

## ОПТИКА

От источника света, например от лампочки, свет распространяется во все стороны и падает на окружающие предметы, вызывая, в частности, их нагревание. Попадая в глаз, свет вызывает зрительные ощущения — мы видим. Можно сказать, что при распространении света происходит передача воздействий от одного тела (источника) к другому (приёмнику).

Вообще же действие одного тела на другое может осуществляться двумя способами: либо посредством *переноса вещества* от источника к приёмнику, либо же посредством *изменения состояния среды* между телами (без переноса вещества).

**Корпускулярная и волновая теории света.** В соответствии с двумя способами передачи энергии от источника к приёмнику возникли и начали развиваться две совершенно разные теории, объясняющие, что такое свет, какова его природа. Причём возникли они почти одновременно в XVII в.

Одна из этих теорий связана с именем Ньютона, другая — с именем Гюйгенса.

### ВАЖНО

Ньютон придерживался так называемой *корпускулярной* теории света, согласно которой свет — это *поток частиц*, идущих от источника во все стороны (перенос вещества).

Согласно же представлениям Гюйгенса свет — это *волны*, распространяющиеся в особой гипотетической среде — эфире, заполняющем всё пространство и проникающем внутрь всех тел.



Обе теории длительное время существовали параллельно. Ни одна из них не могла одержать решающей победы. Лишь авторитет Ньютона заставлял большинство учёных отдавать предпочтение корпускулярной теории. Известные в то время из опыта законы распространения света более или менее успешно объяснялись обеими теориями.

На основе корпускулярной теории было трудно объяснить, почему световые пучки, пересекаясь в пространстве, никак не действуют друг на друга. Ведь световые частицы должны сталкиваться и рассеиваться. Волновая же теория это легко объясняла. Волны, например на поверхности воды, свободно проходят друг сквозь друга, не оказывая взаимного влияния.

Однако прямолинейное распространение света, приводящее к образованию за предметами резких теней, трудно объяснить на основе волновой теории. По корпускулярной же теории прямолинейное распространение света является просто следствием закона инерции.

### ИНТЕРЕСНО

Первые представления древних учёных о свете были весьма наивны. Считалось, что из глаз выходят особые тонкие щупальца и зрительные впечатления возникают при ощупывании ими предметов.

Такая неопределённость во взглядах на природу света господствовала до начала XIX в., когда были впервые изучены явление огибания светом препятствий (дифракция) и явление усиления или ослабления света при наложении световых

пучков друг на друга (интерференция). Эти явления присущи исключительно волновому движению. Объяснить их с помощью корпускулярной теории нельзя. Поэтому казалось, что волновая теория одержала окончательную и полную победу.

Такая уверенность особенно окрепла, когда Максвелл во второй половине XIX в. доказал, что свет — это частный случай электромагнитных волн.

**Важно**

света.

Работами Максвелла были заложены основы *электромагнитной теории*

После экспериментального обнаружения электромагнитных волн Герцем никаких сомнений в том, что при распространении свет ведёт себя как волна, не осталось. Нет их и сейчас.

Однако в начале XX в. представления о природе света начали тем не менее коренным образом меняться. Неожиданно выяснилось, что отвергнутая корпускулярная теория всё же имеет отношение к действительности. Оказалось, что

**Важно**

при излучении и поглощении свет ведёт себя подобно *потoku частиц*.

Были обнаружены прерывистые, или, как говорят, *квантовые*, свойства света. Возникла необычная ситуация: явления интерференции и дифракции по-прежнему можно было объяснить, если считать свет волной, а явления излучения и поглощения — если считать свет потоком частиц. В этой связи вспомним прежде всего, что нам было известно о свете раньше из курса физики.

**Геометрическая оптика.** При первоначальном ознакомлении с оптическими явлениями было введено понятие светового луча как линии, перпендикулярной фронту волны и указывающей направление, в котором свет переносит энергию.

**Запомни**

**Геометрической оптикой** называется раздел оптики, в котором изучаются законы распространения света в прозрачных средах и законы его отражения от зеркальных поверхностей на основе представления о световых лучах.

**Световой луч** — это линия, указывающая, в каком направлении свет переносит энергию. Световой луч перпендикулярен фронту волны.

**Важно**

Одним из основных положений геометрической оптики является положение о прямолинейности распространения света.

Законы преломления и отражения света были установлены экспериментально задолго до выяснения природы света. Однако они могут быть выведены на основе волновой теории в случае, если длина волны света много меньше размеров препятствий, расположенных не очень далеко от места наблюдения.

## ГЛАВА 7 СВЕТОВЫЕ ВОЛНЫ



## § 44 СКОРОСТЬ СВЕТА

Сформулируйте один из основных законов геометрической оптики — закон прямолинейного распространения света.

Когда мы поворачиваем выключатель, то вся комната сразу же озаряется светом. Кажется, что свету совсем не надо времени, чтобы достигнуть стен. Предпринимались многочисленные попытки определить скорость света. Для этого пытались измерить по точным часам время распространения светового сигнала на большие расстояния (несколько километров). Но эти попытки не дали результата. Начали думать, что распространение света совсем не требует времени, что свет любые расстояния преодолевает мгновенно. Однако оказалось, что скорость света не бесконечно велика, и эта скорость была в конце концов измерена.

**Астрономический метод измерения скорости света.** Скорость света впервые удалось измерить датскому учёному О. Рёмеру в 1676 г. Рёмер был астрономом, и его успех объясняется именно тем, что он использовал для измерений очень большие проходимые светом расстояния. Это расстояния между планетами Солнечной системы.

Рёмер наблюдал затмения спутников Юпитера — самой большой планеты Солнечной системы. Юпитер имеет шестнадцать спутников. Ближайший его спутник — Ио — стал предметом наблюдений Рёмера. Он видел, как спутник проходил перед планетой, погружался в её тень и пропадал из поля зрения. Затем он опять появлялся, как мгновенно вспыхнувшая лампа. Промежуток времени между двумя вспышками оказался равным 42 ч 28 мин. Таким образом, эта «луна» представляла собой громадные небесные часы, посылавшие свои сигналы на Землю через равные промежутки времени.

Вначале измерения проводились в то время, когда Земля при своём движении вокруг Солнца ближе всего подошла к Юпитеру (рис. 7.1). Такие же измерения, проведённые несколько месяцев спустя, когда Земля удалилась от Юпитера, неожиданно показали, что спутник опоздал появиться из тени на целых 22 мин по сравнению с моментом времени, который можно было рассчитать, зная период обращения Ио.

Рёмер объяснял это так: «Если бы я мог остаться на другой стороне земной орбиты, то спутник всякий раз появлялся бы из тени в назначенное время; наблюдатель, находящийся там, увидел бы Ио на 22 мин раньше. Запаздывание в этом случае происходит оттого, что свет употребляет 22 мин

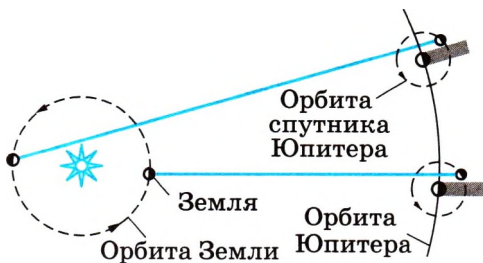


Рис. 7.1

на прохождение от места моего первого наблюдения до моего теперешнего положения». Зная время запаздывания появления Ио и расстояние, которым оно вызвано, можно определить скорость света, разделив это расстояние на время запаздывания. Скорость оказалась чрезвычайно большой, примерно 300 000 км/с. Потому-то крайне трудно определить время распространения света между двумя удалёнными точками на Земле. Ведь за одну секунду свет проходит расстояние, большее длины земного экватора в 7,5 раза.

**Лабораторные методы измерения скорости света.** Впервые скорость света лабораторным методом измерил французский физик И. Физо в 1849 г.

В опыте Физо свет от источника, пройдя через линзу, падал на полупрозрачную пластинку 1 (рис. 7.2). После отражения от пластинки сфокусированный узкий пучок направлялся на периферию быстро вращающегося зубчатого колеса. Пройдя между зубцами, свет достигал зеркала 2, находящегося на расстоянии  $l \sim 8,6$  км от колеса.

Отразившись от зеркала, свет, прежде чем попасть в глаз наблюдателя, должен был пройти опять между зубцами. Когда колесо вращалось медленно, свет, отражённый от зеркала, был виден. При увеличении скорости вращения он постепенно исчезал. В чём же здесь дело? Пока свет, прошедший между двумя зубцами, шёл до зеркала и обратно, колесо успевало повернуться так, что на место прорези вставал зубец, и свет переставал быть видимым.

При дальнейшем увеличении скорости вращения свет опять становился видимым. Очевидно, что за время распространения света до зеркала и обратно колесо успевало в этом случае повернуться настолько, что на место прежней прорези вставала уже новая прорезь.

Зная это время и расстояние между колесом и зеркалом, можно определить скорость света. В опыте Физо при расстоянии, равном 8,6 км, для скорости света было получено значение 313 000 км/с.

Было разработано ещё много других, более точных лабораторных методов измерения скорости света. В частности, американский физик А. Майкельсон разработал совершенный метод определения скорости света с применением вращающихся зеркал.

Была измерена скорость в различных прозрачных средах. Она всегда оказывалась меньше, чем в вакууме.

По современным данным, скорость света в вакууме равна 299 792 458 м/с (с точностью до  $\pm 1,2$  м/с) или приближённо  $3 \cdot 10^8$  м/с.

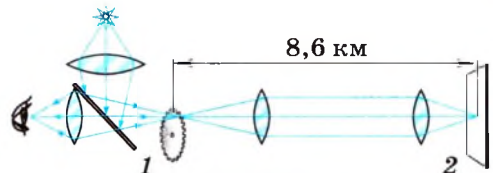


Рис. 7.2



Подумайте, почему в опыте Физо расстояние должно было быть столь большим.



Скорость света. Экспериментальные методы измерения скорости света

Найти

? В чём состояла основная трудность при измерении скорости света?



## § 45 ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА. ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА

Что такое свет?

Какие законы геометрической оптики вы знаете?



**Х. Гюйгенс**  
(1629—1695)



Законы отражения и преломления света можно вывести из одного общего принципа, описывающего поведение волн. Этот принцип (мы о нём уже говорили в § 33) впервые был выдвинут в XVII в. современником Ньютона Христианом Гюйгенсом.

**Закон отражения.** Согласно *принципу Гюйгенса* каждая точка ( $M_1, M_2, M_3 \dots$ ) волнового фронта является источником вторичных волн (рис. 7.3). Огибающая поверхность к фронтам волн от вторичных источников определяет положение нового фронта волны. С помощью принципа Гюйгенса можно вывести закон отражения света.



Рассмотрим, как происходит отражение плоской волны. Повторим определение плоской волны.

**Запомни**

Волна называется **плоской**, если поверхности равной фазы (волновые поверхности) и соответственно фронт волны представляют собой плоскости.

На рисунке 7.4  $MN$  — отражающая поверхность; прямые  $A_1A$  и  $B_1B$  — два луча падающей плоской волны. Плоскость  $AC$  — фронт волны в момент времени, когда луч  $A_1A$  дошёл до отражающей поверхности.

**Запомни**

**Углом падения** называют угол  $\alpha$  между падающим лучом и нормалью к отражающей поверхности в точке падения.

Волновую поверхность отражённой волны можно получить, если провести огибающую к фронтам вторичных волн, центры которых лежат на границе раздела двух сред. Различные участки волновой поверхности  $AC$  достигают отражающей границы не одновременно.



Подумайте, что изображает поверхность  $CD$  (см. рис. 7.3). Какой источник создаёт фронт волны, показанный на этом рисунке?

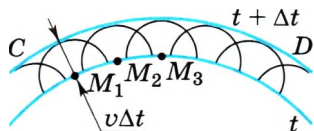


Рис. 7.3

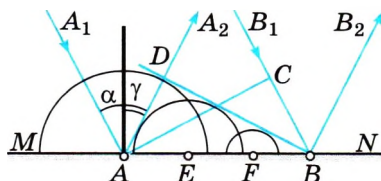


Рис. 7.4

Возбуждение колебаний в точке  $A$  начнётся раньше, чем в точке  $B$ , на время  $\Delta t = \frac{CB}{v}$  ( $v$  — скорость волны).

В момент, когда волна достигнет точки  $B$  и в этой точке начнётся возбуждение колебаний, вторичная волна с центром в точке  $A$  уже будет представлять собой полусферу радиусом  $r = AD = v\Delta t = CB$ . Фронты вторичных волн от источников, расположенных между точками  $A$  и  $B$ , показаны на рисунке 7.4. Огибающей фронтов вторичных волн — фронт отражённой волны — является плоскость  $DB$ , касательная к сферическим поверхностям. Лучи  $AA_2$  и  $BB_2$  перпендикулярны фронту отражённой волны  $DB$ .

**ЗАПОМНИ**

**Углом отражения** называют угол  $\gamma$  между нормалью к отражающей поверхности и отражённым лучом.

Так как  $AD = CB$  и треугольники  $ADB$  и  $ACB$  прямоугольные, следовательно, треугольники равны и угол  $CAB$  равен углу  $DBA$ . Но  $\angle CAB = \alpha$ , а  $\angle DBA = \gamma$  как углы с взаимно перпендикулярными сторонами. Следовательно, угол отражения равен углу падения:

$$\alpha = \gamma. \quad (7.1)$$

Луч падающий, луч отражённый и нормаль к отражающей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости, причём угол падения равен углу отражения.

**ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА**

При обратном направлении распространения световых лучей отражённый луч станет падающим, а падающий — отражённым.



Проведите эксперимент и убедитесь в справедливости закона отражения.

**ВАЖНО**

Обратимость хода световых лучей — их важное свойство.



Принцип Гюйгенса. Закон отражения света



1. Как с помощью закона отражения построить изображение точечного источника света в плоском зеркале?
2. Почему нельзя использовать плоское зеркало в качестве киноэкрана?

1. Луч света падает на плоское зеркало. Угол падения равен  $15^\circ$ . Угол между отражённым лучом и зеркалом

- 1)  $15^\circ$                       2)  $30^\circ$                       3)  $75^\circ$                       4)  $105^\circ$

2. Луч света падает на плоское зеркало. Угол между падающим лучом и зеркалом равен  $20^\circ$ . Угол между падающим и отражённым лучами

- 1)  $50^\circ$                       2)  $100^\circ$                       3)  $40^\circ$                       4)  $140^\circ$





## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА. ЗАКОНЫ ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА»

Одним из основных законов геометрической оптики является закон прямолинейного распространения света. Используя этот закон, можно определить, например, размеры тени от предмета.

Главное при решении задач на законы отражения — необходимо правильно построить лучи, отражённые от зеркальной поверхности согласно закону отражения.

**Задача 1.** Определите диаметр Солнца, если известно, что диаметр Луны  $3,48 \cdot 10^6$  м. Расстояние от Земли до Луны равно  $3,8 \cdot 10^8$  м, а до Солнца  $1,5 \cdot 10^8$  км.

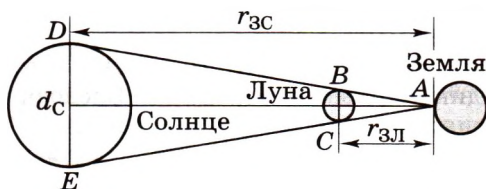


Рис. 7.5

**Решение.** Угловые диаметры Луны и Солнца приблизительно одинаковы, что проявляется при солнечных затмениях (рис. 7.5). Из подобия треугольников  $ABC$  и  $ADE$  следует:

$$\frac{d_{\text{л}}}{r_{\text{зл}}} = \frac{d_{\text{с}}}{r_{\text{зс}}}, \text{ откуда}$$

$$d_{\text{с}} = d_{\text{л}} \frac{r_{\text{зс}}}{r_{\text{зл}}} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ м.}$$

**Задача 2.** Человек, рост которого равен  $h$ , приближается по прямой со скоростью  $v_0$  к фонарю, висящему на высоте  $H$ . Определите скорость, с которой будет уменьшаться размер его тени, и скорость, с которой «бежит» тень головы человека.

**Решение.** На рисунке 7.6 отмечены тени  $A_1B_1$  и  $A_2B_2$  человека, когда он находится на двух разных расстояниях от фонаря. Из подобия треугольников  $A_1C_1B_1$  и  $OEB_1$  следует:  $\frac{H}{h} = \frac{OB_1}{A_1B_1}$ , из подобия треугольников  $A_2C_2B_2$  и  $OEB_2$

следует:  $\frac{H}{h} = \frac{OB_2}{A_2B_2}$ .

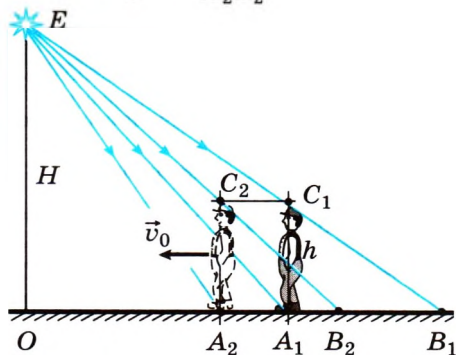


Рис. 7.6

В свою очередь,  $OA_1 - OA_2 = C_1C_2 = v_0 \Delta t$ , где  $\Delta t$  — время перехода человека из положения  $A_1$  в положение  $A_2$ . Изменение размера тени  $\Delta x = v_{\tau} \Delta t = A_1B_1 - A_2B_2 = (OB_1 - OB_2) \frac{h}{H} = B_1B_2 \cdot \frac{h}{H}$ . Из подобия треугольников  $B_1B_2E$  и  $C_1C_2E$  следует  $\frac{B_1B_2}{C_1C_2} = \frac{H}{H-h}$ ,  $B_1B_2 = v_0 \Delta t \frac{H}{H-h}$ . Следовательно скорость уменьшения размеров тени равна  $v_{\tau} = v_0 \frac{H}{H-h} \frac{h}{H} = v_0 \frac{h}{H-h}$ .

Скорость, с которой тень «бежит» головы человека, определим из подобия треугольников  $C_1C_2E$  и  $B_1B_2E$ :  $\frac{v_0 t}{v_r t} = \frac{H - h}{H}$ , тогда  $v_r = v_0 \frac{H}{H - h}$ .

**Задача 3.** Плоское зеркало повернули на угол  $\alpha = 17^\circ$  вокруг оси, лежащей в плоскости зеркала. На какой угол  $\beta$  повернётся отражённый от зеркала луч, если направление падающего луча осталось неизменным?

