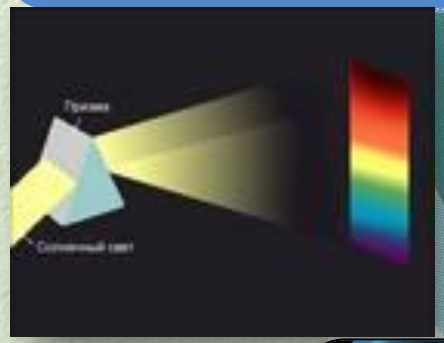
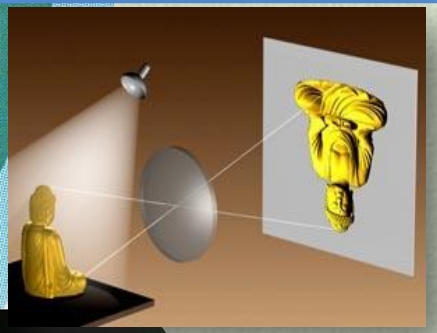
ФИЗИКА

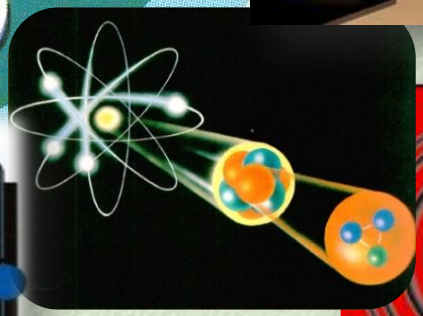
11 КЛАСС

Подготовка к ЕГЭ

Интерференция

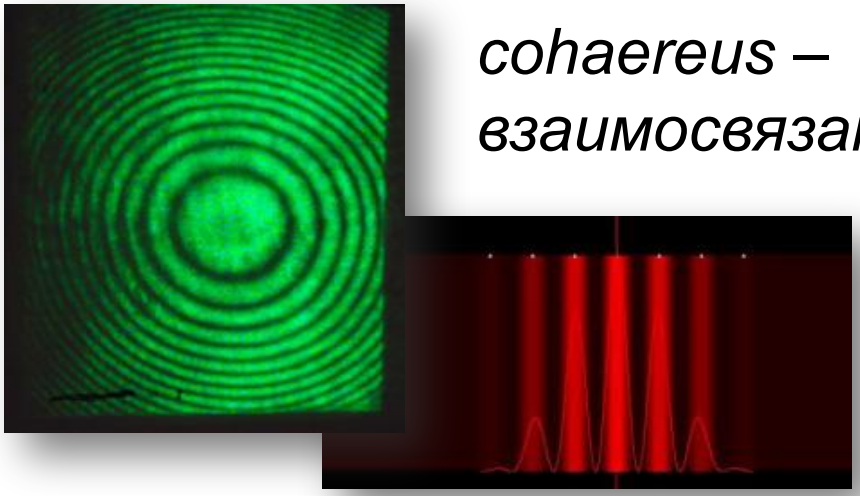






Интерференция света

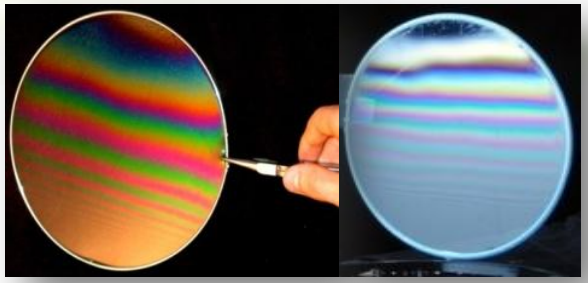
Интерференцией света называется явление наложения **когерентных** световых волн, в результате которого в одних местах пространства возникают **максимумы**, а в других – **минимумы** интенсивности света



cohaereus – взаимосвязанный

Волны с одинаковой частотой и постоянной разностью фаз называются **когерентными**

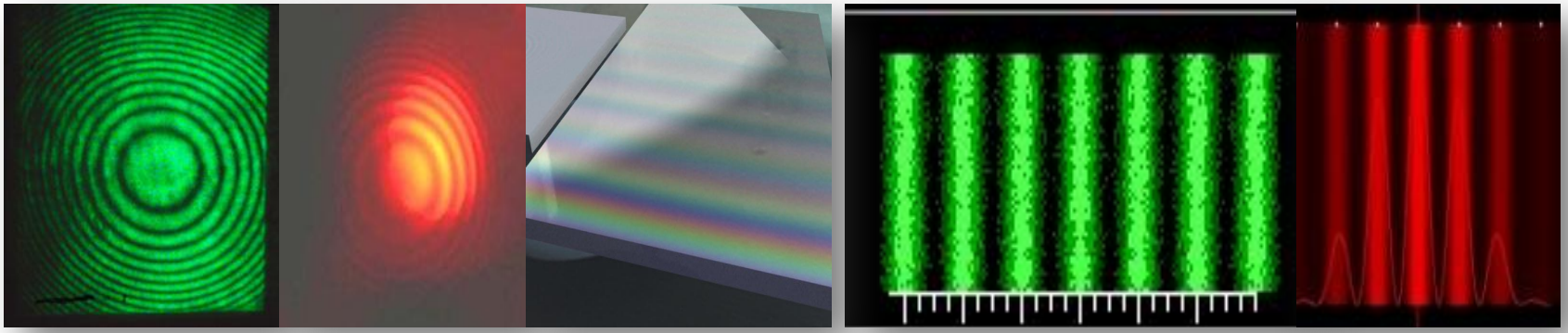
Интерференция света



… Кто бы мог подумать, что свет слагаясь со светом, может вызвать мрак…

Араго

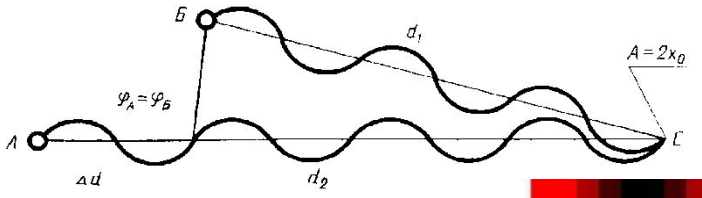
Результат наложения когерентных световых волн, наблюдаемый на экране или фотопластинке в виде регулярного чередования областей повышенной и пониженной интенсивности света, называется **интерференционной картиной**



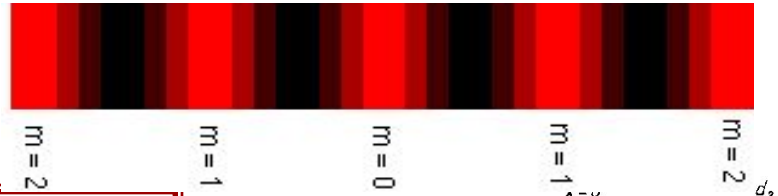
Интерференция света

Условия максимума и минимума

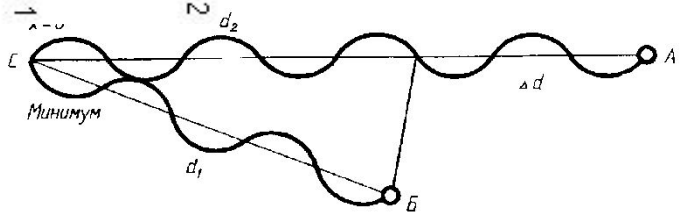
Амплитуда колебаний среды в данной точке **максимальна**, если **разность хода Δd** двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, **равна целому числу длин волн**



$$\Delta d = k\lambda (k = 0,1,2,3...)$$



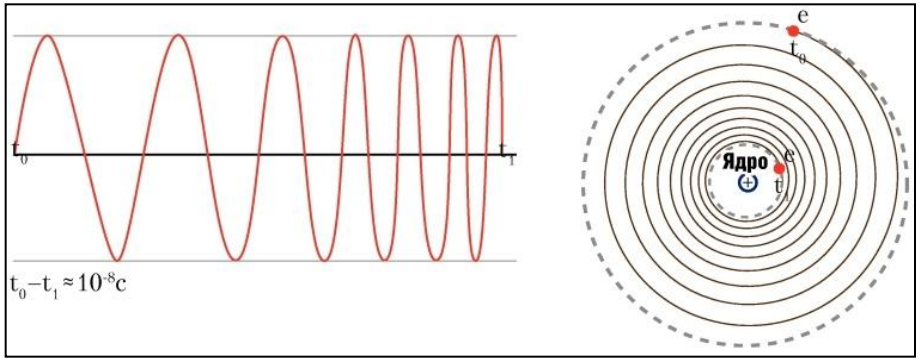
$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2} (k = 0,1,2,3...)$$



Амплитуда колебаний среды в данной точке **минимальна**, если **разность хода Δd** двух волн, возбуждающих колебания в этой точке, **равна нечетному числу полуволн**

Интерференция света

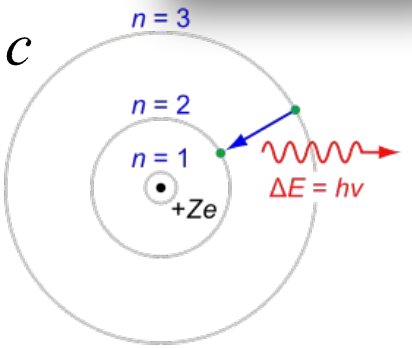
Два независимых источника **естественного** света не являются когерентными!



$$l = cT$$

$$l = 3 \bullet 10^8 \frac{м}{c} \bullet 10^{-8} c$$

$$l = 3м$$



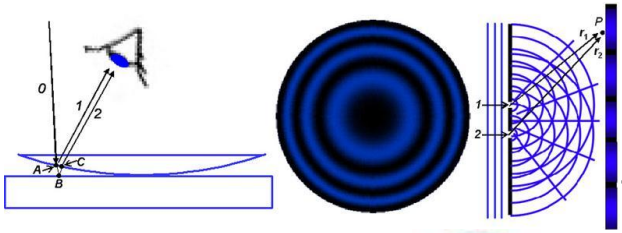
Атомы источников излучают свет **независимо** друг от друга отдельными цугами синусоидальных волн, которые не согласованы друг с другом!

