

Оптика

**Геометрическая оптика.
Интерференция световых волн.
Интерференция в тонких
пластинах.
Интерферометры.**

Что такое свет?

Корпускулярные представления: Ньютон, Планк.

Ньютон предложил считать свет потоком мельчайших корпускул. Это позволило объяснить прямолинейность световых лучей и закон отражения.

Волновые представления: Гюйгенс, Юнг, Френель, Максвелл.

Интерференция и дифракция света никак в эту теорию не вписывались. Теория электромагнитного поля Максвелла показала, что свет – это частный случай электромагнитных волн, то есть процесса распространения в пространстве электромагнитного поля. Волновая оптика объяснила все известные к тому времени световые эффекты.

В начале XX века возродилась корпускулярная теория света, так как были обнаружены явления, которые с помощью волновой теории объяснить не удавалось: фотоэффект, Комpton-эффект и законы теплового излучения. В рамках корпускулярной теории эти явления прекрасно объяснялись, и корпускулы (частицы) света получили специальное название. Макс Планк назвал их световыми квантами (по-русски – порциями), а Альберт Эйнштейн – фотонами.

Корпускулярно-волновой дуализм — принцип, согласно которому любой физический объект может быть описан как с использованием математического аппарата, основанного на волновых уравнениях, так и с помощью формализма, основанного на представлении об объекте как о частице или как о системе частиц.

Геометрическая оптика

Геометрическая оптика – предельный случай волновой оптики, реализующийся при условии, что длина волны много меньше характерных размеров препятствия.

Световой луч — линия, вдоль которой переносится световая энергия.

Основа геометрической оптики - пять законов, открытых экспериментально.

Закон прямолинейного распространения света.

В оптически однородной среде световые лучи распространяются прямолинейно.

Геометрическая оптика

Закон независимого распространения лучей.

Световой луч распространяется независимо от других лучей; освещенность, которую создают несколько лучей, равна сумме освещенностей, создаваемых каждым лучом в отдельности.

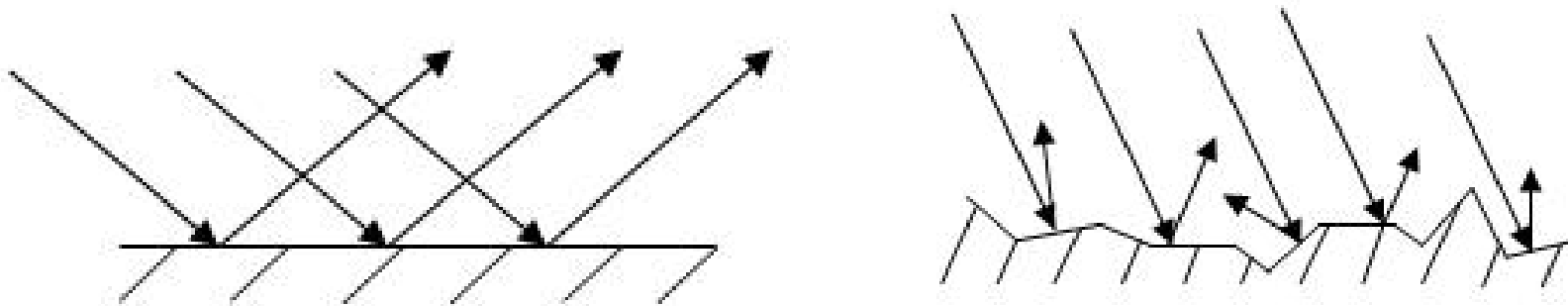
Закон обратимости светового луча.

Световой луч, прошедший по определённой траектории в одном направлении, повторит эту траекторию в точности при распространении в обратном направлении.

Геометрическая оптика

Луч света в однородной среде прямолинейен до тех пор, пока не попадет на границу раздела с другой средой. На границе двух сред луч меняет свое направление. Частично (в некоторых случаях полностью) свет возвращается в первую среду. Это явление называется отражением света. Одновременно свет частично проходит во вторую среду, меняя при этом направление своего распространения. Это явление называется преломлением света.

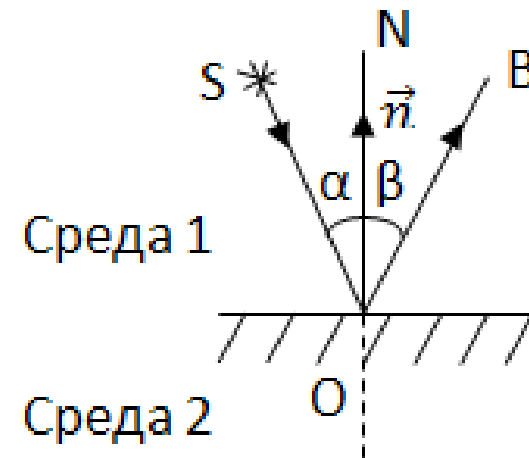
Зеркальное и диффузное отражение



Геометрическая оптика

Закон отражения

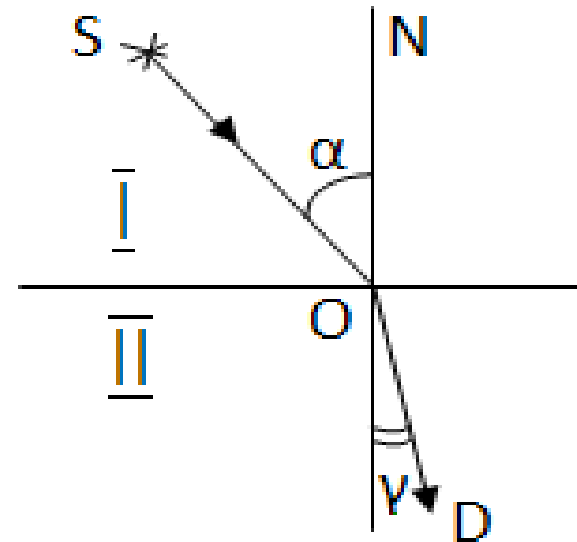
Падающий и отраженный лучи и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; угол падения равен углу отражения.