**Решение.** Пусть  $\varphi$  — первоначальный угол падения луча (рис. 7.7). По закону отражения угол отражения также равен  $\varphi$ , и, следовательно, угол между падающим лучом и отражённым лучом равен  $2\varphi$ . При повороте зеркала на угол  $\alpha$  перпендикуляр  $I$  к зеркалу, восстановленный в точке падения, также повернётся на угол  $\alpha$  и займёт положение  $II$ . Значит, новый угол падения будет равен  $\varphi + \alpha$ . Таким же будет и новый угол отражения.

Поэтому угол, на который повернётся отражённый луч,  $\beta = (\varphi + \alpha) - (\varphi - \alpha) = 2\alpha = 34^\circ$  (см. рис. 7.7).

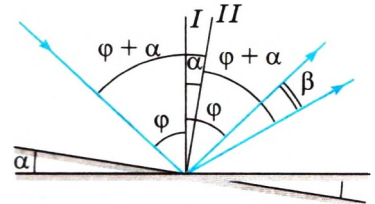


Рис. 7.7

**Задача 4.** Постройте изображение точечного источника  $S$  в плоском зеркале и определите расстояние между источником и его изображением. Расстояние от источника до зеркала равно  $h$ .

**Решение.** Проведём луч  $SA$  (рис. 7.8), падающий на зеркало. По закону отражения угол падения равен углу отражения:  $\angle SAN = \angle BAN$ ,  $\alpha = \beta$ . Луч  $SC$ , перпендикулярный плоскости зеркала, отразившись, пойдёт по тому же пути  $CS$ .

Мы видим, что отражённые лучи не пересекаются, но пересекаются их продолжения. Таким образом, мнимое изображение источника  $S$  находится в точке  $S_1$ .

Так как  $\angle ASC = \alpha$  (накрест лежащие углы параллельных прямых), а  $\angle AS_1C = \beta$  (соответственные углы параллельных прямых), то треугольник  $AS_1S$  равнобедренный,  $CA$  — высота этого треугольника. Следовательно, расстояние между источником и его изображением равно  $2h$ .

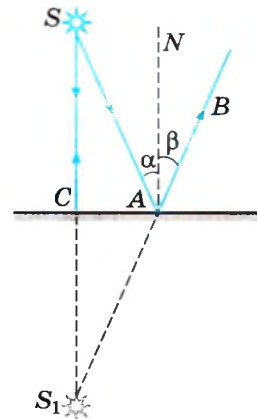


Рис. 7.8

**Задача 5.** Определите число изображений  $N$  точечного источника света  $S$ , полученных в двух плоских зеркалах, образующих друг с другом угол  $\gamma = 60^\circ$ . Источник находится на биссектрисе угла.

**Решение.** Построим изображение  $S_1$  источника  $S$  в зеркале  $I$  (рис. 7.9). Мы можем считать это изображение  $S_1$ , полученное в зеркале  $I$ , предметом



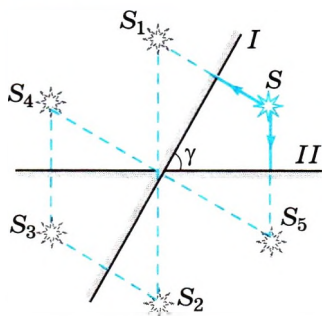


Рис. 7.9

для зеркала  $II$ , а затем изображение  $S_2$ , полученное в зеркале  $II$  предметом для зеркала  $I$ , в котором получаем изображение  $S_3$ .

Также получим изображение  $S_4$  источника  $S_3$  в зеркале  $II$ , являющееся предметом для зеркала  $I$ , которое даёт изображение  $S_5$ . Изображение  $S_5$ , в свою очередь, является предметом для зеркала  $II$ , но его изображение в этом зеркале совпадает с источником  $S$ . Все последующие изображения будут совпадать. На рисунке 7.9 штриховыми линиями показаны лучи, образующие эти мнимые источники. Итак, число изображений  $N = 5$ .

Число изображений можно определить по формуле  $N = (2\pi/\gamma) - 1$ , которая является общей для

подобных задач. Так, число изображений точечного источника, полученных в двух взаимно перпендикулярных плоских зеркалах ( $\gamma = \pi/2$ ),  $N = 3$ , в плоском зеркале ( $\gamma = \pi$ )  $N = 1$ .

### Задачи для самостоятельного решения

1. «Комната, в которую вступил Иван Иванович, была совершенно темна, потому что ставни были закрыты, и солнечный луч, проходя в дыру, сделанную в ставне, принял радужный цвет и, ударяясь в противоположную стену, рисовал на ней пёстрый ландшафт из крыш, деревьев и развешанного на дворе платья, всё только в обращённом виде» (Н. В. Гоголь. «Повесть о том, как поссорился Иван Иванович с Иваном Никифоровичем»). Объясните это явление.

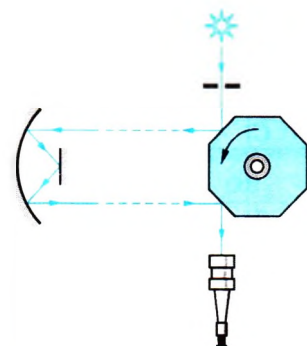


Рис. 7.10

2. Почему тень ног человека на земле от фонаря резко очерчена, а тень головы более расплывчата?

3. На рисунке 7.10 представлена схема опыта Майкельсона по определению скорости света. С какой частотой должна вращаться восьмиугольная зеркальная призма, чтобы источник был виден в зрительную трубу, если световой луч проходит расстояние, примерно равное 71 км?

4. Предмет расположен между двумя плоскими зеркалами, образующими угол  $\alpha = 30^\circ$ , и находится на расстоянии  $l = 10$  см от линии пересечения зеркал на одинаковом расстоянии от обоих зеркал. Определите расстояние между мнимыми изображениями этого предмета в зеркалах.

5. Луч от точечного источника  $S$  падает на плоское зеркало в точке  $A$  и, отражаясь, проходит через точку  $B$  (рис. 7.11). Докажите, что если бы луч от того же источника прошёл через точку  $B$ , отразившись от зеркала в точке  $D$ , то:

1) не был бы выполнен закон отражения;

2) путь  $SDB$  был бы пройден светом за большее время, чем путь  $SAB$ .

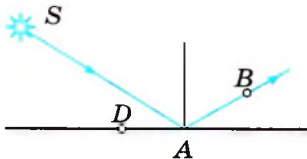


Рис. 7.11



## § 47 ЗАКОНЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

Вспомните, в чём состоит явление преломления света.

При падении светового луча на границу раздела двух сред часть световой энергии возвращается в первую среду, т. е. происходит отражение света. Если вторая среда прозрачна, то свет частично может пройти через границу сред, меняя при этом, как правило, направление распространения.

**Запомни**

**Преломлением света** называется явление изменения направления распространения света при прохождении через границу двух сред.

Вследствие преломления наблюдается кажущееся изменение формы предметов, их расположения и размеров. В этом нас могут убедить простые наблюдения. Положим на дно пустого непрозрачного сосуда монету или другой небольшой предмет. Подвинем сосуд так, чтобы центр монеты, край сосуда и глаз находились на одной прямой. Не меняя положения головы, будем наливать в сосуд воду. По мере повышения уровня воды дно сосуда с монетой как бы приподнимается. Монета, которая ранее была видна лишь частично, теперь будет видна полностью. Установим наклонно карандаш в сосуде с водой. Если посмотреть на сосуд сбоку, то можно заметить, что часть карандаша, находящаяся в воде, кажется сдвинутой в сторону.

Эти явления объясняются изменением направления лучей на границе двух сред — преломлением света.

Закон преломления света определяет взаимное расположение падающего луча  $AB$  (рис. 7.12), преломлённого луча  $DB$  и перпендикуляра  $CE$  к поверхности раздела сред, восстановленного в точке падения.

Угол между падающим лучом и перпендикуляром к поверхности называется **углом падения**, а угол между преломлённым лучом и перпендикуляром — **углом преломления**.

Падающий, отражённый и преломлённый лучи нетрудно наблюдать, сделав узкий световой пучок видимым.

**Вывод закона преломления света.** Выведем закон преломления света с помощью принципа Гюйгенса.

Преломление света при переходе из одной среды в другую вызвано тем, что скорость распространения света неодинакова



Приведите примеры явления преломления света, которые вы наблюдали в повседневной жизни.



Проведите описанные в тексте эксперименты и начертите ход лучей, отражённых от монеты и попадающих в глаз.

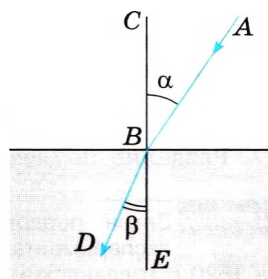


Рис. 7.12





Направьте луч лазерной указки на поверхность воды в прозрачном сосуде и посмотрите, как он преломляется.

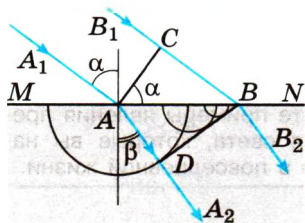


Рис. 7.13

и зависит от свойств среды. Обозначим скорость волны в первой среде через  $v_1$ , а во второй — через  $v_2$ .

Пусть на плоскую границу раздела двух сред (например, воздуха и воды) падает плоская световая волна (рис. 7.13). Обозначим через  $AC$  фронт волны в тот момент, когда волна достигнет точки  $A$ . Луч  $B_1B$  достигнет границы раздела двух сред спустя время  $\Delta t$ :

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}.$$

Когда волна достигнет точки  $B$ , вторичная волна во второй среде от источника, находящегося в точке  $A$ , уже будет иметь вид полусферы радиусом

$$AD = v_2 \Delta t.$$

Фронт преломлённой волны можно получить, проведя поверхность, касательную ко всем фронтам вторичных волн во второй среде, источники которых находятся на границе раздела сред. В данном случае фронт преломлённой волны — плоскость  $BD$ . Она является огибающей фронтов вторичных волн.

Угол падения  $\alpha$  луча  $A_1A$  равен углу  $CAB$  в треугольнике  $ABC$  (углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами). Следовательно,

$$CB = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (7.2)$$

Угол преломления  $\beta$  равен углу  $ABD$  треугольника  $ABD$  (углы между двумя взаимно перпендикулярными сторонами). Поэтому

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \beta. \quad (7.3)$$

Разделив почленно уравнение (7.2) на уравнение (7.3), получим

**ИНТЕРЕСНО** Закон преломления света был экспериментально установлен в 1620 г. голландским учёным Виллебродом Снеллиусом, а в 1637 г. независимо от Снеллиуса этот закон математически вывел французский математик Рене Декарт.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (7.4)$$

где  $n$  — постоянная величина, не зависящая от угла падения.

Величина  $n$  называется **относительным показателем преломления**.

Сформулируем законы преломления света.



### ЗАКОНЫ ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА

- 1) Падающий луч, преломлённый луч и нормаль к границе раздела двух сред в точке падения лежат в одной плоскости.
- 2) Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для этих двух сред, равная относительному показателю преломления второй среды относительно первой.

**Показатель преломления.** Из уравнения (7.4) следует, что показатель преломления равен отношению скоростей света в средах, на границе между которыми происходит преломление:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \quad (7.5)$$

Если угол преломления  $\beta$  меньше угла падения  $\alpha$ , то согласно уравнению (7.4) скорость света во второй среде меньше, чем в первой.

### Запомни

Показатель преломления среды относительно вакуума называют **абсолютным показателем преломления этой среды**.

Он показывает, во сколько раз скорость света в вакууме больше, чем в среде, и равен отношению синуса угла падения к синусу угла преломления при переходе светового луча из вакуума в данную среду:  $n = \frac{c}{v}$ .

Пользуясь формулой (7.5), можно выразить относительный показатель преломления через абсолютные показатели преломления  $n_1$  и  $n_2$  первой и второй сред.

Действительно, так как  $n_1 = \frac{c}{v_1}$  и  $n_2 = \frac{c}{v_2}$ , где  $c$  — скорость света в вакууме, то

$$n = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (7.6)$$

### Важно

Среду с меньшим абсолютным показателем преломления принято называть *оптически менее плотной средой*, а среду с большим показателем преломления — *оптически более плотной*.

Абсолютный показатель преломления определяется скоростью распространения света в данной среде, которая зависит от физических свойств и состояния среды, т. е. от температуры вещества, его плотности, наличия в нём упругих напряжений. Показатель преломления зависит также и от длины волны  $\lambda$  света. Для красного света он меньше, чем для зелёного, а для зелёного меньше, чем для фиолетового. Поэтому в таблицах значений показателей преломления для разных веществ обычно указывается, для какого света приведено данное значение  $n$  и в каком состоянии находится среда. Если таких указаний нет, то это означает, что зависимостью от приведённых факторов можно пренебречь.

В большинстве случаев приходится рассматривать переход света через границу воздух — твёрдое тело или воздух — жидкость, а не через границу



Убедитесь экспериментально в справедливости закона преломления, измеряя углы падения и преломления и вычисляя отношение их синусов при различных углах падения. Это отношение должно остаться неизменным. Эксперимент поставьте самостоятельно.



Сделайте рисунок, аналогичный рисунку 7.13, для случая, когда скорость света во второй среде больше, чем в первой.

вакуум — среда. Однако абсолютный показатель преломления  $n_2$  твёрдого или жидкого вещества отличается от показателя преломления того же вещества относительно воздуха незначительно. Так, абсолютный показатель преломления воздуха при нормальных условиях для жёлтого света равен примерно  $n_1 \approx 1,000292$ . Следовательно,

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2. \quad (7.7)$$

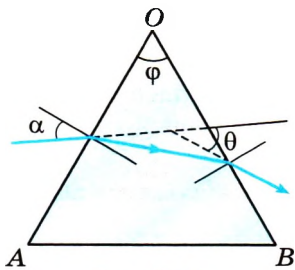


Рис. 7.14

**Ход лучей в треугольной призме.** С помощью закона преломления света можно рассчитать ход лучей в различных оптических устройствах, например в треугольной призме, изготовленной из стекла или другого прозрачного материала.

На рисунке 7.14 изображено сечение стеклянной призмы плоскостью, перпендикулярной её боковым рёбрам. Луч в призме отклоняется к основанию, преломляясь на гранях  $OA$  и  $OB$ .

**Запомним**

Угол  $\varphi$  между гранями  $OA$  и  $OB$  (см. рис. 7.14) называют **преломляющим углом призмы**.



Выведите примерное равенство  $\theta \approx (n - 1)\varphi$ .

Угол  $\theta$  отклонения луча зависит от преломляющего угла призмы, показателя преломления  $n$  материала призмы и угла падения  $\alpha$ . Он может быть вычислен с помощью закона преломления (см. формулу (7.4)). При малых углах  $\alpha$  и  $\varphi$  угол  $\theta \approx (n - 1)\varphi$ , где  $n$  — относительный показатель преломления.

Угол  $\theta$  отклонения луча зависит от преломляющего угла призмы, показателя преломления  $n$  материала призмы и угла падения  $\alpha$ . Он может быть вычислен с помощью закона преломления (см. формулу (7.4)).

При малых углах  $\alpha$  и  $\varphi$  угол  $\theta \approx (n - 1)\varphi$ , где  $n$  — относительный показатель преломления.

Законы преломления света. Показатель преломления

Найти



1. Каков физический смысл показателя преломления?
2. Чем отличается относительный показатель преломления от абсолютного?



1. При прохождении через границу раздела двух сред измерены два угла падения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и два соответствующих им угла преломления  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . О соотношении этих углов можно утверждать, что

$$1) \frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$$

$$2) \frac{\alpha_1}{\gamma_1} = \frac{\alpha_2}{\gamma_2}$$

$$3) \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2}$$

$$4) \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2}$$

## § 48 ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

Какие световые явления наблюдаются на границе раздела двух сред? Каким законам подчиняются эти явления?

При прохождении света из оптически менее плотной среды в более плотную, например из воздуха в стекло или воду,  $v_1 > v_2$ , и, следовательно, согласно закону преломления (см. формулу (7.4)) показатель преломления  $n > 1$ . Поэтому  $\alpha > \beta$  (рис. 7.15) — угол падения больше угла преломления.

### Важно

При прохождении света из оптически менее плотной среды в оптически более плотную луч приближается к нормали к границе раздела сред.

Если же направить луч света в обратном направлении — из оптически более плотной среды в оптически менее плотную (например в воздух) вдоль ранее преломлённого луча (рис. 7.16), то закон преломления можно записать так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{n}. \quad (7.8)$$

### Важно

Преломлённый луч по выходе из оптически более плотной среды будет направлен по линии ранее падавшего луча, поэтому  $\alpha < \beta$ , в этом случае угол падения меньше угла преломления и преломлённый луч отклоняется от нормали.

По мере увеличения угла  $\alpha$  угол преломления  $\beta$  также увеличивается, оставаясь всё время больше угла  $\alpha$ . Наконец, при некотором угле падения  $\alpha$  значение угла преломления  $\beta$  приблизится к  $90^\circ$ , и преломлённый луч будет направлен практически вдоль границы раздела двух сред (рис. 7.17). Наибольшему возможному углу преломления  $\beta = 90^\circ$  соответствует угол падения  $\alpha_0$  (луч 1—1).

При  $\alpha > \alpha_0$  преломление света невозможно, луч должен полностью отразиться (луч 2—2).

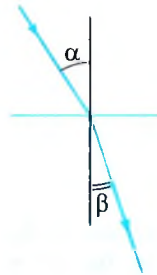


Рис. 7.15

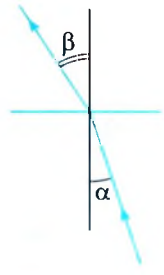


Рис. 7.16

### Запомни

Отражение света, падающего из оптически более плотной среды на границу с оптически менее плотной средой под углом падения, большим некоторого критического угла  $\alpha_0$ , называется **полным отражением света** или **полным внутренним отражением**.

Для наблюдения полного отражения света можно использовать стеклянный полуцилиндр с матовой задней поверхностью. Полуцилиндр



Проведите описанный в тексте эксперимент с полуцилиндром и убедитесь в справедливости принципа обратимости лучей.



закрепляют на диске так, чтобы середина плоской поверхности полуцилиндра совпала с центром диска (рис. 7.18). Узкий пучок света от осветителя направляют снизу на боковую поверхность полуцилиндра перпендикулярно его поверхности. На этой поверхности луч не преломляется. На плоской поверхности луч частично преломляется и частично отражается. Отражение происходит в соответствии с законом отражения, а преломление — в соответствии с законом преломления (см. формулу (7.4)).

