

4. Определите наибольший порядок $m_{\max}$ спектра, наблюдаемого при нормальном падении монохроматического света на дифракционную решетку, имеющую $N = 500 \frac{\text{штр}}{\text{мм}}$, если длина волны света $\lambda = 520 \text{ нм}$.
5. Монохроматический свет падает нормально на дифракционную решетку. Дифракционный максимум первого порядка наблюдается под углом $\theta = 12^\circ$. Сколько других порядков m может наблюдаться и под какими углами?
6. Свет с длинами волн от $\lambda_1 = 400 \text{ нм}$ до $\lambda_2 = 780 \text{ нм}$ падает нормально на дифракционную решетку. В каких порядках может произойти перекрытие максимумов и минимумов? Зависит ли ответ от ширины щели?



§16-1

§ 17. Прямолинейное распространение и отражение света. Зеркала

- Интересные явления наблюдаются при отражении света от границы раздела двух сред. Как происходит отражение света (рис. 101)? Как можно управлять световым лучом?



Закон прямолинейного распространения света: в однородной прозрачной среде свет распространяется прямолинейно.

Закон независимости световых лучей: распространение световых лучей в веществе происходит независимо друг от друга.

Угол между падающим лучом и перпендикуляром, проведенным в точку падения луча, называется углом падения.

Угол, образованный отраженным лучом и перпендикуляром, проведенным в точку падения луча, называется углом отражения.

Закон отражения света: лучи, падающий и отраженный, а также перпендикуляр к отражающей поверхности, проведенный в точку падения, лежат в одной плоскости; угол отражения равен углу падения.

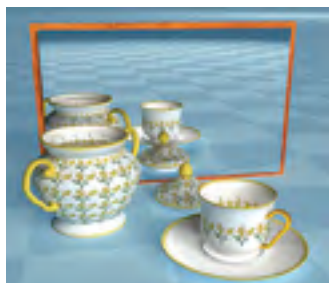


Рис. 101. Изображение в плоском зеркале

Для изучения свойств электромагнитных волн необходимо знать как закономерности их распространения в однородной среде, так и отражения и преломления на границе раздела двух сред.

Геометрической оптикой называют раздел оптики, в котором изучаются законы распространения оптического излучения на основе представления о световых лучах. В геометрической оптике волновая природа света не учитывается. Условимся изображать световые лучи





Рис. 102. Световой пучок

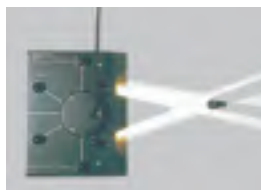


Рис. 103. Прямолинейное распространение света

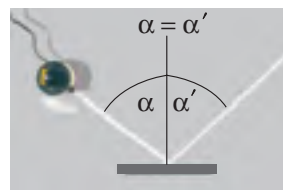


Рис. 104. Отражение света

графически с помощью геометрических лучей. Геометрическому лучу на практике соответствует тонкий *световой пучок*, получаемый при пропускании светового излучения, идущего от удаленного источника, через отверстие (диафрагму) в экране (рис. 102).

Таким образом, следует различать геометрический луч (математическое понятие) и световой пучок (материальный объект), получаемый от источника света.

Уже в начальные периоды оптических исследований были экспериментально установлены четыре основных закона геометрической оптики:

закон прямолинейного распространения света (рис. 102, 103);

закон независимости световых лучей;

закон отражения световых лучей (рис. 104);

закон преломления световых лучей (рис. 105).

В законе прямолинейного распространения света, законах отражения и преломления света использовались понятия «световой пучок» и «световой луч», причем последний рассматривался как бесконечно тонкий пучок. Световой поток можно разделить на отдельные световые пучки, выделяя их при помощи диафрагм (см. рис. 103).

Лучи, выходящие из одной точки, называют **расходящимися**, а собирающиеся в одной точке — **сходящимися** (рис. 106).

