



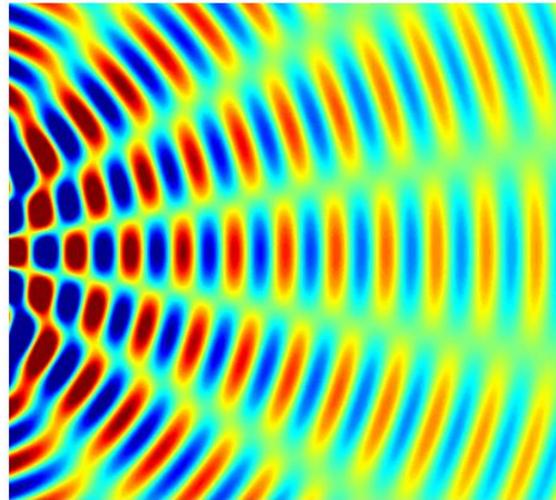
Физические основы компьютерных и сетевых технологий

Семестр 2. Колебания и волны



Музыченко Я.Б.
muzychenko@itmo.ru
2024

Лекція 10. Оптика. Інтерференція світла



- Шкала эм волн. Оптический диапазон.
- Отражение и преломление света на границе раздела двух сред.
- **Интерференция света.**
- Условие возникновения интерференции. Условие минимумов и максимумов интенсивности. Метод деления амплитуды.
- Метод деления волнового фронта.

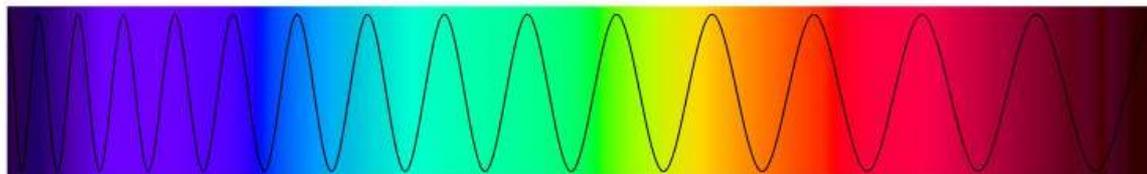
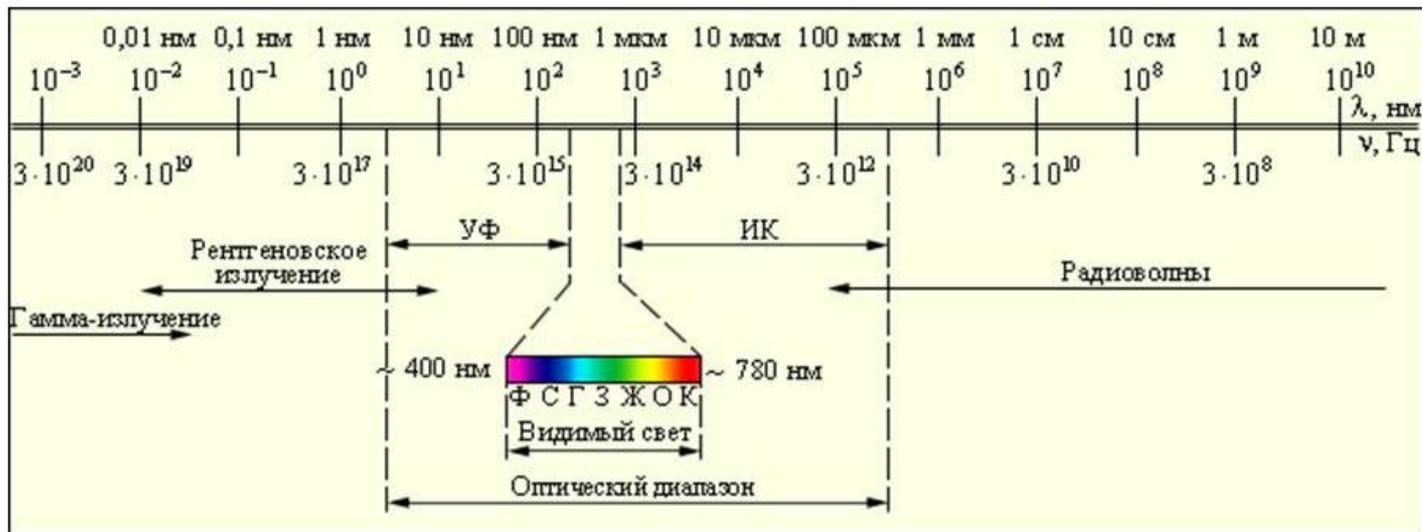
Что такое показатель преломления?

Почему мыльные пузыри окрашены в разные цвета?

Почему не увидеть интерференцию от двух лампочек?

Что называют просветлением оптики?

Шкала электромагнитных волн



ὀπτική (греч.) – видеть, взгляд.

Раздел физики, изучающий явления, связанные с распространением электромагнитного излучения видимого и близкого к нему диапазонов (УФ, ИК).

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = v^2 \Delta \vec{E}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \mu_0 \epsilon \epsilon_0}}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299792456 \text{ м/с}$$

Геометрическая (лучевая):

изучает законы распространения света без учёта его волновой природы (предельный случай волновой оптики при длине волны $\lambda \rightarrow 0$).

Волновая (физическая):

Изучает свет как электромагнитную волну (раздел электродинамики).

