

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральная заочная физико-техническая школа
при Московском физико-техническом институте
(государственном университете)**

ФИЗИКА

Законы отражения и преломления света

Задание №4 для 8-х классов

(2010 – 2011 учебный год)

г. Долгопрудный, 2010



Составитель: В.П. Слободянин, доцент кафедры общей физики МФТИ.

Физика: задания №4 для 8-х классов (2010 – 2011 учебный год). – М.: МФТИ, 2010, 24с.

Дата отправления заданий по физике и математике – 20 февраля 2011г.

Учащийся должен стараться выполнять **все** задачи и контрольные вопросы в заданиях. Некоторая часть теоретического материала, а также часть задач и контрольных вопросов являются сложными и требуют от учащегося больше усилий при изучении и решении. В целях повышения эффективности работы с материалами они обозначены символом «*» (звёздочка). Мы рекомендуем приступить к этим задачам и контрольным вопросам в последнюю очередь, разобравшись вначале с более простыми.

Составитель:

Слободянин Валерий Павлович

Подписано 29.12.10. Формат 60×90 1/16.

Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,5.

Уч.-изд. л. 1,33. Тираж 1500. Заказ №5-з.

Федеральная заочная физико-техническая школа
при Московском физико-техническом институте
(государственном университете)

ООО «Печатный салон ШАНС»

141700, Москов. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9,
ФЗФТШ при МФТИ, тел./факс (495) 408-5145 – **заочное отделение**
тел./факс (498) 744-6351 – **очно-заочное отделение**
тел. (498) 744-6583 – **очное отделение**

e-mail: zftsh@mail.mipt.ru

Наш сайт: www.school.mipt.ru

Введение

Структура задания такова, что сначала вам предлагается краткое изложение теоретических положений, которые встретятся в тексте задания. Каждое положение сопровождается примерами, задачами или контрольными вопросами с подробными решениями или ответами. В конце задания вновь приводятся задачи и контрольные вопросы, которые позволят вам проверить, насколько хорошо вы усвоили пройденный материал.

Если приводимые в тексте материалы покажутся сложными или непонятными, не огорчайтесь! Прочтите примеры и задачи с соответствующим разбором решений. Возможно, после этого всё станет на свои места.

Контрольные вопросы и задачи, предлагаемые в задании, не выходят за рамки изложенного в задании материала, поэтому у тех, кто всё внимательно изучит, не должно возникать серьёзных затруднений.

Задание по оптике разделено на две части. **В первой части**, которая сейчас находится перед вами, изложены закон прямолинейного распространения света, закон отражения, закон преломления. **Во второй части** рассматривается приближённая теория тонких линз.

Напомним, что в геометрии и геометрической оптике **углом** называется фигура, состоящая из двух полупрямых с общей начальной точкой. Эта точка называется **вершиной угла**, а полупрямые – **сторонами угла**. Если стороны угла являются дополнительными полупрямыми одной прямой, то угол называется развёрнутым.

Каждый угол имеет определённую **градусную меру**, большую нуля. Развёрнутый угол равен 180° .

Центральным углом в окружности называется угол с вершиной в её центре. Часть окружности, расположенная внутри такого угла называется **дугой окружности**, соответствующей этому центральному углу. Градусной мерой дуги окружности называется градусная мера соответствующего центрального угла.

Радиианной мерой угла называется отношение длины соответствующей дуги окружности к её радиусу.

Единицей радианной меры угла является **радиан**. Угол в 1 радиан – это угол, у которого длина дуги равна радиусу. Развёрнутый угол, выраженный в радианах, равен приблизительно 3,1415. Этот угол договорились обозначать греческой буквой π .

В оптике, когда имеют дело с малыми углами, удобно выражать их не в градусах, а в радианах. Для малого угла φ (радианная мера которого много меньше 1) справедливы соотношения:

$$\cos \varphi \approx 1, \quad \operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi \approx \varphi.$$

Вопрос 1. С поверхности Земли угол α , под которым виден диск Солнца, равен приблизительно $0,53^\circ$. Чему равна радианная мера этого угла?

Решение. Составим пропорцию: $x/0,53^\circ = \pi/180^\circ$. Отсюда

$$x = \pi \cdot 0,53^\circ / 180^\circ \approx 0,00925 \text{ рад} \approx 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ рад}.$$

§ 1. Прямолинейное распространение света

Мы с вами начинаем изучать световые явления, точнее, их наиболее простую часть – геометрическую оптику. В качестве первого шага введём несколько новых понятий и постулатов.

Будем считать, что свет – это поток мельчайших, не имеющих массы частиц – фотонов, мчащихся в пустоте с невероятно большой скоростью $c = 300\,000\,000 \text{ м/с} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$. (В физике и математике не принято писать числа с большим числом нулей. Вместо них пишут множитель в виде десятки, возведённой в соответствующую степень.) Скорость света столь велика, что вплоть до середины XIX века её не удавалось измерить в лабораторных условиях. Более того, многие физики считали её бесконечно большой. До поры до времени и мы можем придерживаться этой точки зрения.

Весь наш жизненный опыт подсказывает, что в однородной среде свет (фотоны) распространяется вдоль прямой линии. Эту прямую мы будем называть световым лучом или лучом света. Этот экспериментальный факт возводится в ранг постулата.

Постулат 1. В однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Постулат 2. Пересекающиеся световые лучи не взаимодействуют друг с другом.

Все реальные источники света имеют конечные размеры, т. е. являются **протяжёнными**. Но если по смыслу задачи размерами источника света можно пренебречь, то говорят, что источник – **точечный**.

Если между протяжённым источником и экраном поместить непрозрачный диск, плоскость которого параллельна плоскости экрана, то в той части экрана, из которой совсем не видно источник, будет **тьень**. В тех точках экрана, которые диск частично закрывает от источника, наблюдатель увидит **полутень** (рис. 1.1).

