

11 класс, Экспресс-подготовка к ЕГЭ по физике

Теоретический обзор к занятию 9.

Темы: геометрическая оптика, волны, волновая оптика.

Этому разделу в ЕГЭ-2022 по физике могут быть посвящены задания с №№ 16-19, № 26 и № 29. Задания четко разделены на задания по геометрической оптике (тени и полутени, отражение, преломление света и тонкие линзы) и по волновой оптике (интерференция, тонкие пленки, дифракционные решетки, дисперсия).

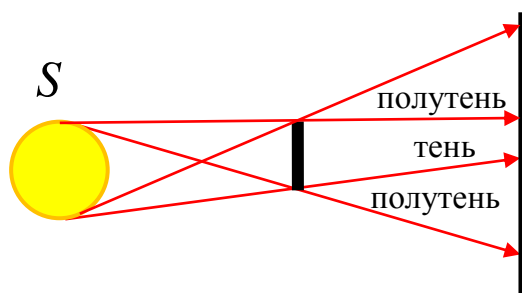
Каждое физическое явление можно описывать с разной точностью на основе различных физических теорий – важно правильно выбирать теорию в соответствии с «уровнем» и требованиям к точности описания. В школьной программе наиболее ярким примером того, как нужно использовать разные теории при описании одного и того же явления, является описание распространения света. Например, если нужно описать взаимодействие света с атомами, молекулами, электронами или ядрами атомов вещества, то нужно использовать представления **квантовой оптики**, и рассматривать свет как поток квантов («порций» энергий и импульса) света – **фотонов**. Если нужно описывать взаимодействие пучка видимого света шириной в несколько микрометров или меньше (но намного больше размеров молекул вещества) с препятствиями, размеры которых примерно такие же, то нам необходимо использовать **волновую оптику**, и рассматривать свет как **электромагнитную волну** (здесь важно, что в видимом диапазоне длина световой волны – несколько десятых частей микрометра). Если же ширина светового пучка и характерные размеры препятствий на его пути намного больше длины световой волны, то можно использовать **геометрическую оптику**. Квантовая оптика является теорией «наиболее глубокого» уровня: все законы волновой оптики можно вывести из законов квантовой оптики (а наоборот нельзя), так же как и все законы геометрической оптики можно вывести из законов волновой. Однако эти выводы сложны и выходят за рамки школьной программы.

Итак, **геометрическая оптика** – это **приближение**, в котором пренебрегают и волновыми, и квантовыми свойствами света. Это наиболее простой способ описания распространения света, в котором мы опираемся на представление о прямолинейных световых лучах. Световые лучи – пучки света, которые одновременно считаются достаточно узкими (по сравнению с характерными размерами препятствий), и достаточно широкими (по сравнению с длиной световой волны). При описании прохождения света через прозрачное 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} : $n_{cp} \equiv c/c_{cp}$. В непрозрачном веществе свет испытывает поглощение и рассеяние, но в школьных задачах эти процессы рассматриваются очень редко. В основном рассматриваются поглощение и рассеяние света в атмосфере и их связь с наблюдаемыми явлениями. Например, именно с рассеянием света связано объяснение того, что цвет чистого неба – сине-голубой, несмотря на то что максимум излучения Солнца (а именно его свет приходит к нам с неба по разным направлениям) лежит в желто-зеленой части спектра. Дело в том, что, когда мы смотрим на небо «мимо» Солнца, к нам приходит свет, рассеянный молекулами газов атмосферы, а эффективность молекулярного рассеяния очень быстро растет с частотой света (пропорциональна 4-й степени частоты!), и поэтому в рассеянном солнечном свете преобладают сине-голубые цвета. Если в атмосфере присутствуют примесь «крупных» по сравнению с молекулами частиц (капли воды, кристаллы льда, пылинки и т.д.), то характер рассеяния изменяется, и вместе с ним – наблюдаемый цвет неба.

Основные законы геометрической оптики:

- **Закон прямолинейности распространения света:**
В однородной среде свет распространяется между любыми двумя точками по прямой.

Как видно, этот закон фактически указывает, что в геометрической оптике мы пользуемся приближением, в котором не учитываем волновые свойства света. Именно поэтому он является для этой теории определяющим (его даже часто называют «основным законом геометрической оптики»).