Геометрическая оптика

Закон преломления света (закон Снеллиуса)

Падающий и преломленный лучи и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения луча, лежат в одной плоскости; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред.



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}$$

n_{21} - относительный показатель преломления второй среды по отношению к первой.

Геометрическая оптика

Если свет переходит из вакуума в вещество, то относительный показатель преломления называют абсолютным показателем преломления вещества.

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad - \text{ абсолютный показатель преломления первой среды}$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2} \quad - \text{ абсолютный показатель преломления второй среды}$$

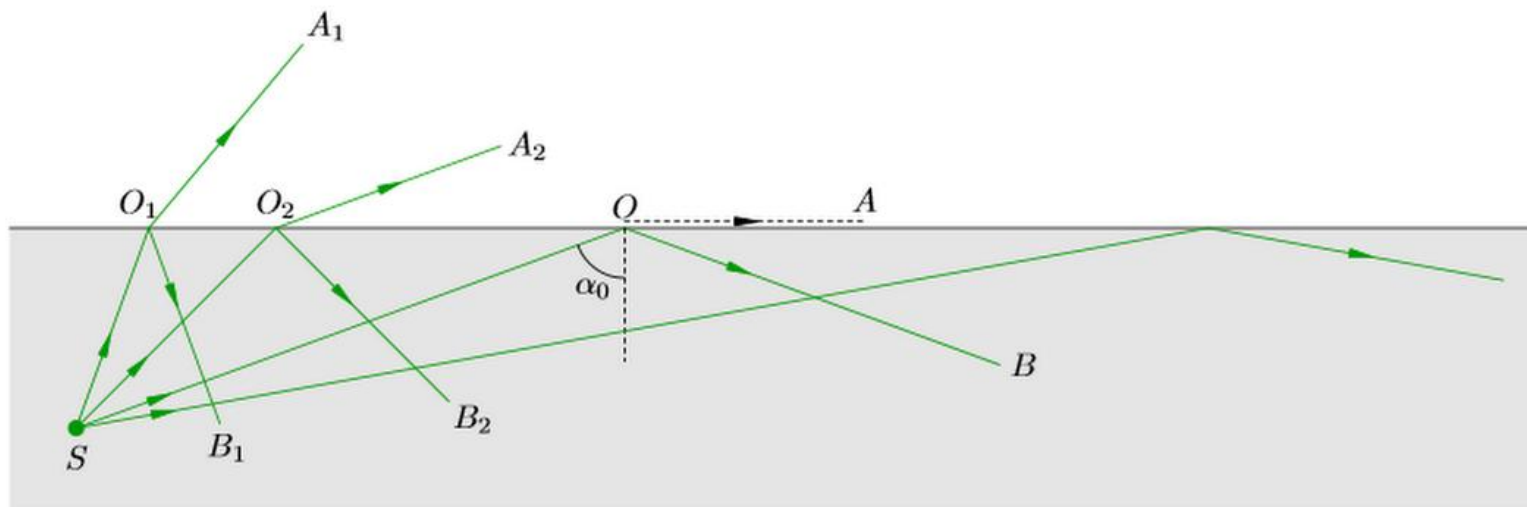
Поскольку для всех сред $v < c$, то абсолютный показатель преломления всегда $n > 1$.

Первая среда оптически более плотная, чем вторая, если $n_1 > n_2$.

Геометрическая оптика

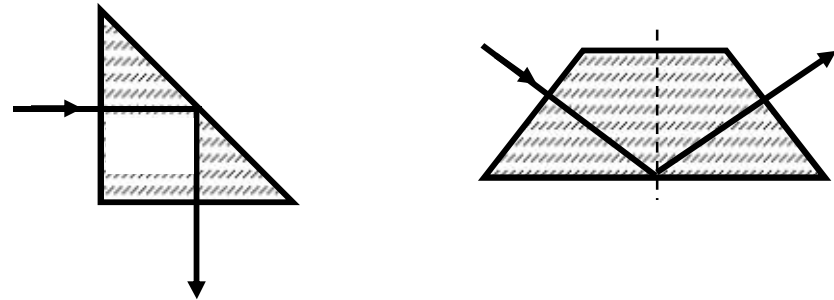
Полное внутреннее отражение.

$$n_1 > n_2$$
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}$$
$$\alpha_0 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$
$$\sin \gamma = 1 \longrightarrow \gamma = \pi/2$$

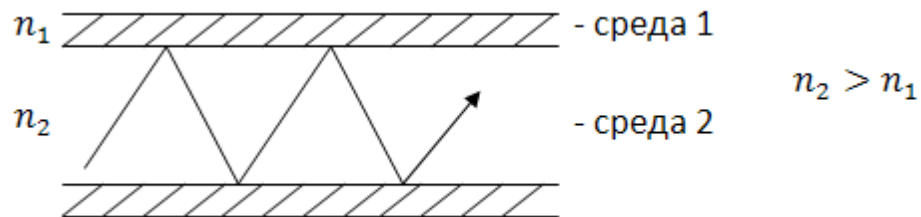


Геометрическая оптика

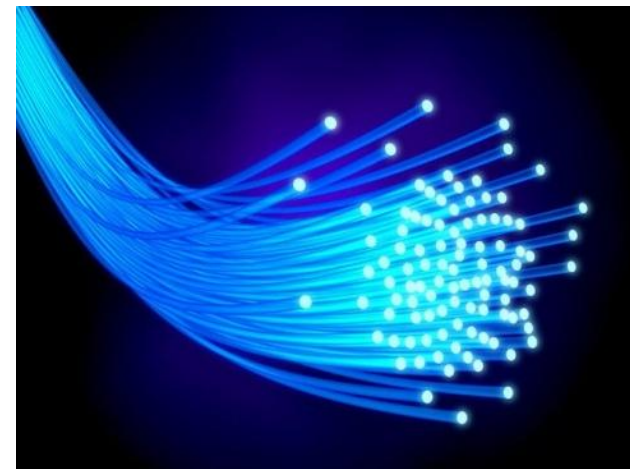
Полное внутреннее отражение.



