

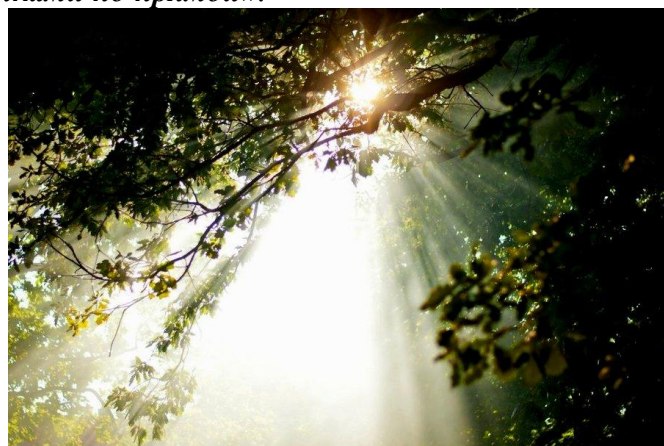
10-11 классы, подготовка к теоретическому туру

олимпиады школьников «Робофест» по физике

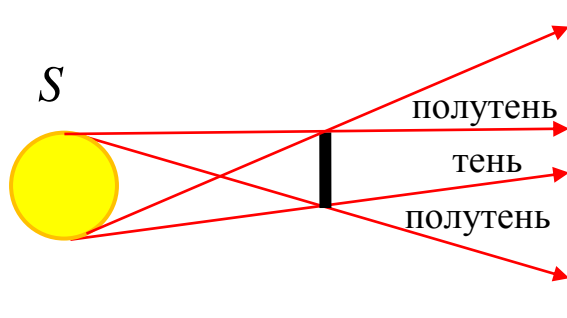
Теоретический обзор к вводному занятию 6.

Тема: «ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА».

Описание *распространения света* – важная задача физики, и за века обсуждения этой проблемы физики изучили много различных свойств света и придумали много методов описания *оптических явлений*. Сейчас мы знаем, что во многих ситуациях для правильного описания поведения света нужно учитывать его *волновые свойства* (свет можно рассматривать как электромагнитную волну), при описании его взаимодействий с атомами и молекулами нужно учитывать его *квантовые свойства* (свет можно рассматривать как поток квантов света – *фотонов*). Но довольно часто хорошую точность дает и самый простой способ описания света, когда его рассматривают как набор *прямолинейных световых лучей*. Такой подход называют приближением **геометрической оптики**, основным законом которой является **закон прямолинейности распространения света**: «*В однородной среде свет распространяется между любыми двумя точками по прямой*».

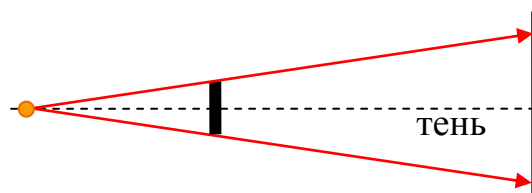


Визуально мы довольно часто наблюдаем эффект «прямолинейности» световых лучей (см. изображения). Особенно четко это наблюдается, когда мы видим границы тени и полутени. Если рассмотреть ход лучей от протяженного источника света, на пути которых поставлено препятствие, то легко, построив «крайние» лучи (идущие от краев источника мимо краев препятствия) найти область тени (куда лучи от источника не попадают) и область полутени (в которую попадает только часть лучей от источника).



Пример 1: Тонкий непрозрачный диск диаметром 30 см освещается маленькой лампочкой и отбрасывает круглую тень на стену. Определите диаметр тени, если расстояние от лампочки до диска в 2 раза меньше, чем расстояние от диска до стены.

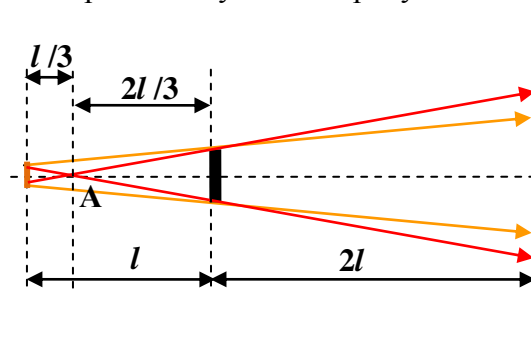
В геометрической оптике важно явно выполнять построение хода лучей. Поэтому изобразим ситуацию на рисунке:



Здесь лампочка «маленькая», поэтому пренебрегаем ее размером и будем считать ее точечным источником. Важно понять, что тень на стене будет круглой только в том случае, если лампочка расположена на оси диска (на прямой, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через его центр). Тогда из подобия треугольников понимаем, что диаметр тени на стене во столько же раз больше диаметра диска, во сколько раз стена дальше от лампочки, чем диск, то есть в $2+1=3$ раза. Итак, диаметр тени будет равен 90 см.