Традиционными **современными** источниками когерентного излучения являются **лазеры**!

Интерференция света

…Надо свет от одного источника разделить на два пучка и, заставив их пройти различные пути, свести вместе…

Огюстен Френель



1

- Зеркала
- Призмы и линзы
- Экраны и щели

2

- Тонкие пленки
- Кольца Ньютона
- Клин

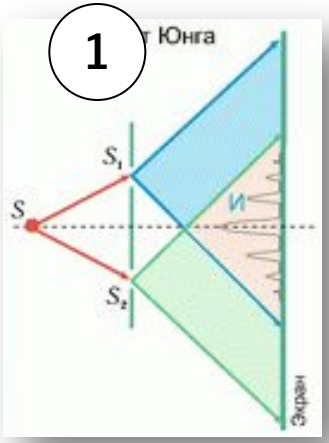
…Когерентные волны от одного источника возникают при отражении света от передней и задней поверхностей тонких пленок…

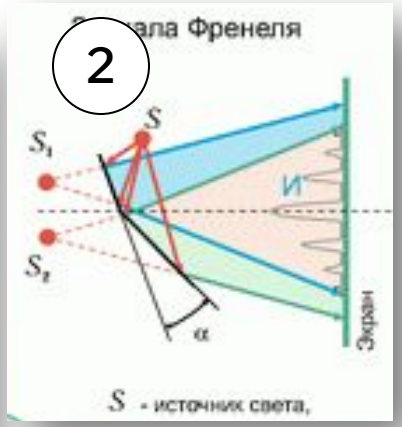
Томас Юнг

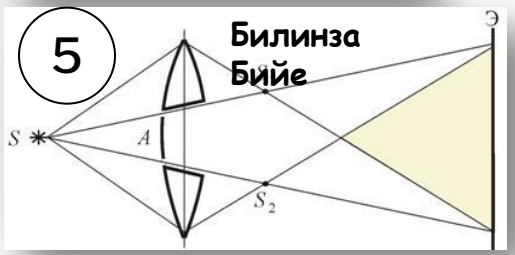
Интерференция света

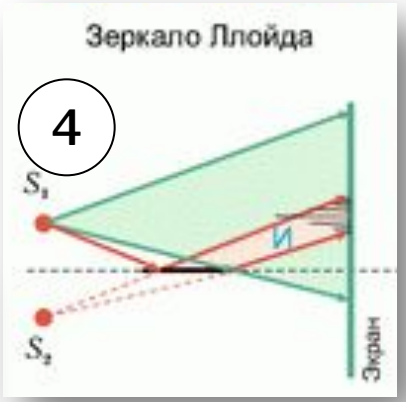
…Надо свет от одного источника разделить на два пучка и, заставив их пройти различные пути, свести вместе…

Огюстен Френель









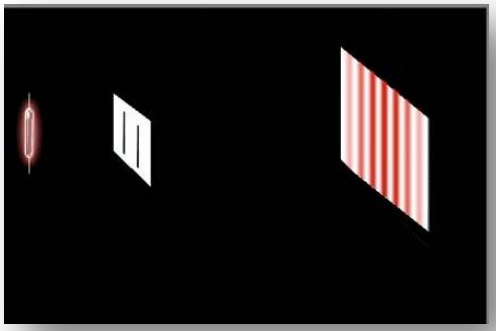
С помощью разделения пучка на две части получают **два мнимых источника** света, дающих когерентные волны!

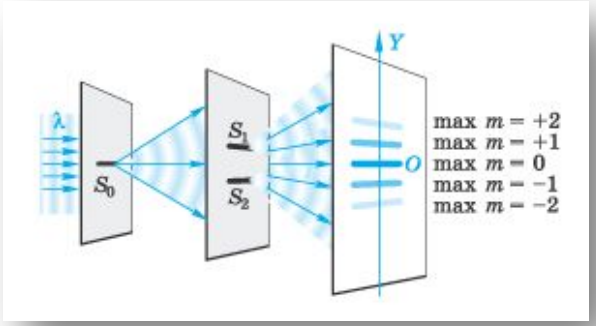
Интерференция света

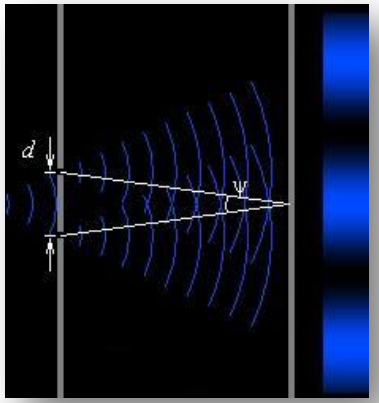
Опыт Юнга

В результате деления фронта волны световые волны, идущие от щелей S_1 и S_2 (шириной около 1 мкм) оказывались когерентными, создавая на экране устойчивую интерференционную картину

Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве



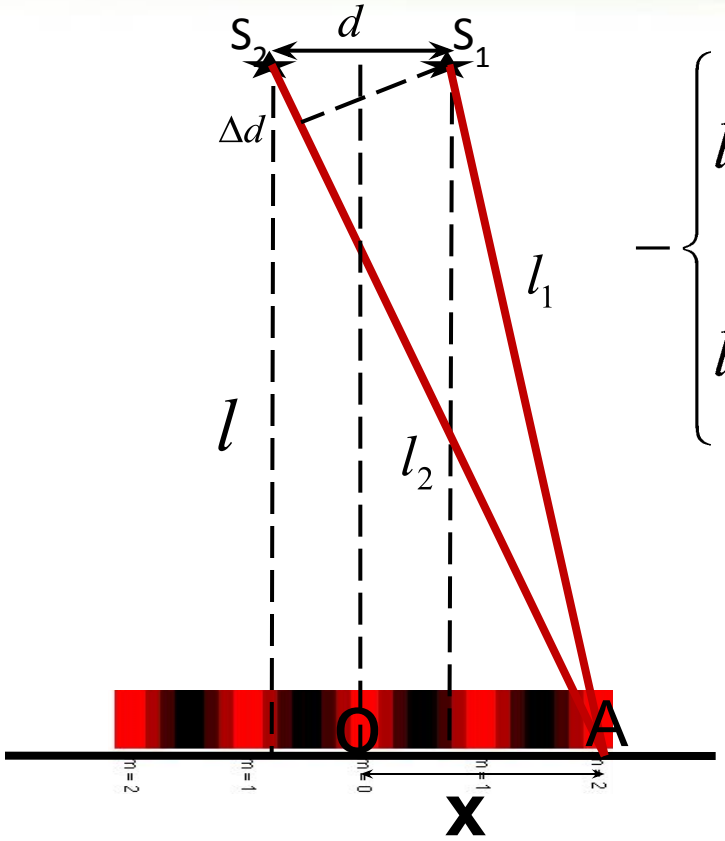




Энергия концентрируется в максимумах за счет того, что в минимумы не поступает совсем!

Интерференция света

Расчет интерференционной картины в опыте Юнга



$$-\begin{cases} l_2^{\,2} = l^2 + \left(x + \dfrac{d}{2}\right)^2 \\ l_1^{\,2} = l^2 + \left(x - \dfrac{d}{2}\right)^2 \end{cases} \Rightarrow x = \frac{\Delta d l}{d}$$

$$x = \frac{\Delta d l}{d} \begin{cases} \Delta d = k\lambda \\ \Delta d = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \end{cases}$$

Расстояние между интерференционными полосами зависит от длины волны **λ**, *расстояния от мнимых источников до экрана* **l** *и расстояния между мнимыми источниками* **d**

Интерференция света

Ключевая ситуация №2 (В)

…При изучении наук задачи полезнее правил…

Ньютон

Когерентные источники монохроматического света, расстояние между которыми 120 мкм, имеют вид узких щелей. Экран на котором наблюдается интерференция света от этих источников, находится на расстоянии 3,6 м. Расстояние между центрами соседних светлых полос равно 14,4 мм. Найдите длину волны монохроматического света

Дано

$\Delta x = 14{,}4 \cdot 10^{-3}\ м$

$d = 1{,}2 \cdot 10^{-4}\ м$

$l = 3{,}6 м$

$\lambda = ?$

Анализ

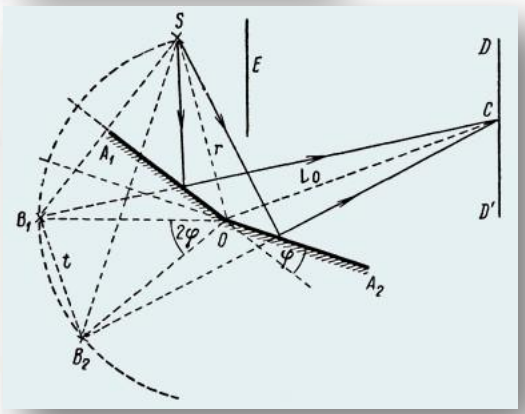
$$-\begin{cases} x_1 = \dfrac{\Delta dl}{d} = \dfrac{k_1 \lambda l}{d} \\ x_2 = \dfrac{\Delta dl}{d} = \dfrac{k_2 \lambda l}{d} \end{cases} \Rightarrow \Delta x = \frac{\lambda l}{d} \Rightarrow \lambda = \frac{d\Delta x}{l} = 480 нм$$