Квантовая:

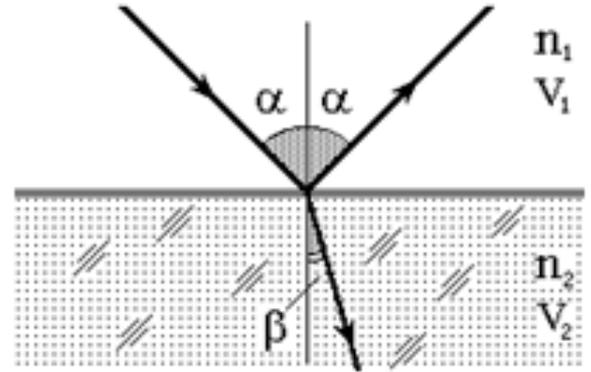
Изучает свет как поток частиц – фотонов.

Закон отражения:

Падающий луч, отраженный луч и перпендикуляр к плоскости падения лежат в одной плоскости, а угол падения равен углу отражения.

Закон преломления:

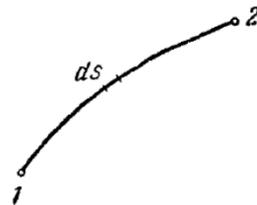
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}$$



Принцип Ферма:

свет распространяется по такой траектории, оптическая длина которой (а значит и время распространения) имеет экстремальное значение.

$$L = \int_1^2 n ds$$



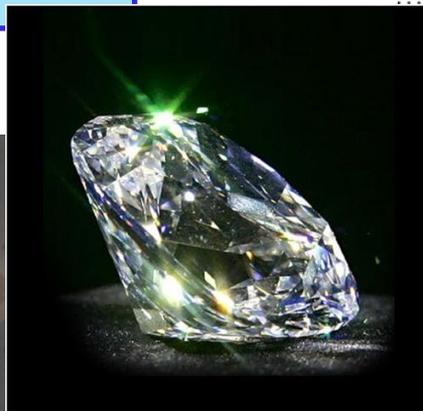
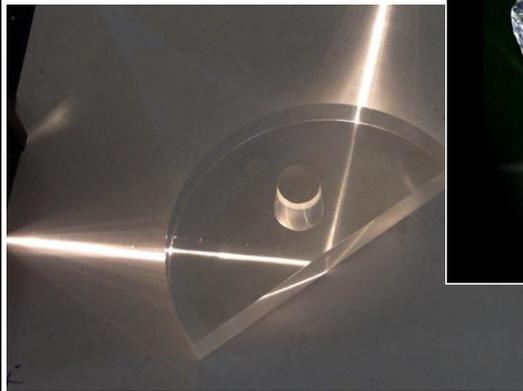
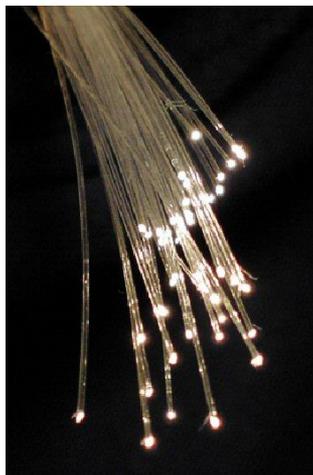
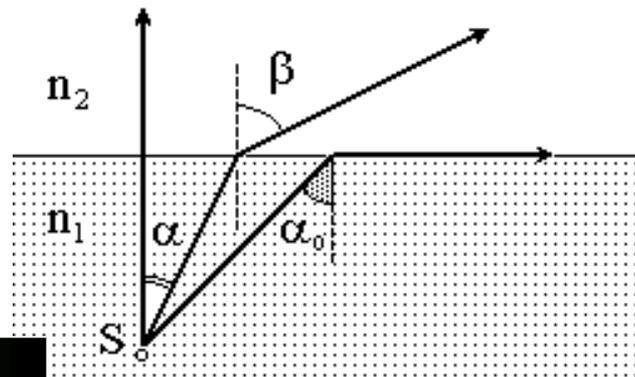
Полное внутреннее отражения

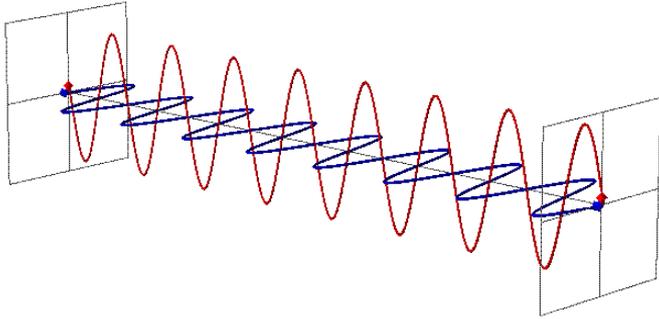
Полное внутреннее отражение:

1 - оптически более плотная среда

$$n_1 > n_2$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} = n_{12}$$





Скорость световой волны:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}} = \frac{c}{n}$$

Показатель преломления:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu\varepsilon}$$

$$n = \sqrt{\varepsilon}$$

$$\vec{E}(x) = \vec{E}_0(x) \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

$$\vec{H}(x) = \vec{H}_0(x) \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

Из опыта: фотоэлектрические, фотохимические, физиологические воздействия вызываются колебанием вектора \vec{E}

Длина волны: $\lambda = vT = \frac{\lambda_0}{n}$

1. Свет с длиной волны 600 нм попадает в среду с показателем преломления 1,5. Как будет окрашен свет в этой среде?
2. Диэлектрическая проницаемость воды равна 81, а показатель преломления 1,33. Как это можно объяснить?