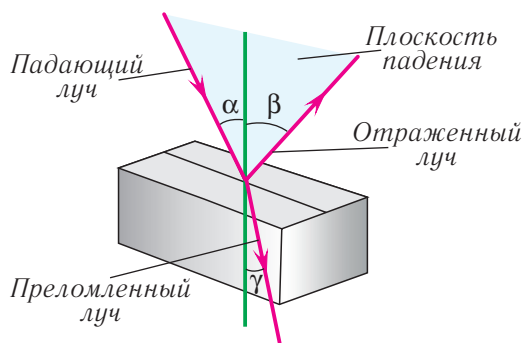


Рис. 105. Преломление и отражение света на границе раздела сред

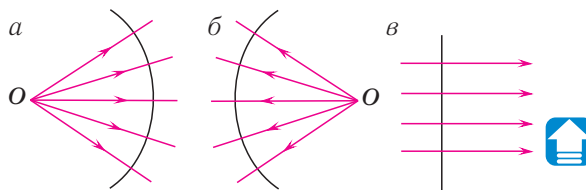


Рис. 106. Пучки света: а — расходящийся; б — сходящийся; в — параллельный

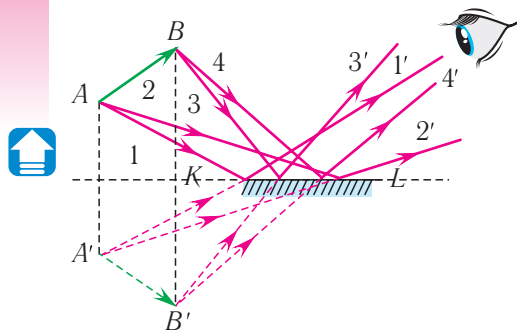


Рис. 107. Построение изображения предмета в плоском зеркале

сделаем для точки B . Глазу наблюдателя будет казаться, что лучи вышли из точек A' и B' , т. е. из крайних точек изображения $A'B'$ предмета AB .

В оптике изображение называется **действительным**, если оно образовано самими лучами (т. е. в данную точку поступает световая энергия). Если же изображение образовано не самими лучами, а их продолжениями, то говорят, что изображение **мнимое** (световая энергия не поступает в данную точку).

Изображение называется **прямым**, если изображение ориентировано так же, как предмет. Если же изображение перевернуто, то его называют **обратным** или **перевернутым**.

Таким образом, изображение предмета в плоском зеркале — мнимое прямое, в натуральную величину. Оно симметрично предмету относительно плоскости зеркала и находится на таком же расстоянии за плоскостью зеркала, как и сам предмет (см. рис. 107).

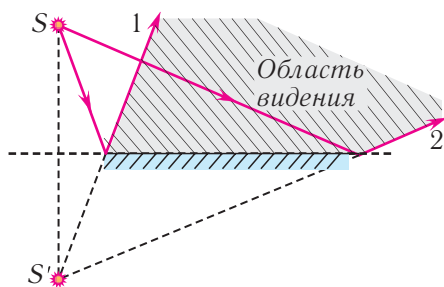


Рис. 108. Построение изображения источника и области видения в плоском зеркале

Как видно из рисунка 106, сферической волне соответствует расходящийся пучок световых лучей, а плоской — параллельный пучок.

Используя закон отражения, можно построить изображение предмета AB в плоском зеркале (рис. 107), представляющем собой плоскую отражающую поверхность. Построив ход лучей 1 и 2 от точки A после отражения от зеркала KL , продолжим их до пересечения в точке A' . Аналогичные построения

сделаем для точки B . Глазу наблюдателя будет казаться, что лучи вышли из точек A' и B' , т. е. из крайних точек изображения $A'B'$ предмета AB .

На рисунке 108 приведен пример построения области видения источника S в плоском зеркале. Для его построения необходимо построить ход лучей 1 и 2, направленных на края зеркала. Область (заштрихованная) между отраженными лучами и дает область, находясь в которой можно увидеть источник.



1. Что называют лучом? Можно ли считать лучом очень узкий пучок света?
2. Какому закону подчиняется распространение света в однородной прозрачной среде?
3. Как следует расположить точечный источник света, плоский предмет и экран, чтобы контур тени на экране был геометрически подобен контуру предмета?
4. Какими станут параллельный, сходящийся и расходящийся пучки света после отражения от плоского зеркала?
5. Какое изображение называется: а) действительным; б) мнимым; в) прямым; г) обратным? Назовите характеристики изображений в плоском зеркале.
6. Как расположено изображение в плоском зеркале?