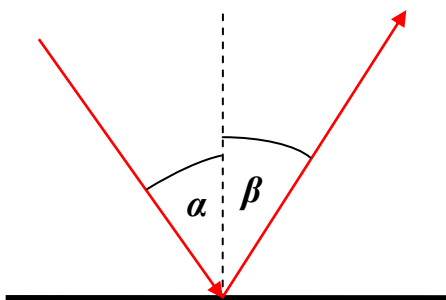


Визуально мы довольно часто наблюдаем эффект «прямолинейности» световых лучей. Особенно четко это наблюдается, когда мы видим границы тени и полутени. Если рассмотреть ход лучей от протяженного источника света, на пути которых поставлено препятствие, то легко, построив «крайние» лучи (идущие от краев источника мимо краев препятствия)

найти область тени (куда лучи от источника не попадают) и область полутени (в которую попадает только часть лучей от источника).

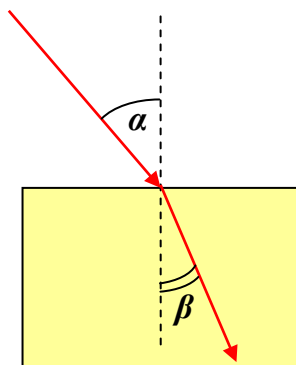
При падении светового луча на границу раздела двух сред происходят явления *отражения* (возвращения светового луча обратно в первую среду) и *преломления* (переход луча из первой среды во вторую, при котором изменяется направление его движения).

- **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 нормалью и отраженным лучом): $\alpha = \beta$.

- **Закон преломления света (закон Снеллиуса):**

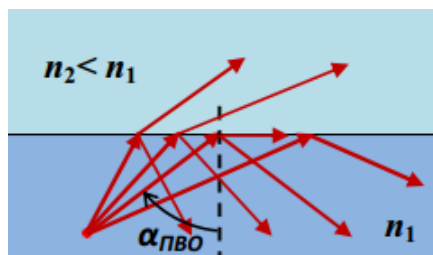


Луч падающий, луч преломленный и нормаль к преломляющей поверхности в точке падения лежат в одной плоскости. Отношение синусов углов падения и преломления (между преломленным лучом и нормалью) равно отношению абсолютных показателей преломления второй и первой сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \equiv n_{21}. \text{ Величина } n_{21} \text{ называется относительным}$$

показателем преломления двух сред.

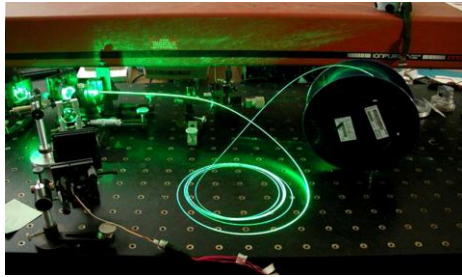
Построение изображений с учетом этих законов становится чисто геометрической процедурой: изображением каждой точки источника света является пересечение световых лучей (*действительное изображение*) или их продолжений (*мнимое изображение*), выходящих из данной точки.



Интересным следствием закона преломления света является явление *полного внутреннего отражения*. Оно состоит в том, что луч, падающий из среды с большим показателем преломления n_1 на границу раздела со средой с меньшим показателем преломления $n_2 < n_1$ под углом $\alpha \geq \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$, не выходит в среду с меньшим

показателем преломления. Действительно, если по формуле закона Снеллиуса рассчитать

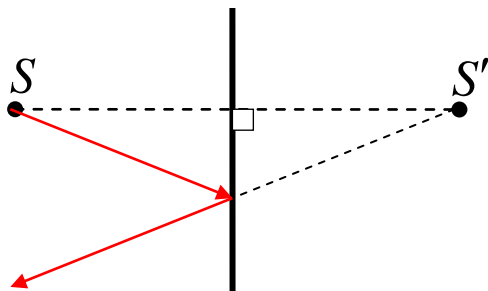
синус угла преломления, то для такого случая он окажется больше 1! В этом случае преломленный луч полностью отсутствует. «Критический» угол $\alpha_{ПВО} \equiv \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$



называют *углом полного внутреннего отражения*. Это явление используют, в частности, в оптоволоконных световодах, двигаясь по которым, свет, испытывая полное внутреннее отражение при «попытке» выхода, повторяет все изгибы световода.