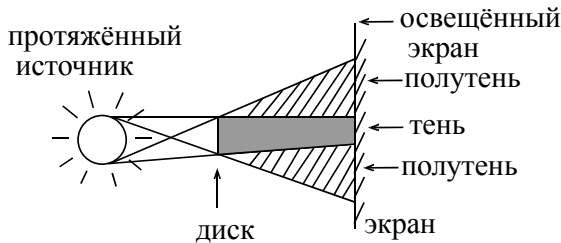


Рис. 1.1

Пример 1.1. Папа Карло, рост которого $h = 1,8$ м, отбрасывает тень длиной $l = 2,7$ м, а Буратино даёт тень длиной $L = 42$ см. Каков рост H Буратино?

Решение. Длина тени папы Карло относится к его росту, как длина тени Буратино к его росту. Запишем это утверждение в виде пропорции:

$$\frac{h}{l} = \frac{H}{L}, \text{ откуда находим } H = L \frac{h}{l} = 28 \text{ см.}$$

Пример 1.2. В полдень Солнце освещает белый экран, лежащий на земле. В плоскости, параллельной экрану, поместили картонный диск, в результате чего на экране возникла тень. При измерении её диаметра:

- А) ни при каких обстоятельствах Солнце нельзя считать точечным источником;
- Б) Солнце можно считать точечным источником, если расстояние L от диска до экрана много больше диаметра D диска;
- В) Солнце можно считать точечным источником, если расстояние L от диска до экрана примерно равно или меньше диаметра D диска.

Решение. Возьмём произвольную точку экрана, находящуюся в области тени.

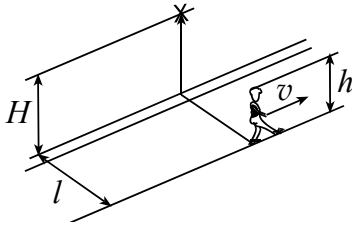


Рис. 1.2

Радианная мера угла, под которым из этой точки виден поперечник диска, приближённо равна D/L . Солнце можно считать точечным источником света, если его угловой размер $\alpha \ll D/L$. Этому условию удовлетворяет вариант ответа В).

Пример 1.3. Поздним весенним вечером молодой человек, рост которого равен h , идёт по краю тротуара со скоростью v . На расстоянии l от края тротуара стоит столб высотой H , на самом верш которого горит фонарь (рис. 1.2). Как изменяется скорость тени головы человека по мере его движения вдоль тротуара?

Решение. Судя по условию задачи, фонарь можно считать точечным источником. Построим ход лучей фонаря для двух положений молодого человека (рис. 1.3). Пусть \tilde{A}_1 и \tilde{A}_2 – положения головы в рассматриваемые моменты времени, а T_1 и T_2 – соответствующие положения тени.

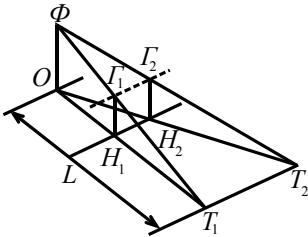


Рис. 1.3

Прямые $\Gamma_1\Gamma_2$ и T_1T_2 – параллельны. Следовательно, тень головы человека движется по прямой линии параллельно краю тротуара. Треугольники $\Phi\Gamma_1\Gamma_2$ и ΦT_1T_2 подобны.

Подобны и треугольники OH_1H_2 и OT_1T_2 . Расстояние L от фонарного столба до линии T_1T_2 найдём из пропорции $L/H = (L-l)/h$, откуда путём несложных преобразований получаем:

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

Теперь рассмотрим подобные треугольники T_1OT_2 и H_1OH_2 . Пусть за единицу времени человек прошёл путь от H_1 до H_2 . За это же время тень головы пройдёт путь T_1T_2 . Значит, отношение скорости v_T тени к

скорости v человека равно отношению L к l , т. е. $v_T/v = L/l$. Откуда следует, что скорость v_T постоянна и равна

$$v_T = v \frac{H}{H-h}.$$

§ 2. Камера-обскура

Выполните дома следующий эксперимент: в середине листа плотной бумаги (подойдёт обложка от исписанной ученической бумаги) проделайте квадратное отверстие со стороной 2–3 мм. Назовём это приспособление «маской». Прикрепите к стене экран (лист белой бумаги) и направьте на него свет от настольной лампы. Лампочка должна быть прозрачная, а не матовая! Расстояние от лампочки до экрана установите чуть более метра. Маску поместите между лампой и экраном на расстоянии 20 – 30 см от лампы. Эксперимент желательно проводить в вечернее время, когда в комнате полумрак. На экране появится светлое пятно от отверстия в маске. Попробуйте до опыта, не читая текст следующего абзаца, предсказать форму этого пятна. Затем проделайте эксперимент. Совпала ли увиденная картинка с вашим предсказанием? Объясните форму светлого пятна, полученного в результате прохождения света сквозь отверстие в маске.

Скорее всего, вы увидите на экране ломаную линию в виде буквы М. Это изображение нити накала лампочки. Ведь источник света – не точечный. От точечного источника изображение отверстия в маске имело бы квадратную форму. В нашем случае светлая полоска есть совокупность изображений маленьких квадратиков, даваемых каждой точкой спирали. Если же приблизить маску к экрану на расстояние в несколько см, то изогнутая линия превратится в квадрат, подобный отверстию в маске!

Если у вас есть фотоаппарат со съёмным объективом, вы можете проделать ещё один интересный опыт. Выверните объектив и на его место вставьте удлинительное кольцо, переднюю поверхность, которого предварительно следует заклеить плотной чёрной бумагой с маленьким отверстием в центре. Отверстие можно проколоть обычной иглой. Получившийся прибор называется камерой-обскурой. С её помощью можно делать вполне приличные фотографии. Важно только, чтобы

фотографируемый объект был хорошо освещён. Фотоплёнка годится самая обыкновенная. В солнечный день можно сфотографировать улицу, дом, дерево и т. д. Правда, выдержка должна составлять несколько секунд и съёмку следует делать, надёжно закрепив фотоаппарат. Между прочим, именно так и делались первые фотографии.