Волоконная оптика — технология передачи света по нитям из оптически прозрачного материала, осуществляющая перенос света внутри нити посредством полного внутреннего отражения.



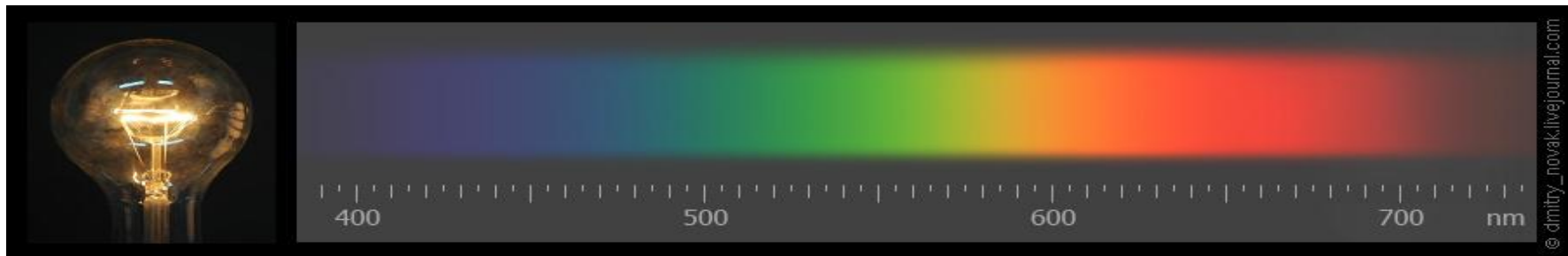
Применение: связь, освещение, медицина.



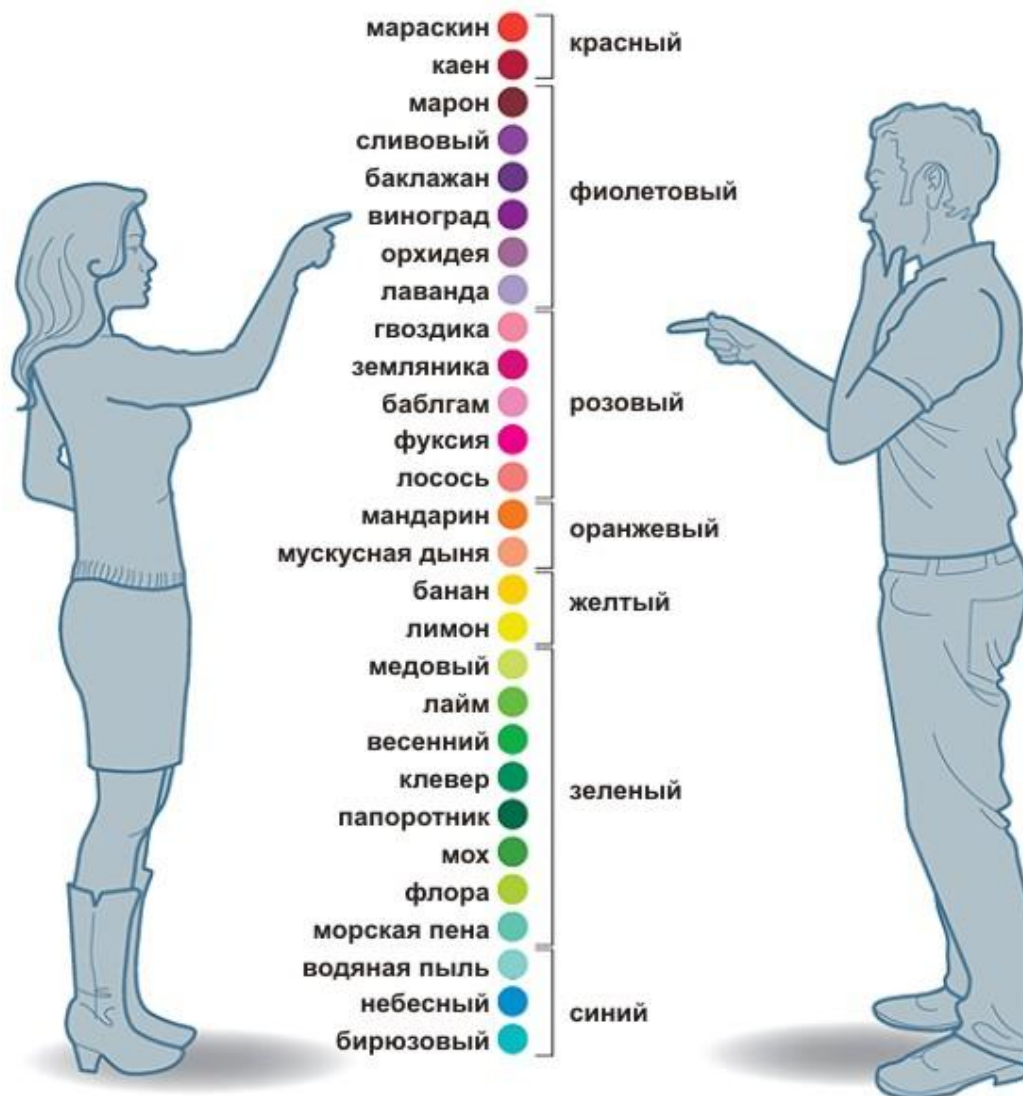
Оптический диапазон электромагнитных волн

Видимый свет – это электромагнитные волны с длинами волн от 450 нм (фиолетовый) до 750 нм (красный). В оптику включаются инфракрасный и ультрафиолетовый диапазон.