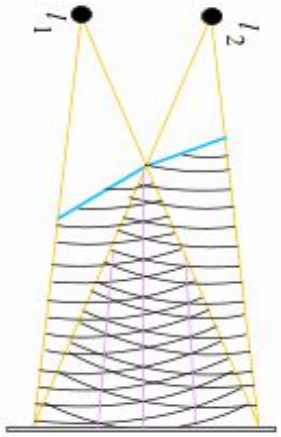
$$x = \frac{\Delta dl}{d} \begin{cases} \Delta d = k\lambda \\ \Delta d = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \end{cases}$$

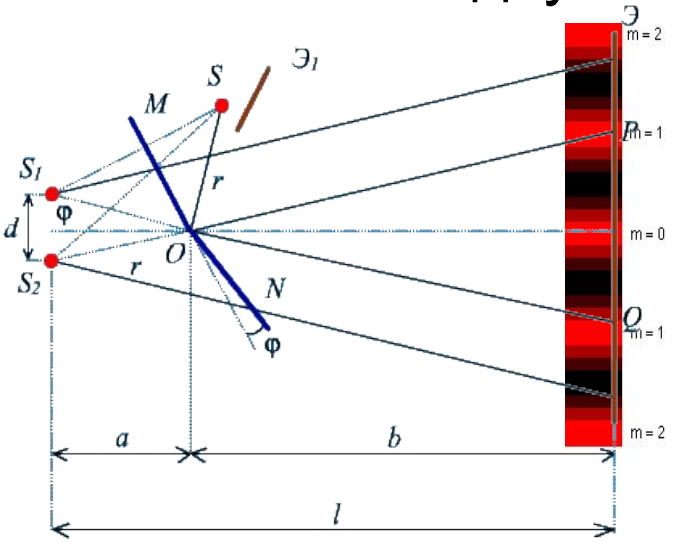
Интерференция света

Зеркала Френеля

Френель предложил в качестве двух когерентных источников воспользоваться двумя изображениями одного и того же действительного источника света в двух плоских зеркалах



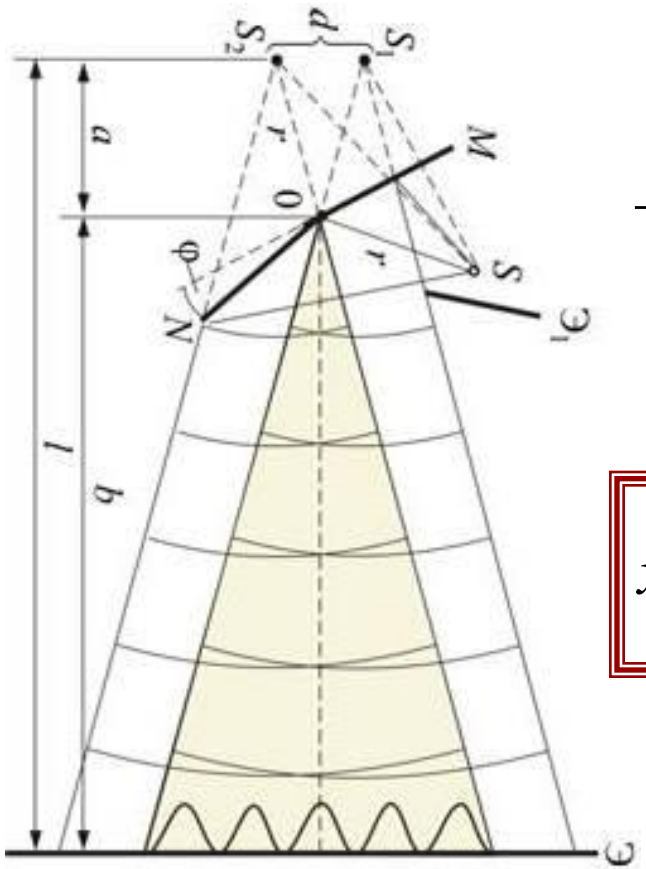




Почему в центре интерференционной картины всегда светлая полоса?

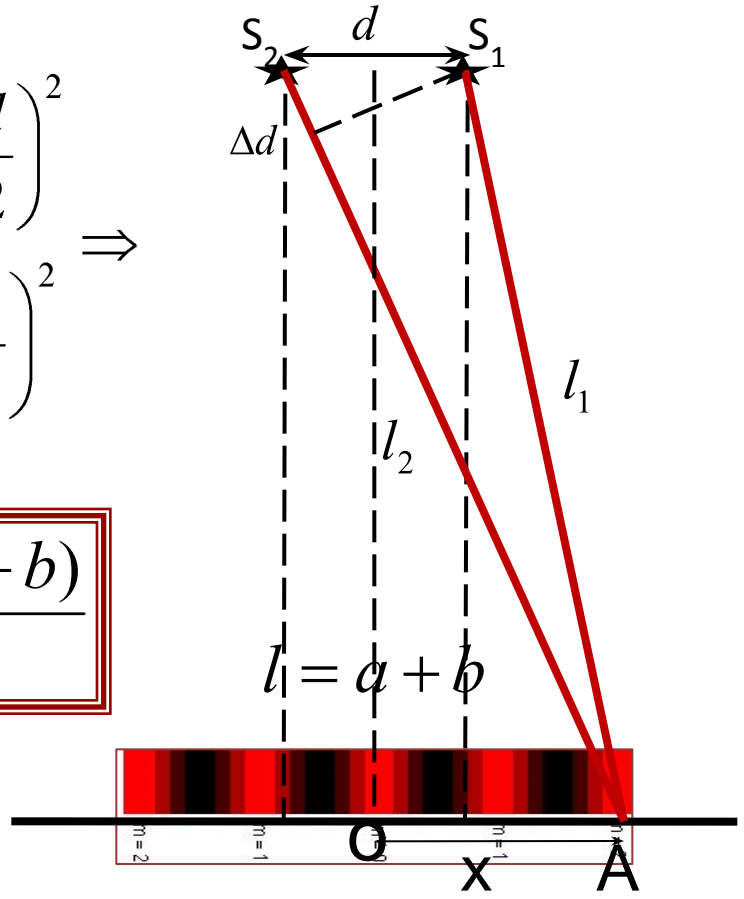
Интерференция света

Расчет интерференционной картины в опыте Френеля

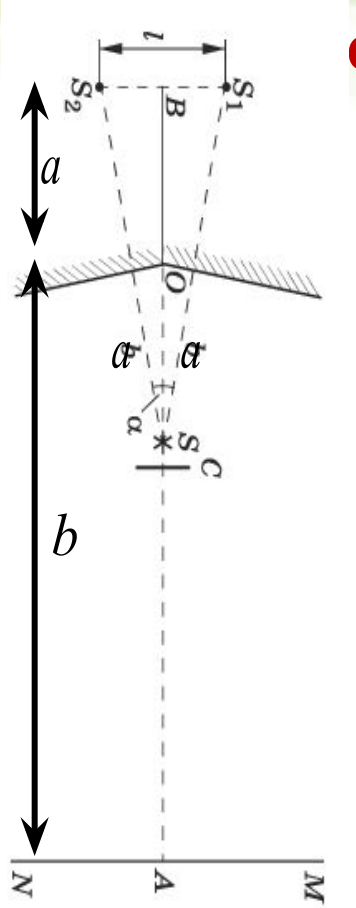


$$-\begin{cases} l_2^{\,2} = l^2 + \left(x + \dfrac{d}{2}\right)^2 \\ l_1^{\,2} = l^2 + \left(x - \dfrac{d}{2}\right)^2 \end{cases} \Rightarrow$$

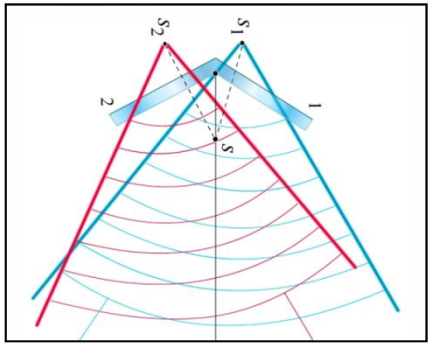
$$x = \frac{\Delta d l}{d} = \frac{\Delta d (a+b)}{d}$$



Интерференция света



сстояние между мнимыми источниками



$$tg\frac{\alpha}{2}=\frac{d}{2\bullet 2a}$$

$$d=2a\alpha$$

$$x=\frac{\Delta dl}{d}=\frac{\Delta d(a+b)}{2a\alpha}\begin{cases}\Delta d=k\lambda\\ \Delta d=(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}\end{cases}$$

Интерференция света

Ключевая ситуация №1 (А)

…При изучении наук задачи полезнее правил…

Ньютон

В опыте с зеркалами Френеля расстояние между мнимыми изображениями источника света равно 0,5 мм, расстояние от них до экрана равно 5 м. В жёлтом свете ширина интерференционных полос равна 6 мм. Определите длину волны жёлтого света