Сейчас, благодаря хорошим объективам, фотоаппараты почти всюду вытеснили камеру-обскуру. Но есть задачи, для решения которых фотоаппарат не годится. Например, при съёмке в рентгеновских лучах. Кроме того, у снимков, выполненных камерой-обскурой, нет ряда искажений, характерных для фотоаппаратов с линзами.

Обратите внимание на то, что камера-обскура даёт перевёрнутое изображение.

Задача 2.1 (экспериментальная). Определите среднее расстояние между витками нити накала лампочки, не разбивая её.

Оборудование: настольная лампа (лампочка не должна быть матовой), фольга (например, от большой шоколадки), игла, лист белой бумаги, рулетка или измерительная лента (в крайнем случае подойдёт линейка).

Решение. Прodelаем иглой отверстие в центре фольги. Прикрепим к стене лист белой бумаги. Это будет экран. Лампу следует установить на расстоянии около двух метров от экрана. Поместим между лампой и экраном фольгу так, чтобы изображение нити накала было видно на экране. Фольгу следует располагать ближе к лампе. Тогда изображение

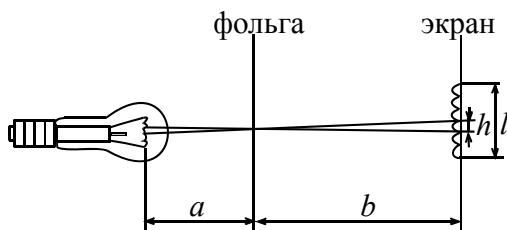


Рис. 2.1

спирали (см. рис. 2.1) будет увеличенным в b/a раз. Чем большее увеличение мы хотим получить, тем больше должно быть отношение b/a .

Пусть шаг спирали равен H , тогда $H/h = a/b$ и, следовательно,

$$H = h \frac{a}{b}. \quad (2.1)$$

Для более точного определения шага h изображения спирали следует измерить расстояние l между несколькими k витками. В этом случае

$$h = \frac{l}{k-1}.$$

§ 3. Законы отражения света. Плоские зеркала

Возьмём какое-нибудь вещество с плоской гладкой поверхностью и направим на эту поверхность световой луч (рис. 3.1) (\vec{S}_1 – вектор, направленный вдоль падающего луча). В точке O , где луч упирается в плоскость, построим к плоскости *внешнюю* нормаль \vec{N} (т. е. перпендикуляр)

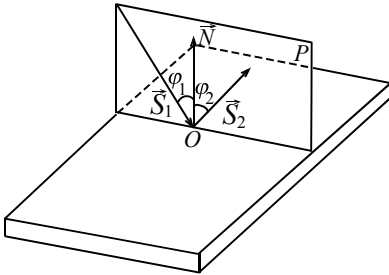


Рис. 3.1

и, наконец, через луч \vec{S}_1 и нормаль \vec{N} проведём плоскость P . Эта плоскость называется **плоскостью падения**. Из какого бы вещества ни состояла выбранная нами поверхность, некоторая часть падающего излучения отразится. В каком направлении пойдёт отражённый луч \vec{S}_2 ?

Было бы странно, если бы он отклонился от плоскости падения, например, вправо или влево: ведь свойства пространства с обеих сторон от этой плоскости одинаковы. К счастью, такого и не происходит.

Острый угол, лежащий между лучом \vec{S}_1 и внешней нормалью \vec{N} , называется углом падения. Обозначим этот угол символом φ_1 . Острый угол, образованный отражённым лучом \vec{S}_2 и нормалью (обозначим его φ_2), называется углом отражения. Многочисленные наблюдения и измерения позволяют нам сформулировать следующий постулат геометрической оптики:

Постулат 3. Падающий луч \vec{S}_1 , нормаль \vec{N} и отражённый луч \vec{S}_2 всегда лежат в одной плоскости – плоскости падения. Угол отражения равен углу падения, т. е.

$$\varphi_2 = \varphi_1. \quad (3.1)$$

Введём ещё одно определение. Угол δ , образованный продолжением луча, падающего на плоское зеркало, и лучом, отразившимся от зеркала

ла, будем называть углом отклонения. Угол отклонения всегда меньше или равен 180° . Понятие угла отклонения можно трактовать и гораздо шире. В дальнейшем мы так будем называть угол, образованный продолжением луча, входящего в произвольную оптическую систему, и лучом, вышедшим из этой системы.

Вопрос 2. Определите угол отклонения луча, падающего на плоское зеркало. Угол падения $\varphi_1=30^\circ$.

Ответ. Угол α , образованный падающим и отражённым лучами, равен сумме углов падения и отражения, т. е. $\alpha = 60^\circ$. Углы α и δ – смежные. Следовательно, $\delta = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$.

Гладкая поверхность, которая отражает почти всё падающее на неё излучение, называется зеркальной. Напрашивается вопрос: почему «почти всё», а не «всё»? Ответ прост: идеальных зеркал в природе не бывает. Например, зеркала, с которыми вы встречаетесь в быту, отражают до 90% падающего света, а оставшиеся 10% частично пропускают, а частично поглощают.

В современных лазерах применяются зеркала, отражающие до 99% излучения и даже больше (правда, в довольно узкой области спектра). Для изготовления таких зеркал была разработана целая научная теория и организовано специальное производство.

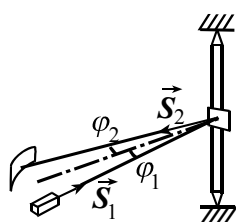
Чистая прозрачная вода тоже отражает часть падающего на её поверхность излучения. При падении света вдоль нормали к поверхности отражается чуть меньше 2% энергии падающего излучения. С увеличением угла падения доля отражённого излучения возрастает. При угле падения, близком к 90° (**скользящее падение**), отражается почти все 100% падающей энергии.

Коснёмся кратко ещё одного вопроса. Не бывает и идеально гладких поверхностей. При достаточно большом увеличении поверхности зеркала на ней можно увидеть микротрещины, сколы, неровности, плоскость которых наклонена относительно плоскости зеркала. Чем больше неровностей, тем более тусклым кажется отражение предметов в зеркале. Поверхность белой писчей бумаги так сильно испещрена микроскопическими неровностями, что практически не даёт никакого зеркального отражения. Говорят, что такая поверхность отражает **диффузно**, т. е.