Частота световых колебаний чрезвычайно высока (10^{15} Гц), любой реальный прибор регистрирует усредненное значение потока. **Интенсивность волны** – среднее значение **потока световой энергии**:

$$I = \langle S \rangle$$

$$\begin{aligned} S &= E_0 \cos(\omega t - kr) H_0 \cos(\omega t - kr) = \\ &= \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} E_0^2 \cos^2(\omega t - kr) \end{aligned}$$

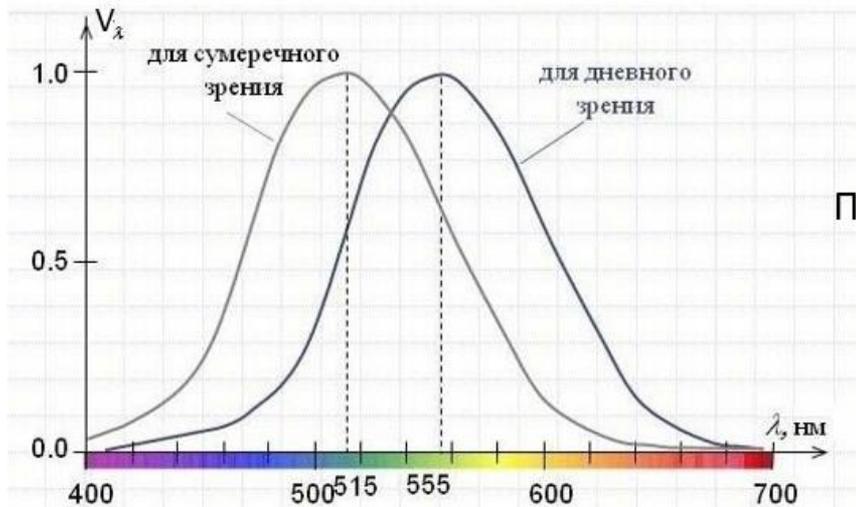
С учетом того, что среднее значение квадрата косинуса по времени равно $\frac{1}{2}$, то

$$I = \langle S \rangle = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} \frac{E_0^2}{2}$$

Энергетические характеристики световой волны

$$\varphi(\lambda) = \frac{d\Phi_\lambda}{d\lambda} \quad \Phi_\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(\lambda) d\lambda$$

Кривая спектральной чувствительности
глаза (кривая видности)



$$\frac{(d\Phi_\lambda)_1}{(d\Phi_\lambda)_2} = \frac{V(\lambda_2)}{V(\lambda_1)}$$

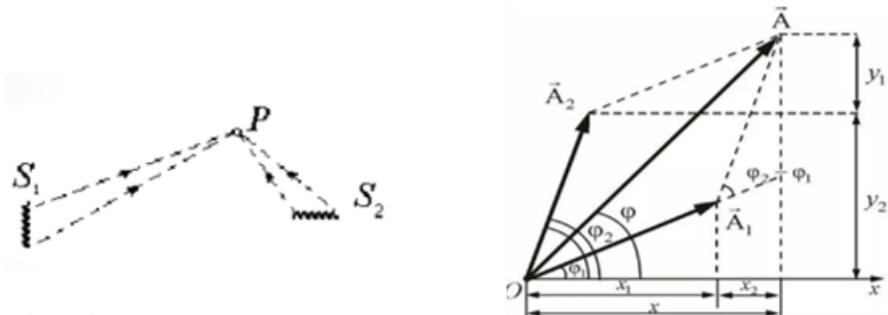
Полный световой поток:

$$\Phi = \int_0^\infty \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

- поток энергии, оцениваемой по зрительному ощущению

Интерференция

Интерференция – перераспределение средней плотности потока излучения (интенсивности) в результате сложения двух и более колебаний



\vec{A}_1, \vec{A}_2 - амплитуды колебаний от источников S_1 и S_2 , δ – разность фаз

Амплитуда результирующего колебания в точке:

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \delta$$

Интенсивность результирующего колебания в точке:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \delta$$

Интенсивность результирующего колебания в точке:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

Если колебания не согласованы:

$$\langle \cos \delta \rangle = 0 \Rightarrow I = I_1 + I_2$$

Интерференции не наблюдается! Колебания не когерентны.

Когерентность – согласованное протекание волновых процессов в пространстве и времени, постоянство разности фаз

$$\cos \delta = 1, \quad \delta = 0, 2\pi, 4\pi \dots \quad \text{Максимум интенсивности}$$