Пример решения задачи

Луч света, отраженный от плоского зеркала, падает перпендикулярно на плоский экран, установленный на расстоянии $l = 5,0$ м от зеркала (рис. 109). На какое расстояние d переместится световой зайчик на экране, если зеркало повернуть на угол $\varphi = 15^\circ$ вокруг оси, лежащей в плоскости зеркала и перпендикулярной к плоскости, в которой находятся падающий и отраженный лучи?

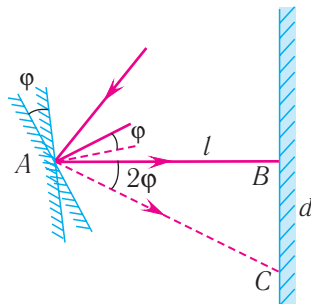


Рис. 109

Дано:

$$l = 5,0 \text{ м}$$

$$\varphi = 15^\circ$$

$$d = ?$$

Решение

При повороте зеркала на угол φ перпендикуляр к зеркалу также повернется на угол φ . Следовательно, угол падения лучей увеличится также на угол φ (см. рис. 109). В соответствии с законом отражения на такую же величину возрастет и угол отражения.

Таким образом, суммарный поворот отраженного луча составит 2φ .

Следовательно, смещение светового зайчика на экране равно длине катета BC прямоугольного треугольника ABC

$$d = l \cdot \operatorname{tg}(2\varphi),$$

$$d = 5,0 \text{ м} \cdot \operatorname{tg}(2 \cdot 15^\circ) = 2,9 \text{ м}.$$

Ответ: $d = 2,9$ м.

Упражнение 13

1. Определите угол падения α солнечных лучей, если столб высотой $H = 5,0$ м отбрасывает тень длиной $l = 2,5$ м.
2. Определите высоту H дерева, если тень от него имеет длину $l_1 = 3,5$ м, а установленная вертикально линейка длиной $l = 30$ см отбрасывает тень длиной $l_2 = 20$ см.
3. Вы хотите сфотографировать себя в зеркале с расстояния $l = 2,2$ м. Можно ли это сделать? Если да, то на какое расстояние x должен быть сфокусирован объектив фотоаппарата.
4. Человек, глаза которого находятся на высоте $h = 1,48$ м над полом, стоит перед плоским вертикальным зеркалом на расстоянии $l = 2,70$ м от него. Нижний край зеркала расположен на высоте $a = 40$ см над полом. На каком расстоянии b от зеркала находится ближайшая точка, которую видно в него?
5. Постройте изображение предмета AB в плоском зеркале KL (рис. 110). Определите графически область его видения.
6. Если мальчик приближается к плоскому зеркалу со скоростью $v = 0,60 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, то с какой скоростью необходимо удалять зеркало от него, чтобы расстояние между мальчиком и его изображением не изменялось?

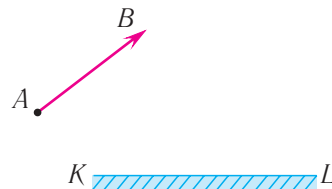


Рис. 110



§ 18. Вогнутые и выпуклые сферические зеркала. Построение изображений

- Каждое утро, умываясь, вы смотрите в плоское зеркало и видите свое четкое отражение в нем. Но поверхность зеркала может быть не только плоской, но и искривленной. Параллельные лучи света, отражаясь от искривленной поверхности, не останутся параллельными. Но отражаются они упорядоченно и могут как сходиться, так и расходиться (рис. 111).

Самый простой пример искривленной отражающей поверхности — сферическая поверхность. Зеркало с такой поверхностью называют **сферическим**.



Рис. 111. Отражения от искривленной зеркальной поверхности

Рис. 112. Сферические зеркала: *a* — вогнутое; *б* — выпуклое

Различают два типа сферических зеркал: *вогнутые*, если зеркальной является внутренняя поверхность сферы (рис. 112, *a*), и *выпуклые*, если — внешняя (рис. 112, *б*).

Основные характеристики сферических зеркал

Рассмотрим основные характеристики сферических зеркал на примере вогнутого зеркала (рис. 113). Центр сферы O называется **оптическим центром** зеркала, его радиус R — **радиусом** зеркала. Вершина шарового сегмента P называется **полюсом** зеркала. Прямая линия OP , проходящая через оптический центр и полюс зеркала, называется **главной оптической осью**. Любая прямая, например прямая OM , проходящая через оптический центр O и поверхность зеркала (за исключением его главной оптической оси), называется **побочной оптической осью**.

