактивность*.

Радиоактивность — это способность ядер некоторых химических элементов самопроизвольно превращаться в ядра других элементов с испусканием излучения.

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 конце XIX — начале XX в. изучением радиоактивности занимались многие выдающиеся физики.

Классический опыт по изучению явления радиоактивности включал установку, которая представляла собой толстостенный свинцовый ящик с прорезью. Внутри ящика помещались крупинцы 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 вся установка помещалась в сильное магнитное поле. На каждую частицу в магнитном поле действует сила, направление которой можно определить по правилу левой руки. Если радиоактивное излучение является потоком частиц с положительным зарядом, то в ситуации, изображённой на рисунке, сила направлена вверх, и весь поток частиц отклоняется вверх. Если радиоактивное излучение — это поток частиц с отрицательным зарядом, 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-излучение** (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 (He), а β -частица —**

это электрон (e^-). Было также установлено, что **γ -излучение представляет собой электромагнитное излучение с очень короткими длинами волн.**

Отметим, что α -, β - и γ -излучения оказались одним из главных инструментов в дальнейшем изучении структуры атома и атомного ядра. Их открытие положило начало эры ядерной физики — раздела физики, изучающего структуру и свойства атомных ядер.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

После открытия альфа-, бета- и гамма-излучений учёные стали изучать их влияние на живые и неживые объекты. Одними из первых, кто обнаружил биологическое действие радиации, были А. Беккерель и супруги Кюри.

Однажды Беккерель взял у супругов Кюри на некоторое время пробирку с радиоактивным радием, а затем несколько часов носил её в кармане жилета. На следующий день на его коже появилось покраснение в форме пробирки.

Пьер Кюри решил проверить на себе воздействие радиоактивных материалов. Он в течение 10 часов носил привязанную к руке пробирку с радием и фиксировал происходящие с кожей изменения. В результате на коже появился сильнейший ожог.

Оказалось также, что весь архив супругов Кюри до сих пор испускает опасное для человека радиоактивное излучение, поэтому хранится в специальных свинцовых контейнерах.

Подробнее о различных видах радиоактивного излучения и методах защиты от него вы узнаете в § 103.

! Радиоактивность — это способность ядер некоторых химических элементов самопроизвольно превращаться в ядра других элементов с испусканием излучения.

! В состав радиоактивного излучения входят α -, β -частицы и γ -излучение.

ВЫВОДЫ

Радиоактивность; состав радиоактивного излучения

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. Что такое радиоактивность?
2. Какие заряженные частицы входят в состав радиоактивного излучения?
3. В чём заключается принципиальное различие между явлениями люминесценции и радиоактивности?

§ 102 СОСТАВ АТОМНОГО ЯДРА

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое зарядовое и массовое число.
- Что такое изотопы.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- 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 имеют сложную структуру.

ЗАРЯДОВОЕ ЧИСЛО. Исследования показали, что *заряд* q атомного ядра равен произведению порядкового номера Z элемента в периодической таблице Д. И. Менделеева на элементарный заряд e :

$$q = Ze.$$

Таким образом, порядковый номер химического элемента связан с зарядом атомного ядра, а следовательно, и с числом электронов в атоме. Поэтому число Z называется **зарядовым числом**. Например, у гелия зарядовое число $Z = 2$, а у углерода $Z = 6$.

ПРОТОННО-НЕЙТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЯДРА. В 1913 г. Э. 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.

Заряд протона является положительным и равным по модулю заряду электрона, т. е. $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса протона более чем в 1800 раз больше массы электрона.

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 **нейтрон**.

В 1932 г. советские учёные Е. Н. Гапон и Д. Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг предложили *протонно-нейтронную модель ядра атома*. По этой теории все ядра состоят из двух видов частиц — протонов и нейтронов.

Протоны и нейтроны называются **нуклонами** (от лат. *nucleus* — ядро), а ядра атомов — **нуклидами**. Поэтому такая модель ядра называется также **нуклонной моделью**.

Протон		заряд: $+1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл масса: $1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрон		заряд: $-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл масса: $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг

МАССОВОЕ ЧИСЛО. Общее число нуклонов в ядре называется **массовым числом** и обозначается буквой A . Массовое число принято выражать в *атомных единицах массы* (а. е. м.) и округлять до целых чисел.

Атомную единицу 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 массового числа A , а внизу — зарядового числа Z . Например, для углерода массовое число равно 12, а зарядовое число равно 6, поэтому записывают: ${}_{6}^{12}\text{C}$.

В общем случае любой химический элемент периодической таблицы Д. И. Менделеева можно представить в виде ${}_{Z}^{A}\text{X}$, где X — символ химического элемента.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Радиус ядра атома можно оценить по формуле

$$R = r_0 A^{1/3},$$

где $r_0 = 1,3 \cdot 10^{-15}$ м, A — массовое число.

По сравнению с размерами самого атома (около 10^{-10} м) ядро атома крайне мало (приблизительно 10^{-14} м), т. е. ядро меньше атома на 4 порядка (в 10 000 раз). Представим, что атомное ядро увеличили до размеров горошины, тогда атом станет размером с футбольное поле.

ИЗОТОПЫ. Учёные, исследуя свойства радиоактивных веществ и измеряя массы их атомных ядер, обнаружили, что у одного и того же химического элемента встречаются атомы с различающимися 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, называются **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 один протон, а число нейтронов может быть равно 0, 1, 2. Эти изотопы имеют названия: *протий* (${}_{1}^1\text{H}$), *дейтерий* (${}_{1}^2\text{H}$) и *тритий* (${}_{1}^3\text{H}$).

В настоящее время в лабораториях получены изотопы водорода с числом нейтронов 3, 4 и даже 6.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Ядро тяжёлого изотопа водорода дейтерия состоит из протона и нейтрона. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая тяжёлая вода D_2O , свойства которой заметно отличаются от свойств обычной воды. Например,

температура кристаллизации тяжёлой воды равна $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура кипения — $101,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Внешне тяжёлая вода выглядит как обычная — без цвета и запаха. Тяжёлую воду можно выделять из обычной воды либо синтезировать искусственно. В природных водах примесь тяжёлой воды к обычной находится в соотношении $1 : 5500$.

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.

▶ ЭТО ИНТЕРЕСНО

Подавляющее большинство изотопов относится к числу искусственно синтезированных, т. е. полученных в результате различных ядерных превращений. Среди искусственных радиоизотопов более 150 принадлежат к так называемым трансурановым элементам, не встречающимся на Земле. Общее количество изотопов, которые удастся синтезировать в будущем, пока неизвестно. Некоторые теоретические модели, разработанные физиками-ядерщиками, оценивают возможное число атомов, способных к существованию, порядка 6000!

ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА. Изотопы бывают устойчивые (*стабильные*) и неустойчивые (*радиоактивные*). В настоящее время известно более 250 стабильных изотопов химических элементов и более 3000 радиоактивных изотопов. Для каждого радиоактивного вещества существует определённый промежуток времени, за который число радиоактивных ядер уменьшается примерно в 2 раза. Этот промежуток времени называется **периодом полураспада**.

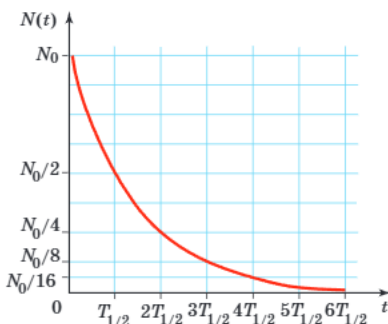
Пусть в некоторый момент времени $t = 0$ вещество состоит из N_0 радиоактивных ядер. Через время $t_1 = T_{1/2}$, равное периоду полураспада, нераспавшихся ядер

останется $N_1 = \frac{N_0}{2}$. Через время $t_2 = 2T_{1/2}$, равное двум периодам полураспада, ядер, которые не распадутся, останется $N_2 = \frac{N_1}{2} = \frac{N_0}{4}$. Через время $t_3 = 3T_{1/2}$

останется $N_3 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_0}{8}$ нераспавшихся ядер и т. д.

Зависимость числа нераспавшихся частиц от времени описывается графиком, изображённым на рисунке.

Исследования показали, что радиоактивные изотопы могут иметь самые различные периоды полураспада — от десяти-миллионных долей секунды до миллиардов лет. Но период полураспада для каждого изотопа постоянен и не изменяется при изменении внешних условий (давлении, температуры и т. д.).



90 Th Торий 232	92 U Уран 238	94 Pu Плутоний 239	88 Ra Радий 226	84 Po Полоний 218	84 Po Полоний 212
$1,39 \cdot 10^{10}$ лет	$4,56 \cdot 10^9$ лет	24 100 лет	1590 лет	3,05 мин	$3 \cdot 10^{-7}$ с

ВЫВОДЫ

- ! В состав всех ядер входят протоны и нейтроны. Протоны и нейтроны называются нуклонами.
- ! Протонно-нейтронная (нуклонная) модель ядра предполагает, что все ядра атомов состоят из двух видов частиц — протонов и нейтронов.
- ! Общее число нуклонов в ядре называется массовым числом.
- ! Ядра, имеющие одинаковое число протонов и разное число нейтронов, называются изотопами.
- ! Период полураспада — это промежуток времени, за который число радиоактивных ядер уменьшается в 2 раза.

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

И ВОПРОСЫ
ЗАДАНИЯ

Протон; нейтрон; зарядовое число; протонно-нейтронная модель ядра; массовое число; изотопы; период полураспада

1. Что такое зарядовое и массовое числа?
2. Чем могут различаться ядра атомов одного и того же химического элемента?
3. Какое отношение имеет атомный номер химического элемента к числу протонов в атомном ядре, к числу электронов в атоме?
4. Объясните, изменяется ли химическая природа элемента при испускании или поглощении γ -квантов ядром атома.
5. Сравните ядра $^{208}_{82}\text{Pb}$ и $^{235}_{92}\text{U}$ по типу и количеству входящих в их состав нуклонов.
6. Чем по составу различаются ядра изотопов фтора $^{17}_9\text{F}$ и $^{19}_9\text{F}$; цинка $^{62}_{30}\text{Zn}$ и $^{70}_{30}\text{Zn}$?
7. Определите количество протонов и нейтронов, входящих в состав следующих ядер: ^1_1H ; ^3_2He ; ^7_3Li ; ^6_3Li ; $^{16}_8\text{O}$; $^{20}_{10}\text{Ne}$; $^{34}_{16}\text{S}$; $^{48}_{20}\text{Ca}$; $^{235}_{92}\text{U}$; $^{237}_{93}\text{Np}$; $^{268}_{105}\text{Db}$.
8. Сколько процентов от первоначального количества радиоактивных ядер остаётся через время, равное: периоду полураспада; двум периодам полураспада?

§ 103 ВЛИЯНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ. ДОЗИМЕТРИЯ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое поглощённая доза излучения.
- Что такое эквивалентная поглощённая доза излучения.
- Единицы в дозиметрии.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое альфа-частицы, бета-частицы и гамма-излучение?
- Что такое радиоактивность?

Излучения, возникающие при радиоактивных превращениях и распадах, оказывают очень сильное воздействие на все живые организмы. Рассмотрим, какое излучение наиболее опасно для человека и как от него можно защититься.

ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ

Космическое излучение и природные радиоактивные вещества

ИСКУССТВЕННЫЕ

Отходы атомной промышленности, радиоактивные отходы, источники, используемые в биологии, медицине, сельском хозяйстве и др.

ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ. Когда в обыденной жизни употребляется слово «радиация», то имеется в виду ионизирующее излучение, которое представляет собой потоки альфа- и бета-частиц, гамма-квантов и нейтронов.

Все существа на Земле подвергаются постоянному воздействию ионизирующей радиации. *Ионизирующее излучение* (или *радиоактивный фон*) образуется за счёт естественных и искусственных источников излучения.

Естественные источники — это космическое излучение и природные радиоактивные вещества. Космическое излучение представляет собой поток частиц, которые непрерывно падают на поверхность Земли из космоса. Среди природных радиоактивных изотопов наибольшей радиоактивностью отличаются изотопы урана и тория, которые входят в состав некоторых минералов и горных пород.

Искусственные источники — это отходы атомной промышленности, радиоактивные изотопы, используемые в биологии, медицине, сельском хозяйстве и др.

Естественный радиоактивный фон существовал в природе всегда. Он играет важную роль в различных физических, химических, биологических процессах.

Для жизни и здоровья человека радиоактивное излучение опасно только тогда, когда превышает определённые допустимые нормы.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Природная радиация является частью окружающего мира, и её не надо бояться. Важно знать и понимать, какого рода облучению вы потенциально можете подвергнуться в той или иной ситуации. Например, когда вы летите на самолёте на высоте 10 000 м, радиа-

ционный фон превышает фон, который находится у поверхности Земли, в 10 раз. Однако, это не превышает 1% от общего облучения организма за счёт всех источников.

Ионизирующее излучение, проходя через вещество, выбивает электроны из его атомов и молекул, т. е. происходит ионизация среды. Ионизация атомов и молекул живой клетки может вызвать её значительные поражения.

В то же время излучения применяются для лечения некоторых заболеваний, например рака. Поэтому важно уметь определять количество (дозу) излучения, проходящего через то или иное вещество. Этим занимается *дозиметрия*.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ. Мощность (интенсивность) источника излучения в заданный момент времени характеризуют его **активностью**, или числом распадов в секунду. В СИ единицей активности является *беккерель* (Бк). 1 Бк — это активность такого радиоактивного источника, в котором за 1 с происходит 1 радиоактивный распад. Также используется единица активности *кюри* (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Воздействие излучений на живые организмы характеризуется физической величиной, называемой *дозой излучения*. **Доза излучения** — это количество переданной организму энергии. Чем больше энергия ионизирующего излучения, переданная организму, тем сильнее могут быть поражения тканей.

Для удобства измерения используется **поглощённая доза излучения** — энергия ионизирующего излучения, поглощённая облучаемым веществом и рассчитанная на единицу массы. Поглощённая доза излучения равна отношению энергии, поглощённой телом, к его массе:

$$D = \frac{E}{m}.$$

В СИ дозу излучения выражают в *греях* (Гр). Один грей равен поглощённой дозе излучения, при которой облучённому веществу массой 1 кг передаётся энергия любого ионизирующего излучения, равная 1 Дж: 1 Гр = 1 Дж/1 кг.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Самой первой единицей дозы излучения был *рентген* (Р); он определялся по ионизации, производимой излучением. В настоящее время 1 Р определяют как дозу рентгеновского или γ -излучения, при которой в одном килограмме воздуха поглощается энергия $0,878 \cdot 10^{-2}$ Дж.

Поглощённая доза излучения зависит от вида и интенсивности излучения, а также от времени облучения. Чем больше поглощённая доза, тем больший вред она может принести живому организму.

Но биологический эффект, который оказывает ионизирующее излучение на живой организм, зависит не только от поглощённой дозы излучения, но и от вида ионизирующего излучения. Поэтому говорят, что разные виды излучения обладают различной *относительной биологической эффективностью* (ОБЭ). Биологическое воздействие любого вида ионизирующего излучения принято сравнивать с аналогичными эффектами, возникающими вследствие рентгеновского излучения или γ -излучения, принятых за образец.

На основе данных об ОБЭ каждый вид ионизирующего излучения характеризуется своим *коэффициентом качества*. Значения коэффициента качества для рентгеновского и γ -излучения $k = 1$. При этом α -излучение имеет коэффициент

качества $k = 20$, а это означает, что при одинаковой поглощённой дозе биологический эффект от действия α -излучения в 20 раз больше, чем от γ -излучения.