разные крошечные участки поверхности бумаги отражают свет в разные стороны. Но зато такая поверхность хорошо видна из разных мест. Вообще, большинство объектов отражают свет диффузно. Диффузно отражающие поверхности используют в качестве экранов.

Тем не менее, от бумаги можно получить зеркальное отражение ярких предметов. Для этого нужно смотреть на поверхность бумаги почти вдоль её поверхности. Лучше всего наблюдать отражение светящейся лампочки или Солнца. Прodelайте такой эксперимент!

Пример 3.1. Для измерения малых углов поворота часто используется следующий приём. К поверхности вращающегося стержня прикрепляют лёгкое маленькое зеркальце, на которое направляют узкий



пучок света. Если теперь на большом расстоянии L от зеркальца установить экран, на который попадает отражённый луч, то по смещению «зайчика» легко найти угол поворота стержня. Определите величину этого угла, если $L = 2,5$ м, а смещение l «зайчика» на экране равно 5 см.

Рис. 3.2

Решение. Рассмотрим схему эксперимента (рис. 3.2). Первоначально было выполнено условие $\varphi_1 = \varphi_3$. Следовательно, величина угла между падающим и отраженным лучом $\beta = \varphi_1 + \varphi_3 = 2\varphi_1$. Предположим, что зеркало вместе со стержнем повернулось на угол α . В этом случае угол падения станет равным φ'_1 , а острый угол между лучами \vec{S}_1 и \vec{S}_2 , соответственно

$$\beta' = \varphi'_1 + \varphi'_3 = 2\varphi'_1 = 2(\varphi_1 + \alpha) = 2\varphi_1 + 2\alpha = \beta + 2\alpha.$$

Отсюда находим угол, на который повернётся отражённый луч:

$$\Delta\varphi = \beta' - \beta = (\beta + 2\alpha) - \beta = 2\alpha.$$

Поскольку $\Delta\varphi \cong \frac{l}{L}$, после подстановки исходных данных получим

$$\alpha = \frac{1}{2}\Delta\varphi = \frac{1}{2} \cdot \frac{5}{250} = \frac{1}{100} \text{ рад, или в градусах } \alpha \approx 0,57^\circ \text{ (напомним, что}$$

1 радиан равен примерно 57°). Заметьте, что результат не зависит от того, в какую сторону поворачивается предмет с зеркальцем. Типичная

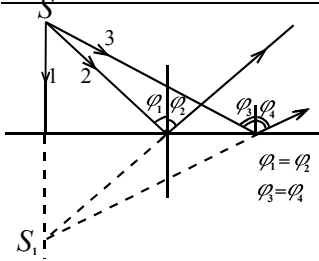


Рис. 3.3

С практической точки зрения один из лучей (на рисунке это луч 1) целесообразно пустить вдоль нормали к плоскости зеркала.

Принято называть изображение предмета, полученное в результате пересечения отражённых лучей, **действительным**, а изображение, полученное при мысленном пересечении продолжений этих лучей в обратном направлении, – **мнимым** (рис. 3.3). Таким образом, S_1 – мнимое изображение источника S .

Пример 3.2. Лампочка настольной лампы находится на расстоянии

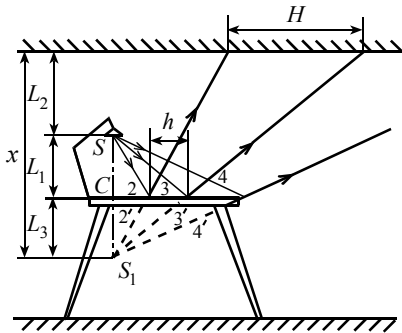


Рис. 3.4

$L_1 = 0,6$ м от поверхности стола и $L_2 = 1,8$ м от потолка. Нить накала лампочки можно считать точечным источником света. На столе лежит осколок плоского зеркала в форме треугольника со сторонами 5 см, 6 см и 7 см.

1) На каком расстоянии x от потолка находится изображение нити накала лампочки, даваемое зеркалом?

2) Найти форму и размеры «зайчика», полученного от осколка зеркала на потолке (МФТИ, 1996).

Решение. Выполним рисунок, поясняющий смысл задачи (рис. 3.4). Обратите внимание на два обстоятельства:

а) зеркало находится на столе на некотором произвольном расстоянии от лампы;

б) изображение можно построить с помощью любых лучей, «отражённых» от плоскости, совпадающей с плоскостью зеркала (например, лучей $3'$ и $4'$). Легко показать, что $SC = CS_1$, т. е. $L_3 = L_1$. Следовательно, расстояние $x = 2L_1 + L_2 \Rightarrow x = 2 \cdot 0,6 + 1,8 = 3$ м.

Для определения формы и размера «зайчика» удобно рассмотреть лучи, «исходящие» от изображения S_1 . Т. к. плоскость зеркала и потолка параллельны, форма «зайчика» будет подобна зеркалу. Найдём коэффициент подобия. Если длина стороны зеркала h , а соответствующая ей длина стороны «зайчика» равна H , то можно записать пропорцию:

$$\frac{h}{H} = \frac{L_3}{x} = \frac{0,6 \text{ м}}{3 \text{ м}} = \frac{1}{5} \Rightarrow H = 5h.$$

Таким образом, длины сторон «зайчика» равны 25 см, 30 см и 35 см соответственно.

Пример 3.3. В первой комнате на столе стоит цветок (F), а на стене у двери (D) висит зеркало (M). В соседней комнате находится Мальвина (G) (рис. 3.5). Выберите правильное утверждение.

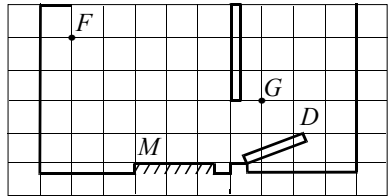


Рис. 3.5

А. Со своего места Мальвина не может видеть в зеркале мнимое изображение цветка (F).