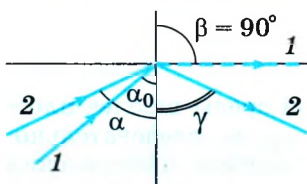


Рис. 7.17



Рис. 7.18

Если увеличивать угол падения, то можно заметить, что яркость (и, следовательно, энергия) отражённого пучка усиливается, в то время как яркость (энергия) преломлённого пучка падает. Особенно быстро убывает энергия преломлённого пучка, когда угол преломления приближается к  $90^\circ$ . Наконец, когда угол падения становится таким, что преломлённый пучок идёт вдоль границы раздела двух сред (см. рис. 7.17), доля отражённой энергии составляет почти 100%. Повернём осветитель, увеличив угол падения до  $\alpha$ . Мы увидим, что преломлённый пучок исчез, и весь свет отражается от границы раздела двух сред, т. е. происходит полное отражение света.

### Запомним

Угол падения  $\alpha_0$ , соответствующий углу преломления  $90^\circ$ , называют **предельным углом полного отражения**.

При  $\sin \beta = 1$  формула (7.8) принимает вид

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}. \quad (7.9)$$

Из этого равенства и может быть найдено значение предельного угла полного отражения  $\alpha_0$ . Для воды ( $n = 1,33$ ) оно равно  $48^\circ 35'$ , для стекла ( $n = 1,5$ ) принимает значение  $41^\circ 51'$ , а для алмаза ( $n = 2,42$ ) составляет  $24^\circ 40'$ . Во всех случаях второй средой является воздух.



Явление полного отражения света используют в так называемой *волоконной оптике* для передачи света и изображения по пучкам прозрачных гибких волокон — световодов.



Явление полного отражения легко наблюдать на простом опыте. Налейте в стакан воду и поднимите его несколько выше уровня глаз. Поверхность воды, если рассматривать её снизу сквозь стенку, покажется блестящей, словно посеребрённой вследствие полного отражения света.

Световод представляет собой стеклянное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.

За счёт многократного полного отражения свет может быть

направлен по любому (прямому или изогнутому) пути (рис. 7.19). Волокна собираются в жгуты. При этом по каждому из волокон передаётся какой-нибудь элемент изображения (рис. 7.20). Жгуты из волокон используются, например, в медицине для исследования внутренних органов.

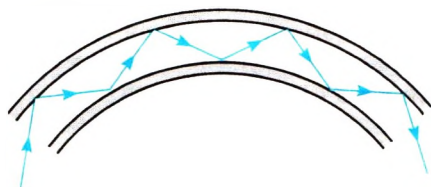


Рис. 7.19

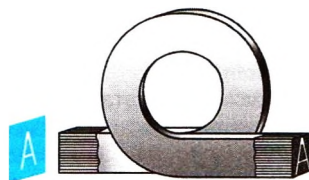
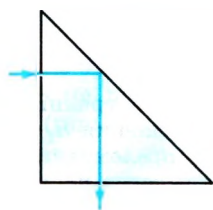


Рис. 7.20

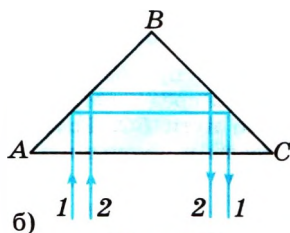
Объём передаваемой информации пропорционален частоте несущей волны. Частота же световых волн в  $10^5$ — $10^6$  раз больше частоты радиоволн. Таким образом, с помощью световых волн можно передавать большой объём информации.

В последнее время волоконная оптика широко используется для быстрой передачи компьютерных сигналов. При этом передаются сигналы в световом диапазоне, что даёт ряд преимуществ, например, малые потери энергии.

Явление полного отражения используется в поворотных и оборачивающих призмах (рис. 7.21). Предельный угол преломления на границе стекло—воздух равен  $42^\circ$ .

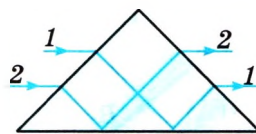


а)



б)

Рис. 7.21



в)

Рассмотрим ход лучей сквозь поворотную и одновременно оборачивающую линзу, основанием которой является равнобедренный

прямоугольный треугольник, изображённый на рисунке 7.21, б. Проходя через широкую грань, лучи не изменяют своего направления, так как угол падения равен нулю. На узкой грани  $AB$  лучи полностью отражаются, так как угол падения равен  $45^\circ$  и, следовательно, больше предельного угла полного отражения для стекла, равного  $42^\circ$ . После полного отражения от левой грани лучи падают на правую грань, снова полностью отражаются и выйдут из призмы по направлению, перпендикулярному широкой грани. Таким



Вспомните, как идут лучи в треугольной призме (см. § 47).



образом, направление пучка света изменяется на  $180^\circ$ . Такой ход лучей используется, например, в призматических биноклях.

Призмы широко используются в оптических приборах. Одно из преимуществ призм перед зеркалами заключается в том, что в призмах, в отличие от зеркал, отражается почти 100 % энергии светового луча и изображение получается ярким.

Полное отражение света. Предельный угол полного отражения

Найти

- ?
1. Чему равен предельный угол полного отражения на границе раздела сред алмаз—воздух?
  2. Как называется телевизионная связь, которая основана на явлении полного отражения?



1. Показатели преломления относительно воздуха для воды, стекла и алмаза соответственно равны 1,33; 1,5; 2,42. В каком из этих веществ предельный угол полного отражения при выходе в воздух имеет максимальное значение?

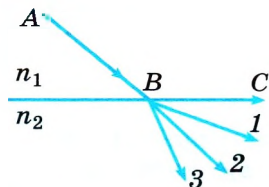
- 1) в воде
- 2) в стекле
- 3) в алмазе
- 4) во всех трёх веществах угол одинаков

2. Синус предельного угла полного отражения на границе стекло—воздух равен  $8/13$ . Абсолютный показатель преломления стекла приблизительно равен

- 1) 1,63
- 2) 1,5
- 3) 1,25
- 4) 0,62

3. Синус предельного угла полного отражения на границе стекло—вода равен 0,875. Чему равна скорость света в стекле? Скорость света в воде  $2,25 \cdot 10^8$  м/с.

- 1)  $4,88 \cdot 10^8$  м/с
- 2)  $2,57 \cdot 10^8$  м/с
- 3)  $1,97 \cdot 10^8$  м/с
- 4)  $3,82 \cdot 10^8$  м/с



4. Луч  $AB$  преломляется в точке  $B$  на границе раздела двух сред с показателями преломления  $n_1 > n_2$  и идёт по пути  $BC$ . Если показатель преломления первой среды  $n_1$  уменьшить, сохранив условие  $n_1 > n_2$ , то преломлённый луч

- 1) пойдёт по пути 1
- 2) пойдёт по пути 2
- 3) пойдёт по пути 3
- 4) исчезнет



«Экспериментальное определение абсолютного показателя преломления различных прозрачных сред, а также относительного показателя преломления света на границе раздела двух сред»

## § 49 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА. ПОЛНОЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА»

При решении задач надо хорошо знать законы преломления света. Обратите внимание на то, что размеры предмета из-за преломления света кажутся изменёнными. Полное отражение наблюдается только в случае падения лучей на границу оптически более плотной среды с оптически менее плотной средой.

**Задача 1.** Определите, на какой угол  $\theta$  отклоняется световой луч от своего первоначального направления при переходе из воздуха в воду, если угол падения  $\alpha = 75^\circ$ .

**Решение.** Из рисунка 7.22 видно, что  $\theta = \alpha - \beta$ . Согласно закону преломления  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ , где  $n$  — показатель преломления воды.

$$\text{Отсюда } \sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \approx 0,727.$$

Из таблицы синусов находим:  $\beta \approx 46^\circ$ . Следовательно,

$$\theta = 75^\circ - 46^\circ \approx 29^\circ.$$

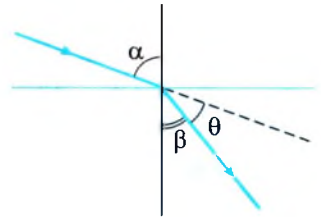


Рис. 7.22

**Задача 2.** Определите, во сколько раз истинная глубина водоёма больше кажущейся, если смотреть по вертикали вниз. Показатель преломления воды  $n = 1,3$ .

**Решение.** Построим ход лучей, вышедших из точки  $S$  на дне водоёма и попавших в глаз наблюдателя (рис. 7.23). Так как наблюдение ведётся по вертикали, один из лучей ( $SA$ ) направим перпендикулярно поверхности воды, другой ( $SB$ ) — под малым углом  $\alpha$  к перпендикуляру, восстановленному в точке  $B$  (при больших углах  $\alpha$  лучи не попадут в глаз). Точка  $S_1$  пересечения луча  $SA$  и продолжения преломлённого луча  $SB$  — мнимое изображение точки  $S$ .

Угол  $ASB$  равен углу падения  $\alpha$  (внутренние накрест лежащие углы), а угол  $AS_1B$  равен углу преломления  $\beta$  (соответственные углы при параллельных прямых). Прямоугольные треугольники  $ASB$  и  $AS_1B$  имеют общий катет  $AB$ , который можно выразить через истинную глубину водоёма  $SA = H$  и через кажущуюся глубину  $S_1A = h$ :  $AB = H \operatorname{tg} \alpha = h \operatorname{tg} \beta$ .

$$\text{Отсюда } \frac{H}{h} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

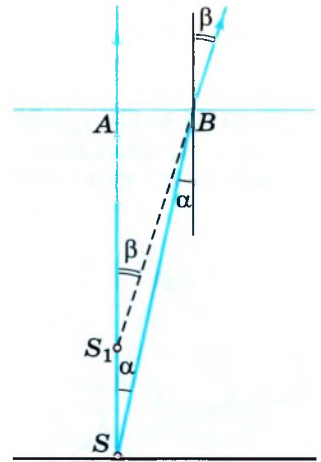


Рис. 7.23

Так как углы  $\alpha$  и  $\beta$  малы, то  $\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n$ , где  $n$  — показатель преломления воды. Следовательно,  $\frac{H}{h} = n$ . Истинная глубина водоёма больше кажущейся в  $n = 1,3$  раза.

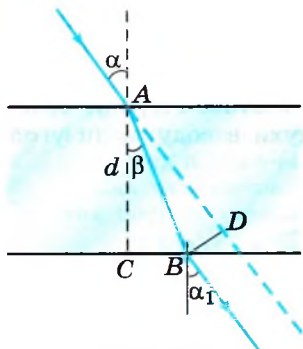


Рис. 7.24

**Задача 3.** Определите линейное смещение луча при прохождении его через плоскопараллельную стеклянную пластинку с показателем преломления  $n_2 = 1,7$  и толщиной  $d = 4$  см. Угол падения луча  $30^\circ$ . Показатель преломления воздуха равен  $n_1 = 1$ .

**Решение.** Выходящий и входящий в пластинку лучи (рис. 7.24) параллельны, что следует из закона преломления: на первой границе воздух—стекло  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$ , на второй границе стекло—воздух  $\frac{\sin \beta}{\sin \alpha_1} = \frac{n_1}{n_2}$ , откуда  $\angle \alpha = \angle \alpha_1$ .

Для определения смещения луча  $x$  рассмотрим треугольники  $ABC$  и  $ABD$ :  $x = BD = AB \sin(\alpha - \beta)$ ,  $AB = \frac{AC}{\cos \beta} = \frac{d}{\cos \beta}$ . Тогда

$$x = \frac{d}{\cos \beta} \sin(\alpha - \beta).$$

Из первого уравнения определим угол  $\beta$ :  $\sin \beta = \frac{n_1 \sin \alpha}{n_2}$ . Тогда

$$x = d \sin \alpha \left( 1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha}{n_2^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \approx 1 \text{ см.}$$

**Задача 4.** На грань призмы с углом при вершине  $\gamma$  под малым углом  $\alpha$  падает луч. Докажите, что отклонение луча  $\delta = (n - 1)\gamma$ , где  $n$  — показатель преломления призмы.

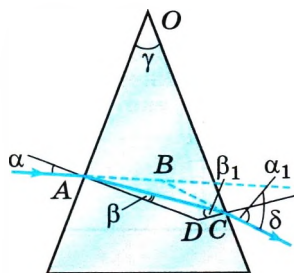


Рис. 7.25

**Решение.** Очевидно, что  $\delta$  — внешний угол треугольника  $ABC$  (рис. 7.25),  $\delta = \angle BAC + \angle BCA$ .

Обозначим через  $\alpha$  и  $\beta$ ,  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  углы падения и преломления на первой и второй поверхностях призмы так, как показано на рисунке 7.25. Тогда  $\angle BAC = \alpha - \beta$ ,  $\angle BCA = \alpha_1 - \beta_1$ , или  $\delta = \alpha - \beta + \alpha_1 - \beta_1$ .

По условию углы малы, и, следовательно,  $\frac{\alpha}{\beta} \approx n$ ,  $\frac{\alpha_1}{\beta_1} \approx n$ . Тогда

$$\delta = (n - 1)\beta + (n - 1)\beta_1. \quad (1)$$

Из четырёхугольника  $AOCD$  (углы  $OAD$  и  $OCD$  прямые) следует, что  $\angle ADC = \pi - \gamma$ , а из треугольника  $ACD$  получим  $\angle ADC = \pi - \beta - \beta_1$ , откуда

$$\beta_1 = \gamma - \beta. \quad (2)$$

Подставив в уравнение (1) выражение (2), получим  $\delta = (n - 1)\beta + (n - 1)\gamma - (n - 1)\beta = (n - 1)\gamma$ .

**Задача 5.** Прозрачный кубик лежит на монете. Монета освещается рассеянным светом. Определите, при каком значении показателя преломления материала кубика монета не будет видна через его боковую грань.

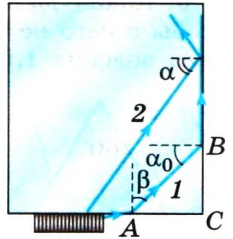


Рис. 7.26

**Решение.** Монета не видна, когда лучи, отражённые от неё, не выходят за грань кубика (рис. 7.26). Это может быть, если лучи, падающие на грань, отражаются от неё или скользят вдоль поверхности грани. Из этого следует, что луч должен падать на боковую грань под углом, большим предельного угла или равным ему:  $\alpha \geq \alpha_0$ . Если луч 1, падающий на основание под углом, близким к  $\pi/2$ , преломившись на нижней грани кубика, попадёт на боковую грань и претерпит полное отражение, т. е. будет скользить вдоль боковой грани кубика, то все остальные лучи, имеющие меньший угол падения на основание, будут падать на эту грань под углом, большим  $\alpha_0$ , и отразятся от неё:  $\alpha > \alpha_0$  (например, луч 2). Для преломления луча 1, отражённого от

монеты, на нижней грани кубика справедливо выражение  $\frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\sin \beta} = n$ .

Закон преломления на границе кубик—воздух имеет вид  $\frac{\sin \alpha_0}{\sin \frac{\pi}{2}} = \frac{1}{n}$ , откуда  $\beta = \alpha_0$ , а так как треугольник  $ABC$  прямоугольный, то  $\alpha_0 + \beta = \pi/2$ , и, следовательно,  $\alpha_0 = 45^\circ$ . Отсюда  $\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}$ ,  $n = \sqrt{2}$ .



**Задачи для самостоятельного решения**

1. Вычислите показатель преломления воды относительно алмаза и сероуглерода относительно льда.
2. Сечение призмы представляет собой равносторонний треугольник. Луч проходит сквозь призму, преломляясь в точках, равноотстоящих от вершины (рис. 7.27). Чему равно наибольшее допустимое значение показателя преломления вещества призмы?
3. Изобразите ход лучей через треугольную стеклянную призму, основанием которой является равнобедренный прямоугольный треугольник. Лучи падают на призму, как показано на рисунке 7.28. Останется ли ход лучей таким же, если призму погрузить в воду?

4. Под каким углом на боковую поверхность призмы должен падать луч, чтобы в призме с углом при вершине  $\gamma = 60^\circ$  его отклонение было минимальным? Определите этот угол для стеклянной призмы с показателем преломления  $n = 1,41$ .

5. В стеклянной пластинке с показателем преломления 1,4 образовался воздушный клин с углом у основания  $30^\circ$ . Определите отклонение луча, падающего нормально на боковую грань (рис. 7.29).

6. Какая должна быть минимальная длина стороны квадратного плота, чтобы с него не был виден камень, находящийся под серединой плота? Глубина водоёма 1,5 м, показатель преломления воды 1,3.

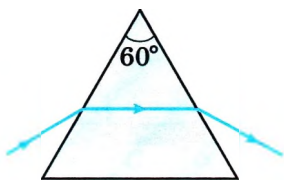


Рис. 7.27

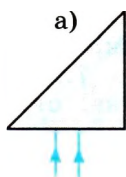


Рис. 7.28

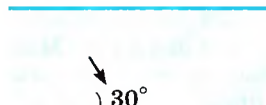
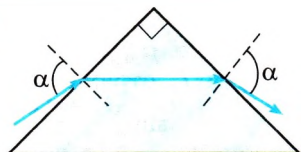


Рис. 7.29



1. Если луч света падает на прямоугольную призму под углом  $\alpha = 80^\circ$  ( $\sin 80^\circ = 0,98$ ), то ход луча оказывается симметричным. Чему равен показатель преломления  $n$  материала призмы? Ответ округлите до десятых.

2. Водолазу, находящемуся под водой, кажется, что пролетающий над головой самолёт, находится на высоте, равной 900 м. Определите реальную высоту, на которой летит самолёт, если показатель преломления воды равен  $4/3$ .

3. В дно водоёма глубиной 3 м вертикально вбита свая, скрытая под водой. Высота сваи 2 м. Свая отбрасывает на дне водоёма тень длиной 0,75 м. Определите угол падения солнечных лучей на поверхность воды. Показатель преломления воды  $n = 4/3$ .

4. На поверхности воды плавает надувной плот шириной 4 м и длиной 6 м. Небо затянуто сплошным облачным покровом, полностью рассеивающим солнечный свет. Определите глубину тени под плотом. Глубину погружения плота и рассеивание света водой не учитывайте. Показатель преломления воды относительно воздуха  $n = 4/3$ .

5. На дне аквариума глубиной 20 см лежит плоское зеркало. Чему равно расстояние от лица человека до его мнимого изображения в зеркале, если он рассматривает его с расстояния 20 см над поверхностью воды? Используйте тот факт, что для малых углов  $\text{tg } \alpha \approx \sin \alpha$ . Показатель преломления воды  $n = 4/3$ .

## § 50 ЛИНЗЫ. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЛИНЗЕ

Вспомните, что такое линза.

Какие бывают линзы, где они используются?

### Запомни

Прозрачное тело, ограниченное криволинейными поверхностями, называют **линзой**.

Простейшая линза — сферическая.

**Виды линз.** Линза может быть ограничена двумя выпуклыми сферическими поверхностями (двояково-выпуклая линза — рис. 7.30, а), выпуклой сферической поверхностью и плоскостью (плоско-выпуклая линза — рис. 7.30, б), выпуклой и вогнутой сферическими поверхностями (вогнуто-выпуклая линза — рис. 7.30, в).