Дано

$\Delta x = 6 \cdot 10^{-3}\ м$

$d = 5 \cdot 10^{-4}\ м$

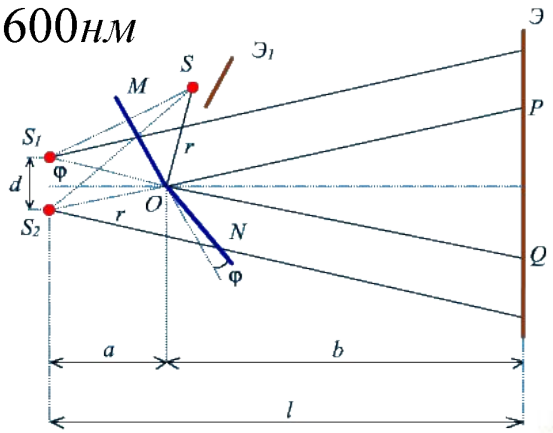
$l = 5 м$

$\lambda = ?$

Анализ

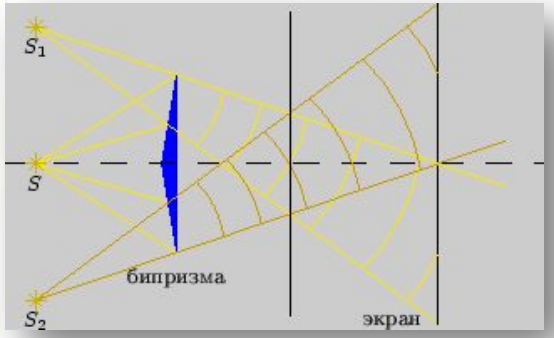
$$-\begin{cases} x_1 = \dfrac{\Delta d l}{d} = \dfrac{k_1 \lambda l}{d} \\ x_2 = \dfrac{\Delta d l}{d} = \dfrac{k_2 \lambda l}{d} \end{cases} \Rightarrow \Delta x = \frac{\lambda l}{d} \Rightarrow \lambda = \frac{d \Delta x}{l} = 600 нм$$

$$x = \frac{\Delta d l}{d} = \frac{\Delta d (a+b)}{2a\alpha} \begin{cases} \Delta d = k\lambda \\ \Delta d = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \end{cases}$$

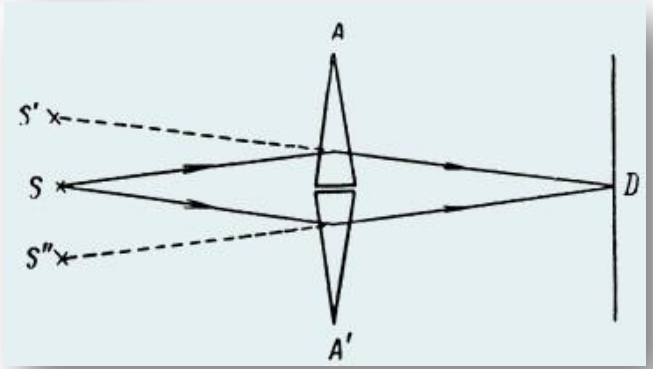


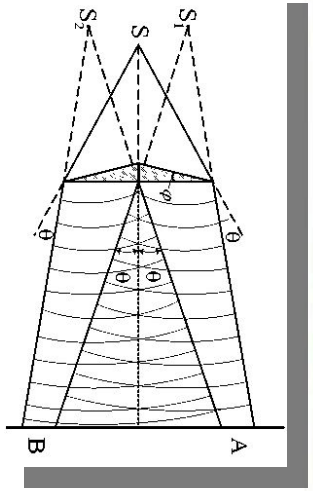
Интерференция света

Бипризма Френеля



В качестве двух когерентных источников используются два изображения одного и того же действительного источника света в результате преломления света в обеих призмах

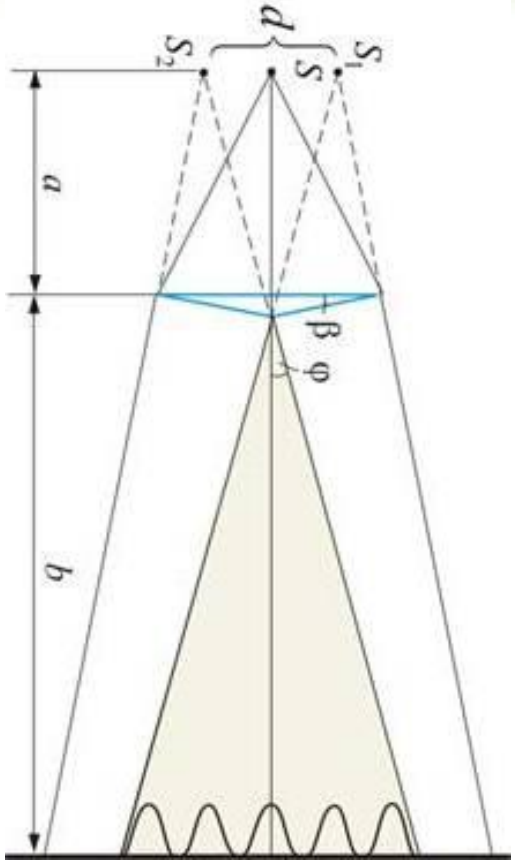




Бипризма Френеля *состоит из двух одинаковых, сложенных основаниями призм с малыми преломляющими углами (порядка нескольких минут)*

Интерференция света

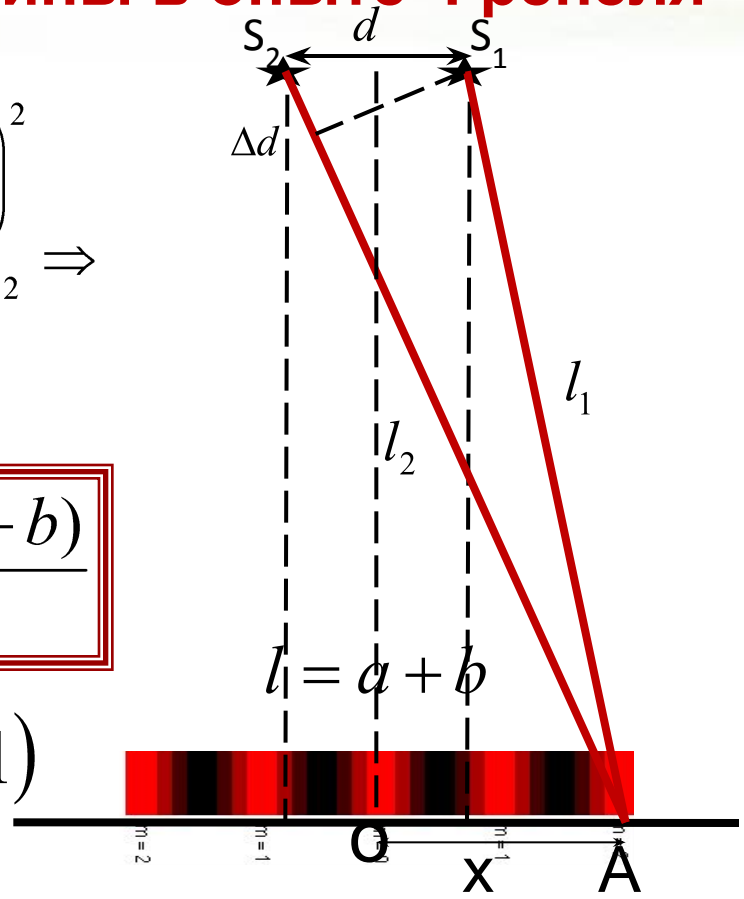
Расчет интерференционной картины в опыте Френеля



$$-\begin{cases} l_2^{\,2} = l^2 + \left(x + \dfrac{d}{2}\right)^2 \\ l_1^{\,2} = l^2 + \left(x - \dfrac{d}{2}\right)^2 \end{cases} \Rightarrow$$

$$x = \frac{\Delta d l}{d} = \frac{\Delta d (a+b)}{d}$$

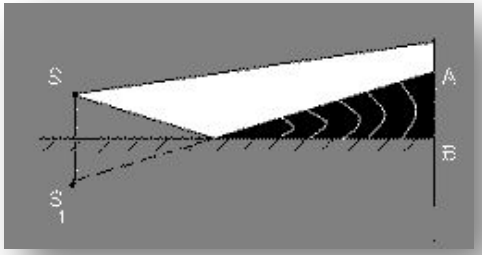
$$d = 2a\varphi(n-1)$$



Что произойдет, если одну половину бипризмы прикрыть непрозрачным экраном?

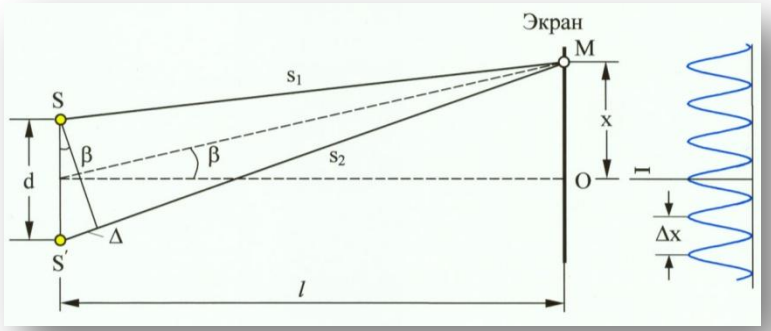
Интерференция света

Зеркало Ллойда



В опыте, предложенном Хемфри Ллойдом, когерентными источниками служат сам источник и его мнимое изображение

Когерентные источники S и S_1 являются противофазными!