Б. Со своего места Мальвина может видеть в зеркале своё изображение.

В. Со своего места Мальвина не может видеть в зеркале действительное изображение цветка (F).

Решение. Выполним поясняющий рисунок (рис. 3.6). Для этого построим изображение F' цветка. Оно будет мнимым.

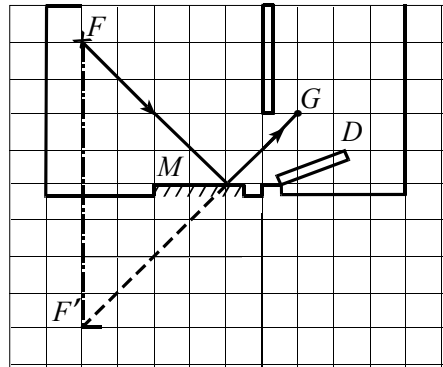


Рис. 3.6

Прямая $F'G$ не перекрывается препятствиями, следовательно, Мальвина может видеть мнимое изо-

бражение цветка (F'). Таким образом, ответ А не подходит. Свое изображение она видеть не может. Значит, и ответ Б не годится. Так как изображение цветка мнимое, Мальвина не может видеть действительное изображение цветка.

Правильный ответ – В.

§ 4. Система двух зеркал

Совершенно иная картина получается при отражении точечного источника S в системе двух зеркал M_1 и M_2 . (M – от английского *mirror* – зеркало.)

Рассмотрим характерный пример. Пусть два плоских зеркала образуют двугранный угол величиной 60° , между зеркалами находится точечный источник света S . В этом случае кроме двух мнимых изображений S_1 и S_2 источника S в зеркалах M_1 и M_2 можно будет увидеть

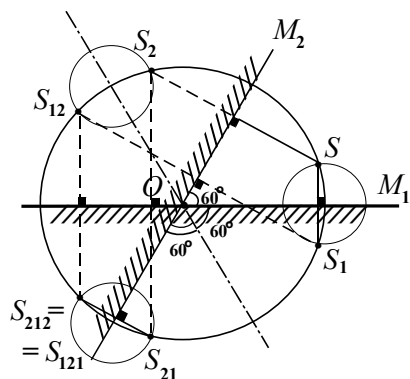


Рис. 4.1

изображения этих изображений (см. рис. 4.1).
В самом деле: изображение S_1 можно принять за новый точечный источник, который, отразившись в зеркале M_2 , даст новое мнимое изображение S_{12} . Аналогичным образом изображение S_{21} получается в результате отражения второго мнимого точечного источника S_2 в зеркале M_1 . Наконец, источник S_{12} , отразившись в зеркале M_1 , даст изображение S_{121} . С ним совпадает изображение S_{212} , получившееся в результате отражения источника S_{21} в зеркале M_2 .

Обратите внимание на то, что все изображения лежат на окружности радиуса R , равного длине отрезка SO . Таким образом, наблюдатель может увидеть в нашей системе зеркал 6 источников: настоящий ис-

точник S и пять его мнимых изображений: $S_1, S_2, S_{12}, S_{21}, S_{212}$, совпадающий с S_{121} .

Внимание! Изображение S_{212} (S_{121}) не может отразиться ни в зеркале M_1 , ни в зеркале M_2 , т. к. находится с их тыльной (не отражающей) стороны. На рисунке эта сторона зеркал показана штриховкой.

Если два прямоугольных плоских зеркала, образующих прямой угол, поставить на третье зеркало, мы получим оптическую систему, состоящую из трёх взаимно перпендикулярных зеркал, известную, как «угловой отражатель» или «катафот». Катафот обладает двумя очень интересными свойствами:

1) одно из видимых в нём изображений находится в вершине угла, образованного всеми тремя зеркалами. Никакой поворот системы зеркал вокруг этой вершины не влияет на положение этого изображения;

2) луч света, попавший в угловой отражатель, обращается строго назад, откуда он пришёл, каким бы ни было это направление. Это замечательное свойство используется при изготовлении отражателей для дорожных указателей, велосипедов и автомашин.

Такой отражатель в своё время с помощью космической ракеты доставили на Луну и затем по отражению лазерного луча, посланного к Луне с Земли, измерили с высокой точностью расстояние до нашего естественного космического спутника.

Пример 4.1. Два плоских зеркала M_1 и M_2 образуют угол α . Перед ними помещён точечный источник света S (рис. 4.2).

Выберите правильное утверждение: в системе зеркал можно видеть только

- А) одно изображение источника света S ;
- Б) два изображения источника света S ;
- В) три изображения источника света S .

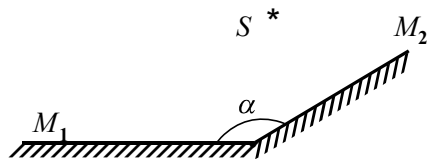


Рис. 4.2

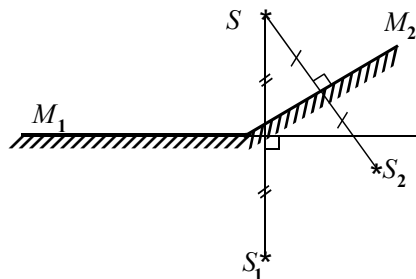


Рис. 4.3

Решение. Выполним поясняющий рисунок (рис. 4.3).

Одно изображение S_1 даст зеркало M_1 , другое изображение S_2 даст зеркало M_2 . Других изображений не будет, т. к. изображения S_1 и S_2 лежат с неотражающей стороны зеркал. Значит, правильный ответ Б).

§ 5. Преломление света

Направим в аквариум, наполненный водой, узкий пучок света S_1 . Если угол падения не слишком велик, то большая часть света проникнет в воду. Рассуждая, как и в случае с отражением, мы можем утверждать, что прошедший в воду луч останется лежать в плоскости падения (рис. 5.1).