Свет солнечный (белый) – смесь разных частот.



Оптический диапазон электромагнитных волн



Излучение и регистрация света

Частота видимого света $\sim 10^{14}$ Гц. Человеческий глаз и любой прибор усредняют колебания во времени.

На рецепторы влияет напряженность электрического поля (световой вектор), а не напряженность магнитного.

Приборы и глаз человека регистрируют интенсивность света.

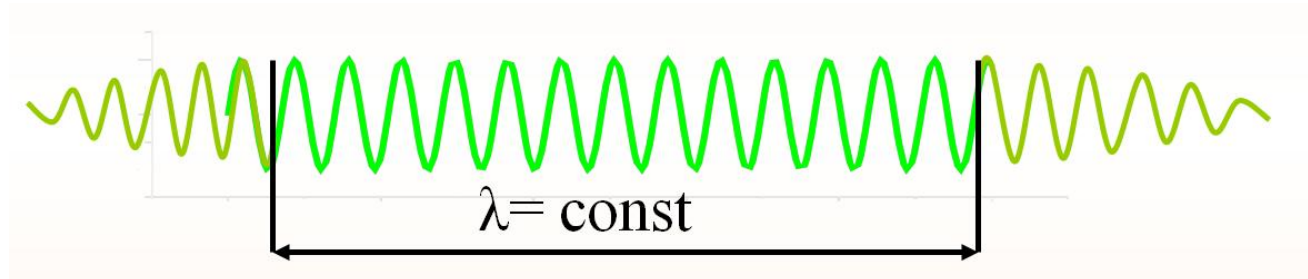
$$I = \left\langle |\vec{E}|^2 \right\rangle$$

Интенсивность пропорциональна энергии электромагнитной волны.

Излучение и регистрация света

Время излучения атома $\sim 10^{-8} \text{ с}$.

Атом излучает не идеальную синусоиду, а волновой цуг.



В одном цуге укладывается примерно 10^7 длин волн.

Излучение атома носит вероятностный характер. Поэтому начальные фазы волновых цугов, последовательно излученных одним атомом, определяются случайным образом и не зависят друг от друга.

Время излучения атомом одного цуга называется временем когерентности. Расстояние, которое проходит свет за время когерентности, называется расстоянием когерентности.

Интерференция

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t - kx_1 + \phi_{01})$$

$$E_2 = A_2 \cos(\omega t - kx_2 + \phi_{02})$$

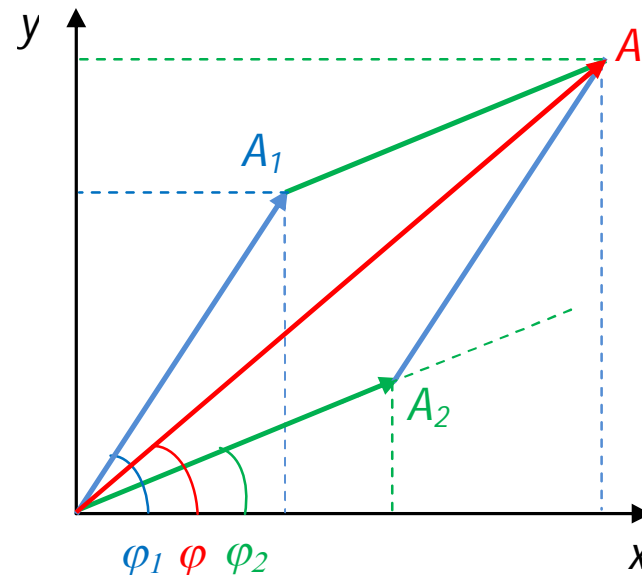
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$$

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = k(x_2 - x_1) + \Delta\phi_0$$

$$\Delta\phi = \phi_{01} - \phi_{02}$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\phi$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \langle \cos \Delta\phi \rangle$$



$$\beta = \phi_1 + \pi - \phi_2$$

Интерференция

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \Delta\varphi \rangle$$

Начальные фазы волновых цугов случайны, поэтому значение косинуса, входящего в интерференционный член, равномерно заполняют значения между ± 1 . Среднее же значение равно нулю.

Для двух некогерентных источников

$$I = I_1 + I_2$$

Интерференция

Интерференция – пространственное перераспределение энергии при наложении двух или нескольких когерентных волн.

$$I = I_1 + I_2 \pm 2\sqrt{I_1 I_2}$$

Колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени. Когерентными могут быть только монохроматические волны.

Интерференция

Разделим световую волну на две, тогда $\Delta\phi_0 = 0$

Пройдя различный путь, волны попадают в точку наблюдения.

$L = nx$ - оптическая длина пути

$\Delta = L_2 - L_1$ - оптическая разность хода

$$\Delta\varphi = k(x_2 - x_1) \quad k = \frac{\omega}{V} = \frac{\omega}{c}n = \frac{2\pi}{\lambda_0}n$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_2x_2 - n_1x_1)$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\Delta$$

Интерференция

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \langle \cos \Delta\varphi \rangle$$