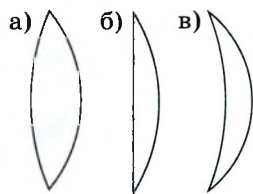


Рис. 7.30

### Запомни

Линзы, которые посередине толще, чем у краёв, называются **выпуклыми**.  
Линзы, которые посередине тоньше, чем у краёв, называются **вогнутыми**.

На рисунке 7.31 изображено три вида вогнутых линз: двояковогнутая — а, плоско-вогнутая — б и выпукло-вогнутая — в.

**Тонкая линза.** Тонкая линза — это физическая модель реальной линзы.

### Запомни

**Тонкой линзой** называют такую линзу, толщина которой  $l = AB$  пренебрежимо мала по сравнению с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  сферических поверхностей линзы (рис. 7.32) и расстоянием предмета от линзы.

Точки А и В — вершины сферических сегментов — расположены в тонкой линзе столь близко друг от друга, что их можно принять за одну точку, которую называют **оптическим центром линзы** и обозначают буквой  $O$ .

Прямую  $O_1O_2$ , проходящую через центры сферических поверхностей, которые ограничивают линзу, называют её **главной оптической осью**. Любую другую прямую, проходящую через оптический центр, называют **побочной оптической осью** (рис. 7.33).



В дальнейшем, говоря о линзе, мы всегда будем подразумевать тонкую линзу. Главная оптическая ось тонкой линзы проходит через оптический центр. Луч света, который проходит через оптический центр линзы, не изменяет своего направления, а только смещается, но, так как линза тонкая, этим смещением можно пренебречь.

**Изображение в линзе.** Подобно плоскому зеркалу, линза создаёт изображения источников света. Это означает, что свет, исходящий из какой-либо точки

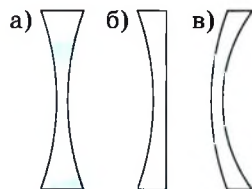


Рис. 7.31



Начертите луч, идущий через плоскопараллельную пластинку. На основании рисунка сделайте вывод, как меняется смещение луча при уменьшении толщины пластинки. Почему неверно утверждение, что луч, идущий через оптический центр линзы, не преломляется?

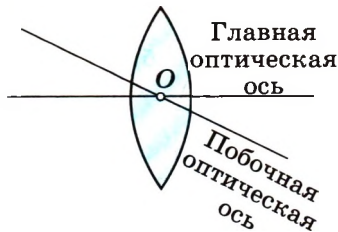


Рис. 7.33

предмета (источника), после преломления в линзе снова собирается в одну точку (изображение) независимо от того, через какую часть линзы прошли лучи. Если по выходе из линзы лучи сходятся, они образуют *действительное* изображение. В случае же, когда прошедшие через линзу лучи расходятся, то пересекаются в одной точке не сами эти лучи, а лишь их продолжения. Изображение в этом случае *мнимое*. Его можно наблюдать глазом непосредственно или с помощью оптических приборов.

**Собирающая линза.** Обычно линзы изготавливают из стекла. Выпуклые линзы в воздухе являются собирающими. Любую из них схематично можно себе представить как совокупность стеклянных призм (рис. 7.34). В воздухе каждая призма отклоняет лучи к основанию. Все лучи, идущие через линзу, отклоняются в сторону её главной оптической оси.

**Интересно** Лучи или их продолжения будут пересекаться практически в одной точке, если они образуют малые углы с главной оптической осью (такие лучи называют *параксиальными* лучами).



Рис. 7.34

### Запомни

Точка, в которой пересекаются после преломления в собирающей линзе лучи, падающие на неё параллельно главной оптической оси, называется **главным фокусом линзы**.

Эту точку обозначают буквой  $F$  (рис. 7.35, а).

Пучки, параллельные главной оптической оси, можно направить на линзу и с противоположной стороны. Точка, в которой они сойдутся, пройдя линзу, будет другим главным фокусом (рис. 7.35, б).



Рис. 7.35

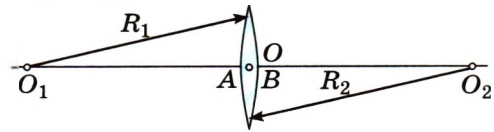


Рис. 7.32

**Важно**

Таким образом, у линзы два главных фокуса. В однородной среде они располагаются по обе стороны линзы на одинаковых расстояниях от неё.

**Запомни**

Расстояние от главных фокусов до оптического центра линзы называется **фокусным расстоянием линзы**; его обозначают буквой  $F$  (той же буквой, что и фокус).

Направим три узких параллельных пучка лучей от осветителя под углом к главной оптической оси линзы. Мы увидим, что пересечение лучей произойдёт не в главном фокусе, а в другой точке (рис. 7.36, а). Эта точка находится в плоскости, перпендикулярной главной оптической оси и проходящей через главный фокус.

**Запомни**

Плоскость, которой принадлежат точки пересечения преломлённых пучков лучей независимо от углов, образуемых этими пучками с главной оптической осью, называют **фокальной плоскостью** (рис. 7.36, б).

**Важно**

Пересечение лучей, параллельных побочной оптической оси, происходит в точке её пересечения с фокальной плоскостью (см. рис. 7.36, б).

Поместив светящуюся точку в фокусе линзы (или в фокальной плоскости), получим после преломления параллельные лучи (рис. 7.37).

Если сместить источник дальше от фокуса линзы, лучи за линзой становятся сходящимися и дают действительное изображение (рис. 7.38, а). Когда же источник находится между фокусом и оптическим центром линзы, преломлённые лучи расходятся и изображение получается мнимым (рис. 7.38, б).

**Рассеивающая линза.** Вогнутые линзы, находящиеся в оптически менее плотной среде (по сравнению с материалом линзы), являются рассеивающими. Направив на такую линзу лучи параллельно главной оптической оси, мы

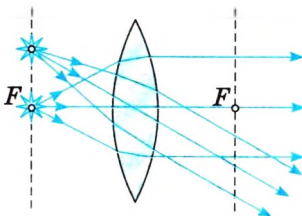


Рис. 7.37

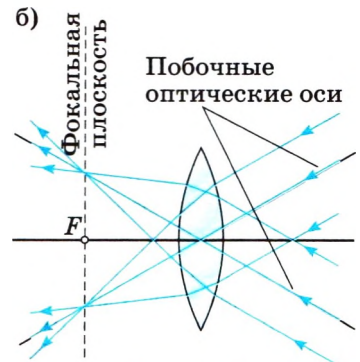
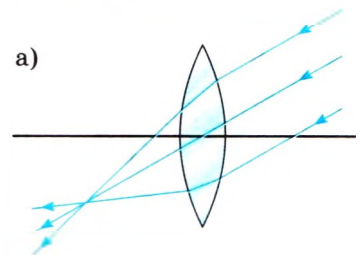


Рис. 7.36



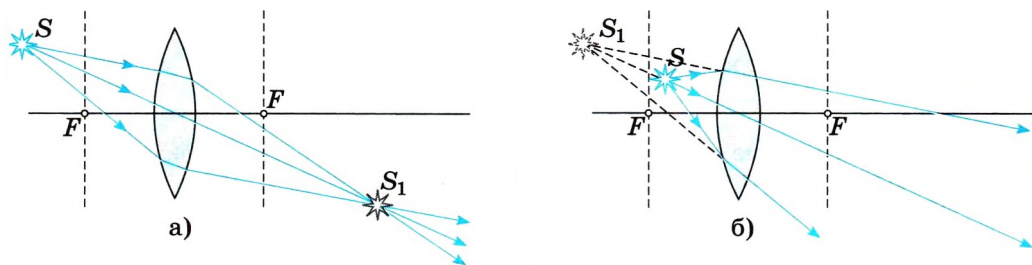


Рис. 7.38



Ещё раз убедитесь в том, что параллельные главной оптической оси лучи сходятся в точку только в случае тонкой линзы. Начертите крупно толстую сферическую линзу, проведите параллельно её главной оптической оси три луча. Измерьте транспортиром углы падения и вычислите углы преломления, считая линзу стеклянной ( $n = 1,3$ ). Проведите преломлённые лучи. Проделайте то же самое на другой сферической поверхности. Сделайте вывод.

получим расходящийся пучок лучей. Их продолжения пересекаются в главном фокусе рассеивающей линзы.

В этом случае главный фокус является мнимым (рис. 7.39, а) и расположен на расстоянии  $F$  от линзы. Другой мнимый главный фокус находится по другую сторону линзы на таком же расстоянии, если среда по обе стороны линзы одна и та же (рис. 7.39, б).

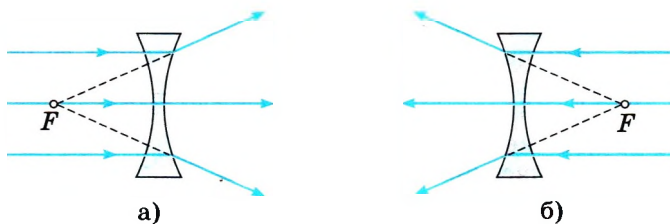


Рис. 7.39

### Оптическая сила линзы.

#### Запомним

Величину, обратную фокусному расстоянию, называют **оптической силой линзы**. Её обозначают буквой  $D$ :

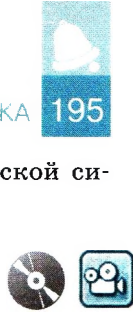
$$D = \pm \frac{1}{F}.$$

$D > 0$ , если линза собирающая,  $D < 0$ , если линза рассеивающая.



Почему мы считаем, что фокусы расположены симметрично, хотя сама линза может быть несимметрична?

Чем ближе к линзе её фокусы, тем сильнее линза преломляет лучи, собирая или рассеивая их, и тем больше оптическая сила линзы.



Оптическую силу  $D$  линз выражают в *диоптриях* (дптр). Оптической силой в 1 дптр обладает линза с фокусным расстоянием 1 м.

**Построение изображений в линзе.** Свойства тонкой линзы определяются главным образом расположением её фокусов. Это означает, что, зная расстояние от источника света до линзы и её фокусное расстояние (положения фокусов), можно найти расстояние до изображения, не рассматривая ход лучей внутри линзы.

Поэтому нет необходимости изображать на чертеже точный вид сферических поверхностей линзы. Собирающую линзу обозначают символом, показанным на рисунке 7.40, а, а рассеивающую — символом, приведённым на рисунке 7.40, б.

Нам уже известно, что все лучи, вышедшие из какой-либо точки предмета, пройдя сквозь тонкую линзу, пересекаются также в одной точке. Именно поэтому линза даёт изображение любой точки предмета, а следовательно, и всего предмета в целом.

Для построения изображений, получаемых с помощью собирающей линзы, фокусы и оптический центр которой заданы, мы будем пользоваться в основном тремя видами «удобных» лучей. Как было выяснено, лучи, параллельные главной оптической оси, преломившись в линзе, проходят через её фокус. Из обратимости хода лучей следует, что лучи, идущие к линзе через её фокус, после преломления будут направлены параллельно главной оптической оси. Наконец, лучи, проходящие через оптический центр линзы, не меняют своего направления.

Построим изображение предмета  $AB$  (рис. 7.41). Чтобы найти изображение точки  $A$ , направим луч  $AC$  параллельно главной оптической оси. После преломления он пройдёт через фокус линзы. Другой луч —  $AD$  можно направить через фокус. После преломления он пройдёт параллельно главной оптической оси. В точке пересечения этих двух преломлённых лучей будет находиться изображение  $A_1$  точки  $A$ . Так же можно построить и все остальные точки изображения.

Не следует только думать, что изображение создаётся двумя или тремя лучами; оно формируется всем бесчисленным множеством лучей, вышедших из точки  $A$  и собравшихся в точке  $A_1$ . В частности, в точку  $A_1$  попадает луч  $AOA_1$ , прошедший через оптический центр  $O$  линзы. Таким образом, для построения изображения точки можно использовать любые два из трёх «удобных» лучей, ход которых через линзу известен: 1) луч, проходящий через оптический центр; 2) луч, падающий на линзу параллельно главной оптической оси; 3) луч, проходящий через фокус.

Изображение предмета  $AB$  в этом случае будет действительным, перевёрнутым, увеличенным.

Рассмотрим ещё случай, когда необходимо построить изображение точки, расположенной на главной оптической оси. Трудность заключается в том,

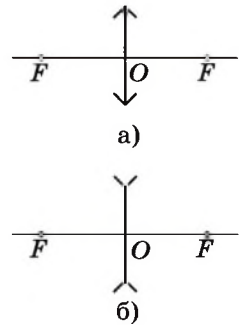


Рис. 7.40

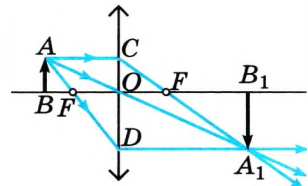


Рис. 7.41

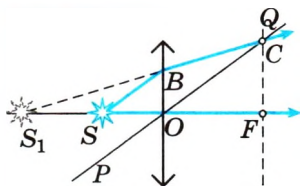


Рис. 7.42

что все три «удобных» луча сливаются в один луч  $SF$ , совпадающий с главной оптической осью. Поэтому необходимо определить ход произвольного луча  $SB$  (рис. 7.42), попавшего на линзу в точке  $B$ .

Для построения преломлённого луча проведём побочную оптическую ось  $PQ$ , параллельную лучу  $SB$ . Затем построим фокальную плоскость и найдём точку  $C$  пересечения фокальной плоскости с побочной оптической осью. Через эту точку и пройдёт преломлённый луч  $BC$ . Таким образом, построен ход двух лучей, выходящих из точки  $S$ . После преломления в линзе эти лучи расходятся. Изображение  $S_1$  точки  $S$  будет мнимым, так как источник расположен между фокусом и линзой.



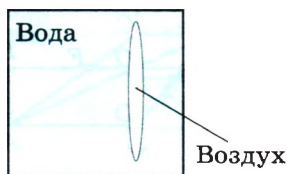
### Линзы. Построение изображений в линзах

Интервью  
Наши



1. С помощью очень тонких одинаковых сегментов изготовлены четыре двояковогнутые линзы. Показатель преломления глицерина больше, чем показатель преломления воды. У собирающей линзы

- 1) между стёклами глицерин, окружающая среда — воздух
- 2) между стёклами вода, окружающая среда — воздух
- 3) между стёклами глицерин, окружающая среда — вода
- 4) между стёклами вода, окружающая среда — глицерин



2. Линзу, изготовленную из двух тонких сферических стёкол одинакового радиуса, между которыми находится воздух (воздушная линза), опустили в воду. Как действует эта линза?

- 1) как собирающая линза
- 2) как рассеивающая линза
- 3) она не изменяет хода луча
- 4) может действовать и как собирающая, и как рассеивающая линза

3. На каком расстоянии от собирающей линзы нужно поместить предмет, чтобы его изображение было действительным?

- 1) больше, чем фокусное расстояние
- 2) меньше, чем фокусное расстояние
- 3) при любом расстоянии изображение будет действительным
- 4) при любом расстоянии изображение будет мнимым

4. Предмет находится между собирающей линзой и её фокусом. Изображение предмета

- 1) мнимое, перевёрнутое
- 2) действительное, перевёрнутое
- 3) действительное, прямое
- 4) мнимое, прямое

5. Оптическая сила линзы — это величина,

- 1) равная отношению фокусного расстояния линзы к её диаметру
- 2) обратная её фокусному расстоянию
- 3) равная отношению диаметра линзы к её фокусному расстоянию
- 4) обратная расстоянию от линзы до изображения предмета

## § 51 ФОРМУЛА ТОНКОЙ ЛИНЗЫ. УВЕЛИЧЕНИЕ ЛИНЗЫ

Какие изображения в линзах являются действительными? мнимыми?  
Какое изображение можно видеть непосредственно, а какое на экране?

Выведем формулу, связывающую три величины: расстояние  $d$  от предмета до линзы, расстояние  $f$  от изображения до линзы и фокусное расстояние  $F$ .

Из подобия треугольников  $AOB$  и  $A_1B_1O$  (см. рис. 7.41) следует равенство  $\frac{BO}{OB_1} = \frac{AB}{A_1B_1}$ .

Из подобия треугольников  $COF$  и  $FA_1B_1$  имеем  $\frac{CO}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$ .

Так как  $AB = CO$ , то  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{FB_1}$ . Отсюда  $\frac{BO}{OB_1} = \frac{OF}{FB_1}$ , или  $\frac{d}{f} = \frac{F}{f - F}$ .

Учитывая свойство пропорции, имеем  $fF + Fd = fd$ .

Поделив все члены полученного равенства на произведение  $Ffd$ , получим

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}, \quad (7.10)$$

или

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = D. \quad (7.11)$$

### Запомни

Уравнение (7.10), как и уравнение (7.11), принято называть **формулой тонкой линзы**.

Величины  $d$ ,  $f$  и  $F$  есть расстояния, т. е. положительные числа. Однако отметим (без доказательства), что в зависимости от условий задачи, применяя формулу линзы, нужно ставить знаки перед членами уравнения согласно следующему правилу.

### Важно

Если линза собирающая, то её фокус действительный и перед членом  $\frac{1}{F}$

ставят знак «+». В случае рассеивающей линзы в правой части формулы (7.10) будет стоять знак «-».

Перед членом  $\frac{1}{f}$  ставят знак «+», если изображение действительное, и знак «-» в случае мнимого изображения.

Перед членом  $\frac{1}{d}$  ставят знак «+» в случае действительной светящейся точки и знак «-», если она мнимая (т. е. на линзу падает сходящийся пучок лучей, продолжения которых пересекаются в одной точке).

Таким образом, формулу линзы в общем виде можно записать так:



Постройте несколько последовательных изображений предмета  $AB$  (см. рис. 7.41) в линзе, изменяя расстояние  $d$  от  $d > 2F$  до  $d < F$ . Начертите график зависимости  $f$  от  $d$ .

$$\pm \frac{1}{d} \pm \frac{1}{f} = \pm \frac{1}{F} = D.$$

В том случае, когда  $F$ ,  $f$  или  $d$  неизвестны, перед соответствующими членами  $\frac{1}{F}$ ,  $\frac{1}{f}$  или  $\frac{1}{d}$  ставят знак «+». Но если в результате вычислений фокусного расстояния или расстояния от линзы до изображения либо до источника получается отрицательная величина, то это означает, что фокус, изображение или источник мнимые.

**Увеличение линзы.** Изображение, получаемое с помощью линзы, обычно отличается своими размерами от предмета. Различие размеров предмета и изображения характеризуют *увеличением*.