Произведение коэффициента качества k и поглощённой дозы D называется эквивалентной поглощённой дозой H :

$$H = kD.$$

Эквивалентная поглощённая доза является количественной мерой последствий облучения живого организма. Единица эквивалентной дозы в СИ — *зиверт* (Зв). Из формулы следует, что 1 Зв равен поглощённой дозе в 1 Гр для рентгеновского или γ -излучения, у которых $k = 1$. Или, по-другому, один *зиверт* — это количество энергии, поглощённой килограммом биологической ткани, равное по воздействию поглощённой дозе в 1 Гр.

Равенство *зиверта* и *грея* показывает, что эквивалентная поглощённая доза и поглощённая доза имеют одинаковую размерность. Но это не означает, что эквивалентная доза численно равна поглощённой дозе. При определении эквивалентной дозы учитывается биологическое воздействие радиации, она равна поглощённой дозе, умноженной на коэффициент качества, зависящий от вида излучения, и характеризует биологическую активность того или иного вида излучения.

ФИЗИКА В ЖИЗНИ

Естественный фон радиации (космическое излучение, радиоактивность окружающей среды и т. д.) составляет до 0,2—0,3 мкЗв/ч, или около 2—3 мЗв в год на человека. Для людей, которые работают с радиоактивными источниками, устанавливается предельно допустимая доза излучения, равная 0,05 Зв в год. Во время полёта на самолёте на высоте 10 км доза излучения составляет около 5 мкЗв в час, а во время рентгеновского обследования — около 0,1 мЗв. Доза излучения 3—10 Зв, полученная за короткое время, смертельна.

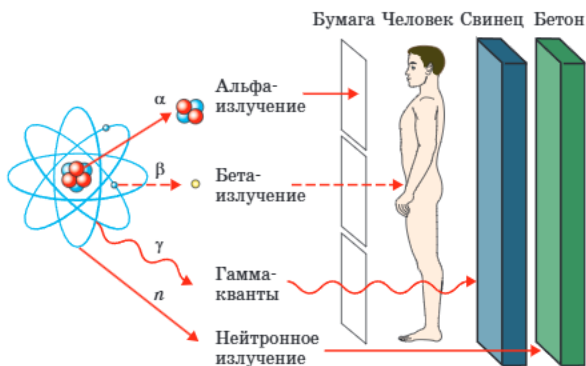
ДОЗИМЕТРЫ. Приборы для измерения эквивалентной поглощённой дозы ионизирующего излучения за некоторый промежуток времени называются *дозиметрами*. Дозиметры бывают профессиональные, бытовые, индивидуальные, промышленные и военные.

В зависимости от типа дозиметра они могут измерять дозы α -, β - или γ -излучения.

ЗАЩИТА ОТ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ. Излучения разных видов оказывают неодинаковое воздействие на организм, что объясняется разной ионизирующей способностью.

Альфа-излучение представляет собой поток ядер гелия, состоящих из двух протонов и двух нейтронов. Проникающая способность этого излучения крайне мала, длина их пробега в воздухе 2—10 см, а длина пробега α -частиц в биологических тканях 30—50 мкм. Альфа-излучение не способно проникнуть через наружный слой кожи и не представляет опасности до тех пор, пока вещества, испускающие альфа-частицы, не попадут внутрь организма. Альфа-частицы полностью задерживаются листом бумаги. Резиновые перчатки также обеспечивают достаточный уровень защиты от альфа-излучений.

Более проникающим и опасным для организма является *бета-излучение*. Бета-излучение — это поток электронов, испускаемых ядрами при бета-распаде. Длина пробега β -частиц в воздухе от 1 см до 20 м в зависимости от их энергии. Они могут быть задержаны цинковой пластинкой толщиной в несколько миллиметров. Также для защиты используют экраны из материалов с небольшой атомной массой: плексигласа, алюминия, стекла и т. д.



Гамма-излучение — это коротковолновое электромагнитное излучение с длинами волн в диапазоне примерно от 10^{-10} до 10^{-14} м. В силу большой проникающей способности оно представляет опасность для живых организмов. Чтобы существенно ослабить гамма-излучение, нужна либо свинцовая пластина толщиной 5 см, либо слой бетона толщиной 30 см, либо слой грунта толщиной 60 см.

Нейтронное излучение — это поток частиц, не имеющих электрического заряда. Масса нейтрона приблизительно в 4 раза меньше, чем масса α -частиц. Нейтронное излучение обладает высокой проникающей способностью и представляет для человека наибольшую опасность из всех видов излучения.

ВЫВОДЫ

- ! Активность излучения — число распадов в секунду.
- ! Доза излучения — количество переданной организму энергии.
- ! Поглощённая доза излучения — энергия ионизирующего излучения, поглощённая облучаемым веществом и рассчитанная на единицу массы.
- ! Эквивалентная поглощённая доза является количественной мерой последствий облучения живого организма и равна произведению поглощённой дозы излучения на коэффициент качества для данного вида излучения.
- ! Дозиметры — приборы для измерения эквивалентной поглощённой дозы ионизирующего излучения за некоторый промежуток времени.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Ионизирующее излучение; радиоактивный фон; активность; доза излучения; защита от излучения

1. Чем отличается поглощённая доза излучения от эквивалентной поглощённой дозы излучения?
2. Каков физический смысл единицы дозы излучения?
3. Почему для хранения радиоактивных материалов используют толстостенные свинцовые контейнеры?

§ 104 ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ И ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое ядерные силы.
- Что такое ядерные реакции.
- Как открыли протон и нейтрон.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Какие частицы входят в состав атомных ядер?
- Какие взаимодействия существуют в природе?

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?

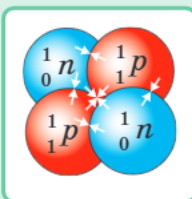
ЯДЕРНЫЕ СИЛЫ. Вы знаете, что, кроме электромагнитных сил, в природе существуют также гравитационные силы. Может быть, стабилизирующую роль в ядрах играет именно гравитационное взаимодействие между нуклонами? Но, как показывают расчёты, сила гравитационного притяжения между двумя протонами в ядре пренебрежимо мала по сравнению с силой электрического отталкивания. Это означает, что между ядерными частицами действуют силы особой природы, радикально отличающиеся от гравитационных и электромагнитных сил. Эти силы называются **ядерными силами**.

Ядерные силы чрезвычайно велики: на расстояниях, сравнимых с размерами самих нуклонов, эти силы примерно на два порядка больше электромагнитных сил. Поэтому ядерное взаимодействие также называется **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.

Особый характер ядерных сил проявляется также в том, что они не зависят от того, является ли нуклон заряженным или нет: два протона взаимодействуют друг с другом так же, как протон с нейтроном или нейтрон с нейтроном (зарядовая независимость ядерных сил).

ЭТО ИНТЕРЕСНО



Из-за малого радиуса действия ядерных сил нуклоны осуществляют взаимодействие только с ближайшими соседями. В этом смысле ядро напоминает каплю жидкости, в которой молекулы взаимодействуют лишь с соседними молекулами, а частицы, находящиеся на поверхности капли, стремятся втянуться внутрь, создавая поверхностное натяжение.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. Характер взаимодействия между нуклонами в ядрах тесно связан с процессами превращения ядер атомов одних элементов в ядра атомов других элементов. Такие превращения называются **ядерными реакциями**.

Кроме ядер, в ядерных реакциях могут также участвовать нейтроны, протоны, частицы, которые получаются в результате ядерных распадов: альфа-частицы, гамма-кванты, бета-частицы и ряд других частиц.

Ядерные реакции записывают в виде специальных формул, в которых обозначены атомные ядра и элементарные частицы.

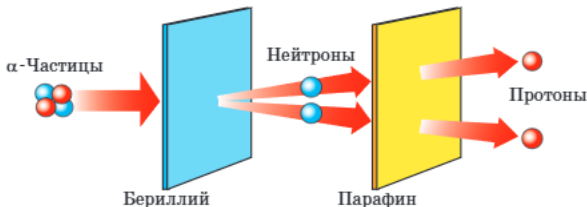
ОТКРЫТИЕ ПРОТОНА. Впервые ядерную реакцию осуществил Э. Резерфорд в 1919 г. Установка Резерфорда состояла из источника α -частиц и регистратора этих частиц — флуоресцирующего экрана. Всё это устройство было помещено в сосуд с воздухом. На экране можно было наблюдать достаточно яркие вспышки от α -частиц. Когда давление в сосуде увеличили, пробег α -частиц уменьшился и вспышки пропали: частицы не долетали до экрана. Но иногда на экране стали появляться бледные вспышки. Они были точно такими же, как от попадания на экран ядер водорода. Таким образом было открыто, 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 **протон** (1_1p).

Эту ядерную реакцию можно записать следующим образом:



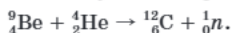
ОТКРЫТИЕ НЕЙТРОНА. В 1920 г. Э. Резерфорд высказал предположение о возможном существовании ядерной частицы, масса которой равна массе протона, а заряд отсутствует.

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 получили название **нейтроны**, обозначаются 1_0n .

Ядерная реакция записывается следующим образом:



ЭТО ИНТЕРЕСНО

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.

Поскольку нейтрон не обладает зарядом, он может практически беспрепятственно проникать в атомные ядра. По этой причине нейтрон является уникальным инструментом для осуществления различных ядерных реакций. Особенно эффективно взаимодействуют с ядрами так называемые медленные нейтроны, скорости которых сопоставимы со скоростями теплового движения молекул газов.

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ. При осуществлении ядерных реакций выполняются законы сохранения электрического заряда, *полного числа нуклонов*, а также *энергии и импульса*.

ВАЖНО

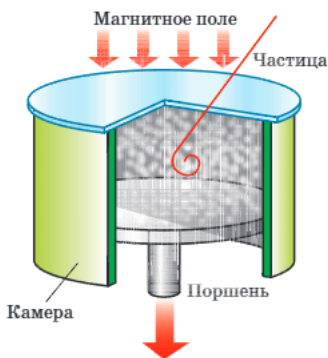
Закон сохранения зарядового числа: сумма зарядовых чисел ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядовых чисел ядер и частиц, образовавшихся в результате реакции: $Z = \text{const}$.

Закон сохранения массового числа: сумма массовых чисел ядер и частиц (нуклонов), вступающих в реакцию, равна сумме массовых чисел ядер и частиц (нуклонов), образовавшихся в результате реакции: $A = \text{const}$.

Например, в реакции (1) расщепления ядра азота α -частицей сохраняются электрический заряд: $2 + 7 = 8 + 1$, а также массовое число: $14 + 4 = 17 + 1$.

Используя законы сохранения массового и зарядового чисел, можно определить неизвестный продукт ядерной реакции.

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ. Частицы, образующиеся в результате ядерных реакций, нельзя увидеть невооружённым глазом. Но учёные узнают о результатах экспериментов в атомной и ядерной физике с помощью специальных приборов, которые позволяют не только обнаружить частицы, но и определить траекторию их движения и основные характеристики, такие как масса, заряд, энергия, импульс и др.



Один из физических приборов для регистрации следов заряженных частиц называется **камерой Вильсона**. Она представляет собой стеклянный цилиндр, внутри которого может двигаться поршень. На дне камеры находится чёрная ткань, увлажнённая смесью воды со спиртом. Камера заполнена насыщенными парами этих жидкостей. Принцип действия камеры Вильсона основан на явлении конденсации. Известно, что конденсация происходит лучше, если в воздухе есть так называемые центры конденсации (например, мельчайшие пылинки). При быстром




опускании поршня парь в камере расширяются, их температура понижается, и пар становится перенасыщенным. Когда в камеру попадает заряженная частица, она образует на своём пути множество ионов. Эти ионы и являются центрами конденсации для перенасыщенного пара. Вокруг них образуются мельчайшие капельки жидкости. Таким образом, вдоль всего пути частицы остаётся видимый след из конденсированных капелек, который можно сфотографировать.

Советские физики П. Л. Капица и Д. В. Скобельцын предложили помещать камеру Вильсона в однородное магнитное поле. Под действием магнитного поля заряженная частица искривляет траекторию своего движения. По кривизне траектории можно судить об отношении заряда частицы к её массе.

Ещё один прибор — *счётчик Гейгера* позволяет автоматически подсчитывать попавшие в него заряженные частицы, но не распознавать их. Счётчик Гейгера способен регистрировать до 10^4 частиц в секунду. Он применяется в основном для регистрации электронов и γ -квантов. Недостатком счётчика Гейгера является то, что прибор регистрирует частицы, но не распознаёт их, а также не измеряет их энергию.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Проще всего обнаруживать и регистрировать заряженные частицы, так как они, проходя через вещество, вызывают ионизацию атомов среды. Нейтральные частицы обнаружить сложнее, чем заряженные. В результате прохождения нейтральных частиц через вещество не происходит ионизации среды. Нейтральные частицы обнаруживают только после их взаимодействия с другими частицами, в результате которого образуются заряженные частицы, которые уже легко регистрируются приборами.

-  Силы, действующие между протонами и нейтронами в ядре, называются ядерными.
-  Процесс превращения ядер атомов одних элементов в ядра атомов других элементов называется ядерной реакцией.
-  При осуществлении ядерных реакций выполняются законы сохранения электрического заряда, полного числа нуклонов, а также энергии и импульса.

Ядерные силы; ядерные реакции; закон сохранения зарядового числа; закон сохранения массового числа; камера Вильсона; счётчик Гейгера

ВЫВОДЫ

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. Как соотносится ядерное взаимодействие с другими видами взаимодействий в природе?
2. Что такое ядерная реакция?
3. Какие законы сохранения выполняются при ядерных реакциях?
4. Счётчик Гейгера бытового дозиметра регистрирует ионизирующие частицы даже тогда, когда поблизости от него нет радиоактивных препаратов. Чем это обусловлено?

§ 105 ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

НОВОЕ В УРОКЕ

- Что такое энергия связи атомных ядер.
- Как связаны масса и энергия.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое ядерные силы?
- Что такое ядерные реакции?

Устойчивость атомных ядер, а также энергетические превращения при ядерных реакциях зависят как от характера взаимодействия между отдельными нуклонами, так и от такой важной физической величины, как энергия связи ядра.

ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР. 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** называется та энергия, которая необходима для расщепления ядра на составляющие частицы.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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.

СВЯЗЬ МАССЫ И ЭНЕРГИИ. Определение 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.

Это уравнение показывает, что полная энергия E_0 находящейся в покое частицы или системы (например, протона, нейтрона, атомного ядра, молекулы) связана с её массой m размерным множителем c^2 . Например, зная массу протона m_p и скорость света c , можно вычислить энергию покоя протона:

$$E_0 = m_p c^2 = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 \approx 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}.$$

В атомной и ядерной физике в качестве единицы энергии, кроме джоуля, используется внесистемная единица *электрон-вольт* (эВ).

1 эВ — это энергия, которую приобретает электрон, ускоренный в электрическом поле напряжением 1 В.

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Тогда энергия покоя протона:

$$E_0 = \frac{1,5 \cdot 10^{-10}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ эВ} = 9,38 \cdot 10^8 \text{ эВ} = 938 \text{ МэВ}.$$

ДЕФЕКТ МАССЫ. В классической механике масса тела равна массе составляющих его частей. Действительно, если положить на одну чашу рычажных весов целую чашку и на другую — все осколки от точно такой же разбитой чашки, то весы останутся в равновесии.