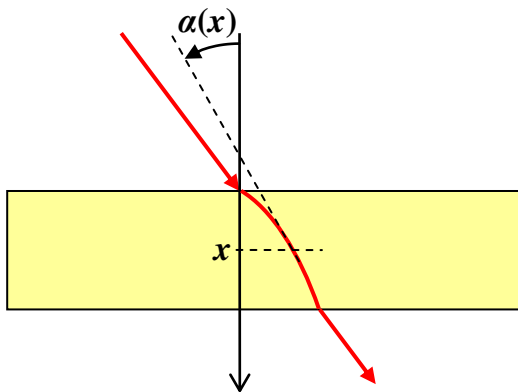
Преломляющие и отражающие тела, расположенные на пути световых лучей, образуют оптические системы. Рассмотрим основные составляющие таких систем, встречающиеся в «школьных» задачах.

1. Плоское зеркало.



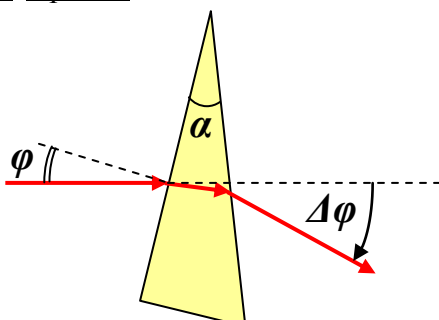
Мнимое изображение точечного источника располагается симметрично источнику относительно плоскости зеркала.

2. Плоскопараллельная пластина.



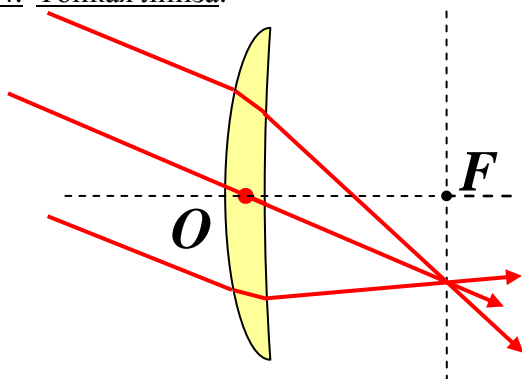
Ход луча внутри пластины определяется изменением показателя преломления, но, если с обеих сторон от пластины – одна и та же среда, то луч выходит из нее под углом, равным углу падения: угол наклона луча к нормали в каждом сечении пластины определяется законом $n(x) \cdot \sin[\alpha(x)] = const$.

3. Призма.

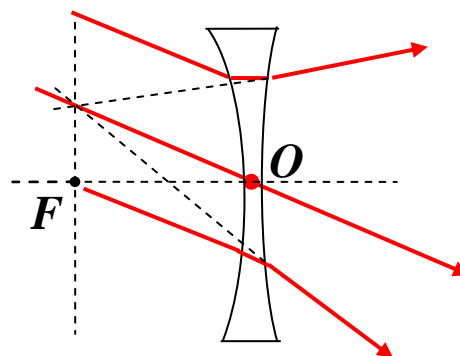


Луч, падающий на грань призмы в плоскости, перпендикулярной ее ребру, при преломлении на обеих гранях отклоняется в одну сторону. Суммарная величина отклонения определяется величиной угла призмы и ее показателем преломления. Для **тонкой призмы** ($\alpha \ll 1$) и малых углов падения ($\varphi \ll 1$) отклонение выражается простой формулой $\Delta\varphi = (n-1) \cdot \alpha$ (n – относительный показатель преломления на границе раздела среда-призма).

4. Тонкая линза.



собирающая линза



рассеивающая линза

Линза – «чечевицевидное» 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: $1 \text{ Дптр} \equiv 1 \text{ м}^{-1}$). 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 заданиях ЕГЭ рассматриваются только **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, справедливо **параксиальное приближение**. Это означает, что все такие лучи можно считать «приосевыми» - идущими под малыми углами к оптической оси. Тогда во всех вычислениях геометрических характеристик этих лучей можно использовать приближенное равенство $\sin \alpha \approx \alpha \approx \tan \alpha$. В результате для тонких линз можно получить

целый ряд простых соотношений для их характеристик. Приведем здесь наиболее важные из них.