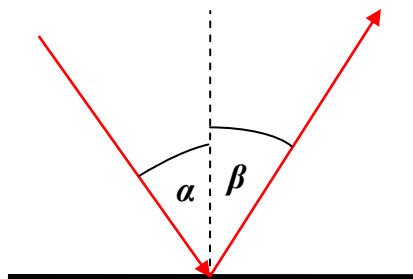
Пример 2: Вместо маленькой лампы в предыдущем примере поставили светящийся диск радиусом 15 см (в два раза меньше, чем у диска-препятствия). Каков будет внешний диаметр области полутени?

Снова изобразим ситуацию на рисунке:



На построении видно, что точка А пересечения крайних лучей полутени (выделены красным цветом) лежит в два раза ближе к источнику, чем к препятствию. Поэтому, если расстояние от источника до препятствия обозначить l , то расстояние от источника до А будет равно $l/3$, а от этой точки до препятствия $2l/3$. Так как по условию расстояние от препятствия до стены в два раза больше, чем от источника до препятствия (равно $2l$), то расстояние от А до стены равно $8l/3$, то есть оно в 8 раз больше, чем расстояние от А до источника. Следовательно, внешний диаметр полутени в 8 раз больше диаметра источника, и равен $8 \times 15 \text{ см} = 120 \text{ см}$.

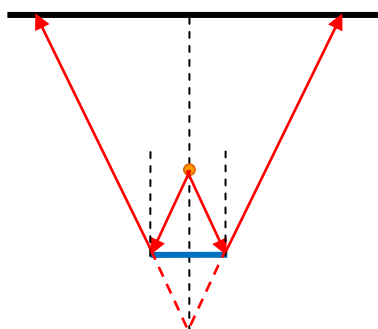
Следующий закон геометрической оптики – **закон отражения света:**



Луч падающий, луч отраженный и нормаль к отражающей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости. Угол падения (между падающим лучом и нормалью) равен углу отражения (между отраженным лучом и нормалью): $\alpha = \beta$.

Пример 3: Маленькая лампочка расположена на высоте 50 см над центром квадратного плоского зеркала со стороной 20 см, расположенного горизонтально. Расстояние от лампочки до потолка равно 150 см. Найти площадь светлого пятна на потолке.

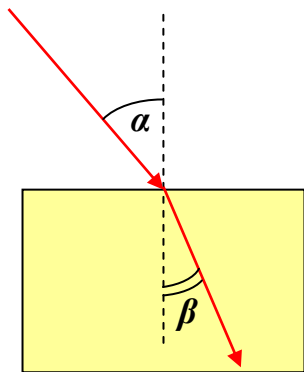
Рисунок:



Построив ход лучей, отражающихся от краев зеркала, замечаем, что точка их пересечения (находящаяся на расстоянии 50 см за зеркалом) в 5 раз дальше от потолка, чем зеркало.

Поэтому квадратное световое пятно от зеркала на потолке по каждой из сторон в 5 раз больше самого зеркала, то есть его сторона $20 \text{ см} \times 5 = 1 \text{ м}$. Значит, его площадь 1 м^2 .