### Запомни

**Линейным увеличением** называют отношение линейного размера изображения к линейному размеру предмета.

Для нахождения линейного увеличения обратимся снова к рисунку 7.41. Если высота предмета  $AB$  равна  $h$ , а высота изображения  $A_1B_1$  равна  $H$ , то

$$\Gamma = \frac{H}{h} \quad (7.12)$$

есть *линейное увеличение*.

Из подобия треугольников  $AOB$  и  $OA_1B_1$  следует, что  $H/h = f/d$ .

Следовательно, увеличение линзы равно отношению расстояния от изображения до линзы к расстоянию от линзы до предмета:



Подумайте, в каких случаях  $\Gamma < 1$ .

$$\Gamma = \frac{f}{d}. \quad (7.13)$$

Линзы являются основной частью фотоаппарата, проекционного аппарата, микроскопа, телескопа. В глазу тоже есть линзы — роговица и хрусталик.

Формула тонкой линзы. Линейное увеличение

Найти



1. Какие лучи удобно использовать для построения изображения в линзе?
2. Что называется увеличением линзы?



### «Оптические системы»

1. Микроскоп, лупа, телескоп.
2. Камера-обскура. Проекционный фонарь.
3. Глаз как оптическая система.

## § 52 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ЛИНЗЫ»

При использовании формулы линзы надо обратить внимание на знаки перед слагаемыми в этой формуле. Обычно в условии задачи даются числовые значения. Только построив изображение и поняв, действительное оно или мнимое, можно получить правильный ответ. При этом в формулу линзы ставят числа  $d$ ,  $f$  и  $F$ , а знаки берут в соответствии с условием задачи и построением согласно указанному в § 51 правилу.

**Задача 1.** На рисунке 7.43 показаны расположения главной оптической оси  $MN$  линзы, светящейся точки  $S$  и её изображения  $S_1$ . Найдите построением оптический центр линзы и её фокусы. Определите, собирающей или рассеивающей является эта линза, действительным или мнимым является изображение.

**Решение.** Луч, проходящий через оптический центр линзы, не отклоняется от своего направления. Поэтому оптический центр  $O$  совпадает с точкой пересечения прямых  $SS_1$  и  $MN$  (рис. 7.44). Проведём луч  $SK$ , параллельный главной оптической оси. Преломлённый луч  $KS_1$  пройдёт через фокус. Зная, что луч, падающий на линзу через фокус, после преломления идёт параллельно главной оптической оси, находим другой фокус. Линза является собирающей, а изображение — действительным.



Рис. 7.43

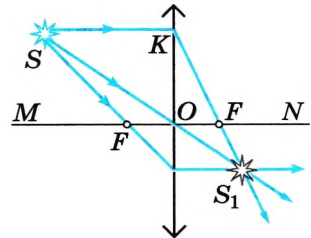


Рис. 7.44

**Задача 2.** Предмет имеет высоту  $h = 2$  см. Какое фокусное расстояние  $F$  должна иметь линза, расположенная на расстоянии  $f = 4$  м от экрана, чтобы изображение данного предмета на экране имело высоту  $H = 1$  м?

**Решение.** Из формулы линзы  $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$  находим фокусное расстояние:  $F = \frac{fd}{d + f}$ .

Увеличение линзы можно выразить так:  $\Gamma = \frac{H}{h} = \frac{f}{d}$ . Отсюда  $d = \frac{hf}{H}$ . Поэтому  $F = \frac{hf}{H + h} \approx 8$  см.

**Задача 3.** Фокусное расстояние собирающей линзы  $F = 30$  см, расстояние от предмета до фокуса  $l = 10$  см. Линейные размеры предмета 5 см. Определите размеры изображения  $H$ .

**Решение.** Из условия задачи неясно, где находится предмет. Он может располагаться как за фокусом, так и перед ним.

Рассмотрим сначала случай, когда  $d_1 = F + l$ . Запишем формулу линзы. Поскольку изображение будет действительным, имеем

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d_1} + \frac{1}{f_1} = \frac{1}{F+l} + \frac{1}{f_1}, \text{ откуда } f_1 = \frac{F(F+l)}{l}.$$

$$\text{Увеличение в этом случае } \Gamma_1 = \frac{H_1}{h} = \frac{f_1}{d_1}, \text{ откуда } H_1 = \frac{f_1 h}{d_1} = \frac{F(F+l)h}{l(F+l)} = \frac{Fh}{l}.$$

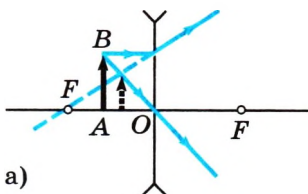
Если предмет расположить между фокусом и линзой, то изображение будет мнимым. В этом случае  $d_2 = F - l$ , и формула имеет вид  $\frac{1}{F} = \frac{1}{d_2} - \frac{1}{f_2} = \frac{1}{F-l} - \frac{1}{f_2}$ .

Выполнив необходимые преобразования, получим  $H_2 = \frac{Fh}{l}$ .

Следовательно, в обоих случаях высота изображения одинакова и равна  $H = \frac{0,3 \cdot 0,05}{0,1}$  (м) = 0,15 м.

**Задача 4.** Тонкая линза с некоторым фокусным расстоянием  $F_1$  создаёт прямое изображение предмета с увеличением  $\Gamma_1 = \frac{2}{3}$ . Чему будет равно увеличение  $\Gamma_2$ , если, не изменяя расстояние между предметом и линзой, заменить линзу на линзу с оптической силой  $D_2 = -D_1$ ?

**Решение.** В первом случае (рис. 7.45, а) было получено уменьшенное прямое изображение предмета  $AB$ . Очевидно, что такое изображение можно получить только в рассеивающей линзе. Предмет находится между фокусом и оптическим центром,



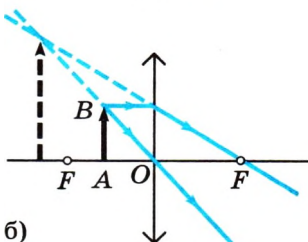
а)

так как увеличение больше  $\frac{1}{2}$ . В этом случае формула линзы имеет вид  $-\frac{1}{F_1} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_1}$ ; увеличение

$\Gamma_1 = \frac{f_1}{d}$ , откуда  $f_1 = d\Gamma_1$ . При замене линзы на собирающую (рис. 7.45, б) ( $D_2 = -D_1$ ) формула линзы имеет вид

$$\frac{1}{F_2} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f_2},$$

откуда  $\Gamma_2 = \frac{f_2}{d}$ ,  $f_2 = d\Gamma_2$ .



б)

Рис. 7.45

Приравнявая правые части формул линзы и учитывая знак «-», получаем

$$\frac{1}{d} - \frac{1}{d \cdot \Gamma_1} = \frac{1}{d \cdot \Gamma_2} - \frac{1}{d}, \quad 2 = \frac{1}{\Gamma_1} + \frac{1}{\Gamma_2}, \quad \Gamma_2 = \frac{1}{2 - \frac{1}{\Gamma_1}} = \frac{\Gamma_1}{2\Gamma_1 - 1} = 2.$$

**Задача 5.** На экран с круглым отверстием радиусом  $r_0 = 10$  см падает сходящийся пучок света. Угол между крайним лучом и осью симметрии равен  $60^\circ$ . Определите точку, в которой будут сходиться лучи, если в отверстие вставляется линза 1) собирающая; 2) рассеивающая. Известно, что  $D_1 = -D_2 = 10$  дптр.

**Решение.** В данном случае источник является мнимым, находящимся на расстоянии  $d = r_0 \operatorname{ctg} \alpha = \frac{r_0}{\sqrt{3}}$ . Формула линзы в первом случае (рис. 7.46, а) имеет вид  $D_1 = \frac{1}{F_1} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f_1}$ , где  $f_1$  — расстояние от линзы до точки пересечения лучей, преломлённых в линзе, откуда

$$f_1 = \frac{F_1 d}{d + F_1} = \frac{F_1 \frac{r_0}{\sqrt{3}}}{\frac{r_0}{\sqrt{3}} + F_1} = 5,9 \text{ см.}$$

Во втором случае формула линзы имеет вид  $D_2 = -\frac{1}{F_2} = -\frac{1}{d} + \frac{1}{f_2}$ . Отсюда

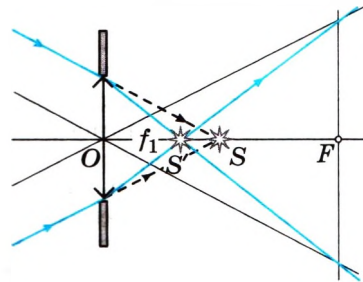
$$f_2 = \frac{F_2 d}{F_2 - d} = \frac{F_2 \frac{r_0}{\sqrt{3}}}{F_2 - \frac{r_0}{\sqrt{3}}} = 14,3 \text{ см.}$$

Из вычислений и из построения изображений ясно, что точка пересечения лучей в первом случае станет ближе к экрану, во втором — дальше от экрана.

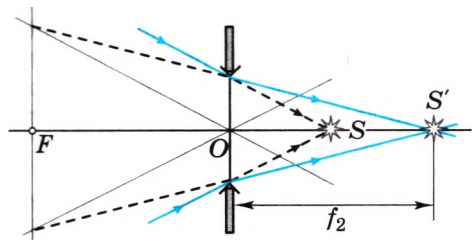
### Задачи для самостоятельного решения

1. С помощью линзы на вертикальном экране получено действительное изображение электрической лампочки. Как изменится изображение, если закрыть верхнюю половину линзы?

2. Фотоаппарат даёт на плёнке изображение человеческого лица. Поясните с помощью чертежа, почему изображение леса, виднеющегося вдаль за человеком, получается нерезким. В какую сторону следует сместить объектив, чтобы лес был изображён чётко? Будет ли при этом чётким изображение лица?



а)



б)

Рис. 7.46





3. Постройте изображение предмета, помещённого перед собирающей линзой, в следующих случаях: 1)  $d > 2F$ ; 2)  $d = 2F$ ; 3)  $F < d < 2F$ ; 4)  $d < F$ .

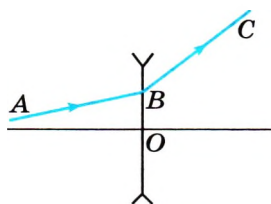


Рис. 7.47

4. На рисунке 7.47 линия  $ABC$  изображает ход луча через тонкую рассеивающую линзу. Определите построением положения главных фокусов линзы.

5. От предмета высотой 1 см получили с помощью линзы действительное изображение высотой 6 см. Когда предмет передвинули на 6 см, то получили мнимое изображение высотой 3 см. Определите фокусное расстояние линзы.

6. На оптической оси линзы с фокусным расстоянием 20 см помещена светящаяся точка на расстоянии 30 см от линзы. По другую сторону от линзы в её фокальной плоскости находится экран. Определите диаметр пятна на экране, если диаметр линзы 3 см.

7. Два одинаковых предмета, находящиеся по одну сторону линзы на расстоянии 60 см друг от друга, изображаются линзой с увеличением 2 и 4 соответственно. Определите расстояние между изображениями предметов.

8. Собирающая линза с фокусным расстоянием 20 см находится на расстоянии 10 см от рассеивающей линзы с фокусным расстоянием 60 см. Определите, на каком расстоянии от второй линзы получается изображение точки  $S$ , если сама светящаяся точка находится на расстоянии 30 см от первой линзы.

9. С какой выдержкой надо фотографировать бегуна, скорость которого 3 м/с, чтобы размытость изображения не превышала 0,1 мм? Фокусное расстояние объектива 15 см, расстояние от фотоаппарата до бегуна 10 м.



1. Небольшой груз, подвешенный на нити длиной 2,5 м, совершает гармонические колебания, при которых его максимальная скорость достигает 0,2 м/с. При помощи собирающей линзы с фокусным расстоянием 0,2 м изображение колеблющегося груза проецируется на экран, расположенный на расстоянии 0,5 м от линзы. Главная оптическая ось линзы перпендикулярна плоскости колебаний маятника и плоскости экрана. Определите максимальное смещение изображения груза на экране от положения равновесия.

2. На оси  $OX$  в точке  $x_1 = 10$  см находится тонкая рассеивающая линза с фокусным расстоянием  $F_1 = -10$  см, а в точке  $x_2 = 25$  см — тонкая собирающая линза. Главные оптические оси обеих линз совпадают с осью  $OX$ . Свет от точечного источника, расположенного в точке  $x = 0$ , пройдя данную оптическую систему, распространяется параллельным пучком. Определите фокусное расстояние  $F_2$  собирающей линзы.

3. На оси  $OX$  в точке  $x_1 = 0$  находится оптический центр тонкой рассеивающей линзы с фокусным расстоянием  $F_1 = -20$  см, а в точке  $x_2 = 20$  см — тонкой собирающей линзы с фокусным расстоянием  $F_2 = 20$  см. Главные оптические оси обеих линз лежат на оси  $OX$ . На рассеивающую линзу по оси  $OX$  падает параллельный пучок света из области  $x < 0$ . Определите координату  $x$  точки, в которой соберётся этот пучок, пройдя данную оптическую систему.



## § 53 ДИСПЕРСИЯ СВЕТА

Какие представления о свете были у учёных в начале XIX в.?  
Что определяет цвет предмета?

Занимаясь усовершенствованием телескопов, Ньютон обратил внимание на то, что изображение, даваемое объективом, по краям окрашено. Он заинтересовался этим и первый «исследовал разнообразие световых лучей и прористекающие отсюда особенности цветов, которых до того времени никто даже не подозревал» (слова из надписи на надгробном памятнике Ньютону). Радужную окраску изображения, получаемого с помощью линзы, наблюдали, конечно, и до него.

Было замечено также, что радужные края имеют предметы, рассматриваемые через призму. Пучок световых лучей, прошедших через призму, окрашивается по краям.

Опыт Ньютона был гениально прост. Ньютон догадался направить на призму световой пучок малого поперечного сечения. Пучок солнечного света проходил в затемнённую комнату через маленькое отверстие в ставне. Падая на стеклянную призму, он преломлялся и давал на противоположной стене удлинённое изображение с радужным чередованием цветов. Стилизованное изображение опыта Ньютона показано на рисунке 7.48. Следуя многовековой традиции, согласно которой радуга считалась состоящей из семи основных цветов, Ньютон тоже выделил семь цветов: фиолетовый, синий, голубой, зелёный, жёлтый, оранжевый и красный. Саму радужную полоску Ньютон назвал *спектром*.

Закрыв отверстие красным стеклом, Ньютон наблюдал на стене только красное пятно, закрыв синим стеклом — синее пятно и т. д. Это означало, что не призма окрашивает белый свет, как предполагалось раньше. Призма не изменяет свет, а лишь разлагает его на составные части (см. рис. I на цветной вклейке). Белый свет имеет сложный состав. Из него можно выделить пучки различных цветов, и лишь совместное их действие вызывает у нас впечатление белого цвета. В самом деле, если с помощью второй призмы, повернутой на  $180^\circ$  относительно первой, собрать все пучки спектра, то опять получится белый свет (см. рис. II на цветной вклейке). Выделив какую-либо часть спектра, например зелёную, и заставив свет пройти ещё через одну призму, мы уже не получим дальнейшего изменения окраски.

На Востоке изготавливали украшения в виде стеклянных призм, дающих разноцветные блики. Декарт наблюдал искусственную радугу на водяной пыли от фонтана.

ИНТЕРЕСНО

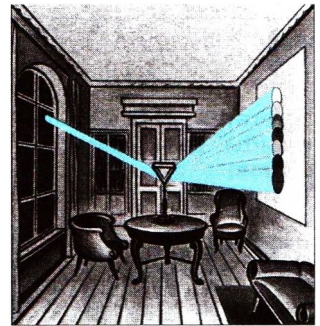


Рис. 7.48



Возьмите линзу и внимательно посмотрите на её края. В каком положении лучей видно, что её края окрашены?


Другой важный вывод, к которому пришёл Ньютон, был сформулирован им в трактате «Оптика» следующим образом: «Световые пучки, отличающиеся по цвету, отличаются по степени преломляемости» (для них стекло имеет различные показатели преломления). Наиболее сильно преломляются фиолетовые лучи, меньше других — красные. Зависимость показателя преломления света от его цвета Ньютон назвал *дисперсией*.

**ИНТЕРЕСНО** Слово «дисперсия» происходит от латинского слова *dispersio* — рассеяние.

Показатель преломления зависит и от скорости света в веществе (см. § 47). Абсолютный показатель преломления  $n = \frac{c}{v}$ . Луч красно-

го цвета преломляется меньше из-за того, что красный свет имеет в веществе наибольшую скорость, а луч фиолетового цвета преломляется больше, так как скорость для фиолетового света наименьшая.

Именно поэтому призма и разлагает свет. В пустоте скорости света разного цвета одинаковы. Если бы это было не так, то, к примеру, спутник Юпитера Ио, который наблюдал Рёмер, казался бы красным в момент выхода спутника из тени. Но этого не наблюдается.

 Начертите лучи, падающие под углом к поверхности прозрачного тела. Покажите, как будут распространяться согласно принципу Гюйгенса фронты волн красного и фиолетового цветов.

Впоследствии была выяснена зависимость цвета от физической характеристики световой волны: её частоты колебаний  $\nu$  (или длины волны  $\lambda$ ). Поэтому можно дать более глубокое определение дисперсии, чем то, к которому пришёл Ньютон.

### Запомни

**Дисперсией** называется зависимость показателя преломления среды от частоты световой волны.

Длины волн видимой части спектра лежат в интервале примерно от 400 до 760 нм. Одному цвету также соответствует определённый диапазон длин волн (рис. 7.49).

Зная, что белый свет имеет сложный состав, можно объяснить удивительное многообразие красок в природе. Если предмет, например лист бумаги, отражает все падающие на него лучи различных цветов, то он будет казаться белым. Покрывая бумагу слоем красной краски, мы не создаём при этом

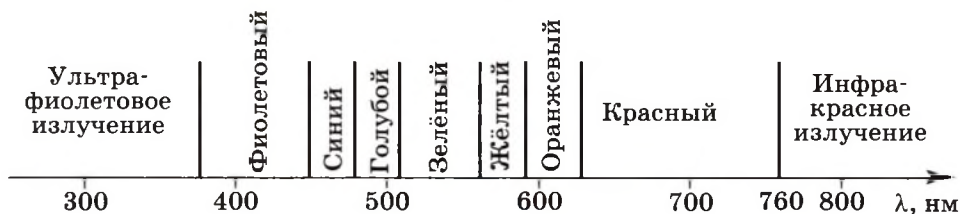


Рис. 7.49

свет нового цвета, но задерживаем на листе некоторую часть имеющегося. Отражаться теперь будут только красные лучи, остальные же поглощаются слоем краски. Трава и листья деревьев кажутся нам зелёными потому, что из всех падающих на них солнечных лучей они отражают лишь зелёные, поглощая остальные. Если посмотреть на траву через красное стекло, пропускающее только красные лучи, то она будет казаться почти чёрной.

