

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Заочная физико-техническая школа**

ФИЗИКА

Законы отражения и преломления света

Задание №4 для 8-х классов

(2014 – 2015 учебный год)



г. Долгопрудный, 2015

Составители: И.А. Попов, доцент кафедры молекулярной физики МФТИ,
В.П. Слободянин, доцент кафедры общей физики МФТИ.

Физика: задание №4 для 8-х классов (2014 – 2015 учебный год), 2015, 23 с.

Дата отправления заданий по физике и математике – 15 марта 2015 г.

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 материалом они обозначены символом «*» (звёздочка). Мы рекомендуем приступать к этим задачам и контрольным вопросам в последнюю очередь, разобравшись вначале с более простыми.

Составители:

**Попов Игорь Алексеевич
Слободянин Валерий Павлович**

Подписано 10.02.15. Формат 60×90 1/16.

Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,44.

Уч.-изд. л. 1,28. Тираж 450. Заказ №44-з.

Заочная физико-техническая школа
Московского физико-технического института
(государственного университета)
ООО «Печатный салон ШАНС»

Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Москов. обл., 141700.

ЗФТШ, тел./факс (495) 408-51-45 – **заочное отделение**,

тел./факс (498) 744-63-51 – **очно-заочное отделение**,

тел. (499) 755-55-80 – **очное отделение**.

e-mail: zftsh@mail.mipt.ru

Наш сайт: www.school.mipt.ru

© ЗФТШ, 2015

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, вы-

раженный 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 **тьнь**. В тех точках экрана, которые диск частично закрывает от источника, наблюдатель увидит **полутень** (рис. 1.1).

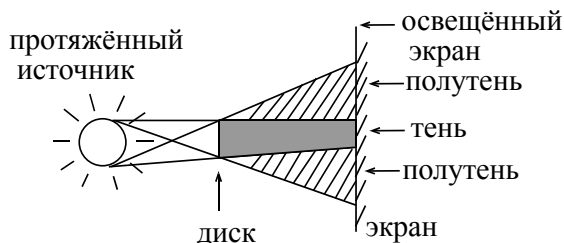


Рис. 1.1

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. 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 веру которого горит фонарь (рис. 1.2). Как изменяется скорость тени головы человека по мере его движения вдоль тротуара?

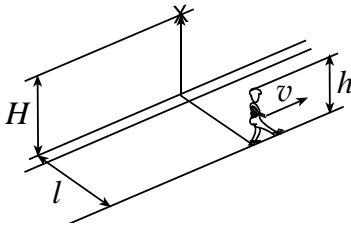


Рис. 1.2

Решение. Судя по условию задачи, фонарь можно считать точечным источником. Построим ход лучей фонаря для двух положений молодого человека (рис. 1.3). Пусть Γ_1 и Γ_2 – положения

головы в рассматриваемые моменты времени, а T_1 и T_2 – соответствующие положения тени.

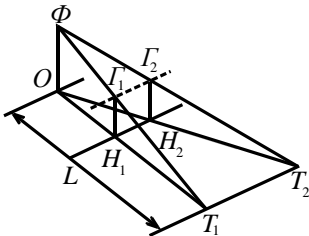


Рис. 1.3

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 тетради) 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 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,

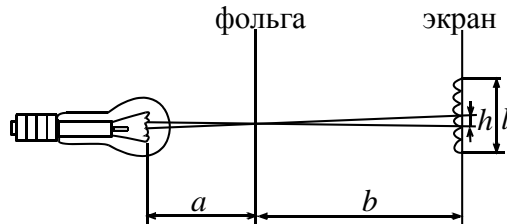


Рис. 2.1

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

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) 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 ?

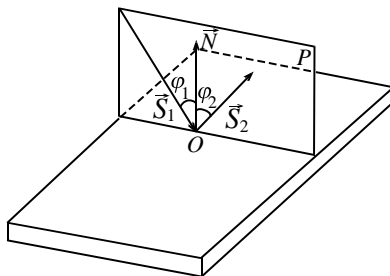


Рис. 3.1

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, 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. Прделайте 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.

Решение. Рассмотрим схему эксперимента (рис. 3.2). Первоначально было выполнено условие $\varphi_1 = \varphi_2$. Следовательно, величина угла между падающим и отражённым лучом $\beta = \varphi_1 + \varphi_2 = 2\varphi_1$.