При описании прохождения света через вещество считается, что влияние вещества в основном проявляется в **замедлении хода** световых лучей. Вещество в оптике характеризуется **абсолютным показателем преломления**, равным отношению скорости света в вакууме c к скорости света в данной среде c_{cp} : $n_{cp} \equiv c/c_{cp}$. Из-за этого замедления на границе разных сред свет испытывает **преломление**. Это явление описывает третий закон геометрической оптики – **закон преломления света** (закон Синнелиуса):



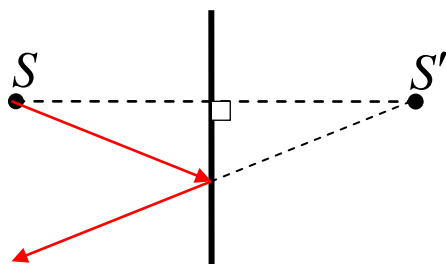
Луч падающий, луч преломленный и нормаль к преломляющей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости. Отношение синусов углов падения и преломления (между преломленным лучом и нормалью) равно отношению абсолютных показателей

преломления второй и первой сред:
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \equiv n_{21}.$$

Величина n_{21} называется относительным показателем преломления двух сред.

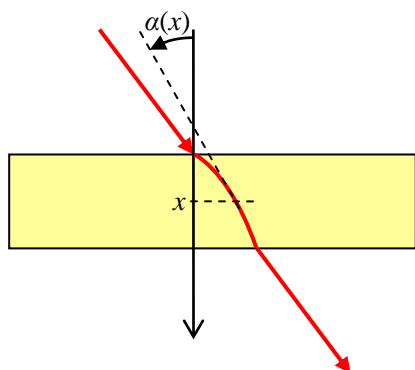
Построение изображений с учетом законов геометрической оптики становится чисто геометрической процедурой: изображением каждой точки источника света является пересечение световых лучей (**действительное изображение**) или их продолжений (**мнимое изображение**), выходящих из данной точки. Преломляющие и отражающие тела, расположенные на пути световых лучей, образуют **оптические системы**. Рассмотрим основные составляющие таких систем, встречающиеся в «школьных» задачах.

1. Плоское зеркало.



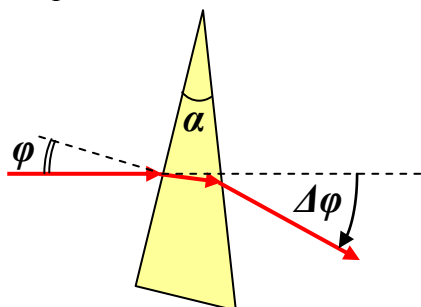
Мнимое изображение точечного источника располагается симметрично источнику относительно плоскости зеркала.

2. Плоскопараллельная пластина.



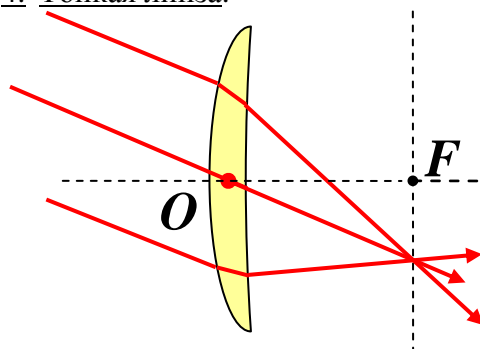
Ход луча внутри пластины определяется изменением показателя преломления, но, если с обеих сторон от пластины – одна и та же среда, то луч выходит из нее под углом, равным углу падения: угол наклона луча к нормали в каждом сечении пластины определяется законом $n(x) \cdot \sin[\alpha(x)] = const$.

3. Призма.

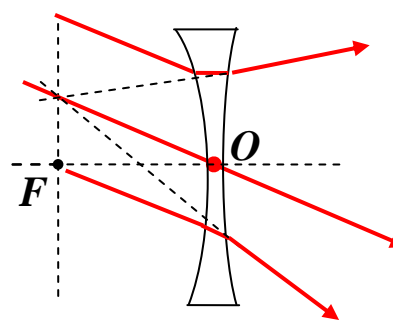


Луч, падающий на грань призмы в плоскости, перпендикулярной ее ребру, при преломлении на обеих гранях отклоняется в одну сторону. Суммарная величина отклонения определяется величиной угла призмы и ее показателя преломления.

4. Тонкая линза.