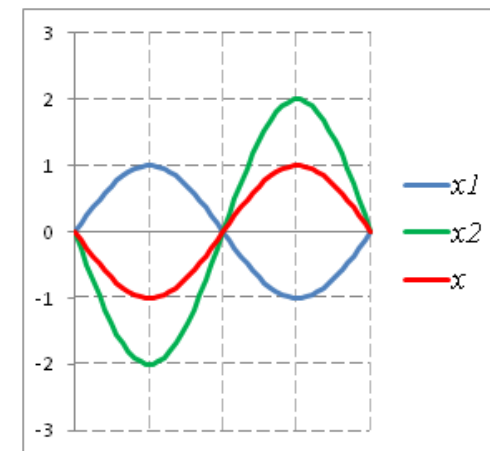
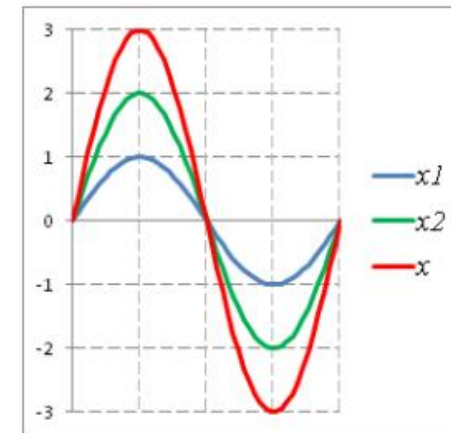
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

Условие интерференционного максимума

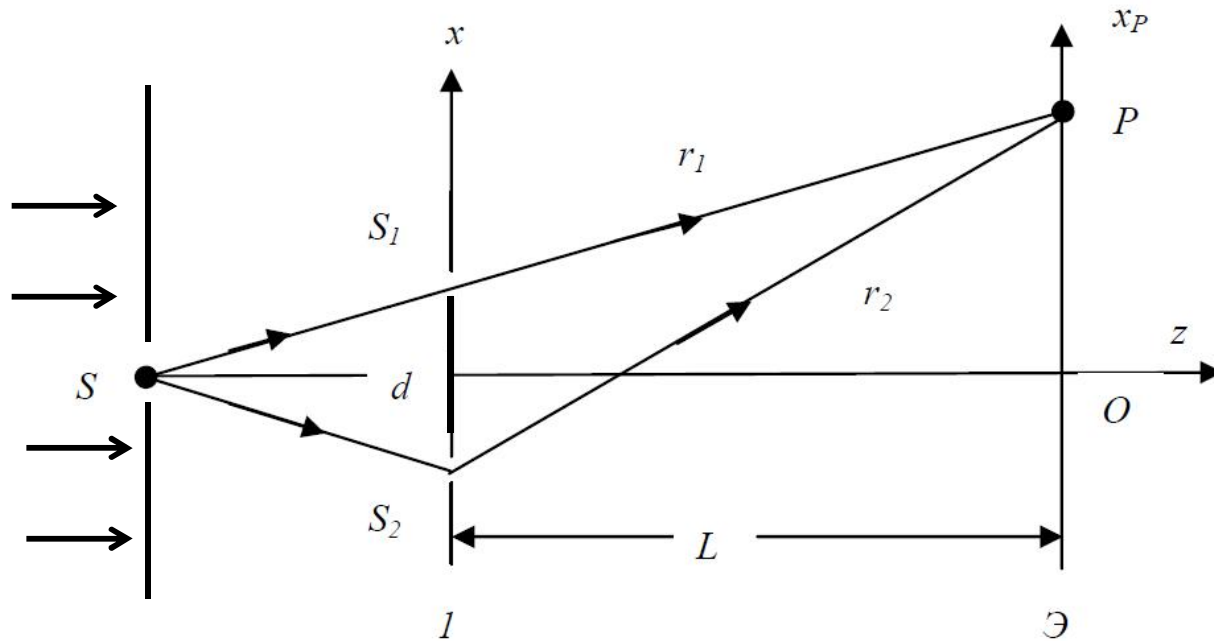
$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

Условие интерференционного минимума

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$



Опыт Юнга



$$r_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$r_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2$$