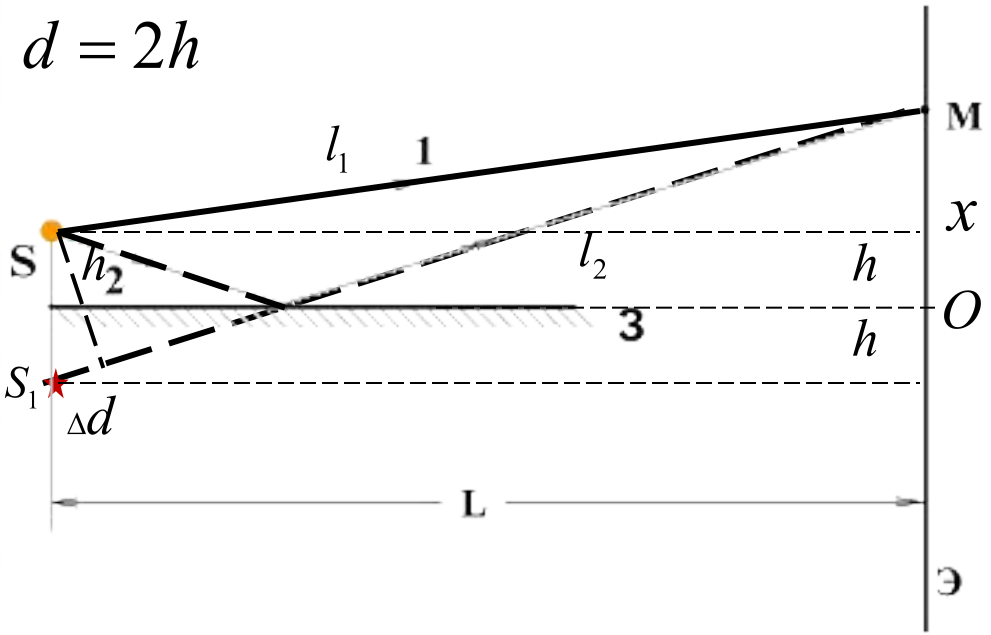


*При отражении от зеркала возникает дополнительная разность хода лучей **λ/2**, обусловленная изменением фазы колебаний на **π** при отражении от более плотной среды*

Интерференция света

Расчет интерференционной картины в опыте Ллойда

$d = 2h$



$$-\begin{cases} l_2^{\,2} = l^2 + (x+h)^2 \\ l_1^{\,2} = l^2 + (x-h)^2 \end{cases} \Rightarrow$$

$$x = \frac{\Delta d l}{2h} \begin{cases} \Delta d = k\lambda \\ \Delta d = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \end{cases}$$

Интерференция света

Ключевая ситуация №1 (А)

…При изучении наук задачи полезнее правил…

Ньютон

Точечный источник монохроматического света находится на расстоянии 1 мм от большого плоского зеркала и на расстоянии 4 м от экрана, перпендикулярного зеркалу. Каково расстояние между соседними максимумами освещенности. Длина волны света 600 нм

Дано

$\lambda = 6 \cdot 10^{-7}\ м$

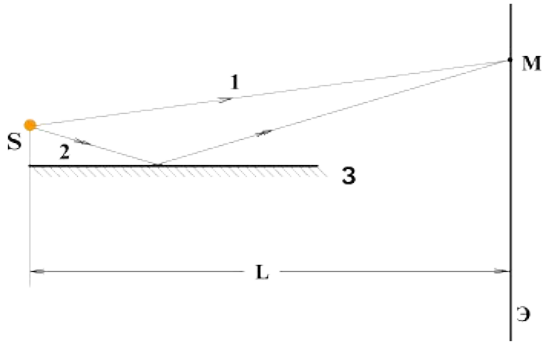
$h = 1 \cdot 10^{-3}\ м$

$l = 4 м$

$\Delta x = ?$

Анализ

$$-\begin{cases} x_1 = \dfrac{\Delta dl}{d} = \dfrac{k_1 \lambda l}{2h} \\ x_2 = \dfrac{\Delta dl}{d} = \dfrac{k_2 \lambda l}{2h} \end{cases} \Rightarrow \Delta x = \frac{\lambda l}{2h} = 1{,}2 мм$$

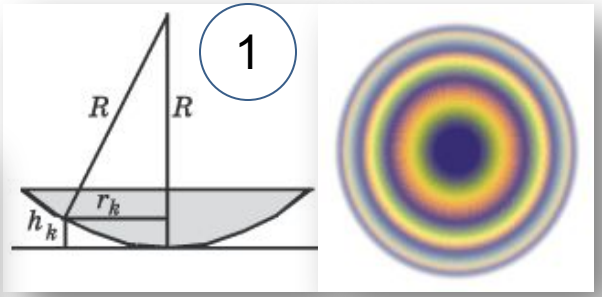


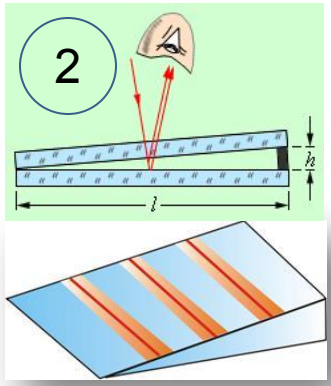
$$x = \frac{\Delta dl}{2h} \begin{cases} \Delta d = k\lambda \\ \Delta d = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \end{cases}$$

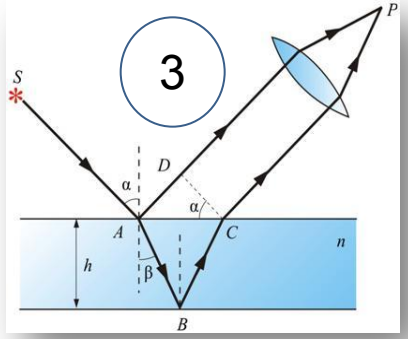
Интерференция света

…Когерентные волны от одного источника возникают при отражении света от передней и задней поверхностей тонких пленок(масляные пленки и пленки жира на воде, крылья насекомых, мыльные пузыри)…

Томас Юнг

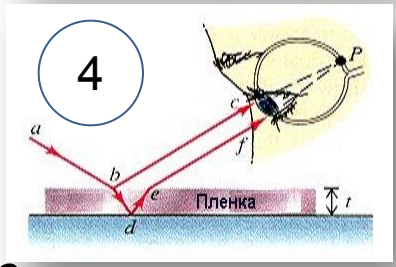






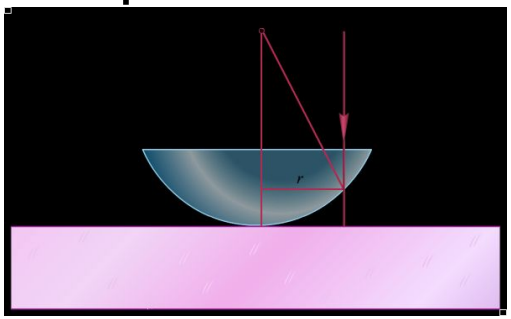
И нефть, попав из бака в водоем,
Павлиний хвост внезапно распустила.
Она об органическом своем
Происхожденьи снова загрустила.

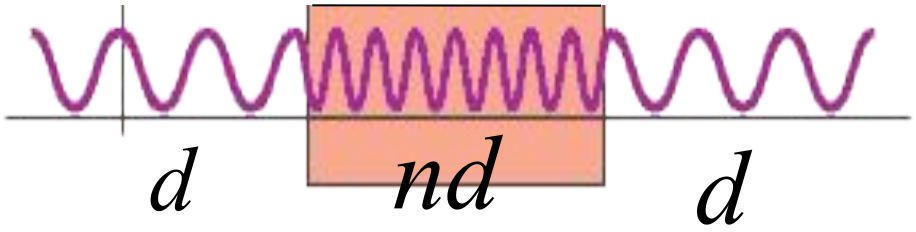
Л.Н. Мартынов



Интерференция света

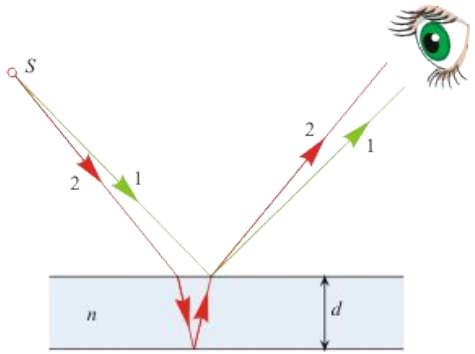
В веществе скорость распространения света, а следовательно, и длина световой волны уменьшается по сравнению с вакуумом в n раз

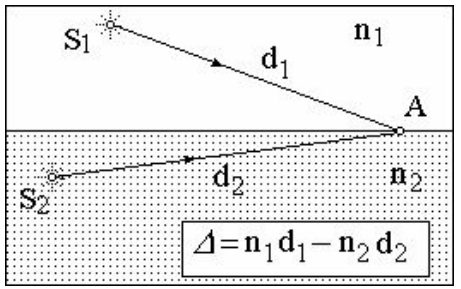




$$\upsilon = \frac{c}{n}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

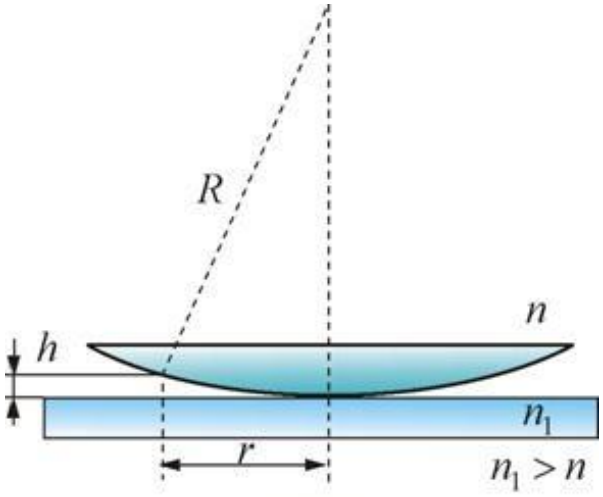


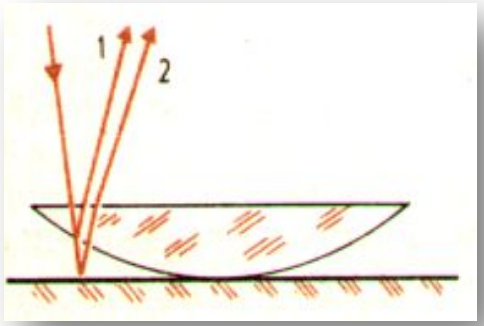


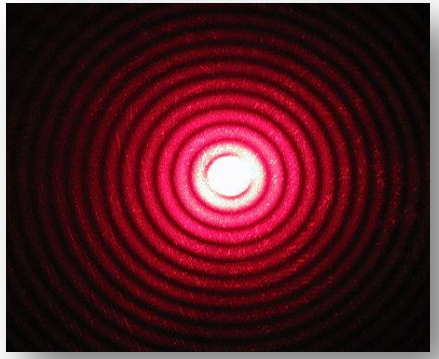
Оптическая длина волны *– характеризует число длин волн, которые укладываются в данной среде на протяжении геометрического пути волны*