собирающая линза



рассеивающая линза

Линза – «чечевицеобразное» преломляющее тело. Двояковыпуклые, плосковыпуклые и некоторые (см. ниже) выпукло-вогнутые линзы в воздухе (в среде с n меньшим, чем у линзы) являются **собирающими**: пучок параллельных световых лучей, падающих на линзу, собирается в точку в плоскости, параллельной плоскости линзы (называемой **фокальной плоскостью**). **Оптическим центром** линзы (O) называют точку, в которой световой луч проходит через линзу без отклонения (обычно эта точка совпадает с геометрическим центром линзы). Ось, проходящая через оптический центр перпендикулярно плоскости линзы, называется **главной оптической осью**. Точка F, в которой сходятся лучи, параллельные главной оптической оси – **фокус** линзы (ясно, что он находится на пересечении главной оптической оси с фокальной плоскостью), а расстояние от оптического центра до фокуса – **фокусное расстояние**. Величина, обратная фокусному расстоянию – **оптическая сила** линзы: $D \equiv \frac{1}{F}$ (единица измерения оптической силы – диоптрия: 1 дптр $\equiv 1 \text{ м}^{-1}$). В случае

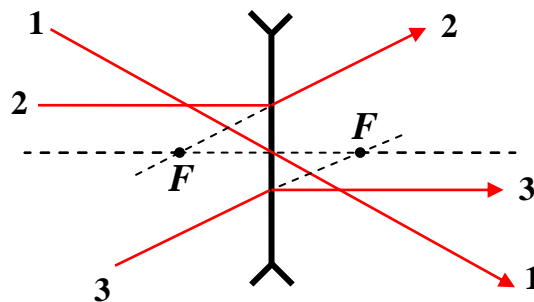
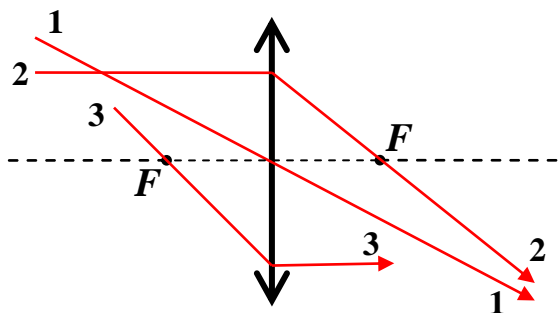
собирающей линзы фокус является действительным (в нем пересекаются световые лучи), а фокусное расстояние и оптическая сила считаются положительными.

Двояковогнутые, плосковогнутые и часть выпукло-вогнутых линз при аналогичных условиях являются **рассеивающими**: пучок параллельных лучей после прохождения линзы расходится так, что продолжения лучей пересекаются в плоскости, параллельной плоскости линзы. В этом случае фокус является мнимым, а фокусное расстояние и оптическая сила считаются отрицательными. Аналогично определяется знак любого расстояния: расстояние от источника до линзы и от линзы до изображения считаются положительными для действительных источников и изображений и отрицательными – для мнимых (мнимый источник – точка пересечения продолжений лучей, падающих на линзу).

В школьных задачах обычно рассматриваются **тонкие линзы**. Так называют линзы, толщина которых много меньше их диаметра, который – в свою очередь – много меньше радиусов

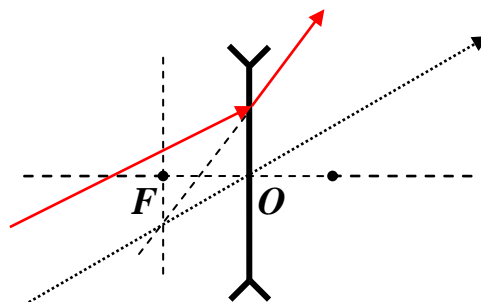
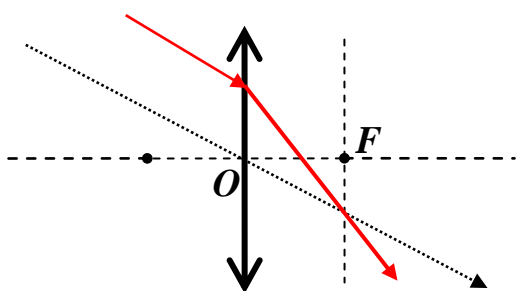
кривизны ее поверхностей. В этом случае для всех падающих на линзу лучей от источников, находящихся от линзы на расстояниях больше или порядка радиусов кривизны, углы их наклона к оси оказываются очень малыми.