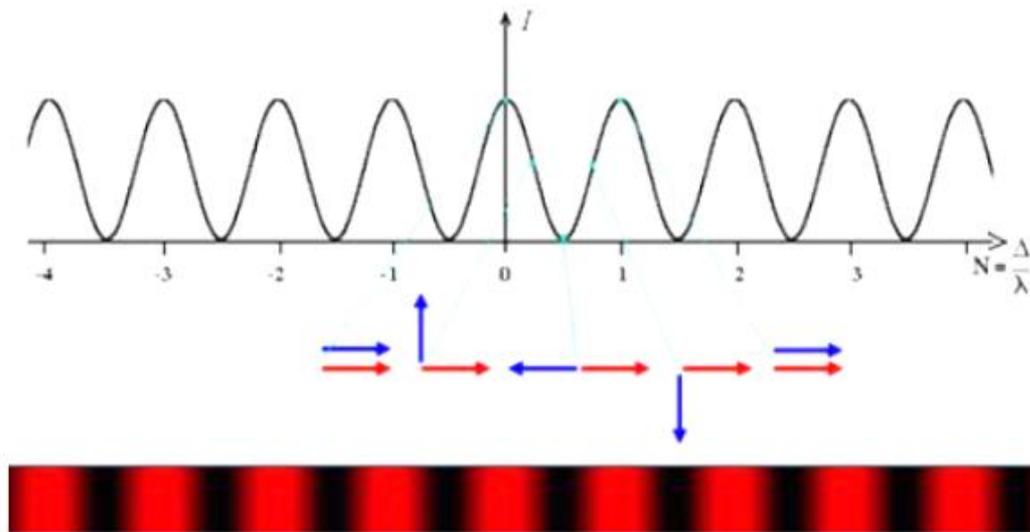
$$\cos \delta = -1, \quad \delta = \pi, 3\pi, 5\pi \dots \quad \text{Минимум интенсивности}$$

Если интенсивности одинаковы:

$$I(P) = 2I_0(1 + \cos \delta)$$

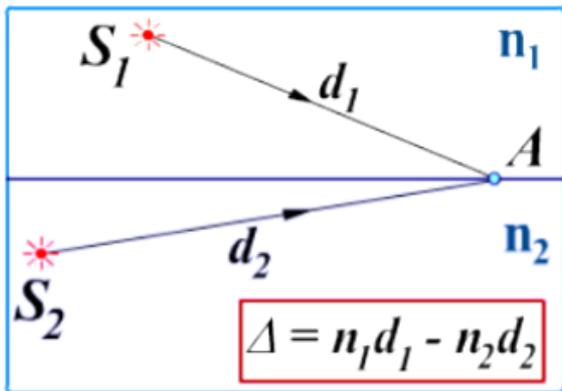
Распределение интенсивности на экране

Порядок интерференции – отношение оптической разности хода (Δ) к длине волны (λ)



$$I(P) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

Оптическая разность хода. Условия минимума и максимума



Оптическая длина пути:

$$(d) = d \cdot n$$

Взаимосвязь разности фаз δ ($\Delta\varphi$)
и ОРХ (Δ):

$$\delta(\Delta\varphi) = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$$

Условие минимумов и максимумов интерференции:

$$\min \quad \Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$\max \quad \Delta = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$x = \frac{\Delta \cdot l}{d}$$

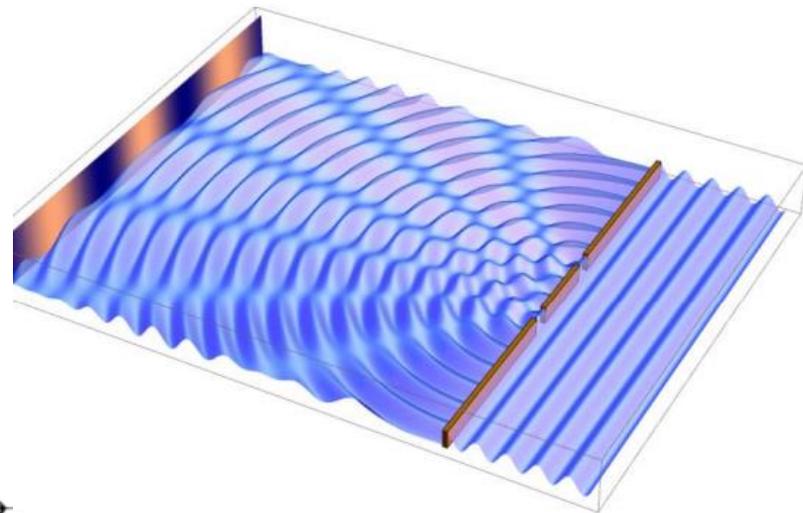
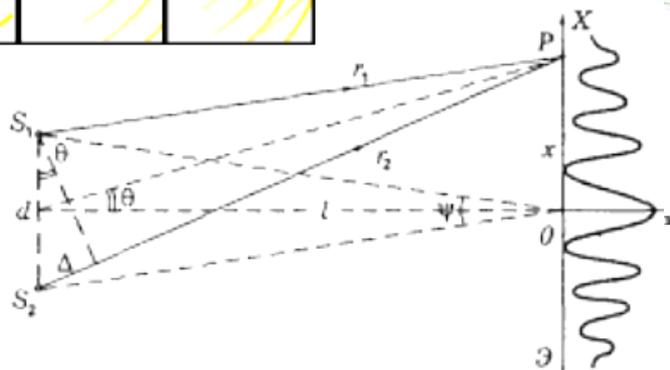
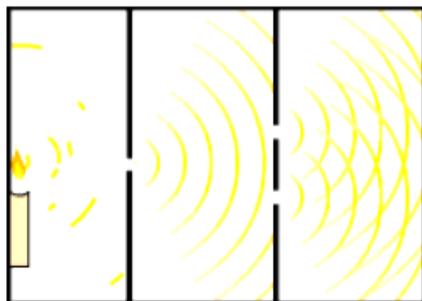
Ширина интерференционной полосы Δx – расстояние между соседними максимумами (минимумами):

$$\Delta x = \frac{\lambda \cdot l}{d}$$

Все схемы наблюдения интерференции методом деления волнового фронта сводятся к схеме Юнга:

бипризма Френеля, бизеркала Френеля, билинза Бийе, зеркало Ллойда.