Интерференция света

Кольца Ньютона - интерференционная картина, возникающая при отражении света в тонкой воздушной прослойке между плоской стеклянной пластиной и плосковыпуклой линзой большого радиуса кривизны



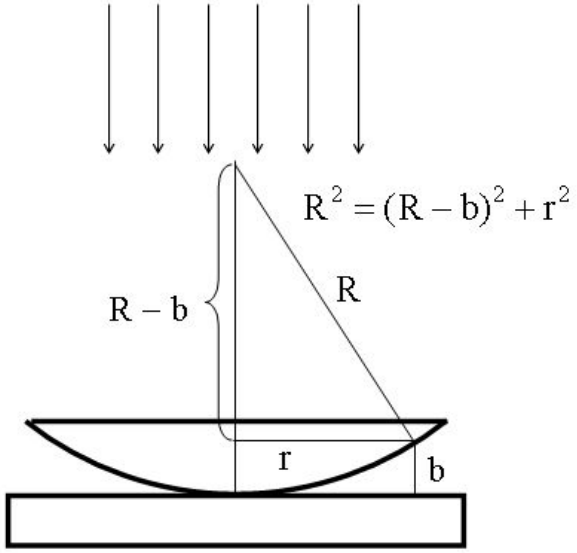


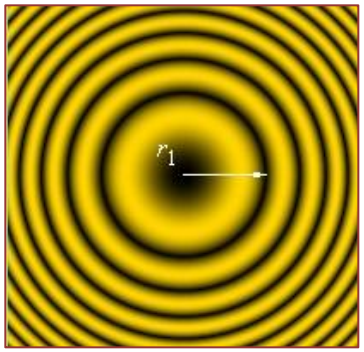


Интерференционная картина имеет вид концентрических колец, получивших название колец Ньютона

Интерференция света

Расчет интерференционной картины в опыте Ньютона кольца в отраженном свете





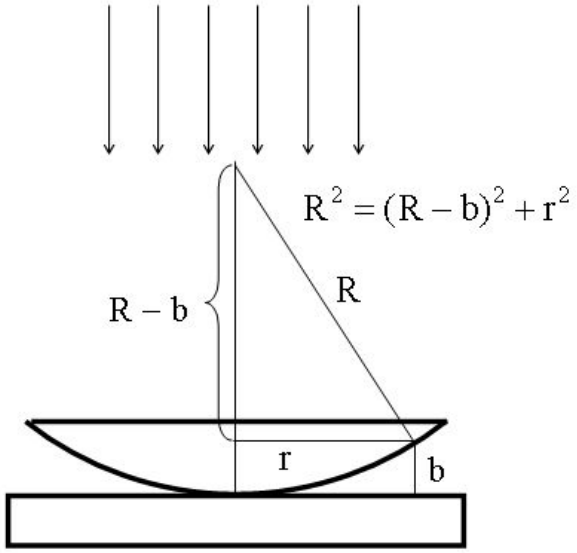
$$r^2 = R^2 - (R-d)^2 = 2Rd \Rightarrow d = \frac{r^2}{2R}$$

$$\Delta d = 2dn + \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \Delta d = \frac{nr^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

$$\begin{cases} \Delta d = k\lambda \\ \Delta d = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \\ \Delta d = \dfrac{nr^2}{R} + \dfrac{\lambda}{2} \end{cases} \qquad \begin{cases} r_{тк} = \sqrt{\dfrac{\kappa\lambda R}{n}} \\ r_{ск} = \sqrt{\dfrac{R\lambda(2k-1)}{2n}} \end{cases}$$

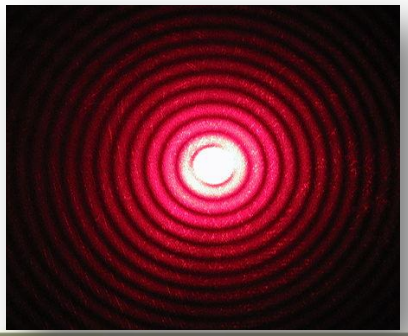
Интерференция света

Расчет интерференционной картины в опыте Ньютона кольца в проходящем свете



$$r^2 = R^2 - (R-d)^2 = 2Rd \Rightarrow d = \frac{r^2}{2R}$$

$$\Delta d = 2dn + \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \Delta d = \frac{nr^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

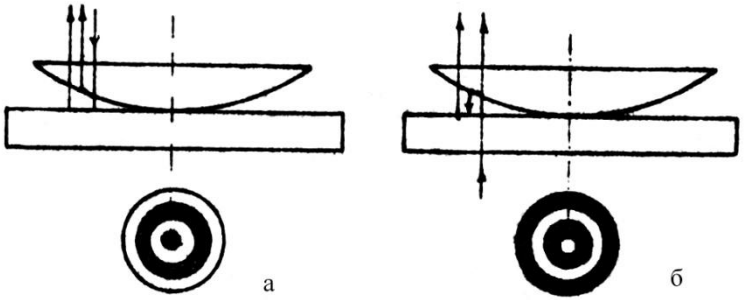


$$\begin{cases} \Delta d = k\lambda \\ \Delta d = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \\ \Delta d = \dfrac{nr^2}{R} + \dfrac{\lambda}{2} \end{cases} \qquad \begin{cases} r_{ск} = \sqrt{\dfrac{\kappa\lambda R}{n}} \\ r_{тк} = \sqrt{\dfrac{R\lambda(2k-1)}{2n}} \end{cases}$$

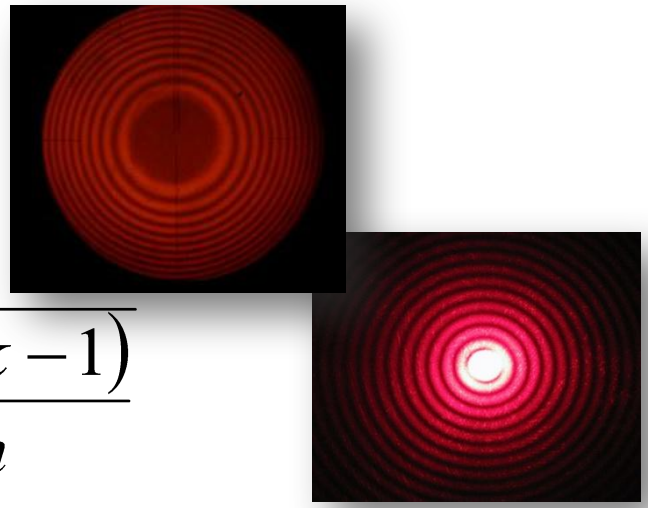
Интерференция света

В интерференционной картине кольца Ньютона

- радиусы колец растут пропорционально квадратному корню из порядкового номера кольца,
- радиусы колец одного и того же порядкового номера увеличиваются при переходе от фиолетового конца спектра к красному



$$r_{ск} = \sqrt{\frac{\kappa\lambda R}{n}}$$



$$r_{тк} = \sqrt{\frac{R\lambda(2k-1)}{2n}}$$

Интерференция света

Ключевая ситуация №1 (A)

…При изучении наук задачи полезнее правил…

Ньютон

Установка для получения колец Ньютона освещается монохроматическим светом с длиной волны 600 нм, падающим по нормали к поверхности пластины. Найдите толщину воздушного зазора между линзой и стеклянной пластиной в том месте, где наблюдается четвертое темное кольцо в **отраженном** свете

Дано

$\kappa = 4$

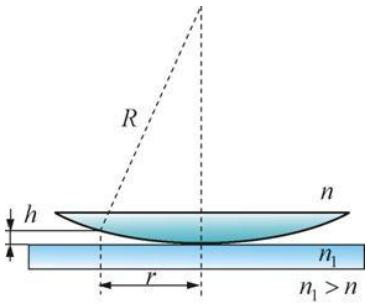
$\lambda = 6 \cdot 10^{-7}\ м$

$d = ?$

Анализ

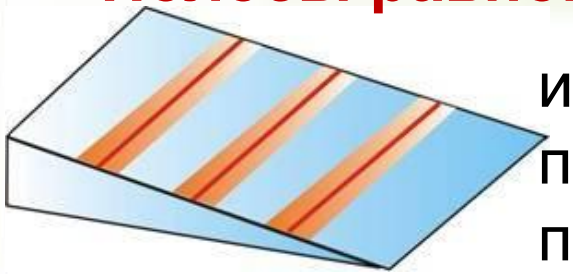
$$2dn + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$2dn = k\lambda \Rightarrow d = \frac{k\lambda}{2} = 1{,}2\ мкм$$