В ядерной физике всё иначе. Как показали точные измерения, масса ядра всегда меньше суммы масс слагающих его протонов и нейтронов.

Рассмотрим ядро гелия ${}^4_2\text{He}$, состоящее из двух протонов и двух нейтронов. Масса протона $m_p = 1,007276$ а. е. м., масса нейтрона $m_n = 1,008665$ а. е. м.

С одной стороны, массу ядра гелия можно выразить как общую массу нуклонов, входящих в его состав:

$$M_{\Sigma} = 2m_p + 2m_n = 4,0319 \text{ а. е. м.} \quad (1)$$

С другой стороны, в соответствии с точными измерениями массы ядра гелия

$$M_{\text{He}} = 4,0026 \text{ а. е. м.} \quad (2)$$

Это значит, что

$$M_{\text{He}} < 2m_p + 2m_n. \quad (3)$$

Разность между суммой масс покоя нуклонов, образующих атомное ядро, и массой покоя этого атомного ядра называется **дефектом массы**:

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}. \quad (4)$$

Так как масса ядра меньше суммы масс слагающих его протонов и нейтронов, то при слиянии свободных протонов и нейтронов в ядро должна выделяться энергия в виде излучения γ -квантов. Эта энергия равна энергии связи ядра:

$$E_{\text{св}} = \Delta mc^2 = (Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}})c^2. \quad (5)$$

Вычислим энергию связи ядра гелия.

С учётом масс (1) и (2) дефект масс окажется равным

$$\Delta m = 4,0319 \text{ а. е. м.} - 4,0026 \text{ а. е. м.} = 0,0293 \text{ а. е. м.}$$

По формуле (5) получим:

$$E_{\text{св}} = 0,0293 \text{ а. е. м.} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ м}^2/\text{с}^2 = 27,4 \text{ МэВ.}$$

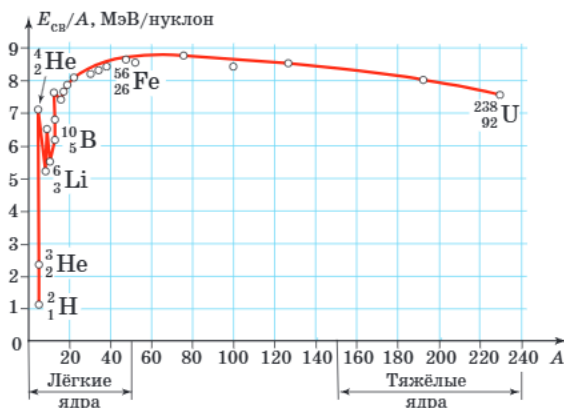
По масштабу энергий микромира это огромная величина. Большие значения энергий связи нуклонов свидетельствуют о колоссальной силе взаимодействия, удерживающей протоны и нейтроны внутри ядра, несмотря на большое электростатическое отталкивание между протонами.

По формуле (5) можно рассчитать значение энергии, выделяющейся или поглощающейся при различных ядерных реакциях. В этом случае под Δm следует понимать разность между суммарной массой частиц и ядер, вступающих в реакцию, и суммарной массой продуктов реакции. Если $\Delta m > 0$, то ядерная реакция проходит с выделением энергии; если $\Delta m < 0$, то ядерная реакция идёт с поглощением энергии.

Ядро	Энергия связи, МэВ
${}^4_2\text{He}$	28
${}^{12}_6\text{C}$	92
${}^{16}_8\text{O}$	128
${}^{32}_{16}\text{S}$	272

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ. В ядерной физике одной из важных характеристик, описывающих стабильность ядра, является **удельная энергия связи** — энергия связи, приходящаяся на один нуклон ($E_{св}/A$).

Удельная энергия связи экспериментально определена для многих ядер в широком диапазоне массовых чисел. Чем больше значение удельной энергии связи, тем стабильнее ядро. По кривой зависимости удельной энергии связи от массового числа можно увидеть, что наиболее стабильными являются ядра с массовыми числами от 50 до 60 (железо и ядра с близким к нему числом протонов) — их энергия связи является максимальной и достигает 8,7 МэВ/нуклон. Когда число протонов и нейтронов в ядре велико (для элементов тяжелее урана), ядро становится менее стабильным, а удельная энергия связи составляет около 7,5 МэВ/нуклон.



ВЫВОДЫ

- ! Энергия связи ядра — энергия, которая необходима для расщепления ядра на составляющие частицы.
- ! Разность между суммой масс покоя нуклонов, образующих атомное ядро, и массой покоя этого атомного ядра называется дефектом массы.
- ! Удельная энергия связи — энергия связи, приходящаяся на один нуклон. Характеризует стабильность ядер.

КЛЮЧЕВЫЕ
СЛОВА

Энергия связи; взаимосвязь массы и энергии; дефект массы; удельная энергия связи

ВОПРОСЫ
И ЗАДАНИЯ

1. В чём заключается взаимосвязь энергии и массы?
2. Как связана энергия связи ядра с его дефектом масс?
3. Почему ядра в области массовых чисел $A \sim 60-100$ оказываются наиболее устойчивыми?
4. На чём основан расчёт энергии, выделяющейся в ядерных реакциях?

ДЕЛЕНИЕ И СИНТЕЗ ЯДЕР § 106



Существует два типа ядерных реакций: *реакции деления* тяжёлых ядер на более лёгкие и *реакции слияния* (синтеза) лёгких ядер в более тяжёлые.

НОВОЕ В УРОКЕ

- Какие частицы и ядра образуются при делении ядер урана.
- Как происходит процесс цепной ядерной реакции.
- Какие реакции называются термоядерными.

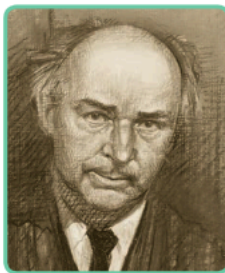
ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое ядерные реакции?
- Какие частицы входят в состав атомного ядра?
- Что такое ядерные силы?

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР УРАНА. В 1939 г. немецкие учёные О. Ган и Ф. Штрассман сделали открытие, которое коренным образом изменило жизнь человечества. Они обнаружили деление ядер урана на две части при их бомбардировке нейтронами. Был создан и новый источник энергии, и целая отрасль энергетики — *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, действуют и силы электростатического отталкивания между протонами. Когда крайние части ядра во время колебаний отдаляются на расстояние, на котором ядерные силы уменьшаются, то ядро может разделиться. 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.

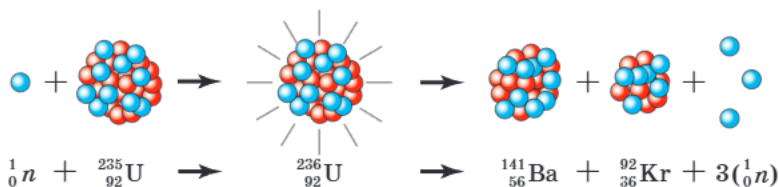
На рисунке (см. с. 182) показана реакция деления ядра урана-235 под действием попавшего в него нейтрона. В данном случае ядрами, которые образовались в процессе деления, являются ядра бария (Ba) и криптона (Kr). При этом выделяется энергия около 200 МэВ. Это обусловлено разницей в энергии связи между начальным тяжёлым ядром и обоими ядерными фрагментами. Если посмотреть на график удельной энергии связи, то можно увидеть, что для урана энергия связи около 7,5 МэВ на нуклон, а для ядер криптона и бария — около 8,6 МэВ на нуклон. Разность составляет примерно 1 МэВ на нуклон, а общее число нуклонов в данном процессе 236. Перемножив эти две величины, можно качественно оценить энергию, выделяемую в процессе деления урана.



Фридрих Штрассман
(1902—1980)



Отто Ган
(1879—1968)



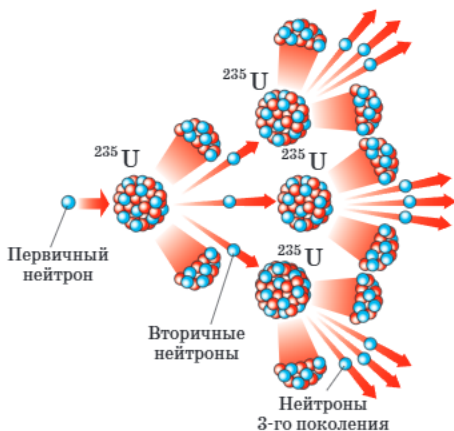
ФИЗИКА В ЖИЗНИ

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 делении 1 кг урана-235 выделяется энергия, которую можно получить при сжигании 3000 т каменного угля, это примерно железнодорожный состав из 60 вагонов.

Советские учёные К. А. Петржак и Г. Н. Флёрв в 1940 г. установили, 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.

Кроме урана, некоторые элементы, стоящие в конце Периодической системы химических элементов Д. И. Менделеева, также способны делиться не только при их бомбардировке нейтронами, но и самопроизвольно.



ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР.

При работе крупной ядерной установки одновременно делится очень большое число ядер урана, поэтому выделяется огромная энергия. Но где взять необходимое для такого деления 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 называется **цепной ядерной реакцией**.

Однако нескольких ядер урана недостаточно для протекания цепной ядерной реакции, так как образующиеся нейтроны не все могут участвовать в последующем делении. Наименьшая масса вещества, при которой возможно протекание цепной реакции, называется **критической массой**.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

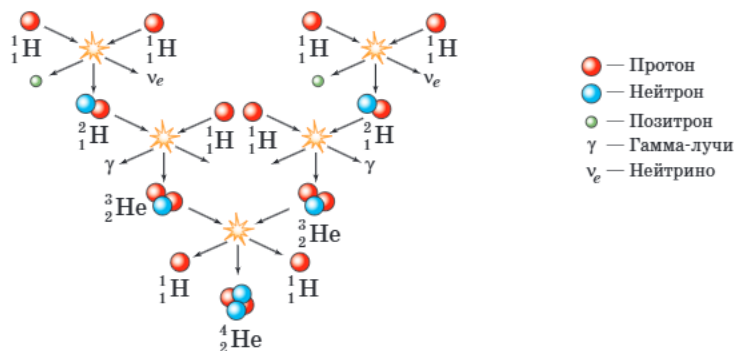
В атомной бомбе происходят *неуправляемые цепные реакции*. В них за короткое время распадается огромное количество ядер, в результате чего выделяется колоссальная энергия.

Управляемые цепные реакции используют в устройствах, называемых *ядерными (атомными) реакторами*.

Первый ядерный реактор был построен в 1942 г. в США под руководством итальянского физика Э. Ферми. В Советском Союзе первый реактор был построен в 1946 г. под руководством И. В. Курчатова.

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.

Подобные реакции могут протекать только при очень высоких температурах, поэтому они называются **термоядерными**.



Термоядерные реакции, происходящие на Солнце

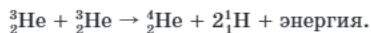
1. Происходит взаимодействие двух протонов, в результате которого образуется изотоп водорода, называемый дейтерий, а также другие частицы (позитрон — частица с массой, равной массе электрона, и положительным электрическим зарядом, равным по модулю заряду электрона, и нейтрино — частица с малой массой, не имеющая заряда) и выделяется некоторое количество энергии:



2. Дейтерий вступает во взаимодействие с другим протоном, в результате чего образуется ядро гелия-3:



3. Два ядра гелия-3 взаимодействуют между собой, образуется стабильный изотоп гелия-4, выделяются два протона и энергия:



Энергетический выход реакций слияния чрезвычайно высок. Например, в реакции синтеза гелия выделяется примерно в 4 раза больше энергии на один нуклон по сравнению с делением тяжёлых ядер.



Оценим, какая энергия выделяется в реакции слияния двух ядер гелия-3 в ядро гелия-4 с образованием двух протонов. Вернёмся к графику зависимости удельной энергии связи от массового числа (с. 180). Удельная энергия связи ядра гелия-3 равна 2,5 МэВ/нуклон, а ядра гелия-4 — 7,1 МэВ/нуклон.

В ядре ${}^3_2\text{He}$ находится 3 нуклона, в реакцию вступают 2 атома гелия-3, поэтому энергия связи исходных частиц равна $2 \cdot 3 \cdot 2,5 = 15$ МэВ.

В ядре ${}^4_2\text{He}$ 4 нуклона, поэтому их энергия связи равна $7,1 \cdot 4 = 28,4$ МэВ.

Следовательно, энергетический выход рассматриваемой реакции

$$Q = 28,4 - 15 = 13,4 \text{ МэВ.}$$

Это приблизительно соответствует экспериментальным данным.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Неуправляемая термоядерная реакция протекает в водородной бомбе. Первая водородная бомба была создана в СССР под руководством А. Д. Сахарова и В. Л. Гинзбурга и взорвана на полигоне в 1953 г.

После открытия термоядерных реакций появилась идея создания термоядерного реактора. Первые исследования такой возможности появились в 1950-х гг.

В 1958 г. в СССР в Институте атомной энергии (позже имени И. В. Курчатова) была построена первая установка, способная создавать условия для осуществления управляемого термоядерного синтеза, — **токамак** (тороидальная камера с магнитными катушками).

В настоящее время реализуется международный проект ИТЭР по созданию прототипа термоядерного реактора.

ВЫВОДЫ

- ❗ Деление ядер — это процесс, в ходе которого ядро атома распадается на два или три ядра-осколка.
- ❗ Термоядерные реакции — реакции синтеза (слияния) лёгких ядер, протекающие при высоких температурах.
- ❗ В реакциях деления и синтеза ядер выделяется огромная энергия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Деление ядер урана; самопроизвольное деление; цепная ядерная реакция; управляемая реакция; ядерный реактор; термоядерные реакции синтеза; токамак

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какая ядерная реакция называется цепной? При каком условии цепной процесс деления ядер будет самоподдерживающимся?
2. Какая реакция называется термоядерной? Какие условия необходимы для начала термоядерной реакции?
3. Какие элементы могут служить топливом для термоядерных реакций?

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА § 107



НОВОЕ В УРОКЕ

Наша жизнь немыслима без потребления энергии. Мы готовим пищу, отапливаем дома, заряжаем аккумуляторы мобильных телефонов и т. п. Для обеспечения жизнедеятельности 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.

- Как можно использовать энергию ядра атома.
- Как устроен атомный реактор.
- Какие преимущества и недостатки у атомной энергетики.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

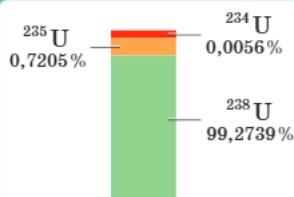
- Из чего состоит ядро атома?
- Какие ядра называются изотопами?
- Что такое ядерные реакции?

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 **атомные электростанции (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.

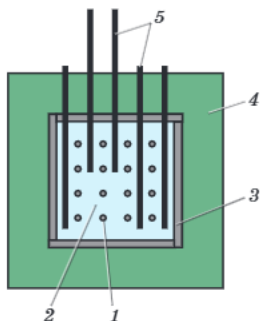
ЭТО ИНТЕРЕСНО

Запасы урана-235, который традиционно используется на атомных электростанциях, на Земле сравнительно малы. В основном урановая руда состоит из урана-238. Доля урана-235 во всех рудниках, которые находятся на Земле в настоящее время, составляет 0,72%. Технологический процесс увеличения доли изотопа урана-235 в природном уране называется **обогащением урана**.



ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР. Сердцем атомной электростанции является **ядерный реактор**, который предназначен для осуществления управляемых цепных ядерных реакций. Главная часть реактора называется **активной зоной**.

В активной зоне (см. рисунок на с. 186) расположены **тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) 1**, имеющие трубчатую форму и содержащие топливо. Топливо для реактора представляет собой таблетки, состоящие из оксида урана-235 и запечатанные в ТВЭЛы. Топливо в реакторах работает 3—5 лет, после чего ТВЭЛы извлекают из реактора и заменяют на новые.



Чтобы ядерное топливо использовалось максимально эффективно, в активную зону реактора помещают *замедлители* 2, 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.

Снаружи активная зона реактора окружена *отражателем нейтронов* 3, который не позволяет нейтронам покидать активную зону. А поверх отражателя расположены стальной корпус реактора и защитный слой бетона 4, которые ослабляют радиоактивное излучение до биологически безопасного уровня.

Для управления цепной реакцией в реакторе предусмотрены *регулирующие стержни* 5, 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.

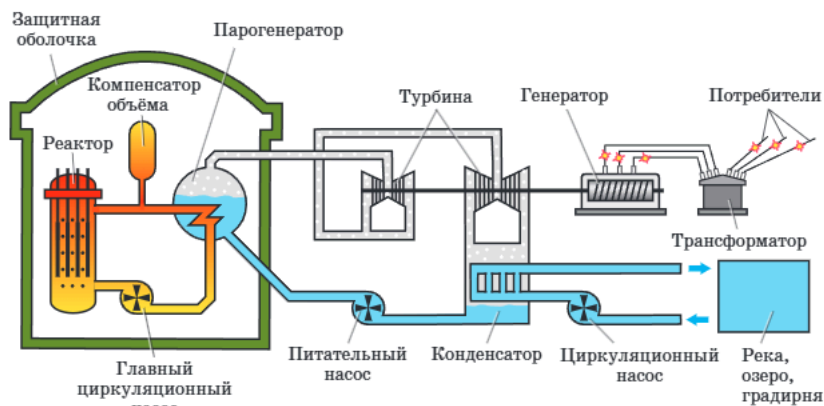
ФИЗИКА В ЖИЗНИ

В России разработана уникальная технология создания реакторов-размножителей на быстрых нейтронах, которая позволит превратить ядерное топливо в возобновляемый источник энергии. В г. Заречном на Белоярской атомной станции уже работают реакторы на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800, планируется запуск нового реактора БН-1200. В реакторах на быстрых нейтронах происходит превращение урана-238, которого несравнимо больше, чем урана-235, в ядерное топливо. В такой реактор загружается обычное топливо (уран-235 или плутоний-239, способные делиться под действием нейтронов), и вокруг него размещается сырьё с ураном-238. Уран-238 захватывает быстрый нейтрон и в результате цепочки ядерных реакций превращается в ядро плутония-239. Таким образом, реактор на быстрых нейтронах не только расходует топливо и вырабатывает энергию, но и производит новое топливо из урана-238. Кажется удивительным, но реакторы на быстрых нейтронах способны производить больше топлива, чем сами потребляют. Из-за этой особенности они называются *реакторами-размножителями*. Такие реакторы могут снабжать топливом обычные ядерные реакторы.

АЭС. Принцип работы атомной электростанции практически ничем не отличается от принципа работы обычной тепловой электростанции. Тепло, выделяющееся в активной зоне реактора, отводится теплоносителем, например водой. Теплоноситель поступает в парогенератор, в котором вода превращается в пар под высоким давлением.

Затем пар подается на турбину, соединённую с генератором электроэнергии, который преобразует кинетическую энергию пара в электроэнергию. Отработанный пар превращается в воду в конденсаторе, откуда вода снова поступает в парогенератор.

На АЭС циркуляция теплоносителя и пара осуществляется по замкнутым контурам, что важно с точки зрения обеспечения радиационной безопасности.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

Первая в мире АЭС была построена в СССР в городе Обнинске и начала работать в 1954 г. Её мощность составляла 5 МВт.
 В настоящее время в мире эксплуатируется свыше 440 реакторов.
 В России с 2020 г. работает самая северная АЭС в мире — плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов».

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ЭКОЛОГИЯ. Преимуществом ядерной энергетики по сравнению с тепловыми электростанциями является отсутствие вредных выбросов в атмосферу при работе реактора. АЭС не потребляют атмосферный кислород и позволяют в перспективе решить проблему ограниченного запаса природного топлива. При этом производимая энергия оказывается значительно дешевле энергии, вырабатываемой на тепловых электростанциях.

Вместе с тем 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, поэтому 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.

! Установка, на которой энергия деления тяжёлых ядер преобразуется в электрическую, называется атомной электростанцией.

ВЫВОД

Атомная электростанция (АЭС); ядерный реактор; обогащение урана

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

1. Какие преимущества есть у атомных электростанций по сравнению с тепловыми?
2. Какой серьёзный недостаток есть у атомной энергетики на сегодняшний день?
3. Зачем в ядерном реакторе используют замедлители и поглотители нейтронов?

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

§ 108 РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

- **ЗАДАЧА 1.** Определите длину волны фотонов, излучаемых атомом водорода при переходе атома из второго стационарного состояния в первое; из третьего стационарного состояния во второе. Какому виду излучения они соответствуют?

Дано:

$$E_1 = -13,6 \text{ эВ}$$

$$E_2 = -3,4 \text{ эВ}$$

$$E_3 = -1,51 \text{ эВ}$$

$$\lambda_{21} \text{ — ?}$$

$$\lambda_{32} \text{ — ?}$$

Решение.

По данным рисунка на с. 161 (§ 100) запишем значения энергии, соответствующие различным состояниям атома водорода, когда электрон находится на орбитах $n = 1, 2, 3$.

Переведём электрон-вольты в джоули:

$$13,6 \text{ эВ} = 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 21,76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$3,4 \text{ эВ} = 3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 5,44 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$

$$1,51 \text{ эВ} = 1,51 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 2,416 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Запишем второй постулат Бора для перехода из второго стационарного состояния в первое: $h\nu_{21} = E_2 - E_1$;

и для перехода из третьего стационарного состояния во второе:

$$h\nu_{32} = E_3 - E_2.$$

Учитывая, что $\nu = \frac{c}{\lambda}$, получим:

$$\lambda_{21} = \frac{hc}{E_2 - E_1}; \quad \lambda_{32} = \frac{hc}{E_3 - E_2}.$$

$$\lambda_{21} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{-5,44 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} + 21,76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

$$\lambda_{32} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{-2,416 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} + 5,44 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Ответ: $\lambda_{21} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ — ультрафиолетовое излучение;
 $\lambda_{32} = 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ — красный цвет видимого излучения.

- **ЗАДАЧА 2.** Допишите ядерную реакцию: ${}^{14}_7\text{N} + ? \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + {}^4_2\text{He}$.

Дано:
 ядерная
 реакция

Решение.

Для решения задач данного типа необходимо вспомнить закон сохранения массового и зарядового чисел в ядерной реакции.

Суммарные значения зарядового и массового чисел ядер после реакции: $\Sigma Z = 5 + 2 = 7$; $\Sigma A = 11 + 4 = 15$.

Известно одно из двух ядер, участвующих в реакции, — ${}^{14}_7\text{N}$.

Тем самым для второго объекта, участвующего в реакции, должно быть $A = 15 - 14 = 1$ и $Z = 7 - 7 = 0$,

т. е. вторым объектом является нейтрон ${}^1_0\text{n}$.

Тогда реакция будет иметь вид:



ЗАДАЧА 3. Вычислите дефект массы, энергию связи и удельную энергию связи для ядра атома углерода $^{12}_6\text{C}$.

Дано:

$$^{12}_6\text{C}$$

$$Z = 6$$

$$N = 6$$

$$M_{\text{C}} = 12 \text{ а. е. м.}$$

$$m_p = 1,00728 \text{ а. е. м.}$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а. е. м.}$$

$$m_e = 0,00055 \text{ а. е. м.}$$

$$\Delta m \text{ — ?}$$

$$E_{\text{св}} \text{ — ?}$$

$$E_{\text{уд}} \text{ — ?}$$

Решение.

Дефект массы можно вычислить по формуле

$$\Delta m = Zm_p + Nm_n - M_{\text{я}}.$$

Массу ядра атома углерода получим, вычитая из массы атома углерода массу шести его электронов:

$$M_{\text{я}} = M_{\text{C}} - 6m_e.$$

$$\Delta m = 6 \cdot 1,00728 + 6 \cdot 1,00867 - (12 - 6 \cdot 0,00055) = 0,099 \text{ (а. е. м.)}.$$

Переведём атомные единицы массы в килограммы:

$$0,099 \text{ а. е. м.} = 0,099 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,64 \cdot 10^{-28} \text{ кг}.$$

Энергия связи ядра $E_{\text{св}} = \Delta mc^2$;

$$E_{\text{св}} = 1,64 \cdot 10^{-28} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 1,48 \cdot 10^{-11} \text{ Дж}.$$

Переведём джоули в электрон-вольты:

$$1,48 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} = 1,48 \cdot 10^{-11} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 92,5 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 92,5 \text{ МэВ}.$$

Удельная энергия связи $E_{\text{уд}} = \frac{E_{\text{св}}}{A}$.

$$E_{\text{уд}} = \frac{92,5 \text{ МэВ}}{12} = 7,7 \text{ МэВ/нуклон}.$$

Ответ: $\Delta m = 0,099 \text{ а. е. м.};$

$E_{\text{св}} = 92,5 \text{ МэВ}; E_{\text{уд}} = 7,7 \text{ МэВ/нуклон}.$

ЗАДАЧА 4. Рассчитайте энергетический выход ядерной реакции при бомбардировке ядер лития ^7_3Li протонами (в результате образуются две α -частицы).

Дано:

$$M_{\text{Li}} = 7,01600 \text{ а. е. м.}$$

$$M_{\text{He}} = 4,00260 \text{ а. е. м.}$$

$$m_p = 1,00728 \text{ а. е. м.}$$

$$m_e = 0,00055 \text{ а. е. м.}$$

$$m_n = 1,00867 \text{ а. е. м.}$$

$$Q \text{ — ?}$$

Решение.

Запишем ядерную реакцию: $^7_3\text{Li} + ^1_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^4_2\text{He}$.

Энергетический выход ядерной реакции $Q = \Delta mc^2$,

где Δm — разность масс исходных частиц и продуктов реакции.

Запишем формулу для дефекта массы:

$$\Delta m = (M_{\text{Li}} - 3m_e) + m_p - 2(M_{\text{He}} - 2m_e);$$

$$\Delta m = (7,016 - 3 \cdot 0,00055) + 1,00728 -$$

$$- 2 \cdot (4,0026 - 2 \cdot 0,00055) = 0,01863 \text{ а. е. м.}$$

Переведём атомные единицы массы в килограммы:

$$0,01863 \text{ а. е. м.} = 0,01863 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 3,09 \cdot 10^{-29} \text{ кг}.$$

$$Q = 3,09 \cdot 10^{-29} \text{ кг} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ м/с})^2 = 2,78 \cdot 10^{-12} \text{ Дж}.$$

Переведём джоули в электрон-вольты:

$$2,78 \cdot 10^{-12} \text{ Дж} = 2,78 \cdot 10^{-12} / 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ эВ} =$$

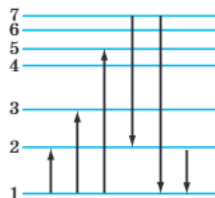
$$= 17,4 \cdot 10^6 \text{ эВ} = 17,4 \text{ МэВ}.$$

Энергетический выход реакции $Q > 0$. Это означает, что реакция идёт с выделением энергии.

Ответ: 17,4 МэВ.

Задачи для самостоятельного решения

- 1 Определите длину волны фотона в вакууме с энергией 1,25 эВ.
- 2 По рисунку определите переход с излучением фотонов с максимальной энергией и переход с поглощением света с максимальной длиной волны.
- 3 Определите частоту излучения атома водорода при переходе электрона с первой орбиты на вторую, с третьей орбиты на первую.
- 4 Рентгеновская трубка, находящаяся под напряжением 4 кВ, при силе тока 1,5 мА излучает $3 \cdot 10^{13}$ фотонов в секунду. Определите КПД трубки, если в среднем длина волны, излучаемая трубкой, составляет 1,0 нм.
- 5 Наименьшая мощность света, которую способен воспринимать адаптированный к темноте глаз, составляет $\approx 10^{-17}$ Вт. Оцените, какому количеству фотонов в секунду с длиной волны 500 нм соответствует указанное значение пороговой мощности.
- 6 Для ионизации атома бора необходима энергия 8,3 эВ. Определите частоту излучения, которое может вызвать ионизацию.
- 7 Допишите ядерные реакции:
- а) ${}^{19}_9\text{F} + \dots \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + {}^4_2\text{He}$; в) ${}^{19}_9\text{F} + \dots \rightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^1_1\text{H}$;
 б) ${}^7_3\text{Li} + \dots \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$; г) ${}^{18}_8\text{O} + {}^4_2\text{He} \rightarrow \dots + {}^1_0\text{n}$.
- 8 При облучении углерода ${}^{12}_6\text{C}$ протонами образуется изотоп ${}^{13}_6\text{C}$. Какая ещё при этом образуется частица? Запишите реакцию данного процесса.
- 9 При бомбардировке бора ${}^{11}_5\text{B}$ протонами в камере Вильсона получили три следа одного типа, направленные в разные стороны. Определите, какое ядро оставляет такие треки.
- 10 Определите, будет ли равна сумма масс 6 протонов и 6 нейтронов массе изотопа углерода ${}^{12}_6\text{C}$, если масса протона $1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг, масса нейтрона $1,6748 \cdot 10^{-27}$ кг, масса изотопа углерода $1,9926 \cdot 10^{-26}$ кг.
- 11 Определите минимальное количество энергии, необходимое для расщепления ядра атома стронция ${}^{88}_{38}\text{Sr}$ на протоны и нейтроны.
- 12 Вычислите дефект массы ядра атома трития.
- 13 Определите, какая энергия выделяется при ядерной реакции:
 ${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} = {}^8_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$.
- 14 Определите энергетический выход реакции, при которой нейтрон бомбардирует атом алюминия с образованием изотопа натрия в реакции
 ${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0\text{n} = {}^{24}_{11}\text{Na} + {}^4_2\text{He}$.



Лабораторная работа № 9

Изучение законов сохранения зарядового и массового чисел в ядерных реакциях

Цель работы

Убедиться в справедливости закона сохранения массового и зарядового чисел в ядерных реакциях.

Оборудование и материалы

Фотографии треков заряженных частиц, образовавшихся в ядерной фотоэмульсии при взаимодействии ядер ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{14}_7\text{N}$ с ядрами фотоэмульсии.

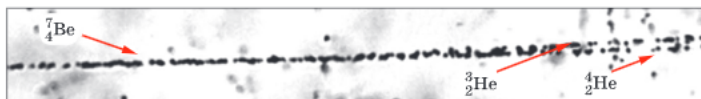
Научная справка

Ядерная фотоэмульсия — один из первых детекторов заряженных частиц, использующихся для изучения ядерных реакций посредством анализа треков заряженных частиц, образующихся в результате ядерных взаимодействий.