$$r_2^2 - r_1^2 = 2dx$$

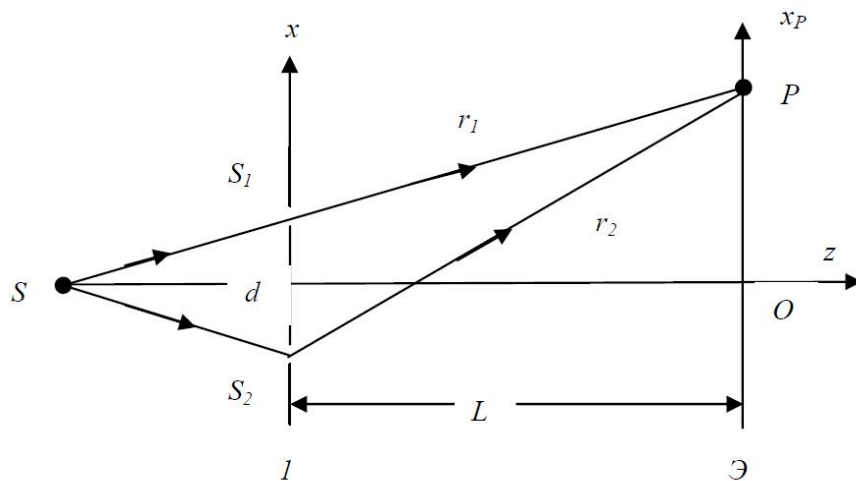
$$L \gg d$$

$$r_2 + r_1 \approx 2L$$

$$\Delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_2 + r_1}$$

$$\Delta = \frac{xd}{L}$$

Опыт Юнга



$$\Delta = \frac{xd}{L}$$

Интерференционный максимум

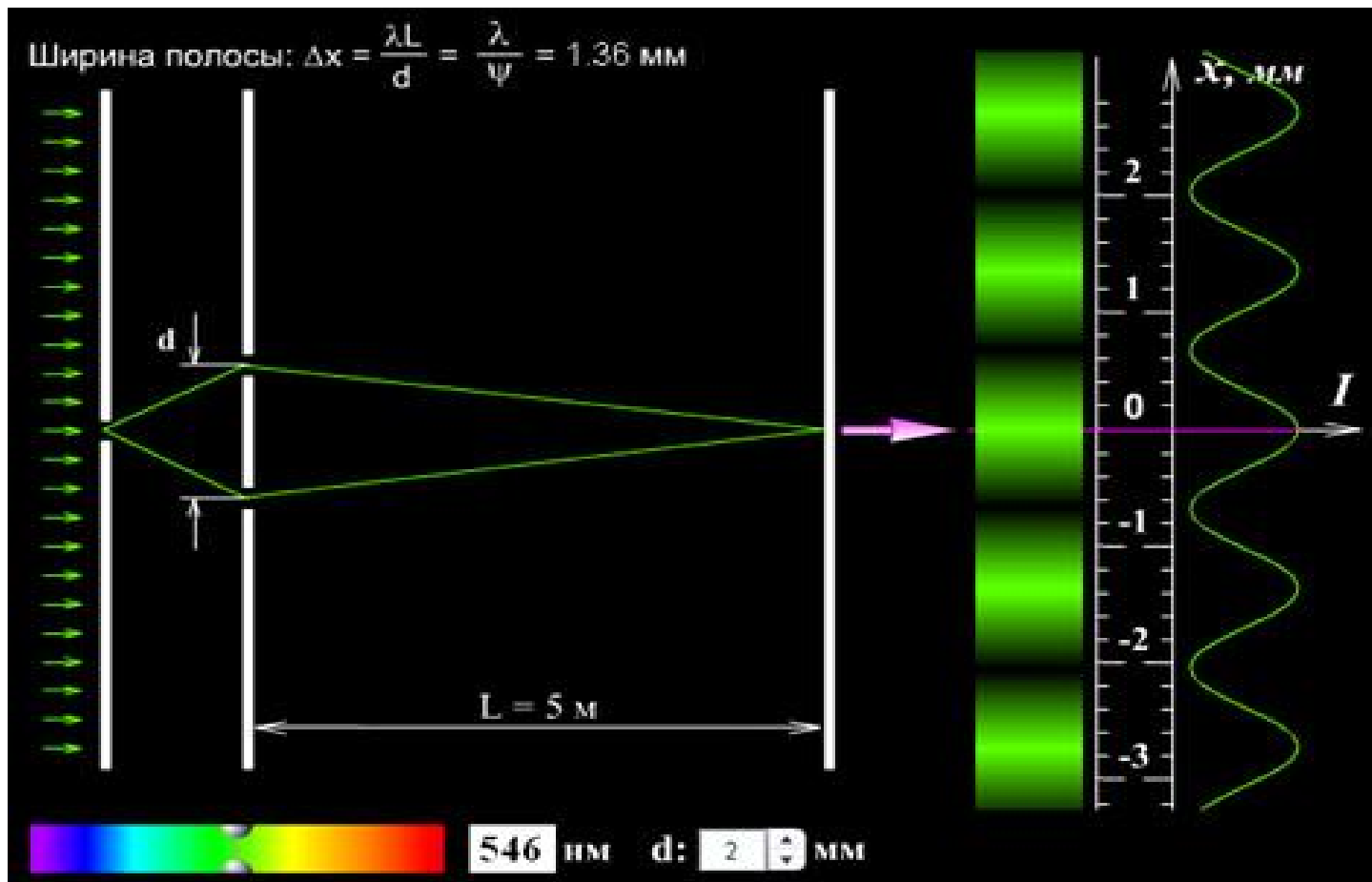
Интерференционный минимум

$$x_{\max} = \pm m \frac{L}{d} \lambda_0$$

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{L}{d} \lambda_0$$

Ширина интерференционной полосы

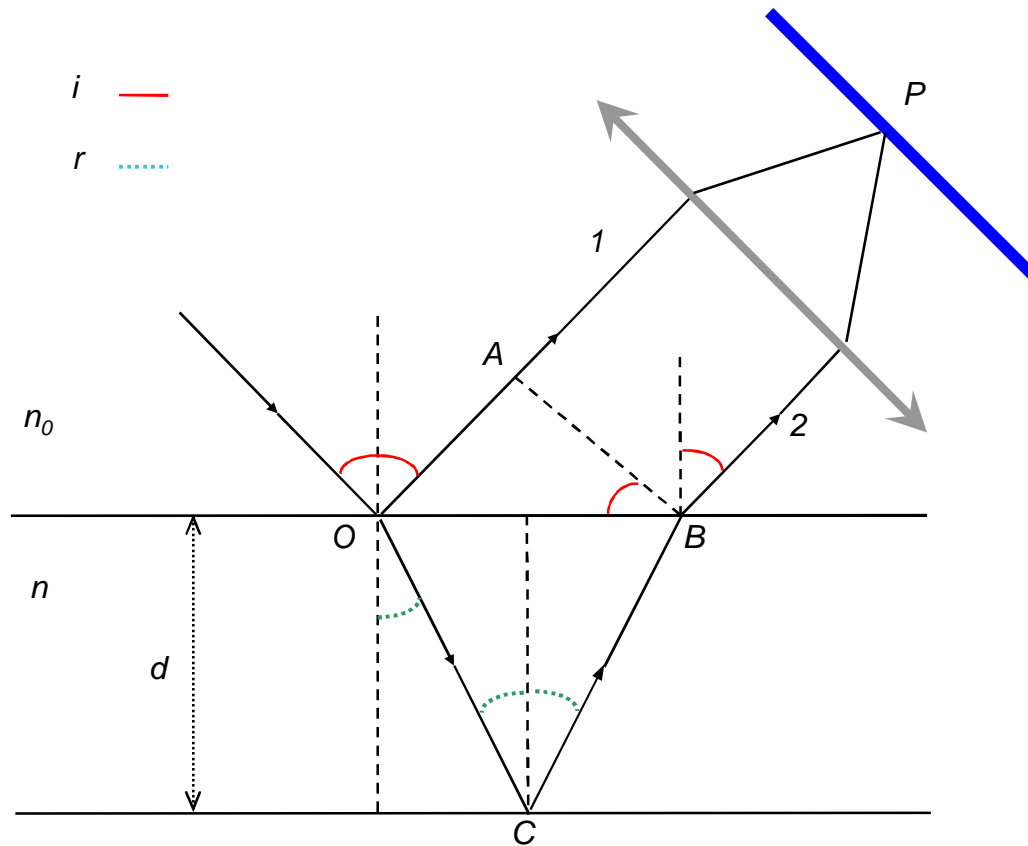
$$\Delta x = x_{\max}(m+1) - x_{\max}(m) = \frac{L}{d} \lambda_0$$