Так как поверхность зеркала сферическая, то из ее геометрических свойств следует, что любая оптическая ось перпендикулярна поверхности зеркала. Поэтому луч, идущий по направлению к зеркалу по какой-либо из оптических осей, отразившись от зеркала, пойдет по той же самой оптической оси, но уже в обратном направлении.

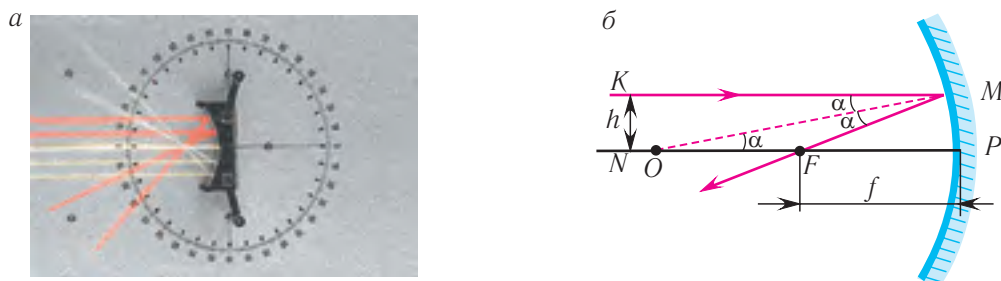


Рис. 113. Вогнутое сферическое зеркало:

a — ход лучей параллельных главной оптической оси; *б* — основные элементы

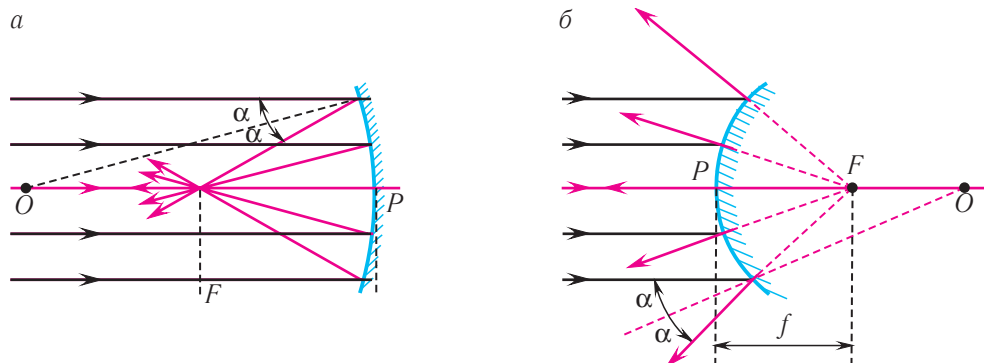


Рис. 114. Построение хода лучей, параллельных главной оптической оси, в зеркалах: *а* — вогнутом; *б* — выпуклом

В плоских зеркалах изображение точечного источника всегда является точечным. Сферические зеркала дают неискаженные изображения только в том случае, если предмет достаточно мал и лучи распространяются вблизи главной оптической оси.



Если направить пучок лучей параллельно главной оптической оси вогнутого сферического зеркала, то все они пересекут главную оптическую ось в одной и той же точке на расстоянии $F = \frac{R}{2}$ (рис. 113, 114, *а*). Аналогичные построения можно сделать и для выпуклого зеркала (рис. 114, *б*). Только в отличие от вогнутого зеркала пересекаться в фокусе будут не лучи, а их продолжения. Эта точка находится на главной оптической оси на расстоянии $F = \frac{R}{2}$ от полюса зеркала — в мнимом фокусе.

Точка F (см. рис. 113, 114) называется **главным фокусом зеркала**. Расстояние $PF = F$ от вершины зеркала до фокуса называется **фокусным расстоянием**. Фокусное расстояние зеркала равно половине радиуса его кривизны. Плоскость, проходящая через главный фокус F линзы перпендикулярно главной оптической оси, называется **фокальной**.

Из свойства обратимости оптических лучей следует, что луч, идущий от источника и проходящий через фокус F , после отражения пойдет параллельно главной оптической оси.