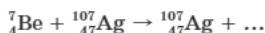
Фотоэмульсии облучались ускоренными до десятка ГэВ лёгкими ядрами ${}^7_4\text{Be}$, ${}^{14}_7\text{N}$ (нуклотрон, ОИЯИ, г. Дубна). Вашему вниманию представлены фотографии событий ядерных взаимодействий, наблюдавшихся при облучении.

Ход работы

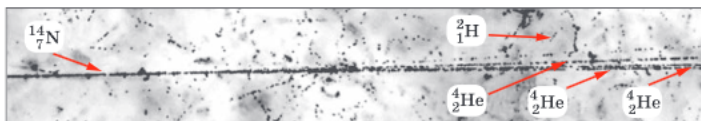
- Рассмотрите фотографию первого события, заключающегося в испускании ядром ${}^7_4\text{Be}$ двух частиц — изотопов гелия (${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$) при взаимодействии с ядром серебра (${}^{107}_{47}\text{Ag}$) из состава ядерной фотоэмульсии.



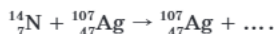
- Допишите реакцию с участием ядерных частиц, треки которых приведены на фотографии:



- Рассмотрите фотографию второго события, заключающегося в испускании ядром ${}^{14}_7\text{N}$ трёх альфа-частиц (${}^4_2\text{He}$) и дейтрона (${}^2_1\text{H}$) при взаимодействии с ядром серебра (${}^{107}_{47}\text{Ag}$) из состава ядерной фотоэмульсии.



- Допишите реакцию с участием ядерных частиц, треки которых приведены на фотографии:



- Определите суммарные значения массовых и зарядовых чисел ядер, участвующих в реакции, и образующихся ядер-продуктов, заполнив таблицу в своей тетради.

Реакция	До взаимодействия		После взаимодействия	
${}^7_4\text{Be} + {}^{107}_{47}\text{Ag} \rightarrow$	ΣA	ΣZ	ΣA	ΣZ
${}^{14}_7\text{N} + {}^{107}_{47}\text{Ag} \rightarrow$	ΣA	ΣZ	ΣA	ΣZ

- Сделайте выводы, сравнив суммарные значения массовых и зарядовых чисел ядер, участвующих в ядерной реакции, с соответствующими значениями для образующихся ядер-продуктов.

Практическая работа-исследование

Изучаем квантовые явления

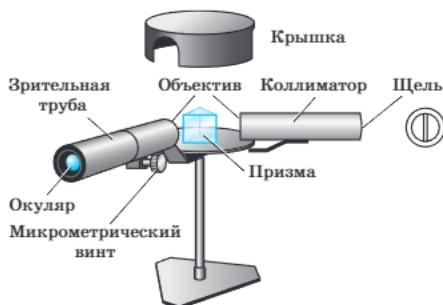
НАБЛЮДЕНИЕ СПЛОШНОГО И ЛИНЕЙЧАТОГО СПЕКТРОВ

Цель работы

Наблюдать сплошной спектр излучения электрической лампы и линейчатый спектр излучения ионизированных газов.

Научная справка

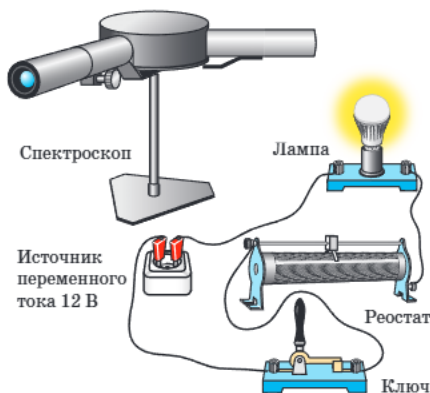
Спектроскоп двухтрубный состоит из окуляра, зрительной трубы, объективов, коллиматора, щели и микрометрического винта. При наблюдении спектров щель направляют на источник света и с помощью объективов и окуляра добиваются появления чёткого изображения. Вращением винта меняют видимую часть спектра.



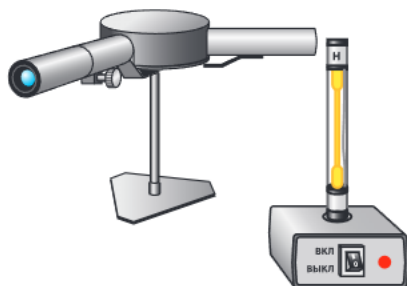
ПОМОЩНИК

- В качестве оборудования вам потребуются спектроскоп двухтрубный, набор спектральных трубок (водород, неон, гелий), прибор для зажигания спектральных трубок, источник тока, лампа накаливания, ключ, реостат, соединительные провода, штатив, таблицы со спектрами излучения газов, находящихся в спектральных трубках.
- Укрепите спектроскоп в штативе таким образом, чтобы щель его коллиматора была расположена вертикально.
- Соберите электрическую цепь, последовательно соединив лампу накаливания, реостат и источник тока.

- Установите спектроскоп перед лампой накаливания так, чтобы её нить накаливания была на высоте щели на расстоянии нескольких сантиметров от неё.
- Замкните цепь и включите лампу. Наблюдайте сплошной спектр излучения нити при полном накале лампы.
- Постепенно уменьшая накал нити с помощью реостата, наблюдайте ослабление яркости спектра и постепенное исчезновение спектральных цветов.
- Какой спектр наблюдается от света лампы накаливания? Запишите последовательность наблюдаемых цветов в спектре.



- Вставьте трубку с исследуемым газом в держатель прибора для зажигания спектральных трубок и включите прибор.
- Какие спектры наблюдаются при исследовании газов в трубках? Зарисуйте вид спектров для различных газов.

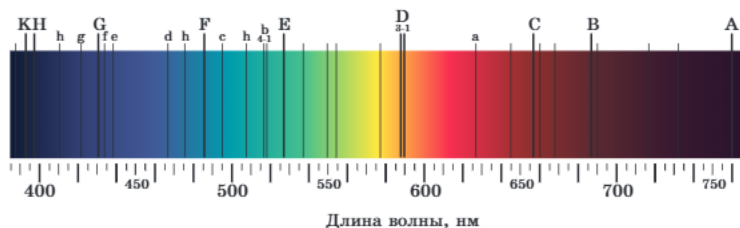


- Сделайте выводы.

Дополнительное задание

Линии поглощения, видимые на фоне непрерывного спектра звёзд, называемые фраунгоферовыми линиями, позволяют судить о химическом составе звёздных атмосфер. В настоящее время астрономы выделяют в спектре Солнца тысячи фраунгоферовых линий (самые сильные из них обозначаются латинскими буквами от А до К). Эти спектральные линии однозначно характеризуют химические элементы, их излучающие.

Рассмотрите видимую часть солнечного спектра поглощения, изображённую на рисунке.



Используя данные из таблицы, определите, какие химические элементы присутствуют в атмосфере Солнца, и каким линиям спектра, обозначенным латинскими буквами от А до К, они соответствуют.

Химический элемент	Длина волны, нм	Химический элемент	Длина волны, нм	Химический элемент	Длина волны, нм
Pt	292	Ca	430	He	587
Al	308	H ₂	486	Ne	632
Ca	393	Cd	508	H ₂	656
Ca	397	Fe	527	Li	670
Hg	405	Tl	535	O ₂	687
Fe	430	Na	589	O ₂	759

КАК ОПРЕДЕЛИТЬ ВОЗРАСТ ДРЕВНИХ НАХОДОК!

КЕЙС

На уроке биологии учащимся рассказали о том, что существуют методы, позволяющие определять возраст ископаемых органических останков, например костей древних животных. На просьбу учеников пояснить более подробно, в чём заключается суть этих методов, учитель биологии рекомендовал ребятам обратиться за помощью к учителю физики. Учитель физики подтвердил, что такие методы действительно существуют, причём основным из них является так называемый *радиоуглеродный метод*.

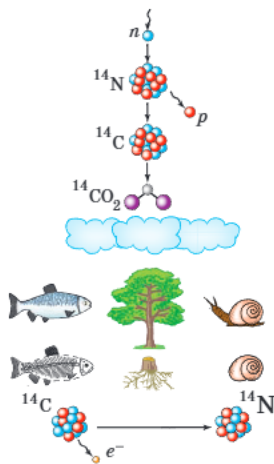
Научная справка

Метод определения возраста органических материалов путём измерения содержания радиоактивного изотопа углерода-14 в этих материалах называется *радиоуглеродным датированием*.

Углерода известно более 10 изотопов. В природе наиболее распространён стабильный изотоп с атомной массой 12 а. е. м. Углерод-14 — радиоактивный изотоп углерода с периодом полураспада 5730 лет ($T_{1/2} = 5730$ лет). Углерод-14 образуется в верхних слоях тропосферы и стратосферы в результате поглощения атомами азота-14 нейтронов, входящих в состав космического излучения, с последующим излучением ядром азота-14 протона.

Углерод (в том числе углерод-14) в виде углекислого газа (CO₂) проникает в воды Мирового океана, на сушу, накапливается в тканях растений, животных, рыб, образуя так называемые карбонатные соединения, т. е. полностью участвует во всех биологических процессах в природе.

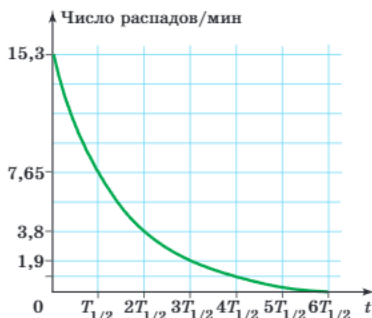
Любой организм с воздухом и пищей получает углерод-14, который затем превращается в азот-14, испуская электрон, а также частицу, называемую нейтрино (эта реакция называется бета-распадом). Учёные установили, что концентрация углерода-14 одинакова во всех живых организмах и равна природной концентрации углерода-14 в атмосфере. Как только живой организм прекращает своё существование, процесс поглощения нового углерода останавливается, но при этом распад углерода-14 в его останках продолжается. Со временем в останках становится всё меньше углерода-14 и отношение количества этого изотопа ко всему углероду (концентрация) уменьшается. Таким образом, зная период полураспада углерода-14 и его концентрацию в живых организмах и измерив число бета-распадов углерода в исследуемом образце, т. е. концентрацию углерода-14 в данный момент времени, можно определить, сколько времени прошло после гибели организма. Используя пояснения учителя и научную справку, проведите и вы небольшое исследование.



Образование изотопа углерода-14, его поступление в живые организмы и распад

Этапы выполнения задания

- Используя описания реакций, данных в научной справке, напишите ядерные реакции образования и распада углерода-14.
- Учёные изучили образцы древесины из свежесрубленных деревьев из разных точек Земли. Оказалось, что в 1 г углерода, выделенного из этой древесины (или любого живого организма), в течение одной минуты происходит приблизительно 15,3 бета-распадов углерода-14 с испусканием электрона в каждом распаде.
- 1 г другого исследуемого образца в минуту излучает $\frac{15,3}{2} = 7,65$ бета-частиц (электронов). Определите возраст образца. Значение периода полураспада углерода-14 возьмите из научной справки.
- 1 г исследуемого образца в минуту излучает $\frac{15,3}{4} = 3,8$ бета-частиц (электронов). Определите возраст образца.
- Археологи нашли фрагмент бивня мамонта. При исследовании образца массой 1 г оказалось, что углерод-14 распадается со скоростью 57 распадов в час. Оцените возраст образца.
- Сделайте вывод.



ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Спектр, состоящий из отдельных цветных линий на чёрном фоне, — линейчатый спектр испускания. Сплошной спектр, перерезанный тёмными линиями, — линейчатый спектр поглощения. Метод определения химического состава вещества по его спектру называется спектральным анализом.
- Излучение испускается отдельными порциями, или квантами.
- Практически вся масса атома сосредоточена в атомном ядре.
- Электрон в атоме может находиться лишь на стационарных уровнях. При переходе атома из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитного излучения.
- В состав радиоактивного излучения входят α - и β -частицы и γ -излучение.
- В состав всех ядер входят нуклоны — протоны и нейтроны.
- Силы, действующие между нуклонами в ядре, называются ядерными.
- Процесс превращения ядер атомов одних элементов в ядра атомов других элементов называется ядерной реакцией.
- Энергия связи ядра — энергия, которая необходима для расщепления ядра на составляющие частицы.
- Разность между суммой масс покоя нуклонов, образующих атомное ядро, и массой покоя этого атомного ядра называется дефектом массы.

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 сейчас осуществить мечту алхимиков: превратить ртуть в золото?

Темы исследовательских и проектных работ


- История открытия атома.
- Рентгеновское излучение.
- Спектральный анализ Солнца и звёзд.
- Абсолютно чёрное тело.
- Энергия кванта.
- Естественная радиоактивность.
- Как открывали протон.
- Как открывали нейтрон.
- Солнечная «печка».
- Элемент уран.
- Радиоактивные элементы.
- Деление и синтез ядер.
- Мирный атом.



Глава 12



СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ



Стремление человечества к знаниям 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.

С. Хокинг

§ 110 СТРУКТУРА ВСЕЛЕННОЙ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Как устроена Вселенная.
- Что представляют собой галактики.
- Есть ли планеты вокруг других звёзд.
- Как изменяется наша Вселенная.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое Вселенная?
- Что такое гравитационные силы?

Как устроена Вселенная? По каким законам она живёт? Попробуем познакомиться 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 объектов и их систем.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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 (1 св. г.) равен примерно $9,46 \cdot 10^{12}$ км. Ещё одной единицей расстояния в астрономии является **парсек** (пк):
 $1 \text{ пк} = 3,263 \text{ св. г.} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ км.}$

ГАЛАКТИКИ. Вследствие гравитации астрономические тела во Вселенной притягиваются друг к другу, образуя системы. В безбрежном космическом пространстве звёзды объединяются в звёздные архипелаги — **галактики**. На данный момент открыто более триллиона галактик!

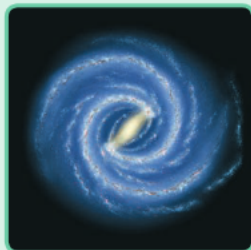
Галактики, в свою очередь, объединяются в отдельные **скопления галактик**. Так, наша галактика **Млечный Путь** вместе с примерно 50 другими галактиками образует скопление, которое называется **Местной группой**.

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 ближайšie к нам небольшие по размеру галактики — Магеллановы Облака (Малое и Большое) и похожую на нашу галактику туманность Андромеды, а также галактику Треугольника.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Земля, Солнечная система и все звёзды, видимые невооружённым глазом, находятся в нашей Галактике, известной под названием **Млечный Путь**. Млечный Путь состоит примерно из 10^{11} звёзд. Диаметр Галактики составляет около 80 000 световых лет, а толщина — 6000 световых лет.

Под действием сил всемирного тяготения все звёзды вращаются вокруг центра Галактики. При изучении расположения звёзд и направления их движения удалось обнаружить некоторые из спиральных рукавов Галактики. Солнце расположено между спиральными рукавами Стрельца и Персея. Расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 23—28 тыс. световых лет. Скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики практически совпадает со скоростью вращения спиральных рукавов. Это означает, что Солнечная система не пересекает области спиральных рукавов, где происходит активное звездообразование, порождающее мощное излучение, губительное для всего живого.



ЗВЁЗДЫ И ПЛАНЕТЫ. Наше Солнце является лишь одной звездой из великого их множества во Вселенной.

Вокруг нашего Солнца вращаются восемь планет. Сразу возникает вопрос: а есть ли планеты, вращающиеся 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 больше, чем яркость планет. Лишь в 1995 г. шведские астрономы М. Майор и Д. Кело открыли первую планету, принадлежащую далёкой звезде. А в 2019 г. за это открытие учёные получили Нобелевскую премию по физике.