На непрозрачном экране в результате интерференции образуется система светлых и темных полос. Если свет не монохроматический, а, например, белый, то полосы будут радужно окрашены. Исключение составляет центральный (нулевой максимум), он останется белым. Положение остальных максимумов зависит от длины волны.

Интерференция в тонких пластинах

Полосы равного наклона



$$n_0 = 1$$

$$\Delta = n(OC + CB) - OA$$

$$OC = CB = \frac{d}{\cos(r)}$$

$$OB = 2d \cdot \operatorname{tg}(r)$$

$$OA = OB \cdot \sin(i)$$

$$n_0 \cdot \sin(i) = n \cdot \sin(r)$$

$$OA = 2nd \cdot \sin(r) \cdot \operatorname{tg}(r)$$

$$\Delta = \frac{2nd}{\cos(r)} - 2nd \cdot \sin(r) \cdot \operatorname{tg}(r)$$

Полосы равного наклона

$$\Delta = \frac{2nd}{\cos(r)} - 2nd \cdot \sin(r) \cdot \operatorname{tg}(r) \qquad \Delta = 2nd \cdot \cos(r)$$

При отражении от более плотной среды фаза отраженной волны меняется на π . В оптическую разность хода добавляется половина длины волны.

$$\Delta = 2nd \cdot \cos(r) + \frac{\lambda}{2}$$

Условие максимума $2nd \cdot \cos(r) = m\lambda - \frac{\lambda}{2} \qquad m = 0, 1, 2, \dots$

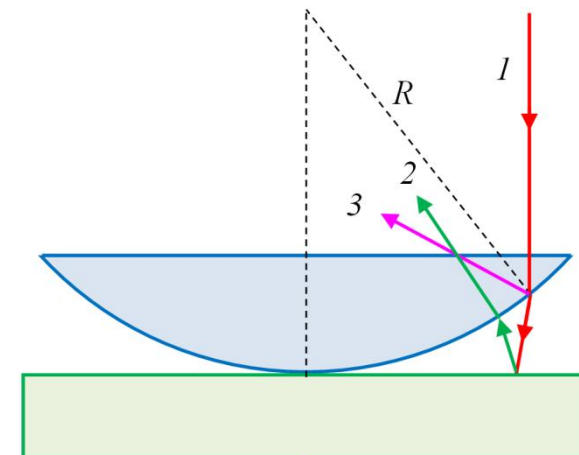
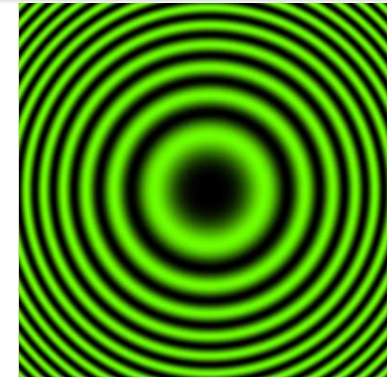
Условие минимума $2nd \cdot \cos(r) = m\lambda$

$$\cos(r) = \sqrt{1 - \sin^2(r)} = \sqrt{1 - \frac{\sin^2(i)}{n^2}} \qquad \Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2(i)} + \frac{\lambda}{2}$$

Полосы равной толщины. Кольца Ньютона.

Частный случай интерференции в тонких пластинах (пленках) - *кольца Ньютона*. Пусть выпуклая поверхность линзы с большим радиусом кривизны R соприкасается в точке с плоской поверхностью хорошо отполированной пластинки. Остающаяся между ними воздушная прослойка постепенно утолщается от точки соприкосновения к краям.

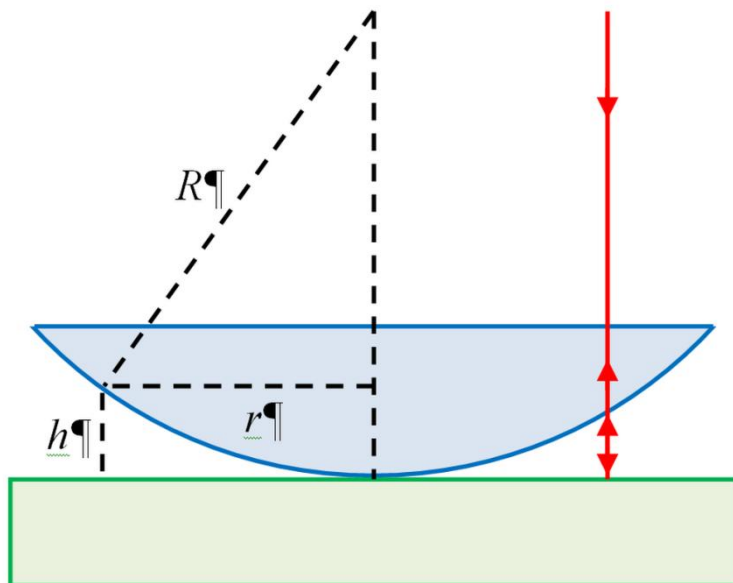
Если на такую оптическую систему сверху вертикально падает пучок монохроматического света, то световые волны, отраженные от криволинейной поверхности линзы и верхней поверхности пластины, будут интерферировать между собой. При этом образуются интерференционные линии, имеющие форму светлых и темных concentрических колец.