- Выражение для оптической силы тонкой линзы, ограниченной двумя сферическими поверхностями с радиусами R_1 и R_2 (которые считаются положительными для выпуклой поверхности и отрицательными для вогнутой):

$$D = \frac{1}{F} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Здесь n – 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!). Эта формула **не входит** в программу ЕГЭ, и задания на ее использование не могут присутствовать в варианте экзамена, и здесь она приведена только для «расширения эрудиции»

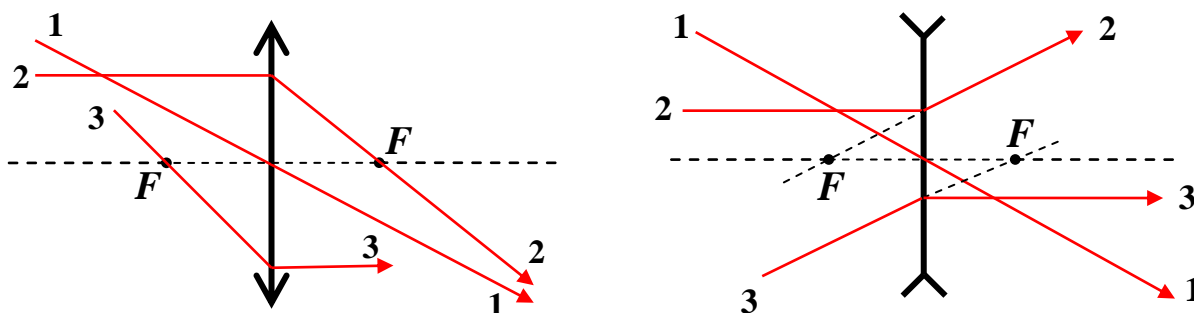
- «Формула линзы», связывающая расстояния от источника до линзы (a) и от линзы до изображения (b):

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{F}.$$

- Увеличение, даваемое линзой: отношение размера изображения к размеру предмета (в ЕГЭ рассматривается поперечное увеличение – по отношению к главной оси линзы) :

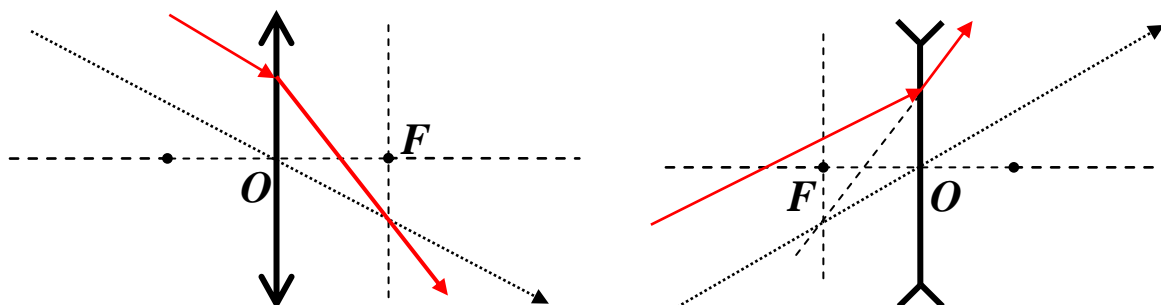
$$\Gamma_{\perp} \equiv \frac{L_{\perp}}{l_{\perp}} = \left| \frac{b}{a} \right| = \left| \frac{F}{a-F} \right|$$

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:



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).



ВОЛНЫ: ЗВУК И СВЕТ.

Волна – процесс распространения колебаний в пространстве. Само колебание при этом может быть самой разной природы: колебания поверхности жидкости, точки натянутой струны, давления газа, напряженности электрического поля и т.д.. Однако все волновые процессы имеют общие черты.

Основные понятия и определения:

Продольные (поперечные) волны – волны, колебания в которых происходят вдоль (поперек) направления распространения волны. Продольными волнами являются звуковые волны в газах и жидкостях (колебания давления – сгущения и разрежения) и часть звуковых волн в твердых телах (упругие колебания сжатия – растяжения, подобные колебаниям пружины). Поперечные волны – колебания натянутой струны, звуковые волны «смещения» в твердых телах, электромагнитные волны. В некоторых случаях движение частиц среды, в которой распространяется волна, более сложно и может рассматриваться как суперпозиция продольных и поперечных движений (к этому типу относятся, например, волны на поверхности воды).