Дисперсия. Спектр видимого света

Найти



1. На тетради написано красным карандашом «отлично» и зелёным — «хорошо». Имеется два стекла — зелёное и красное. Через какое стекло надо смотреть, чтобы увидеть слово «отлично»?
2. Почему только узкий световой пучок даёт спектр после прохождения сквозь призму, а у широкого пучка окрашенными оказываются лишь края?
3. Что такое дисперсия света?



1. Верно(-ы) утверждение(-я)

Дисперсией света объясняется физическое явление

**А:** фиолетовый цвет мыльной плёнки, освещаемой белым светом

**Б:** фиолетовый цвет абажура настольной лампы, светящейся белым светом

**В:** проявление цветного спектра после прохождения белого света через стеклянную призму

1) только А и В                                    2) только Б и В                                    3) А    4) В

2. Разложение пучка солнечного света в спектр при прохождении его через призму объясняется тем, что свет состоит из набора электромагнитных волн разной длины, которые, попадая в призму,

- 1) движутся с разной скоростью
- 2) имеют одинаковую частоту
- 3) поглощаются в разной степени
- 4) имеют одинаковую длину волны

3. При попадании солнечного света на капли дождя образуется радуга. Это объясняется тем, что белый свет состоит из электромагнитных волн с разной длиной волны, которые каплями по-разному

- 1) поглощаются                                    3) поляризуются
- 2) отражаются                                    4) преломляются





## § 54 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА

Дайте определение интерференции механических волн.

При каких условиях она возникает?

Исчезает ли энергия при интерференции волн, если есть интерференционные минимумы?

Если свет представляет собой поток волн, то должно наблюдаться явление интерференции света. Однако получить интерференционную картину (чередование максимумов и минимумов освещённости экрана) с помощью двух независимых источников света, например двух электрических лампочек, невозможно. Включение ещё одной лампочки лишь увеличивает освещённость поверхности, но не создаёт чередования минимумов и максимумов освещённости.

Выясним, в чём причина этого и при каких условиях можно наблюдать интерференцию света.

**Условие когерентности световых волн.** Причина отсутствия интерференционной картины в опыте с двумя лампочками в том, что световые волны, излучаемые независимыми источниками, не согласованы друг с другом. Разность фаз колебаний, вызванных этими волнами, непрерывно изменяется во времени. Для получения же устойчивой интерференционной картины необходимо, чтобы в данной точке пространства разность фаз оставалась постоянной, т. е. чтобы колебания были *когерентны*. Как вы уже знаете, волны, возбуждающие в пространстве когерентные колебания, называются *когерентными волнами*.



От значения разности фаз зависит амплитуда колебаний, вызванных когерентными волнами. Длины когерентных волн также должны быть равны. Точного равенства длин волн от двух источников добиться нетрудно. Для этого достаточно использовать хорошие светофильтры, пропускающие свет в очень узком интервале длин волн. Но невозможно осуществить постоянство разности фаз от двух независимых источников. Атомы источников излучают свет независимо друг от друга отдельными «обрывками» (*цугами*) синусоидальных волн, имеющими обычно длину около метра. И такие цуги волн от обоих источников налагаются друг на друга. Моменты излучения атомов согласовать невозможно. В результате амплитуда колебаний в любой точке пространства хаотично меняется со временем в зависимости от того, как в данный момент времени цуги волн от различных источников сдвинуты относительно друг друга по

фазе. Волны от различных источников света *некогерентны* из-за того, что разность фаз волн не остаётся постоянной (исключение составляют квантовые источники света —

лазеры, созданные в 1960 г.). Никакой устойчивой картины с определённым распределением максимумов и минимумов освещённости в пространстве наблюдаться не будет.



Подумайте, о каких колебаниях в случае световых волн мы говорим.

**Интерференция в тонких плёнках.** Тем не менее интерференцию света удаётся наблюдать. Хотя её и наблюдали очень давно, но только никак не объясняли.

Вы тоже много раз видели интерференционную картину, когда в детстве развлекались пусканием мыльных пузырей или наблюдали за радужным переливом цветов тонкой плёнки бензина на поверхности воды.

Окраску тонких плёнок можно объяснить согласно идее Томаса Юнга сложением волн 1 и 2 (рис. 7.50), одна из которых (1) отражается от наружной поверхности плёнки, а другая (2) — от внутренней. При этом происходит *интерференция световых волн* — сложение двух волн, вследствие которого наблюдается устойчивая во времени картина усиления или ослабления результирующих световых колебаний в различных точках пространства. Результат интерференции (усиление или ослабление результирующих световых колебаний) зависит от угла падения света на плёнку, её толщины и длины волны света.



**Т. Юнг**  
(1773—1829)

Открыл интерференцию света **ИНТЕРЕСНО** (ввёл в физику термин «интерференция»), дал объяснение этому явлению и первым измерил длину световой волны английский учёный Томас Юнг.

### Важно

Усиление света произойдёт в том случае, если преломлённая волна 2 отстанет от отражённой волны 1 на целое число длин волн.

Если же вторая волна отстанет от первой на половину длины волны или на нечётное число полуволн, то произойдёт ослабление света.

Цуг волн от каждого излучающего атома разделяется плёнкой на два цуга, а затем эти части сводятся вместе и интерферируют.



Вспомните условия наблюдения максимумов и минимумов при интерференции механических волн.

### Важно

Когерентность волн, отражённых от наружной и внутренней поверхностей плёнки, возникает из-за того, что они являются частями одного и того же светового пучка.

Юнг понял также, что различие в цвете связано с различием в длине волны (или частоте световых волн). Световым пучкам различного цвета соответствуют волны с разной длиной волны  $\lambda$ . Для взаимного усиления

«Мыльный пузырь, витая в воздухе... зажигается всеми оттенками цветов, присущими окружающим предметам. Мыльный пузырь, пожалуй, самое изысканное чудо природы» (Марк Твен).

### ИНТЕРЕСНО

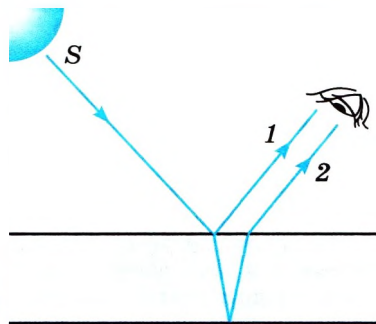


Рис. 7.50

волн, отличающихся друг от друга длиной волны (углы падения предполагаются одинаковыми), требуется различная толщина плёнки. Следовательно, если плёнка имеет неодинаковую толщину, то при освещении её белым светом должны появиться различные цвета.

### Кольца Ньютона.

#### Запомни

Интерференционная картина, возникающая в тонкой прослойке воздуха между стеклянной пластиной и лежащей на ней плоско-выпуклой линзой, сферическая поверхность которой имеет большой радиус кривизны, получила название **колец Ньютона**.

#### Интересно

Монохроматическое излучение — это излучение волн одной частоты.

Оказалось, что радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному; красные кольца имеют максимальный радиус. Расстояния между соседними кольцами уменьшаются с увеличением их радиусов (см. рис. III, 2, 3 на цветной вклейке).

Удовлетворительно объяснить, почему возникают кольца, Ньютон не смог. Удалось это Юнгу. Проследим за ходом его рассуждений. В их основе лежит предположение о том, что свет — это волны. Рассмотрим случай, когда волна определённой длины волны падает почти перпендикулярно на плоско-выпуклую линзу (рис. 7.51). Волна 1 появляется в результате отражения от выпуклой поверхности линзы на границе двух сред стекло—воздух, а волна 2 — в результате отражения от пластины на границе двух сред воздух—стекло. Эти волны когерентны: они имеют одинаковую длину волны и постоянную разность фаз, которая возникает из-за того, что волна 2 проходит больший путь, чем волна 1.

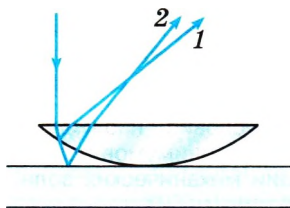


Рис. 7.51



Подумайте, как можно объяснить появление в центре тёмного пятна. Ведь разность хода отражённых волн равна нулю.

Отметим, что при отражении света от оптически более плотной среды фаза колебаний вектора напряжённости  $\vec{E}$  электромагнитной волны изменяется на  $\pi$ . Это изменение можно учесть, вычтя (или прибавив) из разности хода половину длины волны. Говорят, что при таком отражении происходит потеря половины длины волны.

#### Важно

Если вторая волна отстаёт от первой на целое число длин волн, то, складываясь, волны усиливают друг друга.

Напротив, если вторая волна отстаёт от первой на нечётное число полуволн, то колебания, вызванные ими, будут происходить в противоположных фазах и волны погасят друг друга.

Если известен радиус кривизны  $R$  выпуклой поверхности линзы, то можно вычислить, на каких расстояниях от точки соприкосновения линзы со стеклянной пластиной разности хода таковы, что волны определённой длины волны  $\lambda$  гасят друг друга. Эти расстояния и являются радиусами тёмных колец Ньютона. Ведь линии постоянной толщины воздушной прослойки представляют собой окружности. Измерив радиусы колец, можно вычислить длины волн.

**Длина световой волны.** В результате измерений было установлено, что для красного света  $\lambda_{\text{кр}} = 7,6 \cdot 10^{-7}$  м, а для фиолетового —  $\lambda_{\text{ф}} = 3,8 \cdot 10^{-7}$  м. Длины волн, соответствующие другим цветам спектра, принимают промежуточные значения. Для любого цвета длина световой волны очень мала. Поясним это на простом примере. Представьте себе среднюю морскую волну длиной волны в несколько метров, которая увеличилась настолько, что заняла весь Атлантический океан от берегов Америки до Европы. Длина световой волны, увеличенной в той же пропорции, лишь ненамного превысила бы ширину этой страницы.

**Важно**

Явление интерференции не только доказывает наличие у света волновых свойств, но и позволяет измерить длину волны. Подобно тому как высота звука определяется его частотой, цвет света определяется частотой колебаний или длиной волны.

В природе нет никаких красок, есть лишь волны разных длин волн. Глаз — сложный физический прибор, способный обнаруживать различие в цвете, которому соответствует весьма незначительная (около  $10^{-6}$  см) разница в длинах световых волн.

При переходе света из одной среды в другую длина волны изменяется. Это можно увидеть. Заполним водой или другой прозрачной жидкостью с показателем преломления  $n$  воздушную прослойку между линзой и пластиной. Радиусы интерференционных колец уменьшатся.

Почему это происходит? Мы знаем, что при переходе света из вакуума в какую-нибудь среду скорость света уменьшается в  $n$  раз. Частота волны при переходе не изменяется, а так как  $v = \lambda\nu$ , то изменяется в  $n$  раз длина волны.



Возьмите плоско-выпуклую линзу с малой кривизной сферической поверхности и положите её выпуклостью вниз на стеклянную пластину. Внимательно разглядывая плоскую поверхность линзы (лучше через лупу), найдите в месте соприкосновения линзы и пластины тёмное пятно и вокруг него совокупность маленьких радужных колец (см. рис. III, 1 на цветной вклейке). Это и есть кольца Ньютона.

**Интересно**

Большинство животных не способны различать цвета. Они всегда видят чёрно-белую картину. Не различают цвета также дальтоники — люди, страдающие цветовой слепотой.



Кольца Ньютона относят к интерференционным картинам, называемым «полосы равной толщины». Подумайте, как будет выглядеть интерференционная картина, если её наблюдать в воздушном зазоре, образованном между двумя плоскими пластинами, расположенными под небольшим углом друг к другу.



- ?**
1. Как получают когерентные световые волны?
  2. В чём состоит явление интерференции света?
  3. С какой физической характеристикой световых волн связано различие в цвете?
  4. После удара камнем по прозрачному льду возникают трещины, переливающиеся всеми цветами радуги. Почему?
  5. Длина волны света в воде уменьшается в  $n$  раз ( $n$  — показатель преломления воды относительно воздуха). Означает ли это, что ныряльщик под водой не может видеть окружающие предметы в естественном свете?
  6. Человеческий глаз может фиксировать изменение интенсивности излучения с частотой не более 20 Гц. По цепи лампы накаливания идёт переменный ток. Почему мы видим постоянное, а не пульсирующее излучение лампы?



1. Явление интерференции присуще
  - 1) только видимому свету
  - 2) только радиоволнам
  - 3) только звуковым волнам
  - 4) как электромагнитным, так и механическим волнам
2. Световые волны когерентны, если у них
  - 1) совпадают амплитуды
  - 2) совпадают частоты
  - 3) сдвиг фаз не зависит от времени
  - 4) совпадают частоты и сдвиг фаз не зависит от времени
3. Интерференцию света с помощью лазерной указки показать легче, чем с помощью обычного источника, так как пучок света, даваемый лазером,
  - 1) мощный
  - 2) когерентный
  - 3) расходящийся
  - 4) ярче
4. Два точечных источника света находятся близко друг от друга и создают на удалённом экране устойчивую интерференционную картину. Это возможно, если эти два источника являются
  - 1) двумя лампами накаливания
  - 2) двумя солнечными зайчиками от разных зеркал
  - 3) малыми отверстиями в непрозрачном экране, освещёнными светом одного и того же точечного источника
  - 4) малыми отверстиями в непрозрачном экране, освещёнными светом двух точечных источников разных цветов

## § 55 НЕКОТОРЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ

При каких условиях интерференционная картина может измениться? исказиться? Почему для появления цветной интерференционной картины необходима неодинаковая толщина плёнки?

Области применения интерференции очень важны и обширны. Существуют специальные приборы — интерферометры, принцип действия которых основан на явлении интерференции. Назначение их может быть различным: точное измерение длин световых волн, показателя преломления газов и других веществ. Имеются интерферометры специального назначения.

Мы остановимся на двух случаях применения интерференции.

**Проверка качества обработки поверхностей.** С помощью интерференции можно оценить качество обработки поверхности изделия с точностью до  $1/10$  длины волны, т. е. с точностью до  $10^{-6}$  см. Для этого нужно создать тонкую клиновидную прослойку воздуха между поверхностью образца и очень гладкой эталонной пластиной. Тогда неровности поверхности размером до  $10^{-6}$  см вызовут заметные искривления интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности и нижней поверхности эталонной пластины.

**Просветление оптики.** Объективы фотоаппаратов и кинопроекторов, перископы подводных лодок и различные другие оптические устройства состоят из большого числа оптических стёкол — линз, призм и др. Проходя через такие устройства, свет отражается от многих поверхностей.

При падении света перпендикулярно поверхности доля отражённой от неё энергии составляет 5—9 % всей энергии. Поэтому сквозь прибор часто проходит всего 10—20 % поступающего в него света. В результате этого освещённость изображения получается слабой. Кроме того, ухудшается качество изображения. Часть светового пучка после многократного отражения от внутренних поверхностей всё же проходит через оптический прибор, но рассеивается и уже не участвует в создании чёткого изображения. На фотографических изображениях по этой причине образуется «вуаль». Для устранения этих неприятных последствий отражения света от поверхностей оптических стёкол надо уменьшить долю отражаемой энергии света. Получаемое с помощью прибора изображение становится при этом ярче, просветляется. Отсюда и происходит термин *просветление оптики*.

Просветление оптики основано на явлении интерференции. На поверхность оптического стекла, например линзы, наносят тонкую плёнку с показателем преломления  $n_p$ , меньшим показателя преломления стекла  $n_c$ . Для простоты рассмотрим случай нормального падения света на плёнку.

Для упрощения понимания на рисунке 7.52 показан ход луча, падающего на поверхность раздела под небольшим углом  $\alpha$ , однако все вычисления делаем для  $\alpha = 0$ .

Число отражающих поверхностей в современных фотообъективах превышает 10, а в перископах подводных лодок доходит до 40.

**ИНТЕРЕСНО**

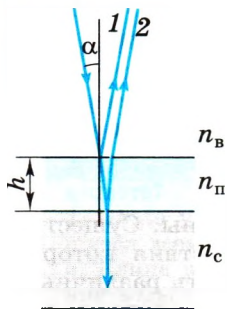


Рис. 7.52

Разность хода световых волн 1 и 2 (см. рис. 7.52), отражённых от верхней и нижней поверхностей плёнки, равна удвоенной толщине плёнки  $2h$ . Длина волны  $\lambda_п$  в плёнке меньше длины волны  $\lambda$  в вакууме в  $n_п$  раз:

$$\lambda_п = \frac{\lambda}{n_п}.$$

Для того чтобы волны 1 и 2 ослабляли друг друга, разность хода должна быть равна половине длины волны в плёнке:

$$2h = \frac{\lambda_п}{2} = \frac{\lambda}{2n_п}. \quad (7.16)$$

Если амплитуды обеих отражённых волн одинаковы или очень близки друг к другу, то гашение света будет полным. Чтобы добиться этого, подбирают соответствующим образом показатель преломления плёнки, так как интенсивность отражённого света определяется отношением коэффициентов преломления двух граничащих сред.

На линзу при обычных условиях падает белый свет. Выражение (7.16) показывает, что требуемая толщина плёнки зависит от длины волны. Поэтому осуществить гашение отражённых волн всех частот невозможно. Толщину плёнки подбирают так, чтобы добиться полного гашения при нормальном падении для длин волн средней части спектра (зелёный цвет,  $\lambda_з \approx 5,5 \cdot 10^{-5}$  см). Она должна быть равна четверти длины волны в плёнке:

$$h = \frac{\lambda_з}{4n_п}.$$

Отражение света для крайних участков спектра — красного и фиолетового — будет несколько меньшим. Поэтому объектив с просветлённой оптикой в отражённом свете имеет сиреневый оттенок. Сейчас даже простые дешёвые фотоаппараты снабжены просветлённой оптикой.

На явлении интерференции основано также изготовление так называемых холодных зеркал. В этом случае необходимо, чтобы от зеркала отражалось как можно больше световой энергии, а волны инфракрасного диапазона проходили через зеркало. Для этого используются диэлектрические плёнки с разными показателями преломления. Толщина плёнки подбирается таким образом, чтобы проходящая через плёнку волна и волна, испытавшая отражение от двух поверхностей плёнки, накладываясь, компенсировали друг друга.

Отсутствие света в областях интерференционных минимумов означает превращение световой энергии в другие формы. Как и при интерференции механических волн, отсутствие света в данной области пространства означает, что происходит перераспределение энергии, отражённых волн нет и весь свет проходит сквозь объектив.