При падении пучка параллельных лучей под углом к главной оптической оси лучи после отражения пересекут побочную оптическую ось в точке, называемой **побочным фокусом F'** (рис. 115).

Построение изображений в сферических зеркалах

Для построения изображения любой точки в сферическом зеркале достаточно построить ход двух любых лучей в зеркале и найти их точку

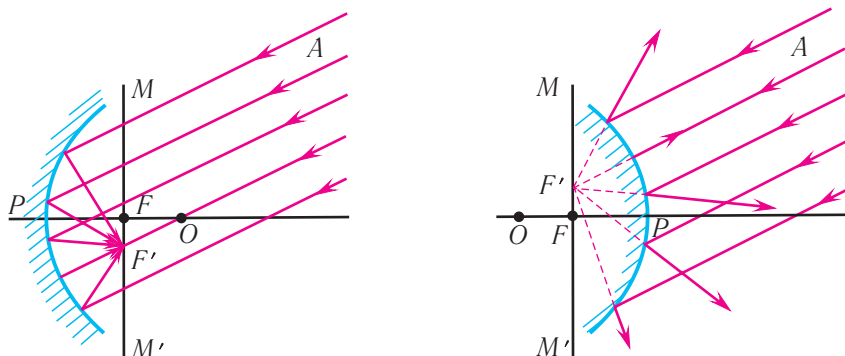


Рис. 115. Отражение пучка лучей, параллельных побочной оптической оси

пересечения. Естественно, что для этого следует выбрать лучи, построить ход которых в зеркале проще всего.

Как правило, для построений выбирают один из **четырёх стандартных (характерных) лучей** (рис. 116):

луч (1) — **через центр зеркала** — отраженный луч пойдет по тому же направлению в обратную сторону;

луч (2) — **параллельный главной оптической оси** — отраженный луч проходит через главный фокус;

луч (3) — **через главный фокус** — отраженный луч проходит параллельно главной оптической оси;

луч (4) — **падающий на зеркало в его полюсе** — отраженный луч идет симметрично главной оптической оси.

Характеристики изображений

Если предмет AB (см. рис. 116, 117) перпендикулярен главной оптической оси в вогнутом сферическом зеркале, то его изображение будет

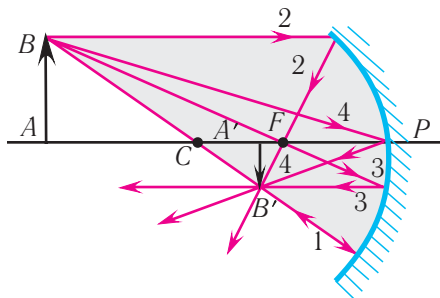


Рис. 116. Стандартные лучи в сферическом зеркале

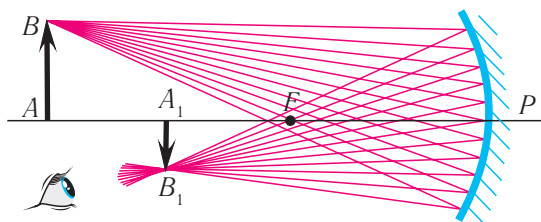


Рис. 117. Формирование действительного изображения в вогнутом сферическом зеркале

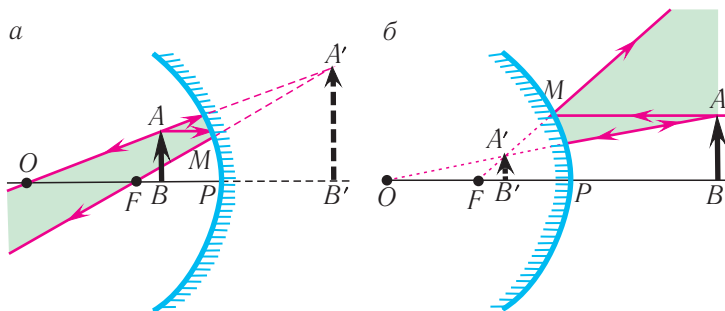


Рис. 118. Построение изображения в зеркалах: а — вогнутом; б — выпуклом

также перпендикулярно этой оси. Поэтому достаточно построить изображение только точки B . Из свойств обратимости светового луча следует, что предмет AB и его изображение A_1B_1 можно поменять местами. Если предмет находится за оптическим центром зеркала, то изображение A_1B_1 предмета — **действительное, обратное и уменьшенное** — находится между главным фокусом и центром зеркала (рис. 117).