Фронт волны – поверхность, которой достигают распространяющиеся колебания к фиксированному моменту времени.

Плоские (сферические,...) волны – волны с соответствующей формой волнового фронта.

Амплитуда, фаза, частота, волновое число – характеристики волнового процесса. Произвольную волну можно рассматривать как результат суперпозиции **плоских монохроматических** (с фиксированной частотой колебаний) **волн**. Набор частот в этой суперпозиции называют **спектром** волны. Плоская монохроматическая волна величины u , распространяющаяся вдоль оси x , описывается выражением

$$u(x,t) = u_m \cdot \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

в котором максимальное значение u_m называют **амплитудой** волны, аргумент косинуса –

фазой волны (величина φ_0 – начальная фаза), $\omega \equiv \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – циклической частотой, а

$k \equiv \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновым числом. Таким образом, можно сформулировать как более строгое

определение: фронт волны есть поверхность постоянной фазы. Величина λ – **длина волны**, связана с частотой и скоростью распространения волн соотношением

$$c = \lambda \cdot \nu.$$

В среде с показателем преломления n скорость (а вместе с ней и длина) волны уменьшаются. Если обозначить λ' (и соответственно k') длину волны и волновое число в среде, то изменение фазы волны при прохождении расстояния x можно записать как

$$k'x = \frac{2\pi}{\lambda'}x = \frac{2\pi n}{\lambda}x = k \cdot nx \equiv k$$

(то есть оно равно изменению фазы волны «без учета» изменения ее длины при прохождении расстояния d). Величину $d \equiv nx$ называют оптической длиной хода волны.

Когерентность: волны (и их источники) считаются когерентными, если они имеют одинаковую частоту и постоянную разность фаз.

Интерференция – явление перераспределения энергии колебаний в пространстве при наложении двух или более когерентных волн (в ЕГЭ используется более «частное»

определение типа: сложение когерентных волн, при котором образуется постоянное во времени пространственное распределение амплитуд результирующих колебаний).

Дифракция – явление изменения направления распространения волны при взаимодействии с препятствиями («огибание» препятствий).

Акустические волны – распространяющиеся колебания давления (в жидкостях или газах) или напряжения (в твердых телах), обусловленные коллективными смещениями молекул. По частоте эти колебания подразделяют на звуковые волны (частота от 20 Гц до 20 кГц), инфразвук (менее 20 Гц) и ультразвук (свыше 20 кГц).

Электромагнитные волны – колебания напряженностей электрических и индукции магнитных полей. По классическим представлениям, источником электромагнитных волн являются ускоренно движущиеся электрические заряды. По частоте подразделяются на: радиоволны (примерно до 10^{10} Гц), тепловые (инфракрасные) лучи (10^{11} - 10^{14} Гц), видимый свет (от $4 \cdot 10^{14}$ Гц до $8 \cdot 10^{14}$ Гц), ультрафиолетовое (10^{15} Гц), рентгеновское (10^{16} - 10^{19} Гц) и гамма (10^{20} Гц и выше) излучения. Внутри этих диапазонов также выделяют различные поддиапазоны значений частоты.

Процесс распространения волны можно описать, опираясь на **принцип Гюйгенса - Френеля**: Каждая точка среды, в которой происходят колебания, становится источником вторичных волн, интерференция которых и приводит к формированию распространяющейся волны. Фронт волны является огибающей фронтов сферических вторичных волн.

Рассмотрим более подробно основные явления, характерные для волн, на примере света (законы *физической оптики*).