1 – нормально падающий на линзу луч; 2 – луч, отраженный от верхней поверхности пластины; 3 – луч, отраженный от криволинейной поверхности линзы.

Полосы равной толщины. Кольца Ньютона.

Поскольку радиус линзы во много раз превышает толщину воздушного зазора, то реальный ход лучей можно заменить упрощенным.



Обозначим как h толщину воздушного зазора между верхней поверхностью пластины и сферической поверхностью линзы на расстоянии r от оси симметрии.

$$R^2 = r^2 + (R - h)^2$$

Поскольку $R \gg h$, то, пренебрегая малыми слагаемыми порядка h^2 , получаем, что

$$h \approx \frac{r^2}{2R}$$

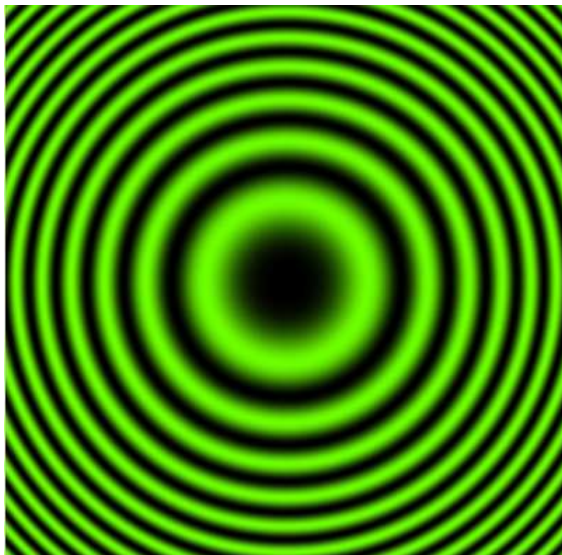
При отражении от нижней пластинки, представляющей оптически более плотную среду, чем воздух, отраженные волны меняют фазу на противоположную. Это эквивалентно увеличению оптического пути на $\lambda/2$.

$$\Delta = 2h + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

Полосы равной толщины. Кольца Ньютона.

В отраженном свете радиусы темных колец удовлетворяют выражению

$$r_m = \sqrt{m\lambda R} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

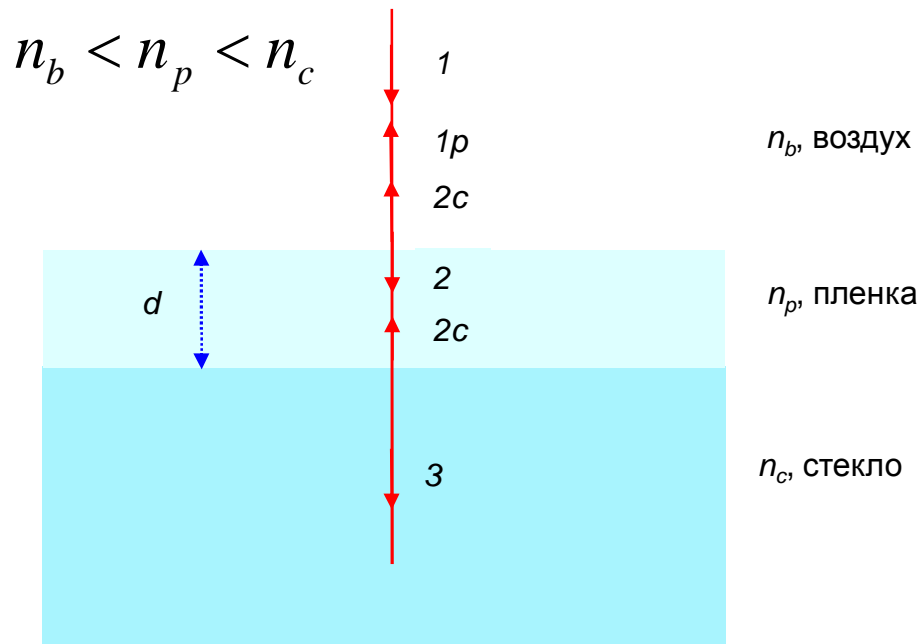


В центре интерференционной картины находится темное пятно (минимум нулевого порядка). Затем, чередуясь со светлыми кольцами, располагаются минимумы $1, 2, 3, \dots, m$ – го порядка.

Интерференционную картину можно наблюдать и в проходящем свете, располагая наблюдателя со стороны нижней поверхности пластины. Интерференционные картины в проходящем и отраженном свете инверсны.

Просветленная оптика

Просветление оптики — увеличение светопропускания оптической системы путем нанесения на поверхность линзы пленки. Величины показателей преломления пленки и стекла линзы подбираются таким образом, чтобы за счет интерференции уменьшить нежелательное отражение.



Эффективное гашение реализуется при равенстве амплитуд обеих отраженных волн, что достигается подбором показателя преломления материала пленки.

Толщина пленки подбирается таким образом, чтобы оптическая разность хода при двойном прохождении световой волной пленки была кратна нечетному количеству полуволн

$$2n_p d = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$$

В этом случае волны, отраженные от границ раздела пленка-воздух и пленка-стекло, будут складываться в противофазе и “гасить” друг друга.

$$n_p = \sqrt{n_c}$$

Интерферометр Майкельсона

Интерферометр — измерительный прибор, принцип действия которого заключается в том, что световой пучок пространственно разделяется на несколько когерентных пучков, каждый из которых, пройдя различные оптические пути, попадает на экран, создавая совместно интерференционную картину.

N, M - зеркала

P – посеребренная пластина

S – монохроматический источник света