1803 г.



d – расстояние между щелями;

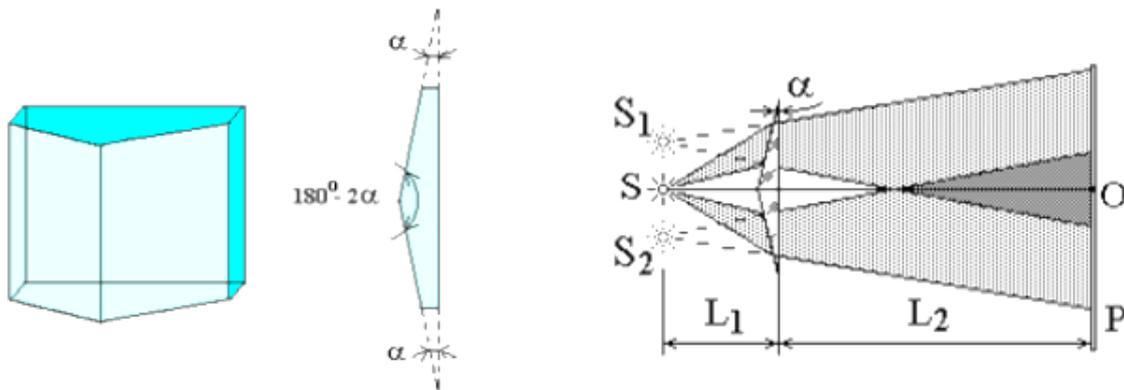
l – расстояние от щелей до экрана;

Ψ – угол, под которым видны оба источника из центра экрана;

x – положение k -го максимума на экране.

Бипризма Френеля

1815 г.



Вследствие малости α все лучи отклоняются бипризмой на одинаковый угол $\theta = \alpha(n-1)$

$$\Delta x = \frac{\lambda(L_1 + L_2)}{2\alpha(n-1)L_1}$$

1. На бипризму падает плоская волна $L_1 = \infty$

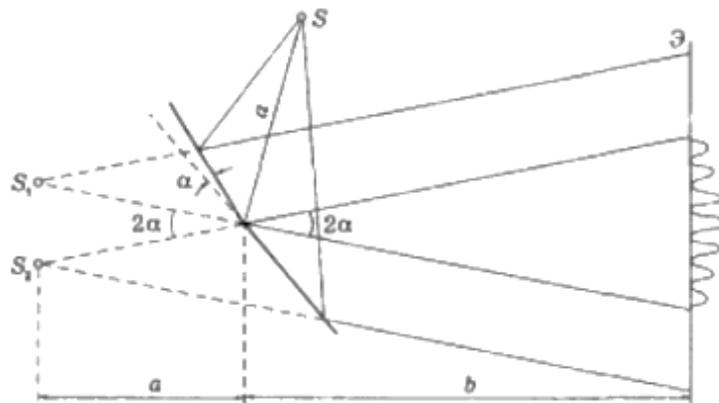
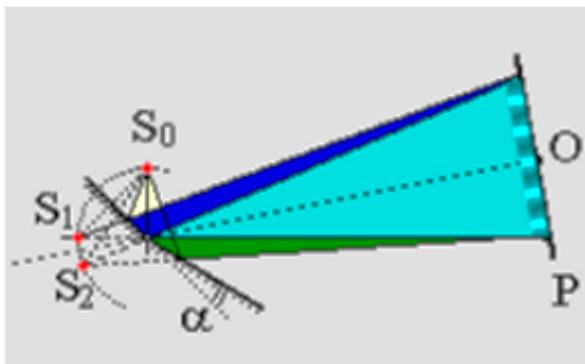
$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha(n-1)}$$

Ширина полосы не зависит от положения экрана.

2. Максимальное число интерференционных полос, наблюдаемых на экране.

$$x = L_2 \cdot 2\alpha(n-1) = \Delta x N_{\max}$$

$$N_{\max} = \frac{L_2 \cdot L_1 \cdot 4\alpha^2 (n-1)^2}{\lambda(L_1 + L_2)}$$



$$\Delta x = \frac{\lambda(a+b)}{2\alpha \cdot a} = \frac{\lambda}{2\alpha} \left(1 + \frac{b}{a} \right)$$