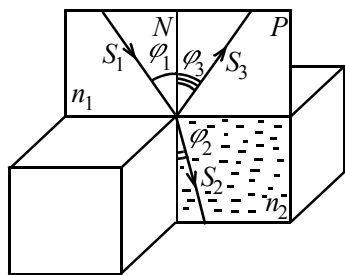


Рис. 5.1

Назовём острый угол φ_2 , лежащий между прошедшим лучом и нормалью \vec{N} , проведённой к поверхности воды, углом преломления. Тщательные измерения показали, что между углом падения и углом преломления нет линейной зависимости (как в случае с отражением).

Долгие годы учёные безуспешно пытались найти соответствующий закон. Только в 1621 году удача улыбнулась голландскому учёному Ван Снеллу (латинская транскрипция – Снеллиус). Впрочем, Снеллиус не опубликовал своё открытие, и закон преломления был повторно открыт в 1637 году знаменитым французским естествоиспытателем – Рене Декартом. Математическая формулировка закона такова:

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2. \quad (5.1)$$

Здесь n_1 и n_2 – постоянные коэффициенты, характеризующие оптические свойства первой и второй среды (подстрочные индексы указывают, какую среду характеризует соответствующий коэффициент). Называют эти коэффициенты показателями преломления среды. Из двух сред та, у которой показатель преломления больше, называют оптически более плотной.

Для разных сортов стекла n изменяется в пределах от 1,4 до 1,8, но наиболее типичное значение составляет приблизительно 1,5.

Поменяем в формуле (5.1) местами левую и правую части:

$$n_2 \sin \varphi_2 = n_1 \sin \varphi_1.$$

Новая запись означает, что теперь мы рассматриваем свет, распространяющийся из второй среды в первую. Если преломлённый луч отразится строго в обратном направлении, то он пойдёт вдоль того же пути, что и луч падающий. Поэтому говорят, что **ход лучей обратим!**

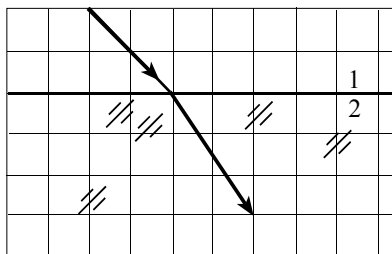


Рис. 5.2

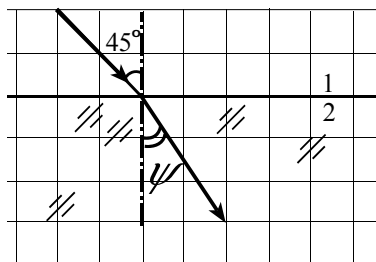


Рис. 5.3

Пример 5.1. Луч света проходит границу раздела двух прозрачных сред (рис. 5.2). Выберите правильные утверждения.

- А) Угол падения больше 50° .
- Б) Угол преломления больше 45° .
- В) Показатель преломления света в среде (1) меньше, чем в среде (2).

Решение. Проведём внешнюю нормаль в точку падения светового луча на границу раздела сред (рис. 5.3). По определению углом падения называется острый угол между падающим лучом и нормалью.

Из рисунка видно, что этот угол равен 45° , т. е. ответ (А) не подходит. Аналогично, угол преломления ψ меньше 45° , т. е. ответ (Б) тоже

не подходит. Наконец, согласно закону Снелла $\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_1} < 1$, т. е. ответ (В) верный.

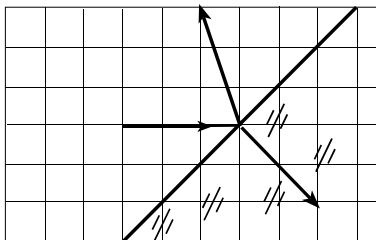


Рис. 5.4

Пример 5.2. На чертеже (рис. 5.4) экспериментатор Глюк изобразил отражение и преломление света на границе раздела воздуха и стекла. Не допустил ли Глюк ошибки? Если да, укажите их.

Решение. Проведём нормаль в точку падения светового луча на границу раздела сред (рис. 5.5). Видно, что угол отражения меньше угла падения, что неверно. Угол преломления равен 0° , что тоже неверно.

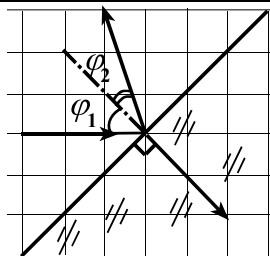


Рис. 5.5

§ 6. Явление полного отражения

Пусть узкий пучок света из среды оптически более плотной в среде оптически менее плотную ($n_1 > n_2$). Пусть сначала он идёт вдоль нормали к поверхности раздела этих сред. Будем постепенно увеличивать угол падения. При этом угол преломления будет возрастать ещё быстрее. Здесь уместно обратить ваше внимание на одну важную деталь: по мере того, как преломленные лучи все сильнее отклоняются к границе раздела двух сред, их интенсивность становится все меньше и меньше. Зато растёт интенсивность отражённого от границы раздела излучения.

Существует угол падения φ_1 , называемый предельным углом полного отражения, при достижении которого в оптически менее плотную среду излучение вообще не проникнет. Все лучи отразятся обратно (поверхность раздела станет подобной идеальному зеркалу). Не проникнут лучи через границу раздела и при любом другом угле, большем угла φ_1 . Найти предельный угол полного отражения просто: в формуле (5.1), нужно положить угол $\varphi_2 = 90^\circ$. При этом $\sin \varphi_2 = 1$. Согласно закону Снелла:

$$\sin \varphi_1 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6.1)$$

Пример 6.1. Показатель преломления алмаза равен 2,42. Найдите для него предельный угол полного отражения.

Решение. Из формулы (6.1) следует: $\sin \varphi_1 = \frac{1}{2,42} = 0,413$. Отсюда легко найти значение самого угла $\varphi_1 \approx 24,5^\circ$.

Пример 6.2 Показатель преломления воды $n = 4/3$. Луч света падает из воды на границу раздела вода-воздух под углом $\varphi_1 = 60^\circ$. Выберите правильные утверждения.