Если предмет находится между фокусом и оптическим центром зеркала (см. рис. 117), то изображение A_1B_1 предмета — **действительное, обратное и увеличенное** — находится за центром зеркала.

Если предмет находится между полюсом зеркала и его фокусом, то изображение A_1B_1 предмета — **мнимое, прямое и увеличенное** — находится за зеркалом (рис. 118, а).

Построим изображение предмета AB в выпуклом зеркале (рис. 118, б). Изображение в таком зеркале *всегда* получается **прямым, мнимым, уменьшенным**.

Все возможные изображения предметов в сферических зеркалах построены на рисунке 119.

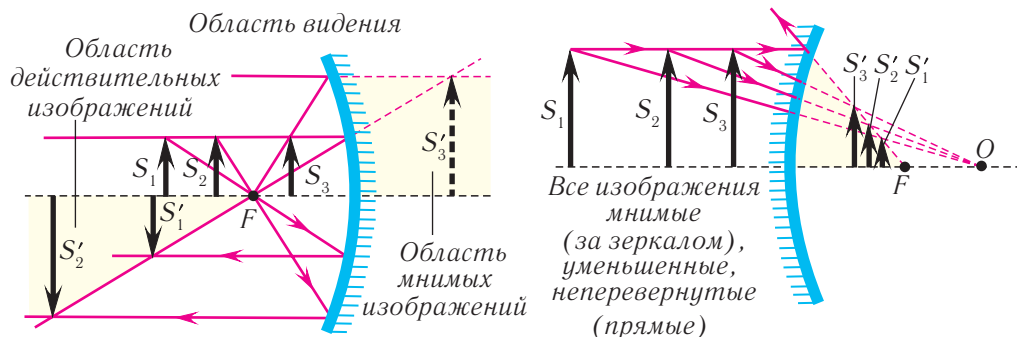


Рис. 119. Изображения предметов в вогнутом и выпуклом зеркалах

Поскольку вогнутые зеркала фокусируют любое электромагнитное излучение, то они находят широкое применение в радиолокации, радиосвязи, радиоастрономии, в телевидении. В частности, вогнутые зеркала применяют в телескопах — приборах для наблюдения звезд, галактик.

► Чертеж первого прожектора был составлен Леонардо да Винчи в Атлантическом кодексе. Первый прожектор был построен в 1779 г. русским механиком И. П. Кулибиным.

В настоящее время широко применяются светодиодные прожекторы (рис. 120). Они имеют рекордно низкое потребление электроэнергии, большой ресурс работ, небольшой вес, большую компактность и могут работать в широком температурном диапазоне.

Первый зеркальный телескоп-рефлектор был построен в 1668 г. И. Ньютоном (рис. 121).

Современные телескопы-рефлекторы имеют зеркала большого диаметра. Так, диаметр главного зеркала телескопа Маунт-Паломарской обсерватории в США — 5 м, а диаметр телескопа специальной обсерватории на Северном Кавказе в России — 6 м.



Рис. 120. Светодиодные прожекторы

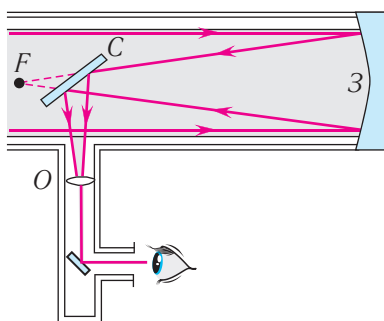


Рис. 121. Телескоп-рефлектор Ньютона и ход лучей в нем



1. Дайте определение сферических зеркал и их классификацию.
2. Дайте определения основных элементов сферических зеркал.
3. Что называется главным фокусом зеркала? Фокальной плоскостью?
4. Какие лучи используются для построения в сферических зеркалах?
5. Что такое побочная оптическая ось и побочный фокус?
6. Какие изображения получаются в сферических зеркалах: а) вогнутых; б) выпуклых?