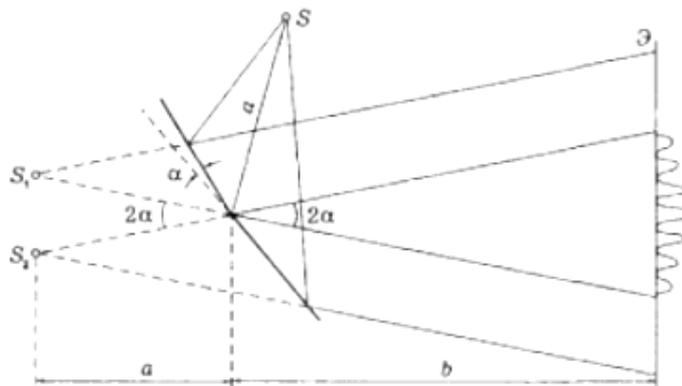
В случае плоской волны $a = \infty$

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

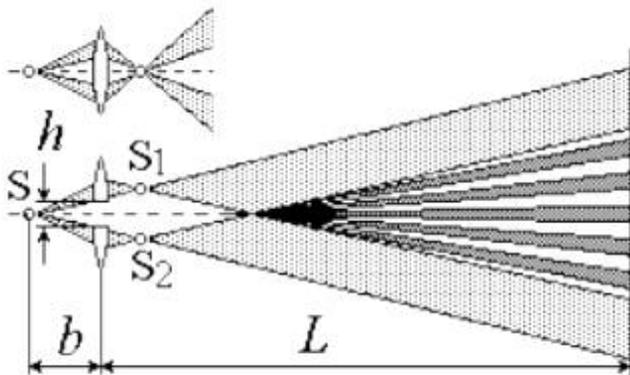
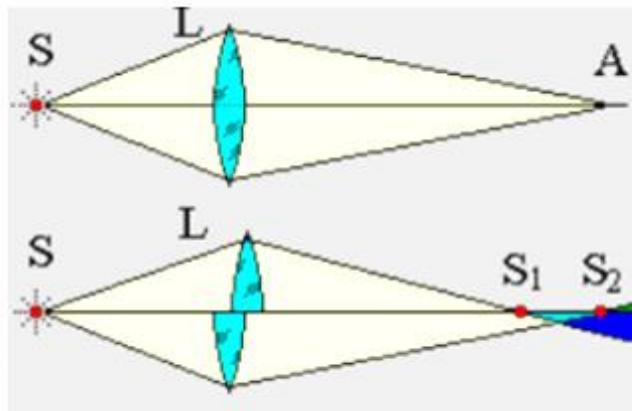
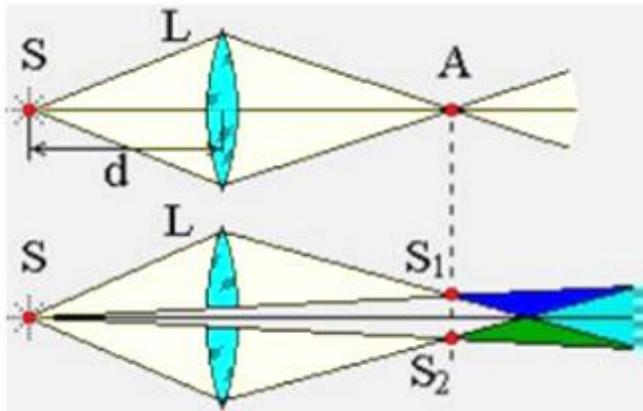
Максимальное число полос, наблюдаемых на экране

$$N_{\max} = \frac{x}{\Delta x}$$

$$x = b \cdot 2\alpha$$



$$N_{\max} = \frac{4\alpha^2 \cdot ab}{\lambda(a+b)}$$

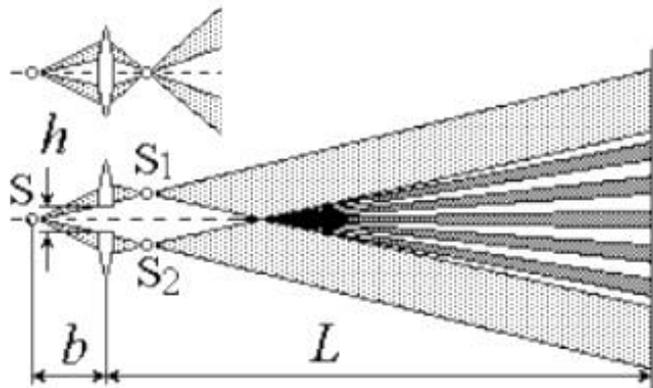


$$\Delta x = \frac{L(b - F) - bF}{hF} \lambda$$

F – фокусное расстояние
линзы

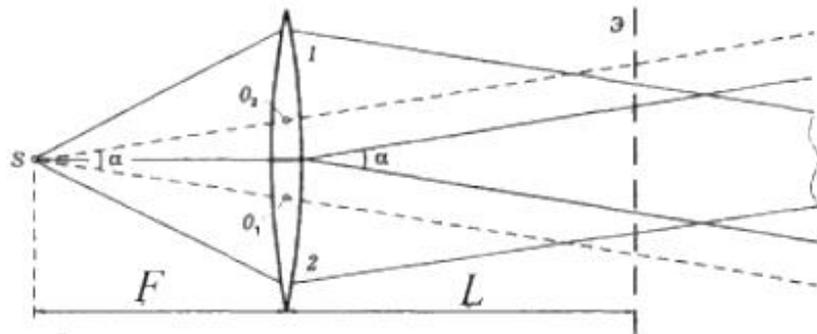
Билинза Бийе

Если источник находится в фокусе:

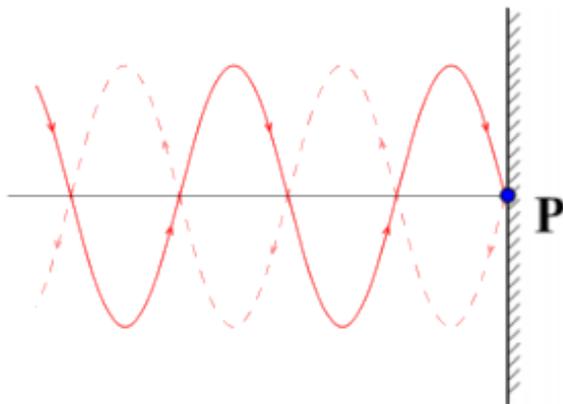
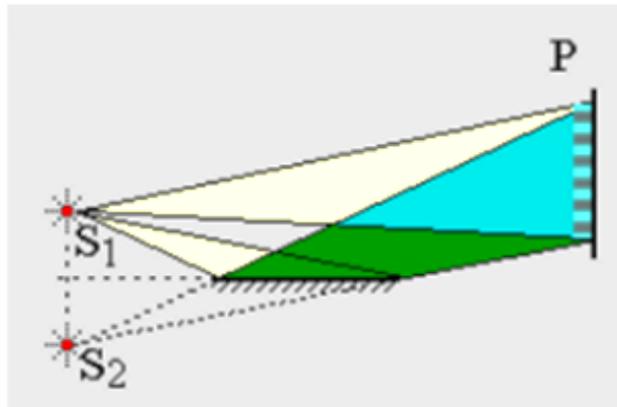