Планеты, обращающиеся вокруг звезды за пределами Солнечной системы, были названы экзопланетами. Астрономы оценивают, что в галактике Млечный Путь могут находиться более 100 млрд экзопланет. В настоящее время подтверждено существование нескольких тысяч экзопланет, и каждый год открываются новые.

РАШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ. Во Вселенной всё находится в непрерывном движении: планеты вращаются вокруг своих звёзд, звёзды вращаются вокруг центров своих галактик, сами галактики также движутся в пространстве.

В 1912—1914 гг. американский астроном В. Слайфер открыл эффект, который называется космологическим красным смещением. Это явление заключается в том, что спектральные линии от далёкого космического источника смещаются в сторону больших значений длин волн по сравнению с длинами волн тех же линий, измеренными для неподвижного источника. Другими словами, регистрируемая длина волны излучения далёкого источника, удаляющегося от нас с высокой скоростью, становится больше.

Если излучение от далёкого космического источника проходит достаточно большое расстояние и красное смещение увеличивается, оно перестаёт быть видимым и становится сначала инфракрасным, а затем микроволновым. Это излучение



Эдвин Хаббл
(1864—1934)

называется **реликтовым**, и оно обнаруживается сегодня в виде микроволн, распространяющихся в космосе во всех направлениях.

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 галактики удаляются от нашей планеты и друг от друга. 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 подчиняется закону, который получил название **закон Хаббла**. В результате учёные сделали вывод, что наша Вселенная расширяется!

ВАЖНО

Закон Хаббла: 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; $H \approx 70 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ — коэффициент пропорциональности, который называется **постоянной Хаббла**.

Постоянная Хаббла показывает, с какой скоростью удаляются друг от друга галактики, находящиеся на расстоянии 1 Мпк.

Учёные пришли к выводу, что Вселенная расширяется 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 учёные до сих пор не могут понять, будет ли наша Вселенная расширяться до бесконечности или же расширение в какой-то момент прекратится и сменится сжатием.

Эту и другие загадки нашей Вселенной, возможно, удастся решить вам.

ВЫВОДЫ

- ! Вселенная — это всё, что существует: от атомов и молекул до огромных космических объектов и их систем.
- ! Закон Хаббла: Вселенная расширяется, причём скорость, с которой галактики удаляются друг от друга, пропорциональна расстоянию между ними.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вселенная; Галактика; звёзды; экзопланеты; закон Хаббла

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Можем ли мы увидеть галактики невооружённым глазом?
2. Существуют ли планеты вокруг других звёзд? И можем ли мы их увидеть?
3. Есть ли центр у нашей Вселенной?

СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ § 111



НОВОЕ В УРОКЕ

Наша планета Земля входит в систему планет и других космических тел, вращающихся вокруг звезды, которую люди когда-то называли Солнце. Именно Солнце, масса которого в 333 000 раз больше массы Земли и почти в 750 раз больше суммарной массы всех планет, управляет движением больших и малых тел Солнечной системы.

- Как устроена Солнечная система.
- Как возникла Солнечная система.
- Характеристики планет и малых тел Солнечной системы.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое гравитационные силы?

КАК УСТРОЕНА СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА. В центре Солнечной системы находится Солнце. Вокруг Солнца обращаются восемь больших планет со спутниками, несколько карликовых планет, сотни тысяч астероидов, несколько тысяч комет, множество метеорных тел и космическая пыль.

Все планеты обращаются вокруг Солнца в одном направлении и почти в одной плоскости. Они расположены на разных расстояниях от Солнца в следующем порядке: Меркурий, Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун. По физическим характеристикам планеты делят на две группы: *планеты земной группы* (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и *планеты юпитерианской группы*, или *планеты-гиганты* (Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун).

В Солнечной системе существуют две области, заполненные малыми космическими телами, — *пояс астероидов*, расположенный между орбитами Марса и Юпитера, и *пояс Койпера*, расположенный за орбитой Нептуна.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Согласно современной теории, Солнечная система начала образовываться 5 млрд лет назад из вращающегося газопылевого облака. Под воздействием сил гравитации облако превратилось во вращающийся диск, а в его центре сосредоточилась основная масса вещества, и образовалось центральное горячее ядро. При температуре в десятки миллионов градусов в ядре начались термоядерные реакции, и вспыхнула новая звезда — Солнце. В то же время под воздействием тяготения образовавшегося Солнца частички пыли и газа обращались вокруг Солнца по разным орбитам. В результате взаимного притяжения этих частиц образовались планеты.

ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ. Планеты земной группы имеют схожее строение, небольшие размеры и массы. Они обладают сравнительно высокой средней плотностью (средняя плотность Земли $5,5 \text{ г/см}^3$) и состоят в основном из оксидов и других соединений тяжёлых химических элементов: железа, алюминия, кремния, магния и др. Две из планет земной группы (Земля и Марс) имеют спутники. Венера, Земля и Марс имеют



атмосферы, которые формируют погоду на планетах. Планеты земной группы расположены близко друг к другу по сравнению с планетами-гигантами. Радиус всей этой области меньше расстояния между орбитами Юпитера и Сатурна.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Венеру достаточно легко наблюдать с Земли. Иногда она сближается с Землёй на расстояние менее 45 млн км. Кроме того, большая плотность облаков на Венере отражает свет от Солнца, что делает планету более яркой. Обычно Венера видна на небе незадолго до восхода или через некоторое время после захода Солнца. Поэтому её называют Утренней или Вечерней звездой.



ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ. По сравнению с планетами земной группы планеты-гиганты имеют бóльшие размеры и массы, но меньшую среднюю плотность. Так, самая большая планета Солнечной системы — Юпитер, его диаметр в 11 раз больше земного, а масса в 2,5 раза больше общей массы всех остальных планет. Средняя плотность Юпитера составляет всего $1,3 \text{ г/см}^3$. Планеты-гиганты состоят в основном из водорода и гелия, а также метана и аммиака. Все планеты-гиганты имеют большую скорость вращения вокруг своей оси. Они имеют десятки спутников и системы колец.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

В 2006 г. в рамках классификации космических объектов, обращающихся вокруг Солнца, был принят термин «карликовая планета». Карликовые планеты намного меньше, чем планеты (даже меньше спутника Земли, Луны), но имеют достаточную массу, чтобы под действием сил гравитации их форма стала близка к сферической. В отличие от больших планет, на орбитах карликовых планет могут находиться и другие объекты. К карликовым планетам относятся Плутон (до 2006 г. считался девятой планетой), Церера (до 2006 г. считалась астероидом) и др.



АСТЕРОИДЫ. Малые космические тела размерами от нескольких десятков метров до нескольких сотен километров называются астероидами (в пер. с др.-греч. — подобный звезде). Они имеют неправильную форму и не имеют атмосферы, хотя у некоторых из них есть спутники.

Большинство астероидов Солнечной системы находится в *поясе астероидов* и в *поясе Койпера*. В результате столкновений с другими астероидами или под действием гравитационного взаимодействия со спутниками или планетами орбиты астероидов могут изменяться. Учёные постоянно следят за астероидами, которые пересекают зем-

ную орбиту, а также за околоземными астероидами, которые могут представлять опасность.

КОМЕТЫ. Космические тела, состоящие из твёрдых частиц, пыли и льда, называются кометами (в пер. с др.-греч. — волосатый, хвостатый). Они движутся по сильно вытянутым эллиптическим орбитам вокруг Солнца.

На больших расстояниях от Солнца кометы недоступны для наблюдения с помощью телескопов. При приближении к Солнцу лёд тает и частично испаряется, превращаясь в газ и высвобождая частички пыли. Газопылевое облако отражает солнечный свет, и комета становится видимой. Твёрдую часть кометы называют *ядром*, а газопылевое облако вокруг ядра — *комой*. Вещество комы переходит в хвост. *Хвост кометы* — слабая светящаяся полоса, направленная в противоположную от Солнца сторону. Кометы могут иметь два или три хвоста.



Схема движения кометы



Комета Хейла—Боппа (1997)

МЕТЕОРЫ И МЕТЕОРИТЫ. Метеорные тела — это космические тела диаметром не больше 30 м. Малые метеорные тела при попадании в земную атмосферу сгорают, оставляя в небе узкий светящийся след — *метеор*. Часто метеоры группируются в метеорные потоки, которые можно наблюдать в определённое время года.

Крупные метеорные тела — *метеориты* достигают поверхности Земли. На месте падения метеоритов образуются *кратеры*. Самым крупным кратером на Земле считается кратер Вредефорт в Южной Африке. Его диаметр около 300 км, а возраст около 2 млрд лет.

Изучение структуры, состава и свойств метеоритов представляет большой интерес. Эти исследования помогают разобраться в процессах образования и эволюции Солнечной системы и планет, в том числе и Земли. В некоторых из метеоритов были обнаружены органические соединения.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

С глубокой древности люди пытались объяснить устройство того большого мира, в котором жили, понять место человечества во Вселенной. Сначала Земля считалась центром Вселенной. Почти все древнегреческие учёные (Пифагор, Аристотель, Платон, Птолемей) придерживались *геоцентрической* (от греч. *geo* — Земля) системы мира, согласно которой центром Вселенной является Земля с обращающимися вокруг неё Луной, Солнцем и планетами.

В начале XVI в. польский учёный Николай Коперник установил, что Земля не только не является центром Вселенной, но даже и не находится в центре Солнечной системы. В своей работе «Об обращениях небесных сфер» он описал *гелиоцентрическую* (от греч. *gelios* — Солнце) систему мира, согласно которой Земля, вращающаяся вокруг своей оси, вместе с другими планетами обращается вокруг Солнца. Коперник доказывал, что именно вращением Земли и её обращением вокруг Солнца объясняются смена дня и ночи и смена времён года.

Предложенная Коперником гелиоцентрическая модель мира вдохновила учёных на поиски закономерностей, которым подчиняется движение планет. Эти закономерности были открыты в начале XVII в. немецким астрономом Иоганном Кеплером, который сформулировал три закона движения планет вокруг Солнца.

ВЫВОДЫ

- ! В центре Солнечной системы находится Солнце.
- ! Вокруг Солнца обращаются восемь больших планет со спутниками, несколько карликовых планет, сотни тысяч астероидов, несколько тысяч комет, множество метеорных тел и космическая пыль.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Солнечная система; планеты земной группы; планеты-гиганты; астероиды; пояс астероидов; кометы; метеоры; метеориты

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. По каким характеристикам планеты делят на две группы?
2. Что такое астероиды?
3. Чем объясняется образование хвоста кометы?
4. Чем отличаются метеоры от метеоритов?

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СОЛНЦА И ЗВЁЗД § 112



НОВОЕ В УРОКЕ

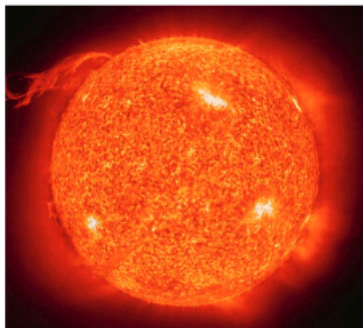
- Из чего состоят звёзды.
- Какие процессы происходят внутри звёзд.
- Как рождаются и умирают звёзды.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Что такое гравитационные силы?
- Что такое термоядерные реакции?

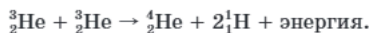
Большинство объектов во Вселенной, которые мы наблюдаем, — это звёзды. Что же собой представляют звёзды? Из чего они состоят? Из чего они рождаются и как умирают?

ИЗ ЧЕГО СОСТОЯТ ЗВЁЗДЫ. Звёзды представляют собой шарообразные космические тела, состоящие из раскалённого газа. 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 движутся с колоссальными скоростями (сотни и тысячи километров в секунду), достаточными для того, 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.**

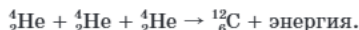
РОЖДЕНИЕ ЗВЁЗДЫ. Звёзды зарождаются из газопылевых облаков, которые носят название *туманностей*. Под действием силы гравитации происходит сжатие, или *коллапс*, туманности — образуется *протозвезда*. Она начинает вращаться, а её центр — нагреваться. Когда температура космического тела достигает порядка 10 млн градусов, начинают происходить термоядерные реакции, в ходе которых ядра водорода сливаются в ядра гелия:



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 ЗВЁЗДЫ. 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:



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 цвет 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 рассеиваются в космическом пространстве. Сжавшееся ядро, остаток от прежней звезды, называется *белым карликом*, который с течением времени остывает до холодного состояния.



ЭТО ИНТЕРЕСНО

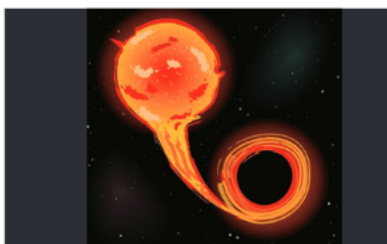
По расчётам учёных, наше Солнце находится на стадии активного сжигания водорода примерно 5 млрд лет. Запасов водорода в ядре ему должно хватить ещё на 5,5 млрд лет.

РОЖДЕНИЕ СВЕРХНОВОЙ ЗВЁЗДЫ. Звёзды, массы которых во много раз превышают массу нашего Солнца, по мере сжигания ядерного топлива расширяются и превращаются в *сверхгиганты*, 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. Такая звезда называется *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/м³). 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 звёздах сила сжатия настолько велика, что материя 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.

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Звезда, подвергающаяся сильному сжатию, через какое-то время перестаёт излучать свет. Радиус, до которого необходимо сжать звезду, чтобы она перестала «отпускать» от себя свет, называется *радиусом Шварцшильда* в честь немецкого учёного К. 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!

ВЫВОДЫ

- ❗ Звёзды представляют собой шаровидные космические тела, состоящие из раскалённого газа.
- ❗ Энергия выделяется за счёт идущих в звезде термоядерных реакций.
- ❗ Звёзды с огромной массой заканчивают свой жизненный путь, превращаясь в чёрные дыры.
- ❗ Чёрную дыру можно обнаружить по гравитационному взаимодействию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

Эволюция звёзд; туманность; протозвезда; красный гигант; белый карлик; сверхновая; нейтронная звезда; чёрная дыра

1. Из чего состоят звёзды?
2. Как рождаются и умирают звёзды?
3. Что такое чёрные дыры?
4. Теряет ли Солнце массу, излучая свет и тепло? Объясните свой ответ.

§ 113 РОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

НОВОЕ В УРОКЕ

- Сколько лет Вселенной по расчётам учёных.
- Как теория Большого взрыва объясняет происхождение Вселенной.
- Каким может оказаться будущее Вселенной.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как устроена наша Вселенная?
- Как образуются звёзды?

Мы уже говорили о том, что наша Вселенная расширяется. Это означает, что Вселенная не была одинаковой во все времена. Возникает 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. Величина, обратная постоянной Хаббла, характеризует время, прошедшее с момента рождения или начала расширения, т. е. возраст Вселенной. Согласно современным оценкам, **возраст Вселенной составляет 13,8 млрд лет.**

Если это утверждение принять за истину, то в нашей Вселенной не должно быть ни одного объекта, возраст которого превышает 13,8 млрд лет. Все известные на сегодняшний день астрономические наблюдения 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. Эта теория происхождения Вселенной называется **теорией Большого взрыва.**

Теорию Большого взрыва, или, как она первоначально называлась, модель горячей Вселенной, предложил российский и американский физик Г. А. Гамов.