Пример решения задачи

С помощью сферического зеркала получено изображение A_1B_1 предмета AB (рис. 122). Определите построением положение и фокус зеркала. Установите также тип зеркала (вогнутое или выпуклое). Известно, что BB_1 — оптическая ось зеркала.

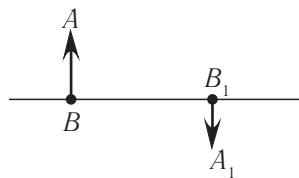


Рис. 122

Решение

Как видно из рисунка 123, изображение A_1B_1 предмета AB является обратным и действительным. Следовательно, зеркало является вогнутым, поскольку только вогнутое зеркало дает действительное изображение. Соединим прямой линией точки A и A_1 . Точка O пересечения прямых AA_1 и BB_1 является центром кривизны сферического зеркала. Отразим

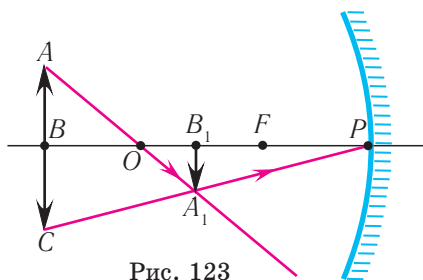


Рис. 123

точку A симметрично относительно оси AB_1 в точку C . Проведем прямую CA_1 до пересечения с прямой BB_1 . Точка P пересечения будет полюсом вогнутого сферического зеркала. Разделив отрезок OP пополам, найдем положение фокуса F вогнутого зеркала.

Ответ: зеркало является вогнутым.

Упражнение 14

1. Постройте изображения предметов в вогнутых сферических зеркалах (рис. 124).

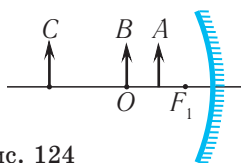


Рис. 124

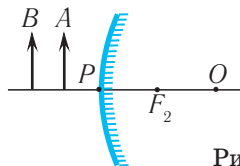


Рис. 125

2. Постройте изображения предметов в выпуклых сферических зеркалах (рис. 125).
3. Постройте ход лучей в вогнутых сферических зеркалах (рис. 126).
4. Постройте ход лучей в выпуклых сферических зеркалах (рис. 127).

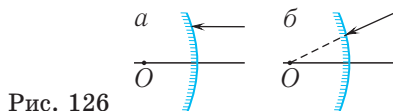


Рис. 126

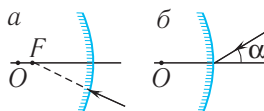


Рис. 127

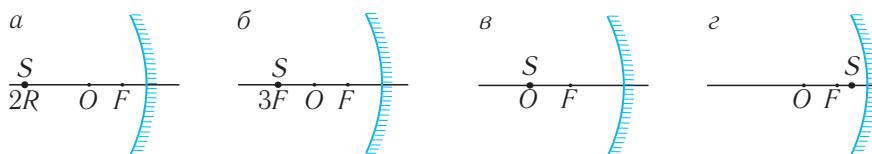


Рис. 128

5. Постройте изображение точечного источника света, находящегося в точке S (рис. 128).



§ 19. Закон преломления света.

Показатель преломления.

Полное отражение

- Что происходит со световым лучом, прошедшим во вторую среду? Как можно управлять световым лучом?



Изменение направления распространения луча света при прохождении через границу раздела двух сред называется преломлением света (рис. 129).

Угол между перпендикуляром, восстановленным в точке падения к границе раздела двух сред, и преломленным лучом называется углом преломления.

Для изучения свойств световых волн необходимо знать закономерности их распространения в однородной среде, а также закономерности отражения и преломления на границе раздела двух сред.

Рассмотрим падение плоской световой волны на плоскую поверхность раздела однородных изотропных и прозрачных сред при условии, что размеры поверхности раздела намного больше длины волны падающего излучения.

Пусть на плоскую поверхность раздела LM двух сред падает плоская световая волна, фронт которой AB (рис. 130). Если угол падения α отличен от нуля, то различные точки фронта AB волны достигнут границы раздела LM не одновременно.

Рассмотрим, что будет происходить во второй среде, считая, что модуль скорости v_2 распространения света в ней меньше, чем в первой



Рис. 129. Преломление света на границе раздела двух сред