$$\Delta x = \frac{\lambda F}{h}$$

Максимальное число полос на экране:



$$N_{\max} = \frac{Lh^2}{F^2\lambda}$$



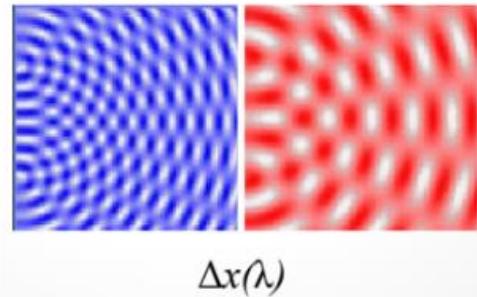
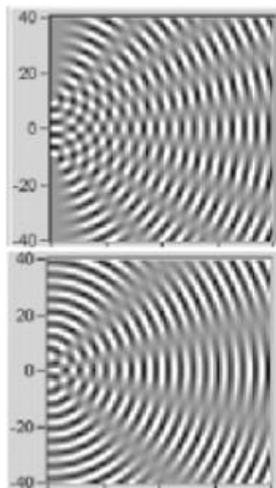
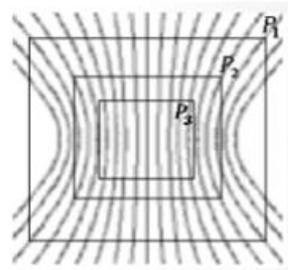
При отражении от зеркала волна претерпевает фазовый сдвиг π . Положения максимумов и минимумов интерференции меняются местами.

$$\Delta = 2h\alpha - \frac{\lambda}{2}$$

*h – высота источника над зеркалом;
 α – угол скольжения.*

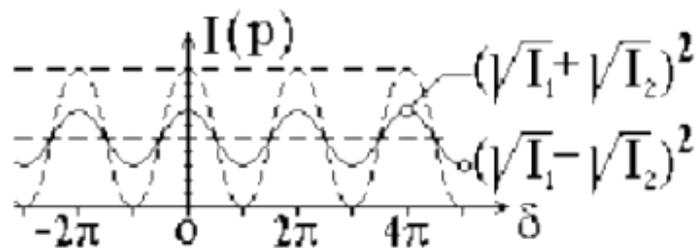
Интерференционная картина

В общем случае интерференционные полосы на экране представляют собой **семейство гипербол**, отвечающих постоянству оптической разности хода



- $\Delta x(d)$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

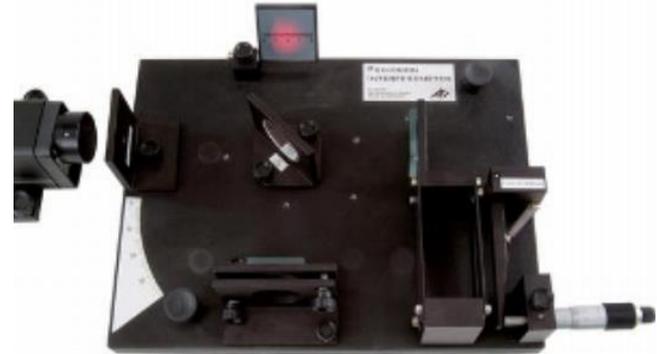
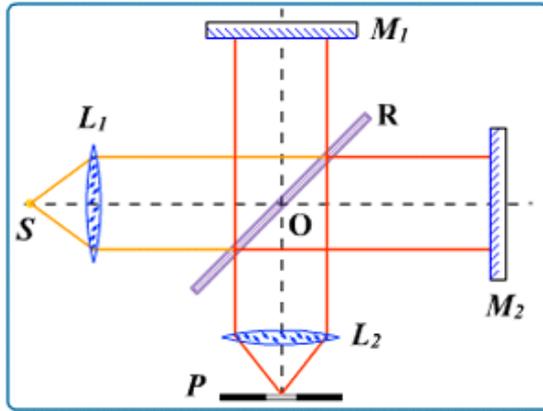


Видность V :