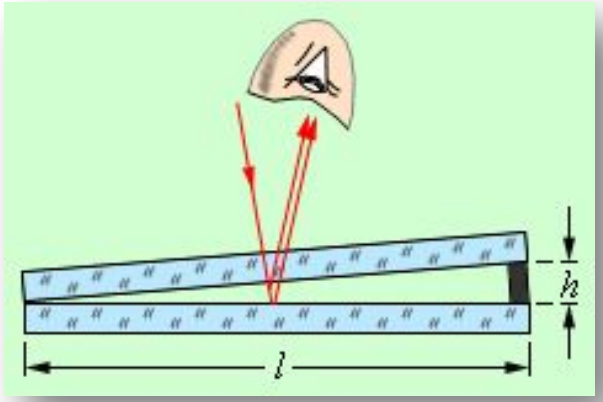


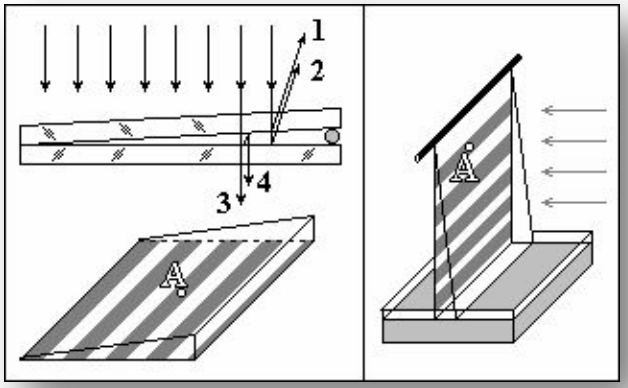
Интерференция света

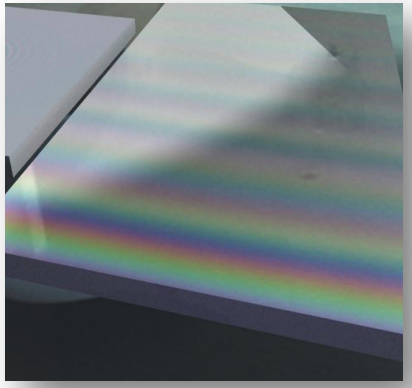
Полосы равной толщины (интерференция в клине)



интерференционные полосы, наблюдаемые при освещении тонких оптически прозрачных слоев (плёнок) переменной толщины пучком параллельных лучей



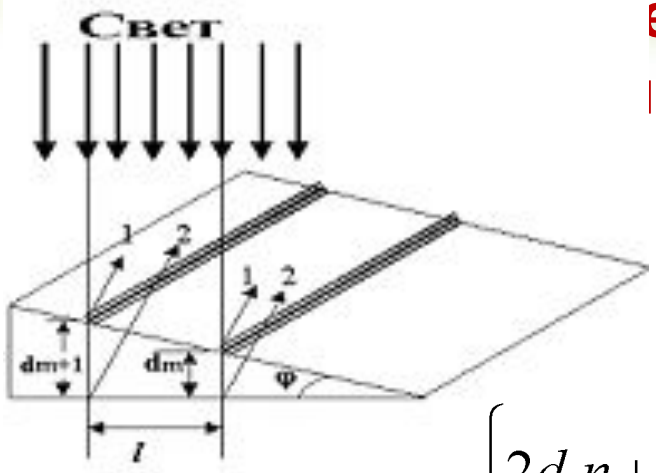


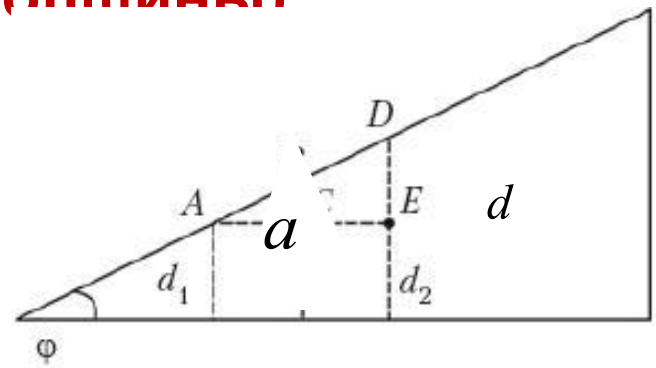


Каждая из таких полос возникает в результате отражения от участков клина с одинаковой толщиной, поэтому их называют ***полосами равной толщины***

Интерференция света

ерференционной картины в клине олосы равной толщины)

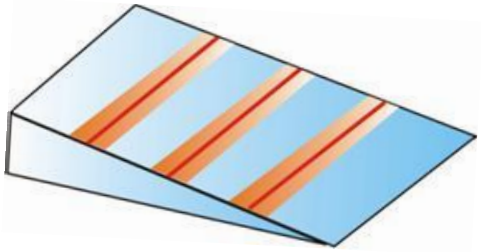




$$-\begin{cases} 2d_1 n + \dfrac{\lambda}{2} = (2k_1 + 1)\dfrac{\lambda}{2} \\ 2d_2 n + \dfrac{\lambda}{2} = (2k_2 + 1)\dfrac{\lambda}{2} \end{cases} \Rightarrow 2n(d_2 - d_1) = \lambda \Rightarrow d = \frac{\lambda}{2n}$$

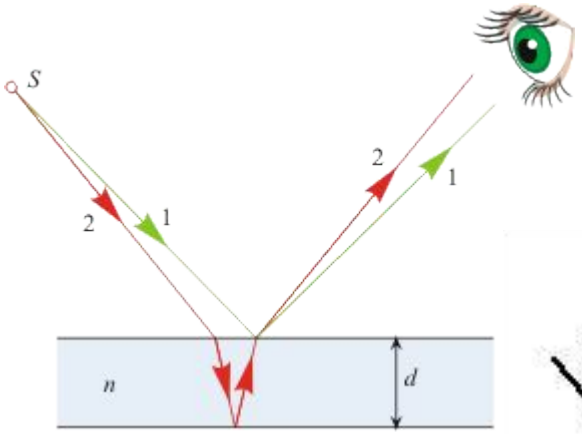
$$a = \frac{\lambda}{2n\varphi}$$

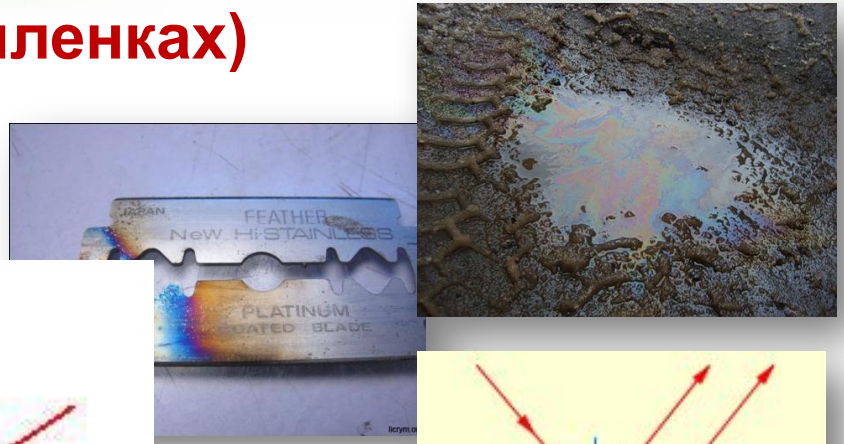
$$\begin{cases} d = \dfrac{\lambda}{2n} \\ d = atg\varphi = a\varphi \end{cases} \Rightarrow a = \frac{\lambda}{2n\varphi} = const$$

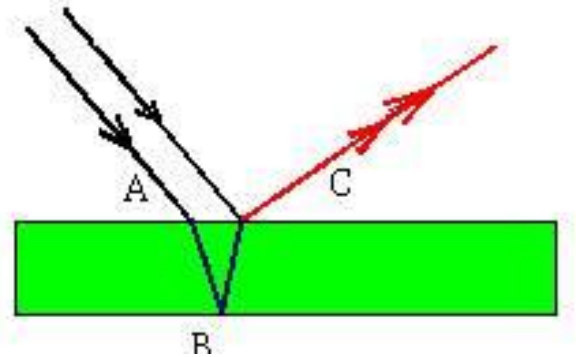


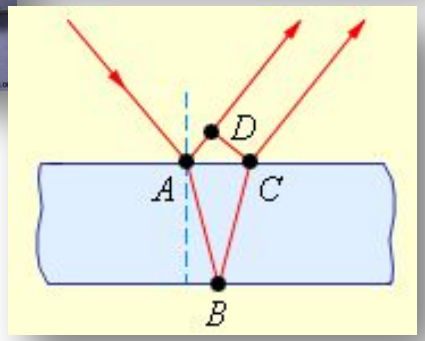
Интерференция света

Полосы равного наклона (интерференция в тонких пленках)