- А) Свет будет распространяться во второй среде под углом $\varphi_2 > \varphi_1$.
- Б) Свет будет распространяться во второй среде под углом $\varphi_2 < \varphi_1$.
- В) Луч света испытает полное отражение.

Решение. Подстановка числовых данных в формулу (5.1) показывает, что правая часть больше 1, следовательно, луч света не проникнет из воды в воздух. Правильный ответ В).

§ 7. Кажущаяся глубина водоёма

Наверно, вы не раз разглядывали в аквариуме или мелкой заводи рыбок или яркие камешки на дне. При этом, скорее всего, вы обращали внимание на то, что толщина водного слоя кажется меньше, чем есть на самом деле. Почему это происходит? Вспомним закон Снелла:

$$\sin \varphi_1 = n \sin \varphi. \quad (7.1)$$

Если угол падения φ мал (параксиальное приближение), то (7.1) можно записать в приближённом виде:

$$\varphi_1 = n\varphi. \quad (7.2)$$

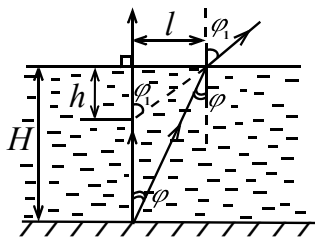


Рис. 7.1

Теперь взглянем на рис. 7.1:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{l}{h} = \operatorname{tg} \varphi_1 \approx \varphi_1 \\ \frac{l}{H} = \operatorname{tg} \varphi \approx \varphi \end{array} \right\} \Rightarrow n = \frac{\varphi_1}{\varphi} = \frac{H}{h} \Rightarrow h = \frac{H}{n}. \quad (7.3)$$

Из (7.3) видно, что глубина водоёма кажется меньше истинной приблизительно в n раз.

Внимание! Формула (7.3) получена в параксиальном приближении. Если предметы, лежащие на дне водоёма, рассматривать под большим углом φ_1 , то глубина водоёма кажется еще меньше.

Задача 5. Луч света падает из воздуха на невозмущённую водную поверхность под углом $\varphi_1 = 10^\circ$. Найти угол преломления по точной формуле (7.1) и приближённой (7.2). На сколько процентов приближённый результат отличается от точного? Для воды $n = 4/3$.

Решение. Согласно (7.1) $\sin \varphi_2 = \sin \varphi_1 / n$, откуда следует, что по точной формуле $\varphi_2 \approx 0,1306$ рад, в то время как по приближённой формуле $\varphi_2 \approx 0,1309$ рад. Относительная погрешность приближённых вычислений равна 0,5%, т. е. менее одного процента!

Пример 7.1. Аквариум высотой 21 см заполнен глицерином, показатель преломления которого равен 1,4. На этот аквариум сверху аккуратно поставили ещё один такой же аквариум, заполненный водой (её показатель преломления 4/3). Какой казалась бы толщина слоя глицерина рыбке, плавающей в аквариуме с водой?

Решение. Толщина слоя глицерина $H = 21$ см. Если в левую часть формулы (7.1) подставить показатель преломления воды n_1 , то для кажущейся глубины глицерина получится формула, аналогичная (7.3):

$$h = H \frac{n_1}{n_2}. \text{ Подстановка в неё числовых данных даст } h = 20 \text{ см.}$$

Указание. При выполнении Задания не переписывайте условия контрольных вопросов и задач! Сразу записывайте их решение.

Контрольные вопросы

1. (Тема 2) В погожий солнечный день лучи Солнца, пробивающиеся сквозь просветы между листьями деревьев, падают на вертикальную стенку, образуя причудливый рисунок в виде хаотически разбросанных круглых пятен (рис. 1). Почему форма светлых пятен не повторяет форму просветов в листьях?



Рис. 1

2*. (Тема 2) Можно ли по размерам светлых круглых пятен (рис. 1) оценить расстояние до кроны дерева, сквозь которую пробивается солнечный свет? Если можно, то как это сделать?

3. (Тема 2) Выберите правильное утверждение. Камера-обскура всегда даёт:

- А) увеличенное изображение;
- Б) мнимое изображение;
- В) перевёрнутое изображение;
- Г) чёрно-белое изображение.

4. (Тема 4) Выберите правильное утверждение. Последовательное отражение предмета в двух плоских зеркалах будет:

- А) действительным;
- Б) мнимым;
- В) в зависимости от положения зеркал может быть как мнимым, так и действительным;
- Г) уменьшенным.

5. (Тема 5) Согласно закону Снелла:

А) $n_1 \sin \varphi_2 = n_2 \sin \varphi_1$;

Б) $\frac{n_1}{\sin \varphi_1} = \frac{n_2}{\sin \varphi_2}$;

В) $n_2 = n_1 \frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2}$;

Г) $\sin \varphi_2 = \sin \varphi_1 \frac{n_2}{n_1}$.

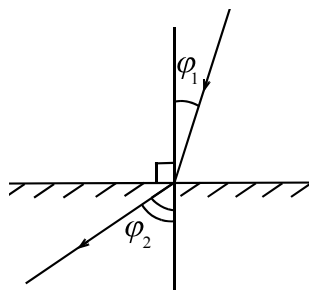


Рис. 2

6. (Тема 5) Луч света проходит границу раздела двух прозрачных сред (рис. 2). Выберите правильные утверждения:

- А) плоскость раздела двух прозрачных сред называется плоскостью падения;
- Б) поскольку $\varphi_1 < \varphi_2$, показатель преломления среды 2 меньше показателя преломления среды 1;
- В) оптическая плотность среды 2 больше оптической плотности среды 1;
- Г) угол падения всегда больше угла преломления.

7. (Тема 5) На рис. 3 и рис. 4 приведены две одинаковые оптические схемы. Однако в первом случае (рис. 3) свет пересекает границу AA раздела двух сред. Во втором (рис. 4) – границу BB раздела двух других сред. В каком из случаев показатель преломления среды (1) больше, чем у среды (2)?

8. (Тема 6) Луч света на границе раздела воды и стекла испытал полное отражение. В какой из сред распространялся этот луч?