При построении изображения, создаваемого линзами, удобно использовать три типа лучей:



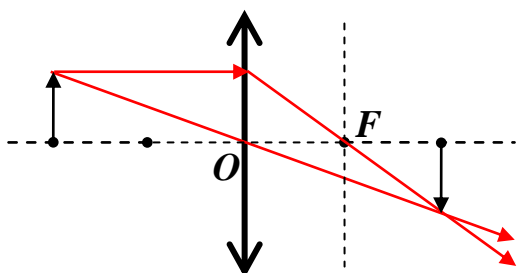
1. Луч, проходящий через оптический центр – не отклоняется.
2. Луч, идущий параллельно оптической оси – идет в действительный фокус для собирающей линзы, из мнимого фокуса для рассеивающей.
3. Луч, выходящий из фокуса (для собирающей линзы) или идущий в фокус (для рассеивающей) – после линзы идут параллельно оптической оси.

Впрочем, ход любого луча, падающего на линзу, можно построить, проведя вспомогательный параллельный ему луч, проходящий через оптический центр – эти лучи (или их продолжения – в зависимости от типа линзы) должны встретиться в фокальной плоскости:



Пример 4: Построить изображение отрезка в собирающей линзе, если отрезок находится одним концом на главной оси линзы на расстоянии от линзы, которое вдвое превышает фокусное расстояние линзы.

Построение проведено на рисунке – используются лучи 1 и 2:



Такое изображение называют перевернутым. Оно не является ни увеличенным, ни уменьшенным – можно доказать, что оно имеет такой же размер, как и исходный отрезок, и находится на таком же расстоянии от линзы. В общем случае размер изображения может отличаться от размера предмета. Поэтому изображения характеризуют специальной величиной – **увеличением Г**. Это отношение размера изображения к размеру предмета.

Кроме того, при описании прохождения лучей через тонкую линзу, можно использовать алгебраические методы. Они основаны на двух базовых формулах:

- **Формула для оптической силы тонкой линзы:** для линзы из вещества с показателем преломления n_l в среде с показателем преломления n_{cp} , ограниченной сферическими

поверхностями с радиусами R_1 и R_2 , оптическая сила равна $D = \frac{1}{F} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ (в

этой формуле радиусы считаются положительными для выпуклой поверхности и отрицательными для вогнутой по отношению к «внутренности» линзы). Отметим, что

$n = \frac{n_l}{n_{cp}}$ – показатель преломления линзы по отношению к окружающей среде. Таким

образом, линза, которая в воздухе является собирающей при помещении ее в жидкость с более высоким, чем у самой линзы, абсолютным показателем преломления станет рассеивающей!

- **Формула линзы:** если предмет находится на расстоянии a от тонкой линзы с оптической силой D , то его изображение находится на расстоянии b от линзы, причем $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F} = D$.

Отметим, что все величины (a , b , F и D) являются *алгебраическими*, то есть принимают как *положительные*, так и *отрицательные* значения. Общее правило здесь состоит в следующем: характеристики *действительного* объекта (такого, где встречаются или откуда выходят световые лучи – предмета, изображения или фокуса) *положительны*, а *мнимого* (где пересекаются продолжения световых лучей, а самих лучей нет) – *отрицательны*.

Пример 5: Глазок светодиода, находящегося на главной оптической оси линзы и направленного в ее сторону, находится на расстоянии 60 см от линзы. Оптическая сила линзы равна +5 дптр. На каком расстоянии за линзой нужно поставить экран, чтобы увидеть на нем четкое изображение глазка светодиода?

В первую очередь обратим внимание, что $D > 0$, то линза является собирающей. Это важно, так как только собирающие линзы создают действительные изображения, которые можно наблюдать на экране (мнимые изображения нельзя получить на экране, так как в точку их расположения реальные световые лучи не приходят). Далее воспользуемся формулой линзы:

$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = D \Rightarrow b = \frac{a}{Da-1} = 30\text{см}$, то есть экран нужно поставить на расстоянии 30 см.

Если оптическая система состоит из нескольких элементов, изображения строятся путем последовательного построения изображения для каждого элемента (в порядке их прохождения световыми лучами). Точно так же – путем последовательного построения изображений – следует действовать в случае многократного прохождения какого-либо элемента оптической системы световым лучом (например, при многократном отражении луча от искривленного зеркала).