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.

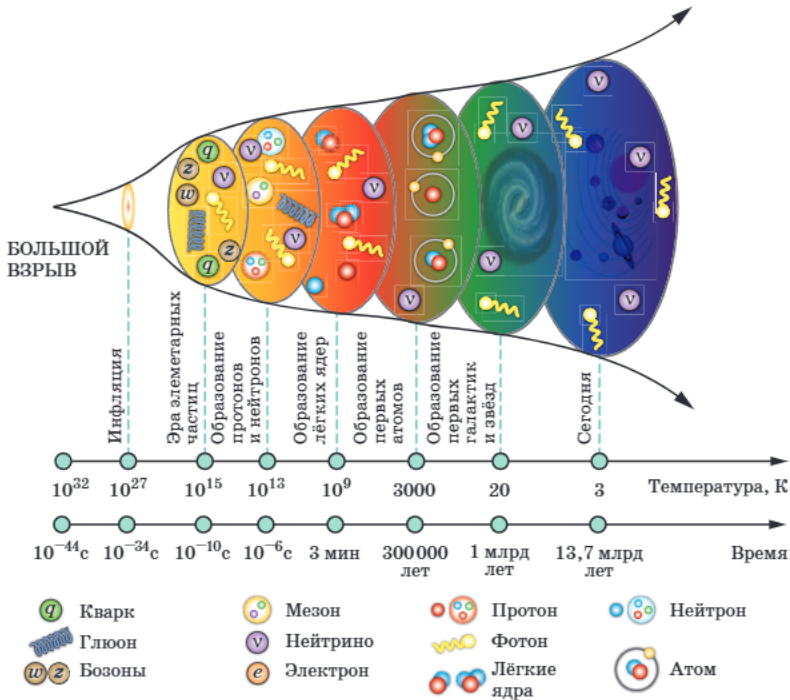
Уже через секунду после Большого взрыва температура составляла около 10 млрд градусов, что примерно в тысячу раз выше температуры в центре современного Солнца. В это время Вселенная в основном состояла из *фотонов*, *электронов* и некоторого количества *протонов* и *нейтронов*, которые образовались в 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 градусов, 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 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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 более тяжёлыми элементами, которые служили основой для формирования новых звёзд и планет.



Хронология эволюции Вселенной от Большого взрыва до наших дней

ЭТО ИНТЕРЕСНО

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* и *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 эволюции 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 обратный процесс — 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 расширений...

ЭТО ИНТЕРЕСНО

Согласно современным представлениям, судьба Вселенной зависит от средней плотности её вещества. Если средняя плотность Вселенной больше критического значения (считается равным 10^{-26} кг/м³), то через некоторое время силы тяготения остановят её расширение и начнётся сжатие Вселенной. Если же средняя плотность Вселенной меньше критического значения или равна ему, то сил тяготения будет недостаточно, чтобы остановить дальнейшее расширение.

Расчётные модели показывают, что плотность видимого вещества во Вселенной составляет около $2 \cdot 10^{-28}$ кг/м³, т. е. меньше критической. Однако при этих расчётах не учитывается плотность, связанная с тёмной материей. По предварительным оценкам, она может быть в несколько раз больше плотности обычного вещества и тем самым играть определяющую роль в дальнейшем сценарии эволюции Вселенной.

ВЫВОДЫ

- ! Современная теория происхождения Вселенной называется теорией Большого взрыва.
- ! Возраст Вселенной составляет 13,8 млрд лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Возраст Вселенной; теория Большого взрыва; кварки; глюоны; фотоны; тёмная энергия; тёмная материя

И ВОПРОСЫ ЗАДАНИЯ

1. Как зародилась наша Вселенная согласно теории Большого взрыва?
2. Каковы возможные варианты будущего Вселенной?

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВСЕЛЕННОЙ § 114



НОВОЕ В УРОКЕ

Исследовать Вселенную можно различными способами: изучая метеориты, упавшие на Землю; наблюдая за объектами, находящимися за пределами нашей планеты, с помощью телескопов; изучая космическое пространство с помощью ракет, спутников, космических станций и кораблей. Кроме того, при помощи экспериментальных физических установок можно изучать материю на уровне атомов, атомных ядер и ещё глубже.

- Какие области науки занимаются исследованиями Вселенной.
- Современные космические телескопы.
- Экспедиции в Солнечной системе.
- Как ускорители и коллайдеры помогают исследовать Вселенную.

ПОВТОРИМ ИЗУЧЕННОЕ

- Как устроена Вселенная?
- Что такое спектр электромагнитного излучения?

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.

Наука, изучающая движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем, называется **астрономией**. В современной физике проблемами микромира занимается такая наука, как **физика микромира**. В XX в. появилась новая область науки, которая называется **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 ТЕЛЕСКОПЫ. Космические объекты очень сложно наблюдать с Земли, так как земная атмосфера поглощает часть электромагнитного излучения, идущего из космоса, и отражает другую его часть обратно в космос. Так, например, большая 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 пределами атмосферы нашей планеты.

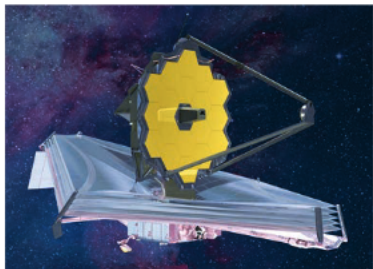
Наши глаза способны воспринимать лишь небольшую часть электромагнитного спектра, поэтому большая часть Вселенной остаётся невидимой для оптических приборов.

Между тем современные телескопы способны работать в различных диапазонах частот — от радиоизлучения до гамма-лучей.

Наблюдения в инфракрасных лучах позволяют нам обнаруживать так называемые тёплые объекты, включая планетарные



Космический телескоп «Хаббл»



Космический телескоп «Джеймс Уэбб»

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.



ЭТО ИНТЕРЕСНО



В 2019 г. на орбиту была выведена российско-немецкая орбитальная обсерватория «Спектр-РГ» («Спектр-Рентген-Гамма»). В 2020 г. благодаря совместной работе учёным удалось составить точную, достаточно подробную карту Вселенной в рентгеновском диапазоне, на которой отмечены звёзды, ядра активных галактик и квазаров, сверхмассивные чёрные дыры и скопления галактик.

Космическое гамма-излучение возникает вследствие процессов, происходящих внутри атомных ядер, а также в процессе взаимодействия частиц и античастиц (например, электронов и позитронов). Гамма-кванты излучаются сверхновыми, нейтронными звёздами и чёрными дырами. Специальные приборы могут регистрировать гамма-лучи, исходящие от Солнца во время солнечных вспышек.

При изучении того или иного космического объекта учёные предпочитают комбинировать изображения, полученные посредством нескольких телескопов различного типа, с целью получения наиболее полного представления об объекте.



КОСМИЧЕСКИЕ МИССИИ. Космические экспедиции очень важны для исследования и освоения Вселенной. В 1957 г. в Советском Союзе был запущен первый искусственный спутник Земли, а в 1961 г. на орбиту вокруг Земли был выведен первый в мире космический корабль-спутник «Восток» с человеком на борту — Юрием Гагариным. С тех пор было отправлено множество спутников и беспилотных космических аппаратов ко всем планетам Солнечной системы, а также их спутникам, астероидам и кометам.

Естественно, что первым объектом для исследования стала Луна как ближайшее к Земле небесное тело. В 1960—1980 гг. было проведено множество успешных

миссий СССР и США. В 1959 г. в результате работы аппарата «Луна-3» были получены первые фотографии обратной стороны Луны, не видимой с Земли. В 1969 г. в рамках миссии «Аполлон-11» был совершён первый пилотируемый полёт на Луну. Астронавты Нил Армстронг и Эдвин Олдрин высадились на поверхность Луны и собрали первые образцы лунной породы для исследований. После этого экспедиции к Луне совершили Япония, Европейское космическое агентство, Китай и Индия. Благодаря этим исследованиям были составлены подробные карты лунной поверхности и выполнен анализ лунных пород.

После успешных лунных экспедиций космические миссии были отправлены к Венере и к Марсу. Марс является самой изучаемой планетой Солнечной системы, так как многие учёные предполагают, что на Марсе когда-то была жизнь. В рамках первых программ «Марс» (СССР) и «Маринер» (США) были запущены космические аппараты к Марсу, которые сделали снимки поверхности, исследовали состав атмосферы и измерили температуру на поверхности. В настоящее время на орбитах Марса работают несколько искусственных спутников, а на поверхности планеты работают автоматические станции, которые должны получить подробный состав марсианских почв и установить, существовали ли когда-либо условия, подходящие для жизни, а также провести подготовку для высадки человека на Марс. Результаты исследований свидетельствуют, что в древние времена на Марсе была пресная вода, пригодная для жизни.

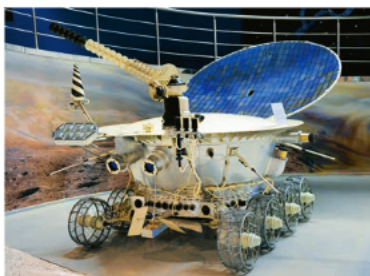
Миссии к планетам-гигантам начались только через 10 лет после начала изучения планет земной группы. К ним были запущены аппараты НАСА (программы «Пионер», «Вояджер» и др.). Космический аппарат «Галилео» (1989) первым вышел на орбиту Юпитера, подробно изучил его атмосферу и спутники.

Человек пока побывал только на Луне, но учёные планируют отправить людей на Марс, Венеру, астероиды и даже за пределы Солнечной системы.

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИКА МИКРОМИРА. Одной из основных задач современной физики микромира является получение ответов на вопросы о том, что происходило в первые мгновения развития Вселенной, как из фундаментальных «кирпичиков материи» — кварков и глюонов образовались протоны, нейтроны и атомы веществ, 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 навстречу друг другу со скоростями, близкими к скорости света, и обладающие огромными энергиями.



Луноход-1 (СССР, 1970)

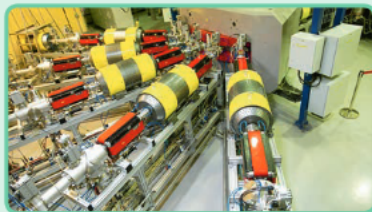


Марсоход (США, 2018)

В результате таких столкновений учёные надеются воссоздать условия, которые существовали при зарождении нашей Вселенной. Подобные установки требуют огромных материальных и интеллектуальных затрат, поэтому различные государства мира объединяют свои усилия и создают международные организации и сообщества, под эгидой которых учёные и инженеры разных стран совместно решают сложные задачи.

Крупнейшими мировыми научными центрами являются Европейский центр ядерных исследований (ЦЕРН), построенный недалеко от Женевы (Швейцария), Брукхейвенская национальная лаборатория, расположенная близ Нью-Йорка (США), Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» в Москве и Объединённый институт ядерных исследований (ОИЯИ) в подмосковном городе Дубна (Россия).

▶ ЭТО ИНТЕРЕСНО



Для поиска новых элементов в Объединённом институте ядерных исследований был создан комплекс сложной аппаратуры (фабрика сверхтяжёлых элементов), 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.

В честь выдающихся советских и российских учёных Д. И. Менделеева, Г. Н. Флёрва, Ю. Ц. Оганесяна были названы элементы периодической таблицы химических элементов: *менделевий* (101), *флеровий* (114) и *оганесон* (118). В названии элемента *самарий* (62) — имя русского горного инженера, полковника В. Е. Самарского-Быховца. В честь России (Руси) назван *рутений* (44), в честь наукограда Дубна — *дубний* (105), в честь Московской области — *московский* (115).

Выводы

- ❗ Исследовать Вселенную можно различными способами: изучая метеориты, упавшие на Землю; наблюдая за далёкими объектами с помощью различных телескопов; изучая космическое пространство с помощью ракет, спутников, космических станций и обсерваторий, а также с помощью экспериментальных физических установок, позволяющих изучать материю на уровне атомов, атомных ядер и ещё глубже.
- ❗ Для того чтобы изучать структуру материи, создаются гигантские физические установки, называемые коллайдерами.

Ключевые слова

Астрономия; астрофизика; физика микромира; космические телескопы; космические миссии

и вопросы задания

1. Какие существуют современные методы исследования Вселенной?
2. Почему для изучения процессов, происходивших в первые мгновения образования Вселенной, в настоящее время необходимо строить огромные установки для осуществления столкновений частиц высоких энергий?

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ § 115



- **ЗАДАЧА 1.** Солнце со своей планетной системой вращается вокруг центра Галактики со скоростью 220 км/с. Сколько оборотов за всё время своего существования совершило Солнце? Возраст Солнца считайте равным 4,5 млрд лет. Расстояние от центра Галактики до Солнца $2,5 \cdot 10^{20}$ м.

Дано:
 $v = 220$ км/с
 $t = 4,5$ млрд лет
 $R = 2,5 \cdot 10^{20}$ м
 $N = ?$

Решение.
 Переведём время в секунды:
 $4,5$ млрд лет $= 4,5 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 1,4 \cdot 10^{17}$ с.
 Период обращения Солнца $T = \frac{2\pi R}{v}$.
 Число оборотов $N = \frac{t}{T} = \frac{tv}{2\pi R}$.

$$N = \frac{1,4 \cdot 10^{17} \text{ с} \cdot 220 \text{ 000 м/с}}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{20} \text{ м}} = 19,6.$$

Ответ: 19,6.

- **ЗАДАЧА 2.** С какой скоростью удаляется от Земли самая близкая к нам галактика — туманность Андромеды, если расстояние до неё составляет 2,5 млн световых лет? Постоянная Хаббла равна 70 км/(с · Мпк).

Дано:
 $R = 2,5 \cdot 10^6$ св. лет
 $H = 70$ км/(с · Мпк)
 $v = ?$

Решение.
 Переведём расстояние, выраженное в световых годах, в парсеки:
 $2,5 \cdot 10^6$ св. лет $= 2,5 \cdot 10^6 / 3,26 = 0,766 \cdot 10^6$ пк $= 0,766$ Мпк.
 По закону Хаббла $v = HR$.
 $v = 70$ км/(с · Мпк) $\cdot 0,766$ Мпк ≈ 53 км/с.

Ответ: 53 км/с.

Задачи для самостоятельного решения

- 1 Масса чёрной дыры, расположенной в центре Галактики, составляет приблизительно 10^{10} масс Солнца. Сравните данное значение с массой атома водорода.
- 2 Сравните значения ускорений свободного падения вблизи поверхности Земли и Солнца.
- 3 Сравните время, которое потребуется свету, чтобы дойти от звезды альфа Центавра (4,4 св. лет) и от звезды Веги (25,3 св. лет) до Земли.

- 4 Оцените расстояние от Солнца до центра нашей галактики Млечный Путь, если свет проходит это расстояние приблизительно за 26 000 лет.
- 5 Радиус орбиты Марса составляет 1,5 а. е., а орбитальная скорость вращения 24,1 км/с. Оцените, за какое время (в земных сутках) Марс делает полный оборот вокруг Солнца.
- 6 В результате своей эволюции Солнце, как предсказывают учёные, станет красным гигантом, причём его радиус увеличится до радиуса орбиты Земли. Как изменится ускорение свободного падения вблизи поверхности Солнца к тому моменту, когда оно станет красным гигантом? Считайте, что масса Солнца останется прежней.
- 7 Для того чтобы звезда превратилась в чёрную дыру, требуется сверхвысокое сжатие вещества. Например, Солнце (при его массе $1,99 \cdot 10^{30}$ кг) должно быть сжато до радиуса ≈ 3 км. Оцените плотность вещества при таком сжатии.
- 8 Оцените среднюю плотность нейтронной звезды массой 1,4 массы Солнца и радиусом 30 км.
- 9 С какой скоростью удаляется от нас галактика Треугольника, если расстояние до неё 2,9 млн св. лет?
- 10 Галактика Фейерверк удаляется от нас со скоростью 470 км/с. Через какое время мы сможем увидеть взрыв сверхновой в этой галактике?