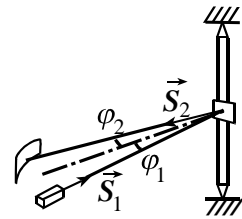


РИС. 3.2

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

$$\beta' = \varphi'_1 + \varphi'_2 = 2\varphi'_1 = 2(\varphi_1 + \alpha) = 2\varphi_1 + 2\alpha = \beta + 2\alpha.$$

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 ошибка, допускаемая при решении подобных задач, заключается в том, что считают $\Delta\varphi = \alpha$, и таким образом занижают величину измеряемого угла в два раза.

При построении изображения некоторой точки S в плоском зеркале необходимо использовать, по крайней мере, **два произвольных луча**. Методика построения понятна из рис. 3.3. С практической точки зрения один из лучей (на рисунке это луч 1) целесообразно пустить вдоль нормали к плоскости зеркала.

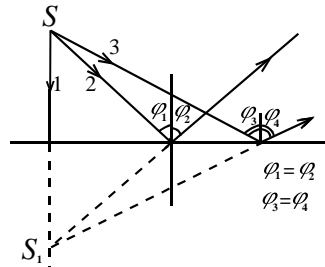


РИС. 3.3

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 $L_1 = 0,6$ 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

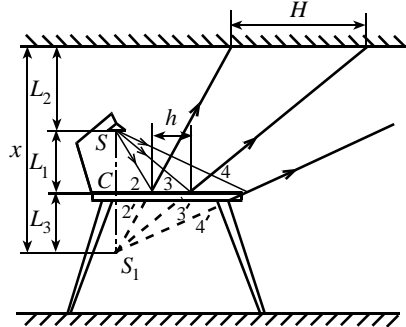


РИС. 3.4

$$x = 2L_1 + L_2 \Rightarrow x = 2 \cdot 0,6 + 1,8 = 3 \text{ м.}$$

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.

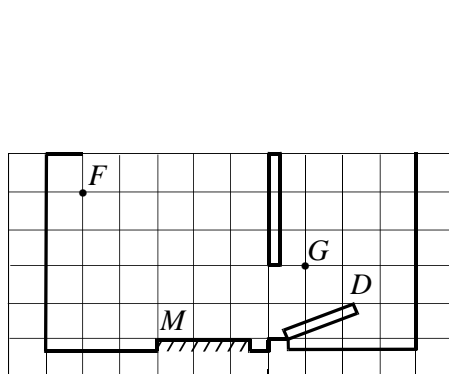


Рис. 3.5

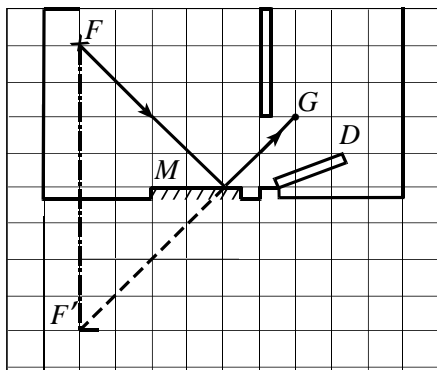


Рис. 3.6

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.

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.

Прямая $F'G$ не перекрывается препятствиями, следовательно, Мальвина может видеть мнимое изображение 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 изображения этих изображений (см. рис. 4.1).

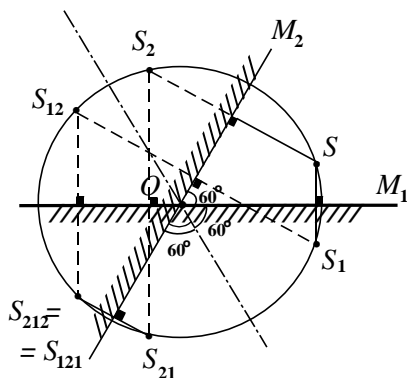


РИС. 4.1

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_2 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 источник 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).

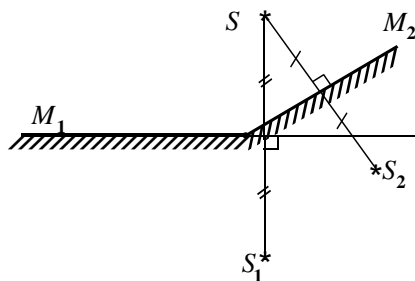


Рис. 4.2

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 .