Интерференция:

При сложении двух волн одинаковой амплитуды от когерентных синфазных ($\Delta\varphi_0$) источников на расстояниях r_1 и r_2 от них в среде с показателем преломления n для суммарного колебания получаем:

$$u_1 = u_m \cdot \cos(\omega t - nk r_1 + \varphi_0), u_2 = u_m \cdot \cos(\omega t - nk r_2 + \varphi_0) \Rightarrow \\ \Rightarrow u = u_1 + u_2 = U_m \cdot \cos\left(\omega t - nk \frac{r_1 + r_2}{2} + \varphi_0\right),$$

где результирующая амплитуда

$$U_m = 2u_m \cdot \cos\left(nk \frac{r_2 - r_1}{2}\right) = 2u_m \cdot \cos\left(\pi \frac{\Delta d}{\lambda}\right)$$

Нетрудно заметить, что амплитуда суммарного колебания максимальна и равна сумме амплитуд волн, если **оптическая разность хода равна целому числу длин волн**:

$$\Delta d = d_2 - d_1 = m \cdot \lambda, \quad m \in Z$$

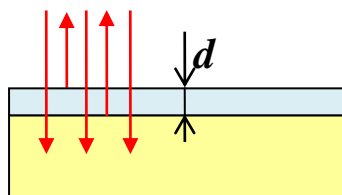
С другой стороны, амплитуда суммарного колебания минимальна и равна разности амплитуд волн, если **оптическая разность хода равна нечетному числу длин полуволен**:

$$\Delta d = (2m + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad m \in Z$$

Эти условия называют условиями наблюдения максимумов и минимумов интерференции. Если интерференция световых волн происходит на экране, то мы можем наблюдать **интерференционную картину** – чередование максимумов и минимумов (светлых и темных полос). Целое число m называют порядком интерференции. В задачах обычно рассматриваются две схемы интерференции: интерференция волн от двух близкорасположенных точечных источников и интерференция двух сходящихся под малым углом плоских волн. Требование когерентности с обычными источниками света выполнить практически невозможно, поэтому для наблюдения интерференции обычно накладывают волны от **одного и того же** источника. Поэтому анализ результата интерференции обычно сводится к вычислению оптической разности хода интерферирующих волн от общей

поверхности постоянной фазы. При этом следует учесть, что при отражении от оптически более плотной среды (т.е. среды с большим n) фаза волны сдвигается на π . Поэтому к длине хода волны, испытывающей такое отражение, следует прибавлять половину длины волны.

Один из наиболее часто используемых в материалах ЕГЭ примеров интерференции – интерференция волн, отраженных от двух границ тонкой пленки. Например, при нормальном падении световой волны из вакуума на тонкую пленку с показателем преломления n_1 , нанесенную на поверхность с показателем преломления $n_2 > n_1$, отражение будет минимальным, если волны, отраженные от обеих поверхностей раздела



сред, взаимно погашают друг друга. Это произойдет, если оптическая разность хода равна нечетному числу длин полуволн. Заметим, что отражение в обоих случаях происходит от оптически более плотной среды ($n_2 > n_1 > 1$), и сдвиг на π происходит для обеих отраженных волн, и не меняет разности хода. Если толщина пленки равна d , то разность хода равна

$2n_1d$ (второй волне нужно дополнительно пройти пленку в обоих направлениях).

Следовательно, минимизация отражения достигается при $2n_1d = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$, то есть при

$d = (2m+1)\frac{\lambda}{4n_1}$, $m = 0, 1, 2, \dots$. Ясно, что снижение отражения означает увеличение

прозрачности границы раздела сред. Такие «просветляющие» покрытия используются на практике во многих оптических устройствах.

Дифракция.

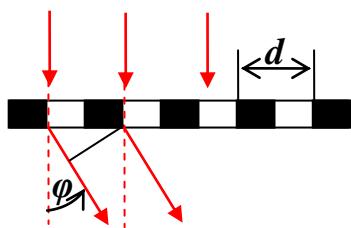
При ограничении волнового фронта вторичные источники на краю препятствия испускают волны в область, находящуюся за ним – волна огибает препятствие. В этом и состоит явление *дифракции*. Оно становится заметным, если размеры препятствия меньше или порядка длины волны. Например, в геометрической оптике считается, что размеры зеркал, линз и т.д. значительно превосходят длину световой волны, и поэтому дифракционным искривлением лучей пренебрегают.