## § 56 ДИФРАКЦИЯ СВЕТА

Вспомните явление дифракции механических волн.  
Какое условие необходимо для наблюдения дифракции?

Если свет — это волна, то наряду с интерференцией должна наблюдаться и *дифракция* света. Ведь дифракция — огибание волнами краёв препятствий — присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко, так как волны отклоняются от прямолинейного распространения на заметные углы только на препятствиях, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны, как мы с вами знаем, очень мала ( $\sim 10^{-7}$  м).

Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света: светлое пятно на экране против отверстия будет иметь большие размеры, чем размеры пучка.

**Опыт Юнга.** В 1802 г. Т. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 7.53). В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия *B* и *C* на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим через малое отверстие *A* в другой ширме. Именно эта деталь (наличие двух отверстий), до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют ведь только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия *A* возбуждала в отверстиях *B* и *C* когерентные колебания. Вследствие дифракции от отверстий *B* и *C* выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции этих двух световых волн на экране появлялись чередующиеся светлые и тёмные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаружил, что интерференционные полосы исчезли. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причём весьма точно.

**Теория Френеля.** Исследование дифракции было завершено в работах Огюстена Френеля. Френель не только более детально исследовал различные случаи дифракции на опыте, но и разработал на основе принципа Гюйгенса количественную теорию дифракции, позволяющую в принципе рассчитать дифракционную картину, возникающую при огибании светом любых препятствий. Им же было впервые объяснено прямолинейное распространение света в однородной среде на основе волновой теории.

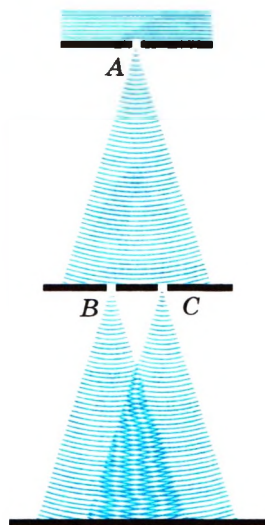


Рис. 7.53



Обсудите детально с одноклассниками опыт Юнга. Где мы наблюдаем дифракцию, а где — интерференцию?



Этих успехов Френель добился, объединив принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно идее Френеля

**Важно**

каждая точка волнового фронта является источником вторичных волн, причём все вторичные источники когерентны (принцип Гюйгенса—Френеля).



**О. Френель**  
(1788—1827)

Применим принцип Гюйгенса—Френеля для определения амплитуды колебаний в точке  $B$ , возбуждённых источником  $S$  (рис. 7.54). Считаем, что в момент времени  $t$  фронт волны имеет радиус  $R$ . Проведём из точки  $B$  сферические поверхности радиусами  $b + \lambda/2$ ,  $b + 2\lambda/2$ ,  $b + 3\lambda/2$  и т. д. Весь фронт волны таким образом будет разделён на кольцевые зоны 1, 2, 3 и т. д., называемые *зонами Френеля*. При этом колебания, вызываемые вторичными источниками, находящимися в двух соответствующих точках соседних зон (например, в точках  $M_4$  и  $M_5$ ), происходят в противофазе и частично гасят друг друга.

Если первая зона вызывает в точке  $B$  колебания с амплитудой  $A_1$ , вторая — с амплитудой  $A_2$  и т. д., то амплитуда колебаний в точке  $B$  будет определяться формулой

$$A_B = A_1 - A_2 + A_3 - A_4 + \dots \quad (7.17)$$

Так как  $A_1 > A_2 > A_3 > \dots$ , то можно показать, что амплитуда колебаний, вызванных в точке  $B$   $i$ -й зоной, равна:

$$A_i = \frac{A_{i-1} + A_{i+1}}{2} \quad (7.18)$$

Перепишем выражение (7.17) в виде

$$A_B = \frac{A_1}{2} + \left( \frac{A_1}{2} - A_2 + \frac{A_3}{2} \right) + \left( \frac{A_3}{2} - A_4 + \frac{A_5}{2} \right) + \dots = \frac{A_1}{2},$$

так как согласно формуле (7.18) все выражения в скобках равны нулю.

**Интересно** Любопытный случай произошёл на заседании Французской академии наук в 1818 г. С. Пуассон, присутствовавший на заседании, обратил внимание на то, что из теории Френеля вытекают факты, явно противоречащие здравому смыслу, а именно: за маленьким непрозрачным диском всегда должно находиться светлое пятно в центре тени. Каково же было удивление учёных, когда поставленные эксперименты доказали, что так и есть на самом деле! Светлое пятно в центре дифракционной картины от круглого диска называют *пятном Пуассона*.

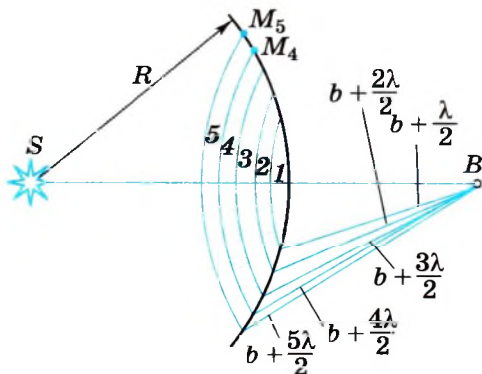


Рис. 7.54

Мы получили, что амплитуду колебаний и соответственно освещённость в точке  $B$  определяет половина первой зоны, размеры которой порядка долей миллиметра. Следовательно, свет распространяется от точки  $S$  к точке  $B$  практически прямолинейно.

**Дифракционные картины от различных препятствий.** Расчёты, сделанные Френелем, полностью были подтверждены экспериментом. Из-за того что длина световой волны очень мала, угол отклонения света от направления прямолинейного распространения невелик. Поэтому для отчётливого наблюдения дифракции нужно либо использовать очень маленькие препятствия, либо не располагать экран далеко от препятствий. При расстоянии между препятствием и экраном порядка метра размеры препятствия не должны превышать сотых долей миллиметра. Если же расстояние до экрана достигать сотен метров или нескольких километров, то дифракцию можно наблюдать на препятствиях размерами в несколько сантиметров и даже метров.

На рисунке 7.55,  $a$ – $в$  схематично показаны дифракционные картины от различных препятствий:  $a$  — от тонкой проволоочки;  $b$  — от круглого отверстия;  $в$  — от круглого экрана.

Вместо тени от проволоочки видны светлые и тёмные полосы. В центре дифракционной картины от отверстия появляется тёмное пятно, окружённое светлыми и тёмными кольцами (изменяя диаметр отверстия, можно в центре дифракционной картины получить и светлое пятно, окружённое тёмными и светлыми кольцами). В центре тени, образованной круглым экраном, видно светлое пятнышко, а сама тень окружена тёмными концентрическими кольцами.



Подумайте, почему уменьшается амплитуда колебаний, возбуждаемых в точке  $B$  каждой последующей зоной (при увеличении номера зоны Френеля), несмотря на то, что площади зон равны.

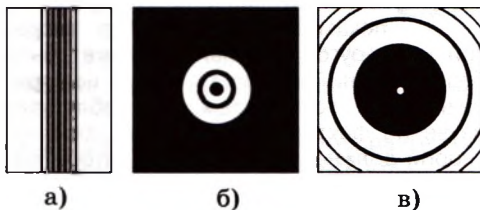


Рис. 7.55

Дифракция. Принцип Гюйенса—Френеля

Найти



1. Какое явление называется дифракцией?
2. Почему дифракцию механических волн наблюдать легче, чем дифракцию света?



## § 57 ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Как определяют границы применимости физической теории?

Все физические теории отражают происходящие в природе процессы лишь приближённо. Для любой теории могут быть указаны определённые границы её применимости. Можно ли применять в конкретном случае данную теорию или нет, зависит не только от той точности, которую обеспечивает эта теория, но и от того, какая точность требуется при решении той или иной практической задачи. Границы применимости теории можно установить лишь после того, как разработана более общая теория, охватывающая те же явления.

Все эти общие положения относятся и к геометрической оптике. Эта теория является приближённой. Она неспособна объяснить, например, явления интерференции и дифракции света. Более общей и более точной теорией является волновая оптика. Согласно ей закон прямолинейного распространения света и другие законы геометрической оптики выполняются

достаточно точно лишь в том случае, если размеры препятствий на пути распространения света *много больше длины световой волны*. Но совершенно точно они не выполняются никогда.

Принцип действия оптических приборов описывается законами геометрической оптики. Согласно

этим законам можно различать с помощью микроскопа сколь угодно малые детали объекта; с помощью телескопа можно установить существование двух звёзд при любых малых угловых расстояниях между ними. Однако в действительности это не так, и лишь волновая теория света позволяет разобратся в причинах предела разрешающей способности оптических приборов.

**Разрешающая способность микроскопа и телескопа.**

**Запомни**

Способность оптического прибора различать детали рассматриваемого объекта называют **разрешающей способностью** прибора.

Волновая природа света налагает предел на возможность различать детали предмета или очень мелкие предметы при их наблюдении с помощью микроскопа. Дифракция не позволяет получить отчётливые изображения мелких предметов, так как свет распространяется не строго прямолинейно, а огибает предметы. Из-за этого изображения получаются размытыми.

Минимальное линейное расстояние между точками предмета или двумя предметами, которые можно различить с помощью микроскопа,  $l \approx \frac{\lambda}{2(n-1)}$ , где  $n$  — показатель преломления материала, из которого изготовлена линза

**Интересно**

«...Успехи волнового принципа показывают, что выбор между той или другой теорией не может быть безразличен. Полезность теории не ограничивается только тем, что облегчает изучение фактов... цель всякой хорошей теории должна состоять в том, чтобы содействовать прогрессу науки открытием связующих фактов...» О. Френель.



объектива. Учитывая, что среднее значение показателя преломления стекла  $n \approx 1,5$ , получаем  $l \approx \lambda$ . Следовательно,

**Важно**

невозможно разрешить две детали объекта, размеры которых меньше длины световой волны.

Применение ультрафиолетового излучения позволяет повысить разрешающую способность линз. Использование же электронного микроскопа даёт возможность получать разрешение, во много раз превышающее разрешение оптического микроскопа.

Дифракция также налагает предел на разрешающую способность телескопа. Вследствие дифракции волн у края оправы объектива изображением звезды будет не точка, а система светлых и тёмных колец. Если две звезды находятся на малом угловом расстоянии друг от друга, то эти кольца налагаются друг на друга, и глаз не может различить, имеются ли две светящиеся точки или одна. Предельное угловое расстояние (предел разрешения оптического прибора) между светящимися точками, при котором их можно различать, определяется отношением длины волны к диаметру объектива:

$$\Theta = \frac{1,22\lambda}{D},$$

где  $\Theta$  — угол, под которым из центра линзы наблюдаются два точечных объекта.

Таким образом, для уменьшения углового расстояния, которое разрешается телескопом, необходимы объективы возможно большего диаметра.

Эти примеры показывают, что с дифракцией приходится считаться всегда, при любых препятствиях. Ею при очень тщательных наблюдениях нельзя пренебрегать и в случае препятствий, размеры которых значительно больше, чем длина волны.

**Важно**

Дифракция света определяет границы применимости геометрической оптики.

Границы применимости геометрической оптики

Найти



1. Почему с помощью микроскопа нельзя увидеть атом?
2. В каких случаях приближённо справедливы законы геометрической оптики?







## § 58 ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЁТКА

Как получают когерентные источники света?  
Почему существует предел в наблюдении деталей предметов?



На явлении дифракции основано устройство оптического прибора — *дифракционной решётки*.

## ЗАПОМНИ

**Дифракционная решётка** представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделённых непрозрачными промежутками (рис. 7.56).

## ЗАПОМНИ

Если ширина прозрачных щелей (или отражающих свет полос) равна  $a$  и ширина непрозрачных промежутков (или рассеивающих свет полос) равна  $b$ , то величина  $d = a + b$  называется **периодом решётки**.

Обычно период дифракционной решётки порядка 10 мкм.

Рассмотрим элементарную теорию дифракционной решётки. Пусть на решётку (рис. 7.57) падает плоская монохроматическая волна длиной вол-



Рис. 7.56

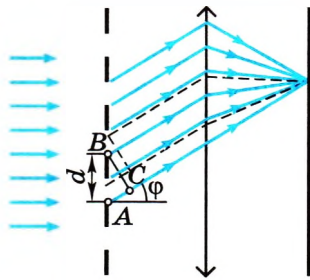


Рис. 7.57

## ИНТЕРЕСНО

Решётку изготавливают с помощью специальной делительной машины, наносящей на стеклянную пластину параллельные штрихи. Число штрихов достигает нескольких тысяч на 1 мм; общее число штрихов превышает 100 000. Просты в изготовлении желатиновые отпечатки с такой решёткой, зажатые между двумя стеклянными пластинами. Отражательные решётки представляют собой чередующиеся участки, отражающие свет и рассеивающие его. Рассеивающие свет штрихи наносят резцом на отшлифованную металлическую пластину.

ны  $\lambda$ . Так как период дифракционной решётки мал, то волна будет огибать непрозрачные промежутки. Согласно принципу Гюйгенса вторичные источники, расположенные в щелях, когерентны и создают световые волны, распространяющиеся по всем направлениям. Найдём условие, при котором идущие от щелей волны усиливают друг друга. Рассмотрим, например, волны, распространяющиеся в направлении, определяемом углом  $\varphi$ . Разность

хода волн от краёв соседних щелей равна длине отрезка  $AC$ . Если на этом отрезке укладывается целое число длин волн, то волны от всех щелей, распространяющиеся под углом  $\varphi$ , складываясь, будут усиливать друг друга. Из треугольника  $ABC$  можно найти длину катета  $AC$ :  $AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi$ .

**Важно**

Максимумы будут наблюдаться под углом  $\varphi$  в соответствии с условием

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (7.19)$$

где величина  $k = 0, 1, 2, \dots$  определяет порядок спектра.

Нужно иметь в виду, что при выполнении условия (см. формулу (7.19)) усиливают друг друга не только волны, идущие от нижних (см. рис. 7.57) краёв щелей, но и волны, идущие от всех других точек щелей. Каждой точке в первой щели соответствует точка во второй щели, находящаяся на расстоянии  $d$  от первой точки. Поэтому разность хода испущенных этими точками вторичных волн равна  $k\lambda$ , и эти волны взаимно усиливаются.

За решёткой помещают собирающую линзу и за ней — экран на фокусном расстоянии от линзы. Линза фокусирует лучи, идущие параллельно, в одной точке. В этой точке происходит сложение волн и их взаимное усиление.



Подумайте, будет ли наблюдаться дифракционная картина, если не помещать за решёткой линзу.

**Запомним**

Углы  $\varphi$ , удовлетворяющие условию (7.19), определяют положение так называемых **главных максимумов** на экране.

Наряду с картиной, получаемой в результате дифракции света, в случае дифракционной решётки наблюдается дифракционная картина и от отдельных щелей. Интенсивность максимумов в ней меньше интенсивности главных максимумов.

**Важно**

Так как положение максимумов (кроме центрального, соответствующего  $k = 0$ ) зависит от длины волны, то решётка разлагает белый свет в спектр. Чем больше  $\lambda$ , тем дальше от центрального максимума располагается тот или иной максимум, соответствующий данной длине волны (см. рис. IV на цветной вклейке).

Каждому значению  $k$  соответствует свой порядок спектра.

Чем больше число щелей, тем более резко очерчены максимумы и тем более широкими минимумами они разделены. Световая энергия, падающая на решётку, перераспределяется ею так, что большая её часть приходится на максимумы, а в область минимумов попадает незначительная часть энергии.

С помощью дифракционной решётки можно проводить очень точные измерения длины волны. Если период решётки известен, то



Как будет выглядеть дифракционная картина в монохроматическом свете?

**ИНТЕРЕСНО** Лазерный диск с бороздками, проходящими близко друг от друга, подобен отражательной дифракционной решётке. Если вы посмотрите на отражённый им свет от электрической лампочки, то обнаружите разложение света в спектр. Можно наблюдать несколько спектров, соответствующих разным значениям  $k$ . Картина будет очень чёткой, если свет от лампочки падает на пластинку под большим углом.

определение длины волны сводится к измерению угла  $\varphi$ , соответствующего направлению на максимум.

Мы можем наблюдать дифракционную картину достаточно просто. Так, если прищуриться, смотря на яркий источник света, то можно обнаружить радужные цвета. Наши ресницы вместе с промежутками между ними представляют собой грубую дифракционную решётку.

### Дифракционная решётка. Дифракционный спектр

Назад



1. Зависит ли положение максимумов освещённости, создаваемых дифракционной решёткой, от числа щелей?
2. Что вы увидите, посмотрев на электрическую лампочку сквозь птичье перо?
3. Чем различаются спектры, получаемые с помощью призмы, от дифракционных спектров?



1. Дифракционная решётка с периодом  $d$  освещается нормально падающим световым пучком с длиной волны  $\lambda$ . Какое из приведённых ниже выражений определяет угол  $\alpha$ , под которым наблюдается второй главный максимум?

- |                               |                               |
|-------------------------------|-------------------------------|
| 1) $\sin \alpha = 2\lambda/d$ | 3) $\cos \alpha = 2\lambda/d$ |
| 2) $\sin \alpha = d/2\lambda$ | 4) $\cos \alpha = d/2\lambda$ |

2. Луч лазера направляется перпендикулярно плоскости дифракционной решётки. Расстояние между нулевым и первым дифракционными максимумами на удалённом (расстояние до экрана  $L \gg 10$  см) экране равно 10 см. Расстояние между дифракционными максимумами первого порядка примерно равно

- |         |          |          |          |
|---------|----------|----------|----------|
| 1) 5 см | 2) 10 см | 3) 20 см | 4) 40 см |
|---------|----------|----------|----------|

3. На дифракционную решётку с периодом 0,0066 мм падает по нормали плоская монохроматическая волна. Длина волны 550 нм. Какое максимальное количество дифракционных максимумов можно наблюдать с помощью этой решётки для данной световой волны?

- |       |       |      |       |
|-------|-------|------|-------|
| 1) 11 | 2) 24 | 3) 3 | 4) 22 |
|-------|-------|------|-------|

4. На дифракционную решётку с периодом 0,004 мм падает по нормали плоская монохроматическая волна. Количество дифракционных максимумов, наблюдаемых с помощью этой решётки, равно 19. Чему равна длина волны света?

- |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1) 640 нм | 2) 560 нм | 3) 440 нм | 4) 580 нм |
|-----------|-----------|-----------|-----------|

## ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ТЕМЕ «ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ И ДИФРАКЦИЯ СВЕТА»

При решении задач надо выбрать когерентные волны, определить оптическую разность хода и записать условия наблюдения максимумов и минимумов интенсивности света.