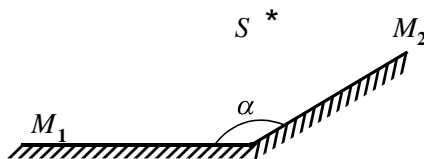


Рис. 4.3

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).

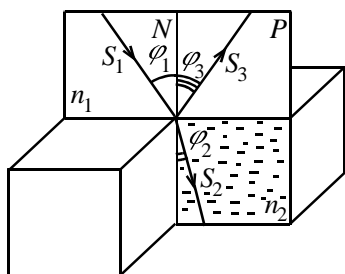


Рис. 5.1

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 ту, 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!**

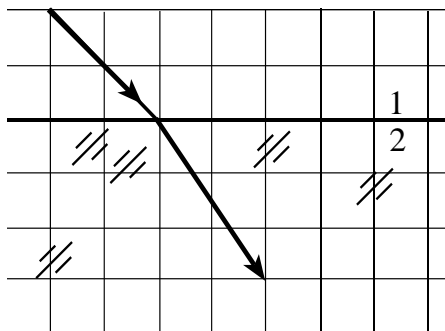


Рис. 5.2

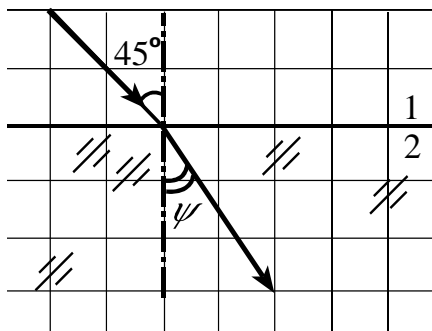


Рис. 5.3

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.

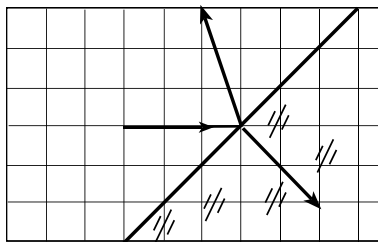


Рис. 5.4

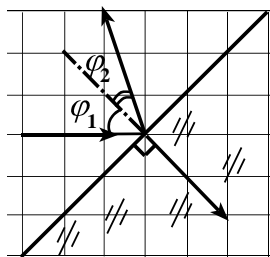


Рис. 5.5

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 ошибок? 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.

§ 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 $\varphi_{\text{п}}$, 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 $\varphi_{\text{п}}$. 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:

$$\sin \varphi_1 = n_2 / n_1. \quad (6.1)$$

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

Решение. Из формулы (6.1) следует: $\sin \varphi_{\text{п}} = \frac{1}{2,42} = 0,413$. Отсюда

легко найти значение самого угла $\varphi_{\text{п}} \approx 24,5^\circ$.

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:

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

Теперь взглянем на рис. 7.1:

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

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

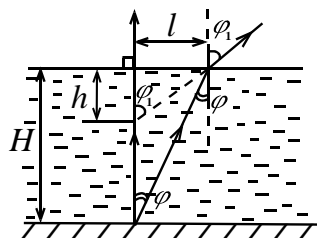


Рис. 7.1

Внимание! Формула (7.3) получена в параксиальном приближении. Если предметы, лежащие на дне водоёма, рассматривать под большим углом φ_1 , то глубина водоёма кажется ещё 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. В торговом центре установили большой декоративный бассейн, в котором плавают рыбы (см. рис. 8). Хулиган, праздно шатающийся по коридорам торгового центра, достал из кармана лазерную указку высокой мощности и попытался осветить лазерным лучом рыб. Как хулиган, должен целиться, чтобы попасть лазерным лучом в рыбу – выше, ниже или точно в видимое изображение?

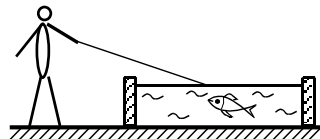


Рис. 8

2. Угол α между плоскостью зеркала и падающим лучом в 7 раз меньше угла φ между падающим и отражённым лучами. Вычислите угол α .

3. Луч света падает из воздуха на плоскопараллельную стеклянную пластину, толщина которой равна 1 см, под углом $\alpha = 30^\circ$. Найдите расстояние между входящим и выходящим лучами, если показатель преломления стекла, из которого сделана пластина, равен $n = 1,5$.