Например, при падении световой волны на очень узкую щель, ширина которой D по порядку величины не очень сильно превосходит λ и сильно меньше расстояния до расположенного за щелью экрана L . Волновое поле за препятствием есть сумма вторичных волн от источников в плоскости щели. На экране, поставленном за препятствием, вследствие дифракции будет наблюдаться «уширенное» изображение щели шириной $x \approx \frac{\lambda L}{2D}$. Можно считать, что параллельный пучок лучей при прохождении через

узкую щель приобрел дифракционную расходимость, причем угол расходимости

$$\Delta\varphi \approx 2 \arctg\left(\frac{x}{L}\right) \approx \frac{\lambda}{D}.$$

Дифракционная решетка – система отражающих или пропускающих полосок («штрихов»), расположенных периодически с периодом d . При достаточно малых d

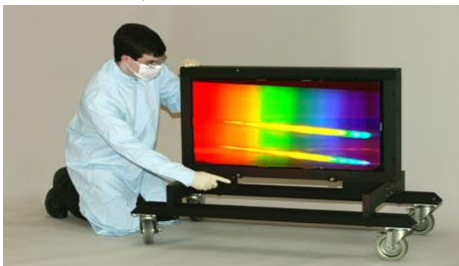


наблюдаются отклонения от законов геометрической оптики: отраженные (или прошедшие) лучи идут под другими углами, чем падающие, то есть наблюдается дифракция. В случае дифракционной решетки максимумы дифракционной картины наблюдаются при значениях углов отражения (или прохождения) φ_m , для которых разность

хода от точек, отстоящих друг от друга на один период решетки, равна целому числу длин волн – в этом случае вторичные волны от разных полосок решетки усиливают друг друга. Для нормального падения волны (см. рисунок):

$$d \cdot \sin(\varphi_m) = m \cdot \lambda, \quad m \in Z.$$

Целое число m называют порядком дифракционного максимума. Следует обратить внимание, что эта величина бывает как положительной, так и отрицательной. В материалах



ЕГЭ именно эта формула чаще всего используется для ответа на вопросы по теме «дифракция». Например, важно понимать, что, поскольку $|\sin(\varphi_m)| \leq 1$, то $|m| \leq \frac{d}{\lambda}$.

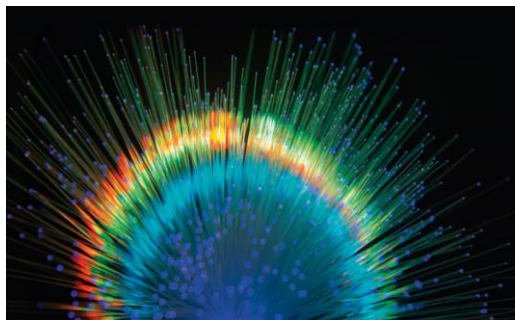
Значит, максимальный порядок дифракционного максимума, который можно наблюдать с помощью решетки с периодом d , есть целая часть от отношения

$\frac{d}{\lambda}$. При этом максимальное количество наблюдаемых максимумов равно $2m_{\max} + 1$, так как

есть еще «главный» порядок ($m = 0$) и отрицательные порядки!

Дисперсия.

Дисперсией света называют явление разделения световых волн разной частоты вследствие зависимости показателя преломления от частоты (или, что в принципе то же самое, от длины волны). В самом деле, если белый свет (который является смесью всех цветов видимой части спектра) направить на призму, то, если показатель преломления имеет разное значение для лучей разных цветов, эти лучи отклонятся на разный угол. Таким образом, разные цвета будут разделены, и на экране, поставленном за призмой, мы



увидим радужную полоску – белый свет разлагается в спектр. Описанный прибор (призма и экран) является простейшим **спектроскопом** – прибором для разделения спектральных компонент излучения. Полезно знать, что спектроскопические исследования – один из основных инструментов современной экспериментальной физики, так как по спектру излучения, испускаемого разными объектами, можно судить об их строении. С

дисперсией света отчасти связано видимое покраснение Солнца на закате: показатель преломления атмосферного воздуха для красных лучей выше, чем для фиолетовых – именно красные лучи дольше всех достигают наблюдателя при закате Солнца. Хотя этот эффект имеет «двойственную» природу – даже в большей степени он связан с тем, что красные лучи менее интенсивно рассеиваются в атмосферном воздухе (а поэтому лучше доходят). Ясно, что на закате участок пути луча от Солнца до глаз наблюдателя, проходящий в воздухе, гораздо больше, чем, например, в полдень, и влияние рассеяния увеличивается (интенсивность рассеяния быстро растет с частотой, а в видимой области минимальная частота именно у красного цвета).