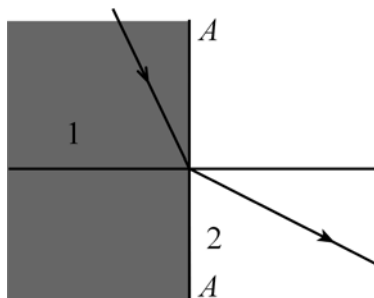


Рис. 3

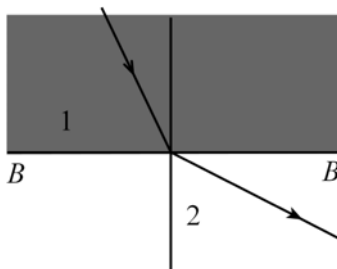


Рис. 4

9. (Тема 7) При разглядывании сквозь слой воды светлых камушков, лежащих на дне водоёма, вам кажется, что:

- А) размер изображения камушка уменьшенный;
- Б) видимая глубина водоёма больше истинной;
- В) видимая глубина водоёма меньше истинной;
- Г) угол падения света, идущего от камушка, больше угла преломления.

Задачи

Задача 1. Точечный источник света S находится на расстоянии $L = 23$ см от поверхности плоского зеркала (рис. 5). Точка O лежит в плоскости зеркала, SO – перпендикуляр к плоскости зеркала. Зеркало поворачивают на угол $\varphi = 30^\circ$ вокруг оси, перпендикулярной плоско-

сти рисунка и проходящей через точку O . На какое расстояние сместится изображение источника света?

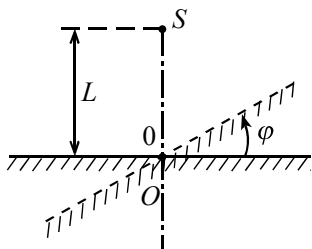


Рис. 5

Задача 2. На какой угол α нужно повернуть зеркало вокруг оси, перпендикулярной плоскости рисунка и проходящей через точку O (см. рис. 5 к задаче 1), чтобы угол отклонения δ луча, идущего из т. S к т. O , стал равен 50° ? Вначале SO – перпендикуляр к плоскости зеркала.

Задача 3. На стопку из пяти стеклянных плоскопараллельных пластинок, показатели преломления которых последовательно возрастают от 1,41 до 1,61, падает из воздуха под углом $\varphi_1 = 45^\circ$ луч света. Толщина стопки $H = 20$ мм. Обозначим через L – расстояние, на которое сместился луч света вдоль поверхности пластинок (рис. 6).

Под каким углом φ_2 луч выйдет из стопки пластинок?

Выберите правильное утверждение:

А) $L > H$;

Б) $L = H$;

В) L не зависит от порядка следования пластинок;

Г) При изменении порядка следования пластинок может произойти полное отражение света.

Задача 4. Над водой на расстоянии $H = 75$ см зависла стрекоза. Из под воды на неё смотрит голодная рыбка. На каком расстоянии h от поверхности воды рыбка видит изображение стрекозы?

Задача 5. Синус угла падения светового луча из глицерина на границу раздела с воздухом равен 0,50, а синус угла преломления – соответственно 0,70. Чему будет равен синус нового угла преломления, если синус угла падения увеличить до 0,70? Как изменится результат, если синус нового угла падения увеличить до 0,75?

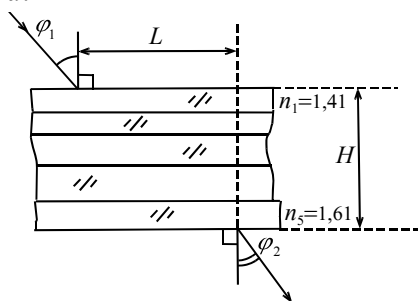


Рис. 6

Задача 6. У стеклянной призмы с преломляющим углом $\beta = 30^\circ$ грань BC посеребрена. Луч света падает на грань AB под углом $\varphi = 45^\circ$ (рис. 7), преломляется на ней и после отражения от грани BC выходит из грани AB под тем же углом $\varphi = 45^\circ$. Вычислите показатель преломления материала призмы.

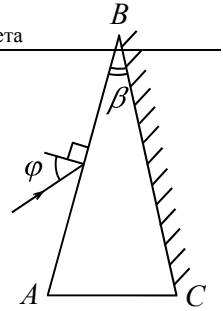


Рис. 7

Задача 7*. У прямоугольной равнобедренной призмы посеребрены грани-катеты. Луч падает на грань-гипотенузу под углом φ_1 (рис. 8). Под каким углом φ_2 луч выйдет из призмы?

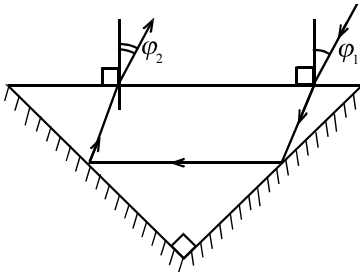


Рис. 8

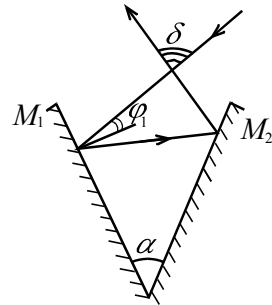


Рис. 9

Задача 8*. Два плоских зеркала M_1 и M_2 образуют двугранный угол α . На зеркало M_1 падает луч света, отражается от него, падает на зеркало M_2 и выходит из системы зеркал. Угол δ , образованный лучом, входящим в систему зеркал и лучом, выходящим из неё (рис. 9), называется углом отклонения. Выразите угол δ через угол α и угол φ_1 падения луча на зеркало M_1 . Как изменится угол отклонения δ , если угол падения φ_1 увеличить на 5° ?

Задача 9. Луч света, распространяющийся в глицерине ($n_{\text{г}} = 1,43$), испытывает на границе раздела с воздухом полное отражение. Выйдет ли он в воздух, если на поверхность воды налить слой подсолнечного масла ($n_{\text{м}} = 1,29$)?