ПОДВЕДЁМ ИТОГИ

- Вселенная — это всё, что существует: от атомов и молекул до огромных космических объектов и их систем.
- Закон Хаббла: Вселенная расширяется, причём скорость, с которой галактики удаляются друг от друга, пропорциональна расстоянию между ними.
- В центре Солнечной системы находится Солнце.
- Вокруг Солнца обращаются восемь больших планет со спутниками, несколько карликовых планет, сотни тысяч астероидов, несколько тысяч комет, множество метеорных тел и космическая пыль.
- Звёзды представляют собой шаровидные космические тела, состоящие из раскалённого газа.
- Энергия выделяется за счёт идущих в звезде термоядерных реакций.
- Звёзды с огромной массой заканчивают свой жизненный путь, превращаясь в чёрные дыры.
- Чёрную дыру можно обнаружить по гравитационному взаимодействию.
- Возраст Вселенной составляет 13,8 млрд лет.
- Теория происхождения Вселенной называется теорией Большого взрыва.

- Исследовать Вселенную можно различными способами: изучая метеориты, упавшие на Землю; наблюдая за объектами, находящимися за пределами нашей планеты, с помощью телескопов; изучая космическое пространство с помощью ракет, спутников, космических станций и кораблей, а также с помощью экспериментальных физических установок, позволяющих изучать материю на уровне атомов, атомных ядер 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?
- ? Есть гипотеза, что во Вселенной могут существовать галактики, состоящие из антивещества. Как вы думаете, могут ли они быть обнаружены имеющимися на сегодня средствами наблюдения?

Темы исследовательских и проектных работ

- Расширяющаяся Вселенная.
- Загадки Вселенной.
- Звёздный «роддом».
- Чёрные дыры.
- Жизнь и смерть звезды.
- От Большого взрыва до наших дней.
- Всё ли мы видим во Вселенной.
- Тёмная материя.
- Энергия во Вселенной.
- Мир волн.
- Исследование Вселенной.
- Физика микромира.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие инженерной деятельности: от Архимеда до наших дней

Учёные изучают то, что уже есть;
инженеры создают то, чего никогда не было.

Альберт Эйнштейн

История человечества неотделима от истории инженерии, истории изобретений и открытий. Для древнего человека основной целью было выживание в тех природных условиях, в которых он находился. И переход от использования готовых предметов, существующих в природе, к созданию новых предметов, например орудий труда и жилищ, сыграл одну из ключевых ролей в развитии цивилизации. К гениальным «инженерным» открытиям древности относятся приспособления из палки и камня, используемые для охоты и войны, добывание огня, колесо, лук и стрелы и др.

Развитие инженерии напрямую связано с развитием науки, особенно математики и физики. Первым великим инженером, о котором нам известно, можно считать Архимеда — древнегреческого математика, физика и инженера из Сиракуз, жившего в III в. до н. э. Он был автором многих технических изобретений. Величайшим достижением Архимеда считается разработка математических методов решения большого числа инженерных задач.

К достижениям инженерной мысли в эпоху Древнего Рима по праву относят строительство великолепных для своего времени дорог, развитие военной техники и судоходства, акведуки и водопровод и многое другое.

В V в. наступила эпоха, которую называют Средневековьем. В это время были изобретены или усовершенствованы различные приборы и механизмы. Всему миру известны великие китайские изобретения: компас, порох, технология изготовления бумаги и книгопечатание. Впечатляют изобретения арабских учёных: ветряная мельница, коленчатый вал, форма архитектурной арки, арабские цифры, которые сейчас используются в большинстве стран мира для записи чисел в десятичной системе счисления.

В Средние века технические знания, технологии и технические приспособления передавались по наследству от отца к сыну. Возникали династии стеклодувов, кузнецов, ткачей, гончаров. Мастера учили подмастерьев, дети наследовали традиции ремесла от отцов. Поэтому новшества появлялись достаточно редко и распространялись крайне медленно.

В конце XII — начале XIII в. появились первые университеты в Европе: Болонский университет в Италии и Оксфордский университет в Англии.

XIV—XVI века вошли в историю Европы как эпоха Возрождения. Это название прежде всего отражает возрождение интереса к величайшим достижениям науки, искусства и инженерии Античности, многие из которых были забыты или утрачены. Именно в эпоху Возрождения творили такие великие учёные и инженеры, как Леонардо да Винчи, Иоганн Кеплер, Тихо Браге, Николай Коперник, Галилео Галилей, были сделаны великие географические открытия, бурно развивались науки и искусства.

Одно из величайших технических изобретений этой эпохи — изобретение книгопечатания. Именно создание технических устройств, которые позволяли не переписывать книги от руки, а издавать их в виде напечатанных текстов большими

тиражами, позволило ускорить и расширить процесс распространения знаний, сделать их доступными большому количеству людей. В Европе в середине XV в. автором изобретения книгопечатания является немецкий первопечатник Иоганн Гутенберг. На его станке можно было изготовить около 100 оттисков одной страницы за час. В России печатать книги начали в XVI в. при Иване Грозном.

С эпохой Возрождения начинается новый этап развития техники, с которого, как считают историки науки, собственно, начинается развитие инженерной деятельности так, как мы её понимаем и сегодня. С этой же эпохой связано и формирование физики как науки. Первые открытия на этом этапе принадлежат итальянскому физическому, механику, астроному, математику и философу Галилео Галилею. В это время огромное внимание исследователями уделяется созданию новых приборов и повышению точности измерений. Например, новые астрономические приборы, изготовленные датским астрономом Тихо Браге, помогли в определении координат звёзд с небывалой до этого времени точностью. Результаты этих измерений помогли ученику Тихо Браге, немецкому астроному Иоганну Кеплеру, вывести знаменитые законы движения планет.

Вслед за изобретением Галилеем телескопа, давшего возможность астрономических наблюдений, был изобретён и микроскоп, позволяющий в деталях рассматривать мелкие объекты. В 1665 г. Р. Гук создал свой первый микроскоп, который обладал 30-кратным увеличением, и с его помощью обнаружил, что всё живое состоит из клеток. Микроскопы Левенгука, сконструированные им с 1674 г., могли увеличивать от 100 до 300 раз. Благодаря своим устройствам Левенгук впервые наблюдал микроорганизмы.

Научная революция, начавшаяся с трудов Коперника, завершилась во второй половине XVII в. трудами великого Исаака Ньютона, который открыл законы, ставшие основой классической механики. Вслед за научной революцией в XVIII—XIX вв. произошла промышленная революция, когда технические изобретения позволили массово перейти от ручного труда к машинному. Начало бурного развития промышленного производства связано с изобретением ткацкого станка и паровой машины. В нашей стране первую паровую машину создал русский инженер-изобретатель Иван Иванович Ползунов. Первый паровоз в России построили отец и сын Черепановы.

Если XVIII век назывался веком пара, то XIX век стал веком электричества. Электричество открыло для человечества принципиально новые возможности. Паровая машина может преобразовать энергию сгорания угля в полезную работу, но использовать эту энергию можно только в том месте, где установлена угольная топка и паровой котёл. Электростанция может быть размещена на большом расстоянии от потребителя электроэнергии и при этом снабжать его необходимой электроэнергией.

В 1775 г. А. Вольта изготовил первый источник электрического тока, состоявший из цинковой и медной пластинок, разделённых лоскутком ткани, пропитанным солёной водой или разбавленной кислотой. Поворот магнитной стрелки вблизи проводника с током, обнаруженный Х. Эрстедом в 1820 г., впервые продемонстрировал взаимосвязь электрических и магнитных явлений.

В 1831 г. М. Фарадей «превратил магнетизм в электричество» и открыл закон электромагнитной индукции, что позволило в дальнейшем создать электрический двигатель, генератор электрического тока, электростанции.

В 1864 г. английский учёный Дж. Максвелл создал теорию электромагнитного поля и выдвинул гипотезу существования электромагнитных волн. В 1888 г. Г. Герц подтвердил предсказания теории Максвелла — открыл электромагнитные волны и установил прямолинейность их распространения. За открытием Герца

последовал лавинный рост изобретений и открытий, кардинально изменивших наш мир. Самые знаковые из них — радио, телевидение. В изобретение радио и телевидения большой вклад внесли наши соотечественники А. С. Попов и В. К. Зворыкин.

На рубеже XIX—XX вв. произошёл ряд удивительных научных открытий, которые классическая наука не могла объяснить. Это и открытие излучения нового неизвестного вида, названное по имени своего открывателя рентгеновским (1895), и открытие А. Беккерелем явления радиоактивности (1896), открытие Дж. Дж. Томсоном электрона (1897), гипотеза М. Планка о квантовой природе света (1900), открытие Э. Резерфордом атомного ядра (1911), квантовая модель атома Н. Бора (1913), открытие деления ядер урана под действием нейтронов О. Ганом и Ф. Штрассманом (1939), открытие спонтанного деления ядер урана советскими физиками Г. Н. Флёровым и К. А. Петряком (1940). Все эти открытия стали основой новой научной революции.

Стало ясно, что понимание законов квантовой механики и связи массы и энергии даёт человечеству возможность доступа к огромным запасам энергии, скрытым внутри атомных ядер. Формула Эйнштейна $E_0 = mc^2$ стала символом XX в. В 50-х гг. прошлого столетия началось строительство первых атомных станций — очень сложных сооружений, воплотивших в себе самые передовые технологии того времени.

С именами советских учёных П. Л. Капицы, Л. Д. Ландау, Н. Н. Боголюбова, В. Л. Гинзбурга и А. А. Абрикосова связаны теоретические и экспериментальные исследования двух важнейших для квантовой физики явлений — сверхтекучести и сверхпроводимости. В дальнейшем это позволило создать новую область инженерии, связанную с созданием криогенной техники.

Благодаря трудам Н. Г. Басова и А. М. Прохорова в России были созданы первые лазеры. За эту разработку они получили Нобелевскую премию по физике. Лазерные технологии стали стремительно развиваться, и сейчас лазерная техника применяется в медицине, биологии, промышленности и даже в повседневной жизни.

Открытия Ж. И. Алфёрова в области физики полупроводников стали основой для создания нового поколения микроэлектронных устройств, без которых уже немислим современный мир: мобильных телефонов, современных компьютеров, оптоволоконной связи и многих других. Работы Алфёрова, за которые он получил Нобелевскую премию, открыли людям дорогу в эру электроники и цифровых технологий.

С именами советских учёных, академиков В. И. Векслера и Г. И. Будкера связаны разработка теории и инженерные решения, которые позволили создать современные ускорители и коллайдеры.

В течение XX в. научно-технический прогресс развивался с небывалым до этого ускорением. В 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли, а в 1961 г. Ю. А. Гагарин совершил первый полёт в космос. Произошло это благодаря идеям К. Э. Циолковского, разработавшего теорию движения ракет и реактивных приборов, а также конструкторскому таланту С. П. Королёва, который реализовал эти идеи, создав ракетно-космическую технику.

В XXI в. скорость изменений во всех областях жизни постоянно возрастает. Развитие информационно-коммуникационных технологий и электроники обеспечило возможности получения, обработки и передачи огромных массивов данных, стремительно развивается робототехника, геновая инженерия и телемедицина, фундаментальная наука делает новые открытия о строении Вселенной. Сейчас в России создаются новые крупнейшие инженерные сооружения для фундаментальных и прикладных исследований.

В 2010 г. Нобелевскую премию по физике получили два наших соотечественника А. К. Гейм и К. С. Новосёлов за открытие самого тонкого в мире материала — графена. Этот материал толщиной всего в один атом обладает удивительными свойствами. Его высокая прочность, упругость и прозрачность находят применение в современной электронике, медицине, космической промышленности.

За последние годы российскими учёными были синтезированы новые элементы таблицы Д. И. Менделеева. По инициативе Ю. Ц. Оганесяна, именем которого назван новый 118-й элемент Периодической системы, создана первая в мире «фабрика сверхтяжёлых элементов».

В России также создаются исследовательские установки класса мегасайенс. Среди них ускорительный комплекс на встречных пучках тяжёлых ионов NICA, Международный центр нейтронных исследований на базе высокопоточного исследовательского реактора ПИК, токамак с сильным магнитным полем (Игнитор), рентгеновский источник синхротронного излучения четвёртого поколения (ИССИ-4), сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ).

Для того чтобы продолжать развиваться, но при этом сохранить уникальные природные богатства нашей планеты, развивать экологически чистые технологии, необходимо новое поколение учёных и инженеров, готовых получать новые знания в течение всей жизни.

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. Знание физики необходимо инженерам, программистам, врачам, биологам и даже архитекторам. Это стало особенно важным сейчас, когда многие достижения современных технологий рождаются на стыке различных наук.

Удачи вам в этом нелёгком, но очень интересном деле изучения физики!

Ответы к задачам для самостоятельного решения

ГЛАВА 7

- 2 с.
- Воздух и вода, в воде в 4,4 раза больше.
- Уменьшится в 17,7 раза.
- 2,7 км.
- 440 Гц.
- 2 с.
- 0,625 мм; 75 мкм—1,5 мм.
- 150 м/с; 600 м.

ГЛАВА 8

- ≈ 280 кВт.
- В первом трансформаторе в 1,3 раза больше.
- 71 В; 7,1 Ом; 93 %.
- 0,4 мФ.
- Да.
- 500 кГц.
- 0,8 мкс.
- 30 км.
- 50 км.
- 0,1 мс.

ГЛАВА 9

- 3,5 м.
- 88 см.
- 2; 3; 5.
- Стекло, алмаз, $n_2/n_1 = 1,5$.
- $\approx 48^\circ$.
- 2,4; алмаз.
- 44° .
- Вторая в $\approx 1,7$.
- 7,5 см; 1 см.
- 0,5 м; 37,5 м.

ГЛАВА 10

- 360 с; 2600 с.
- $1,987 \cdot 10^8$ м/с; $1,959 \cdot 10^8$ м/с.
- 436 нм.
- Красный.

ГЛАВА 11

- 993 нм.
- $2,5 \cdot 10^{15}$ Гц; $2,9 \cdot 10^{15}$ Гц.
- $\approx 0,1$ %.
- 25.
- $1,72 \cdot 10^{35}$ Гц.
- Нет.
- $1,6 \cdot 10^{-10}$ Дж.
- $1,43 \cdot 10^{-29}$ кг.
- 0.
- 3,2 МэВ.

ГЛАВА 12

- $\approx 10^{67}$ раз больше.
- Отличаются в 28 раз.
- От Веги в 5,75 раза больше.
- $\approx 2,5 \cdot 10^{20}$ м.
- Около 680 земных суток.
- Уменьшится в $\approx 4,6 \cdot 10^4$ раза.
- $\approx 1,8 \cdot 10^{19}$ кг/м³.
- $\approx 2,5 \cdot 10^{16}$ кг/м³.
- 61 км/с.
- 22,5 млн лет.