4. Луч света, направленный горизонтально падает на вертикальное зеркало под углом 20° . На какой угол φ повернётся отражённый от зеркала луч, если зеркало повернуть на $\psi = 45^\circ$?

5. На подоконнике окна с двойными стёклами стоит зажжённая свеча. Найдите расстояние между изображениями огонька свечи, если расстояние между стёклами стеклопакета равно $h = 3$ см. Почему этот эффект лучше наблюдать ночью чем днём?

6. Луч света падает из воздуха в неизвестную жидкость. Определите величину показателя преломления жидкости, если угол падения луча составляет 45° с нормалью к поверхности жидкости, а преломлённый луч направлен под углом 30° с нормалью к поверхности жидкости.

7. На дне водоёма, глубина которого равна 1 м, закрепили точечный источник света. Определите радиус светового пятна, образуемого выходящими лучами.

Задачи

1. В комнате (рис. 9) установлена круглая колонна (K), диаметр которой равен $D = 0,5$ м. Комната освещается рассеянным дневным светом, попадающим через окно (Ok), ширина которого равна 1 м. Как будет выглядеть тень, отбрасываемая колонной на стену (Cm), если колонна установлена симметрично относительно оси окна? Определите размер тени и полутени, отбрасываемой колонной на противополо-

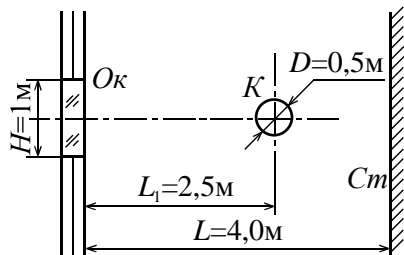


Рис. 9

ложную от окна стену, если расстояние между стеной, в которой находится окно и противоположной стеной равно $L = 4$ метра, а расстояние от оси колонны до окна равно $L_1 = 2,5$ м. Как изменится структура тени, если колонну поместить строго посередине между окном и стеной? Как будет выглядеть световая картина на стене полностью?

2. Стекланную призму, основания которой представляют собой прямоугольные равнобедренные треугольники, поместили в широкий сосуд с водой, стоящий на столе (см. рис. 10), так уровень воды доходит до $1/2$ высоты основания призмы. Луч падает на левую наклонную грань призмы горизонтально. Под каким углом к горизонтالي луч выйдет из призмы, если входной луч попадает в призму на уровне $5/9$ высоты основания призмы? Показатели преломления стекла и воды соответственно составляют $n_{ст} = 1,5$ и $n_{в} = 1,35$.

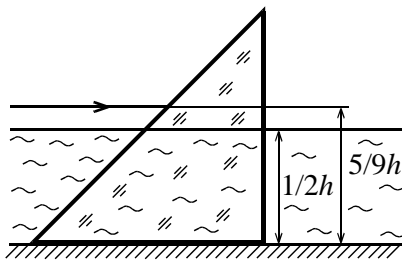


Рис. 10

3. Луч света падает из воздуха на плоскопараллельную пластину, изготовленную из органического стекла. Угол падения равен 40° . Найдите величину показателя преломления материала, из которого изготовлена пластина, если угол между отражённым и преломленным лучами равен 110° .

4. Луч света падает на плоскую границу раздела двух сред под углом 15° , а преломляется под углом 30° . При каком значении угла падения луч не перейдёт границу раздела двух сред?

5. Основание стеклнной призмы представляет собой равнобедренный прямоугольный треугольник (см. рис. 11). На большую грань призмы нормально падает луч света. При какой величине n показателя преломления стекла, из которого изготовили призму луч света выйдет из призмы, отразившись последовательно от двух её граней?

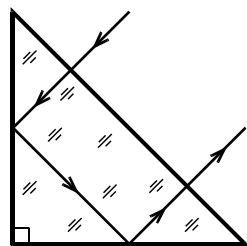


Рис. 11

6. На дне открытого бассейна с водой установлен вертикальный шест. Определите длину тени, отбрасываемой шестом на дно пруда, если солнечные лучи падают под углом 45° . Уровень воды в бассейне $H = 2$ метра, длина шеста $h = 1,5$ метра.

7. Предложите способ измерения коэффициента преломления жидкости в школьной лаборатории. Какое оборудование Вы будете использовать и как будете проводить эксперимент, чтобы достичь максимальной точности измерений?