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

$$V_{\max} = 1 \quad V_{\min} = 0$$

Интерферометр Майкельсона

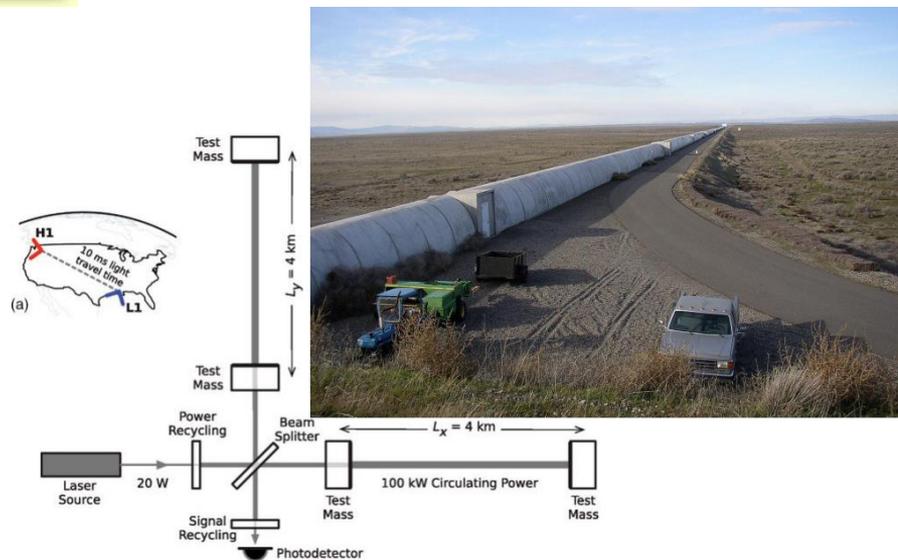


$$\Delta = 2(OM_1 - OM_2)$$

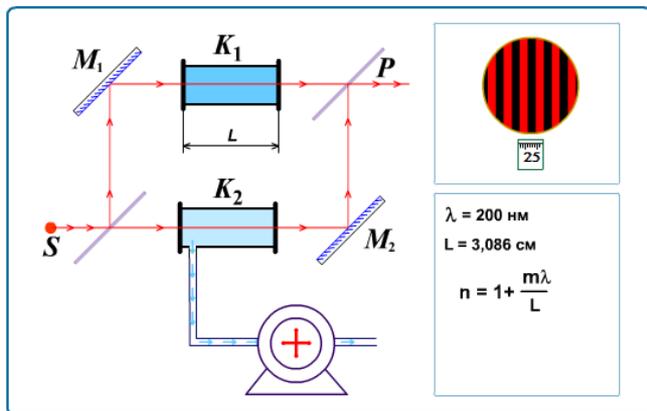
Если $OM_1 = OM_2$ (равноплечий интерферометр) то на экране наблюдается равномерная засветка

Опыт Майкельсона-Морли (1887) – проверка гипотезы существования эфира, измерение скорости света

Интерферометр Майкельсона

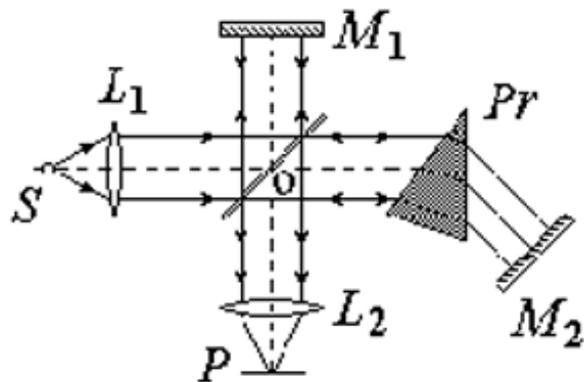


Интерферометр Маха-Цендера



Интерферометр Тваймана-Грина

- используется для контроля оптических элементов.



Задание к лекции. Вариант № 1.

1. Докажите, что при отражении волны от оптически более плотной среды ее фаза меняется на π .
2. Получите закон преломления света из: а) граничных условий б) принципа Ферма

(II) A Michelson interferometer can be used to determine the index of refraction of a glass plate. A glass plate (thickness t) is placed on a platform that can rotate. The plate is placed in the light's path between the beam splitter and either the fixed or movable mirror, so that its thickness is in the direction of the laser beam. The platform is rotated to various angles, and the number of fringes shifted is counted. It can be shown that if N is the number of fringes shifted when the angle of rotation changes by θ , the index of refraction is $n = (2t - N\lambda)(1 - \cos \theta) / [2t(1 - \cos \theta) - N\lambda]$ where t is the thickness of the plate. The accompanying Table shows the data collected by a student in determining the index of refraction of a transparent plate by a Michelson interferometer.

N	25	50	75	100	125	150
θ (degree)	5.5	6.9	8.6	10.0	11.3	12.5

In the experiment $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ and $t = 4.0 \text{ mm}$. Determine n for each θ and find the average n .

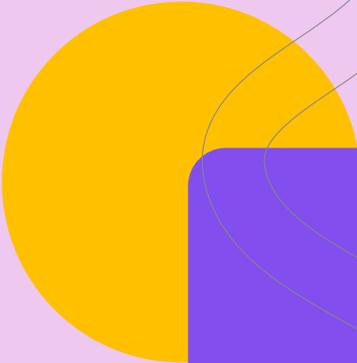
Задание к лекции. Вариант № 2



Визуализация интерференционной картины. Опыт Юнга

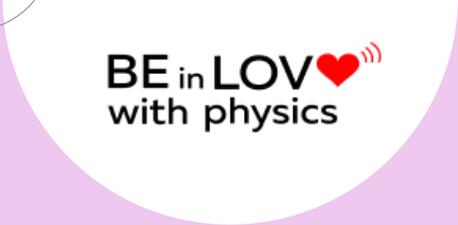
Входные параметры: длина волны, показатели преломления, расстояния между щелями, до экрана.

Внешний вид модели: интерференционная полосы



**Спасибо
за внимание!**

muzychenko@itmo.ru



BE in LOV  
with physics