**Задача 1.** В опыте Юнга по дифракции световых волн расстояние между щелями  $d = 0,07$  мм, а расстояние от двойной щели до экрана  $D = 2$  м. При освещении прибора зелёным светом расстояние между соседними светлыми дифракционными полосами оказалось равным  $\Delta h = 16$  мм. Определите длину волны.

**Решение.** В некоторой точке  $C$  экрана (рис. 7.58) будет наблюдаться максимум освещённости, если выполнено условие

$$d_2 - d_1 = k\lambda,$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$  — целые числа.

Применим теорему Пифагора к треугольникам  $S_1CE$  и  $S_2CB$ :

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2}\right)^2, \quad d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2}\right)^2.$$

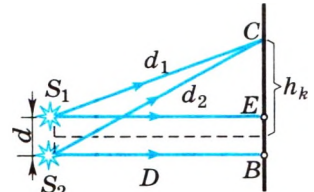


Рис. 7.58

Вычитая почленно из первого равенства второе, получаем  $d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d$ , или  $(d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d$ .

Так как  $d \ll D$ , то  $d_1 + d_2 \approx 2D$ . Следовательно,  $d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}$ .

Учитывая, что  $d_2 - d_1 = k\lambda$ , можем записать:  $k\lambda \approx \frac{h_k d}{D}$ .

Отсюда находим расстояние  $k$ -й светлой полосы от центра экрана:  $h_k \approx \frac{k\lambda D}{d}$ . Расстояние между соседними полосами равно:  $\Delta h = h_{k+1} - h_k \approx \frac{\lambda D}{d}$ . Отсюда  $\lambda \approx \frac{d\Delta h}{D} \approx 5,6 \cdot 10^{-5}$  см.

**Задача 2.** В некоторую точку пространства приходит излучение с оптической разностью хода волн  $\Delta = 1,8$  мкм. Определите, будет ли наблюдаться интерференционный минимум или максимум в этой точке. Длина волны: 1) 600 нм; 2) 400 нм.

**Решение.** Максимум или минимум интерференционной картины зависит от числа полуволн, укладывающихся на разности хода. Для  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  получим

$$\frac{\Delta}{\lambda_1} = \frac{1,8 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-7}} = 3, \quad \frac{\Delta}{\lambda_2} = \frac{1,8 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-7}} = 4,5,$$

т. е. для излучения с длиной волны 600 нм в этой точке будет наблюдаться интерференционный максимум, а для излучения с длиной волны 400 нм,

для которого разность хода равна нечётному числу длин полуволн, будет наблюдаться интерференционный минимум.

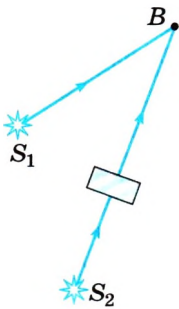


Рис. 7.59

**Задача 3.** Сместится ли интерференционный максимум, если на пути одного из лучей в опыте Юнга (рис. 7.59) поставить пластинку из стекла с показателем преломления  $n = 1,4$  и толщиной  $d = 1$  мм? Источник света монохроматический, длина волны  $\lambda_0 = 4 \cdot 10^{-7}$  м.

**Решение.** Длина волны в стекле  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ . На толщине пластинки укладывается число длин волн  $N = \frac{d}{\lambda} = \frac{dn}{\lambda_0} = 3,5 \cdot 10^3$ .  $N$  — целое число, следовательно, разность фаз колебаний, вызванных источниками  $S_1$  и  $S_2$ , не изменится. Следовательно, в точке  $B$  останется интерференционный максимум.

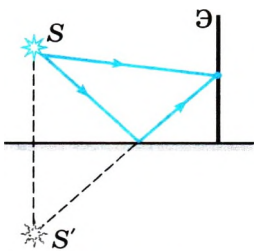


Рис. 7.60

**Задача 4.** Монохроматический источник света (зелёный,  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м) расположен над плоским зеркалом. Перпендикулярно зеркалу на расстоянии  $l = 1$  м от источника находится экран, на котором на расстоянии  $h_5 = 1$  мм от зеркала наблюдается пятый интерференционный максимум. Определите, на каком расстоянии от зеркала находится источник.

**Решение.** Интерференционная картина получается в результате наложения потока от источника  $S$  и потока, отражённого от зеркала (рис. 7.60). Источник  $S$  и его мнимое изображение  $S'$  можно рассматривать как два когерентных источника, расстояние между которыми равно  $d$ . Искомое расстояние  $d_0 = \frac{d}{2}$ .

Согласно формуле (см. решение задачи 1) координату пятого максимума определим по формуле  $h_5 = \frac{5\lambda l}{d}$ , откуда  $d = \frac{5\lambda l}{h_5}$ . Следовательно,  $d_0 = \frac{5\lambda l}{2h_5} = 1,25 \cdot 10^{-3}$  м.

**Задача 5.** Рассчитайте радиус  $k$ -го тёмного кольца в установке для наблюдения колец Ньютона. Радиус линзы  $R$ , длина волны  $\lambda$ .

**Решение.** Интерференционная картина получается в результате наложения волн, отражённых от границы двух сред воздух—стекло. Волны 1 и 2 когерентны, разность фаз колебаний, вызванных этими волнами, определяется размером воздушного зазора (см. рис. 7.51). Если размер зазора таков, что вторая волна отстаёт от первой на целое число длин волн, то колебания, возбуждаемые волнами, будут усиливать друг друга (интерференционный максимум); если размер зазора таков, что вторая волна отстаёт от первой на нечётное число полуволн, то колебания, вызванные ими, гасят друг друга (интерференционный минимум). Соответственно в первом случае

мы наблюдаем светлое кольцо, во втором — тёмное. Каждое из колец соответствует одной и той же толщине воздушного зазора.

Теперь рассчитаем радиус  $r_k$   $k$ -го тёмного кольца (рис. 7.61). По теореме Пифагора запишем:

$$R^2 = r_k^2 + (R - d_k)^2, \text{ где } d_k - \text{толщина зазора.}$$

$$\text{Отсюда } 2Rd_k = r_k^2 + d_k^2.$$

По условию радиус кривизны линзы велик, тогда  $d_k \ll R$  и  $d_k \ll r_k$ . Значение  $d_k^2$  настолько мало, что им можно пренебречь. Тогда для  $d_k$  имеем

$$d_k = \frac{r_k^2}{2R}. \quad (1)$$

Вторая волна проходит на  $2d_k$  больше, чем первая. Известно, что при отражении волны от оптически более плотной среды происходит изменение фазы колебаний волны на  $\pi$ , таким образом, при отражении второй волны от пластины происходит потеря половины длины волны. Следовательно, разность хода волн 1 и 2 равна  $\Delta = 2d_k + \frac{\lambda}{2}$ .

$$\text{Условие минимума имеет вид } 2d_k + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Отсюда определяем толщины воздушного зазора, соответствующие тёмным кольцам:  $2d_k + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2}$ , или

$$d_k = \frac{k\lambda}{2}. \quad (2)$$

Приравнявая выражения (1) и (2), получаем  $\frac{r_k^2}{2R} = \frac{k\lambda}{2}$ . Радиусы тёмных колец определяются формулой  $r_k = \sqrt{k\lambda R}$ .

Из этой формулы следует, что в центре интерференционной картины будет всегда тёмное пятно. Это очевидно, так как разность хода волн в точке касания определяется половиной длины волны при отражении волны 2 (см. рис. 7.51, с. 208) от пластины — оптически более плотной среды. Кроме этого, ясно, что кольца будут тем лучше различимы, чем больше  $R$ , т. е. чем уже воздушный зазор.

**Задача 6.** Определите углы, соответствующие дифракционным максимумам первого и второго порядков для зелёного света ( $\lambda = 0,55$  мкм), если дифракционная решётка содержит  $10^3$  штрихов на 1 см.

**Решение.** Максимумы дифракционного спектра наблюдаются согласно формуле (7.19) под углами

$$d \sin \varphi_1 = \lambda, \quad (1)$$

$$d \sin \varphi_2 = 2\lambda. \quad (2)$$

Период дифракционной решётки равен  $d = d_0/N$ .

Подставив  $d$  в формулы (1) и (2), получим  $\varphi_1 = 3,15^\circ$ ,  $\varphi_2 = 6,31^\circ$ .

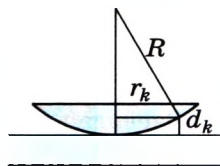


Рис. 7.61

**Задача 7.** Период дифракционной решётки 3 мкм. Определите наибольший порядок спектра для жёлтого света (длина волны 580 нм).

**Решение.** Запишем формулу для наблюдения максимумов спектра, полученного с помощью дифракционной решётки:  $d \sin \varphi = k\lambda$ .

Очевидно, что максимальный порядок спектра  $k_{\max}$  достигается при максимальном значении  $\sin \varphi$ , т. е. при  $\varphi \approx 90^\circ$ . Положим  $\sin \varphi = 1$ , тогда  $d = k\lambda$ ,  $k_{\max} = d/\lambda < 6$ , откуда  $k_{\max} = 5$ .



$S_1$  \* \*  $S_2$

### Задачи для самостоятельного решения

1. Два когерентных источника  $S_1$  и  $S_2$  испускают свет длиной волны  $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$  м. Источники находятся на расстоянии  $d = 0,3$  см друг от друга. Экран расположен на расстоянии 9 м от источников. Что будет наблюдаться в точке А экрана (рис. 7.62): светлое пятно или тёмное?

2. На дифракционную решётку, имеющую период  $d = 1,2 \cdot 10^{-3}$  см, падает по нормали монохроматическая волна. Оцените длину волны  $\lambda$ , если угол между спектрами второго и третьего порядков  $\Delta\varphi = 2^\circ 30'$ .

Рис. 7.62

3. Две щели находятся на расстоянии 0,2 мм друг от друга и отстоят на расстоянии 1,5 м от экрана. На щели падает поток монохроматического света ( $\lambda = 500$  нм) от удалённого источника. Определите расстояние между соседними интерференционными полосами.

4. Точка мыльного пузыря, ближайшая к наблюдателю, кажется ему зелёной ( $\lambda = 540$  нм). Определите минимальную толщину мыльной плёнки. Показатель преломления мыльной плёнки  $n = 1,35$ .

5. Чему равна постоянная дифракционной решётки, если при её освещении монохроматическим светом длиной волны 500 нм лучи, отклоняющиеся на угол  $15^\circ$ , образуют максимум четвёртого порядка?

6. На дифракционную решётку, имеющую 100 штрихов на 1 мм, по нормали к ней падает белый свет. Определите ширину спектра первого порядка на экране, если расстояние от линзы до экрана 2 м. Видимым считайте свет в диапазоне 400—760 нм.



1. Какое число штрихов на 1 мм имеет дифракционная решётка, если зелёная линия ( $\lambda = 550$  нм) в спектре первого порядка наблюдается под углом  $\varphi = 19^\circ$ ? Считайте, что  $\sin 19^\circ = 0,33$ .

2. На дифракционную решётку, имеющую период  $2 \cdot 10^{-5}$  м, падает нормально параллельный пучок белого света. Спектр наблюдается на экране на расстоянии 2 м от решётки. Чему равно расстояние между красным и фиолетовым участками спектра первого порядка (первой цветной полоски на экране), если длины волн красного и фиолетового света соответственно равны  $8 \cdot 10^{-7}$  и  $4 \cdot 10^{-7}$  м? Считайте  $\sin \varphi = \text{tg} \varphi$ .

3. Дифракционная решётка, имеющая 400 штрихов на 1 мм, расположена параллельно экрану на расстоянии 1,5 м от него. На решётку перпендикулярно её плоскости направлен пучок света. Определите длину волны света, если расстояние на экране между вторыми максимумами слева и справа от центрального (нулевого) равно 60 см.



## ПОПЕРЕЧНОСТЬ СВЕТОВЫХ ВОЛН. ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

Вспомните, как выглядит мгновенный снимок электромагнитной волны. Как направлены векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$  в электромагнитной волне?

Явления интерференции и дифракции не оставляют сомнений в том, что распространяющийся свет обладает свойствами волн. Но каких волн — продольных или поперечных?

Длительное время основатели волновой оптики Юнг и Френель считали световые волны продольными, т. е. подобными звуковым волнам.

Однако постепенно накапливалось всё больше и больше экспериментальных фактов, которые никак не удавалось истолковать и согласно которым световые волны считали продольными.

**Опыты с турмалином.** Рассмотрим подробно один из таких экспериментов, очень простой и эффектный. Это опыт с кристаллами турмалина (прозрачными кристаллами зелёной окраски).

Кристалл турмалина принадлежит к числу так называемых одноосных кристаллов. Возьмём прямоугольную пластину турмалина, вырезанную таким образом, чтобы одна из её граней была параллельна оси кристалла. Если направить нормально на такую пластину пучок света от электрической лампы или солнца, то вращение пластины вокруг пучка никакого изменения интенсивности света, прошедшего через неё, не вызовет (рис. 7.63). Можно подумать, что свет только частично поглотился в турмалине и приобрёл зеленоватую окраску. Больше ничего, кажется, и не произошло. Но это не так. Если пучок света заставить пройти через второй точно такой же кристалл турмалина (рис. 7.64, а), параллельный первому, то при одинаково направленных осях кристаллов опять ничего интересного не происходит: просто световой пучок ещё более ослабляется за счёт поглощения во втором кристалле. Но если второй кристалл вращать, оставляя первый неподвижным (рис. 7.64, б), то обнаружится удивительное явление — гашение света. По мере увеличения угла между осями интенсивность света уменьшается. И когда оси перпендикулярны друг другу, свет не проходит совсем (рис. 7.64, в). Он целиком поглощается вторым кристаллом. Как это можно объяснить?

**Поперечность световых волн.** Из описанных выше опытов следуют два вывода:

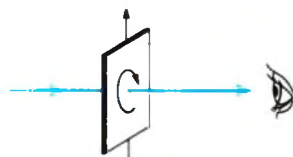


Рис. 7.63

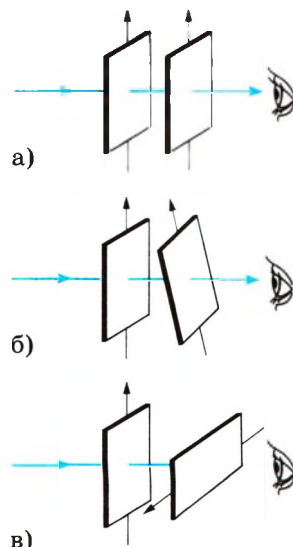


Рис. 7.64



## В \*

*во-первых*, световая волна, идущая от источника света, полностью симметрична относительно направления распространения (при вращении кристалла вокруг луча в первом опыте интенсивность практически не меняется);

*во-вторых*, волна, вышедшая из первого кристалла, не обладает осевой симметрией (в зависимости от поворота второго кристалла относительно луча интенсивность прошедшего света изменяется).

## ИНТЕРЕСНО

В XVIII в. световые волны рассматривались как упругие волны в эфире, заполняющем пространство и проникающем внутрь всех тел. Такие волны, казалось, не могли быть поперечными, так как поперечные волны, в соответствии с воззрениями того времени, могут существовать только в твёрдом теле.

Полное объяснение опыта можно получить, сделав два предположения. Первое предположение относится к самому свету.

## ВАЖНО

Свет — поперечная волна.

В падающем от обычного источника пучке световых волн происходят колебания всевозможных направлений, перпендикулярных направлению распространения волн (рис. 7.65).



Вспомните, как происходит распространение продольных волн.

Почему они симметричны по отношению к направлению распространения? Может ли быть нарушена эта симметрия при переходе в среду с другими свойствами?

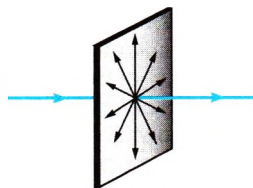


Рис. 7.65

Согласно этому предположению световая волна обладает осевой симметрией, являясь в то же время поперечной.

## ЗАПОМНИ

Световой поток, в котором колебания векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  происходят по всем направлениям, перпендикулярным направлению распространения волн, называется **естественным светом**.

## ИНТЕРЕСНО

Волны на поверхности воды осевой симметрией не обладают, так как колебания частиц воды происходят только в вертикальной плоскости.

Это название оправданно, так как в обычных условиях источники света излучают такой поток. Данное предположение объясняет результат первого опыта. Вращение кристалла

турмалина не меняет интенсивность прошедшего света, потому что падающая волна обладает осевой симметрией (несмотря на то, что она поперечная).

Второе предположение относится не к световой волне, а к кристаллу.

### Важно

Кристалл турмалина обладает способностью пропускать световые волны с колебаниями, происходящими в одной определённой плоскости (плоскость  $P$  на рисунке 7.66).

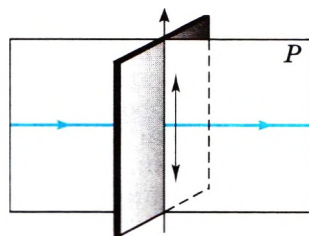


Рис. 7.66

### Запомни

Свет, в котором колебания вектора  $\vec{E}$  происходят только в одной определённой плоскости, называется **поляризованным** или, точнее, **плоскополяризованным** светом.

Это предположение полностью объясняет результаты второго опыта. Из первого кристалла выходит плоскополяризованная волна. При скрещённых кристаллах (угол между их осями  $90^\circ$ ) она не проходит сквозь второй кристалл. Если оси кристаллов составляют между собой некоторый угол, отличный от  $90^\circ$ , то проходят колебания, амплитуда которых равна проекции амплитуды волны, прошедшей через первый кристалл, на направление оси второго кристалла.

Итак, кристалл турмалина преобразует естественный свет в плоскополяризованный.

**Поляриоды.** Не только кристаллы турмалина способны поляризовать свет. Таким же свойством, например, обладают так называемые поляриоды. Поляриод представляет собой тонкую ( $0,1$  мм) плёнку кристаллов герпатита, нанесённую на целлулоид или стеклянную пластинку. С поляриодом можно провести те же опыты, что и с кристаллом турмалина. Преимущество поляриодов в том, что можно получать большие поверхности, поляризующие свет. К недостаткам поляриодов относится фиолетовый оттенок, который они придают белому свету.



Как вы думаете, может ли произойти поворот вектора  $\vec{E}$  независимо от поворота вектора  $\vec{B}$ ?

Поперечность световых волн. Естественный и поляризованный свет

Найти

1. Доказательством поперечности световой волны служит явление

- |                  |                |
|------------------|----------------|
| 1) дифракции     | 3) дисперсии   |
| 2) интерференции | 4) поляризации |

2. Поляризация света доказывает, что свет — это

- 1) поток заряженных частиц
- 2) поток электронейтральных частиц
- 3) поперечная волна
- 4) продольная волна