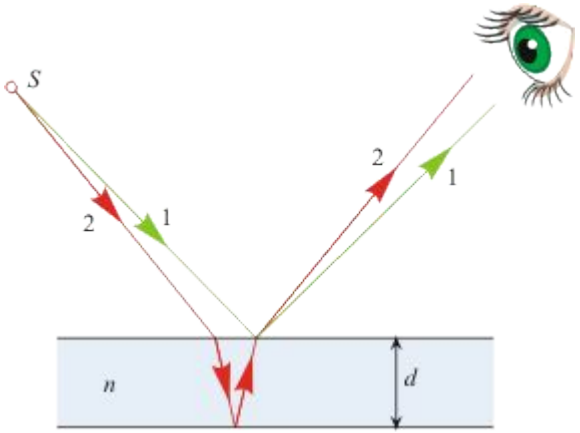


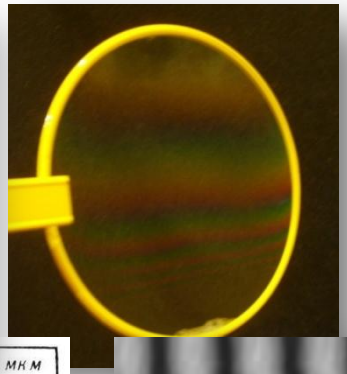


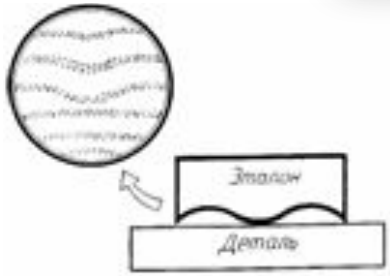
Если пленка идеальна, однородна и плоскопараллельна, то в зависимости от ее толщины, поверхность пленки оказывается либо равномерно освещенной, либо равномерно затемненной

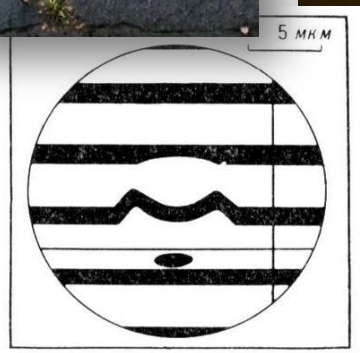
Интерференция света

Полосы равного наклона (интерференция в тонких пленках)





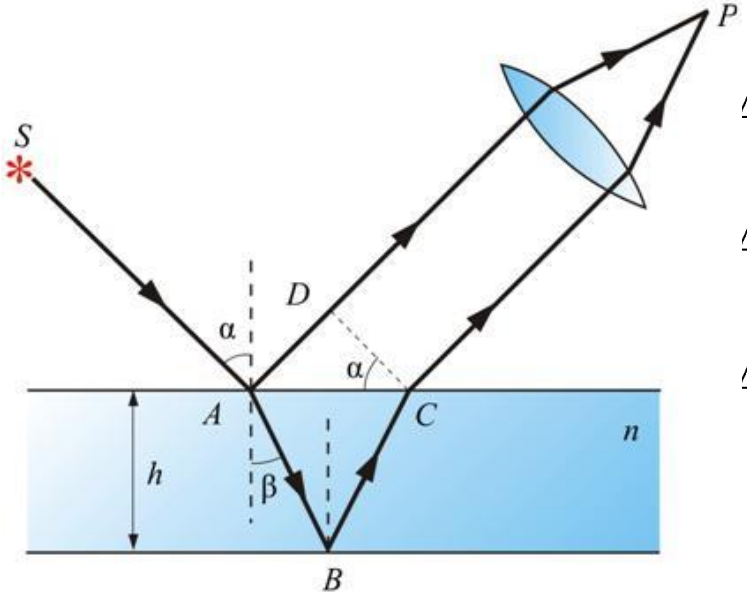




Если толщина пленки неодинакова, то наблюдается чередование светлых и темных полос, что позволяет осуществлять контроль качества поверхности

Интерференция света

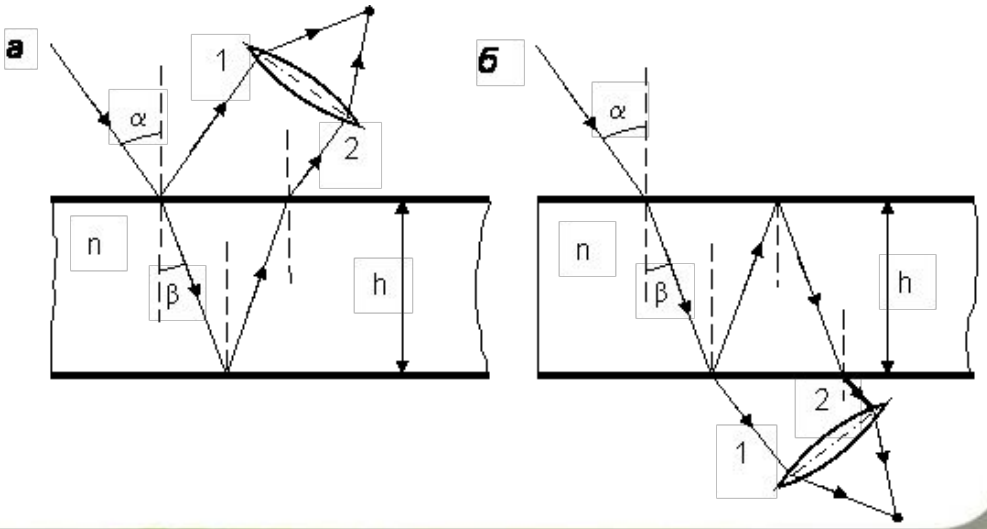
Расчет интерференционной картины в тонких пленках в отраженном свете



$$\Delta d = 2hn\cos\beta + \frac{\lambda}{2} = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta d = k\lambda(\max)$$

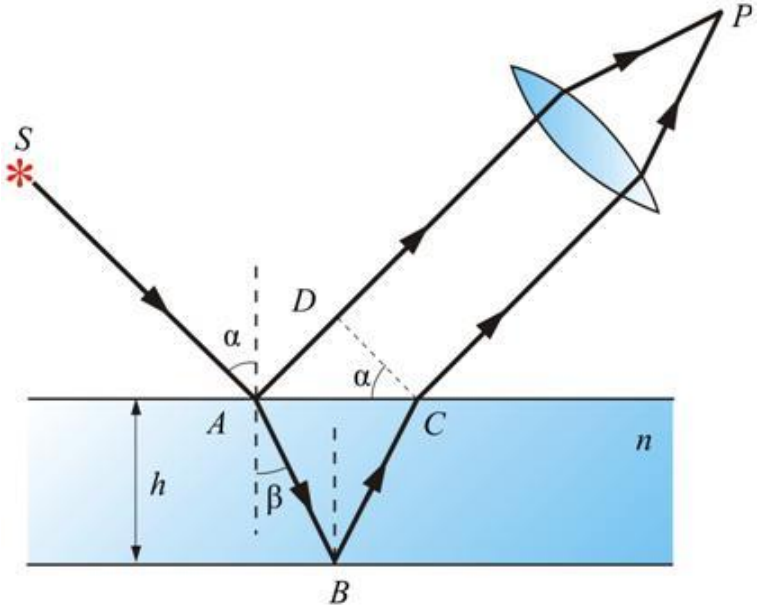
$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}[\min]$$



полосы равного наклона

Интерференция света

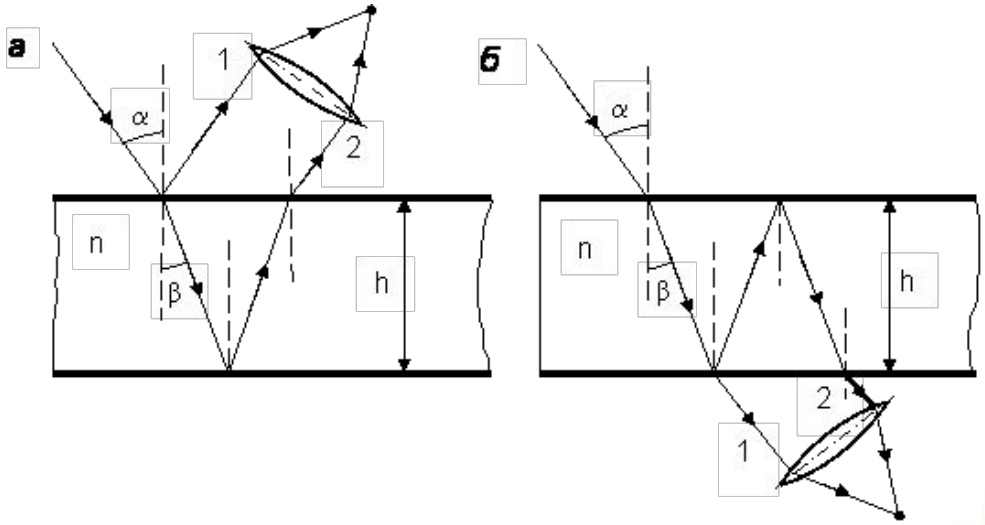
Расчет интерференционной картины в тонких пленках в проходящем свете



$$\Delta d = 2hn\cos\beta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}$$

$$\Delta d = k\lambda(\max)$$

$$\Delta d = (2k+1)\frac{\lambda}{2}[\min]$$



полосы равного наклона

Интерференция света

Ключевая ситуация №2 (В)

…При изучении наук задачи полезнее правил…

Ньютон

На мыльную пленку с показателем преломления 1,33 падает белый свет под углом 45°. При какой наименьшей толщине пленки **отраженные** лучи будут окрашены в желтый цвет. Длина волны желтого света 600 нм

Дано

$n = 1{,}33$

$\alpha = 45°$

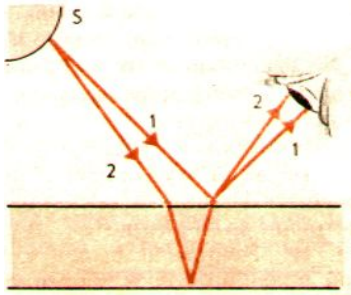
$\lambda = 6 \cdot 10^{-7}\ м$

$d = ?$

Анализ

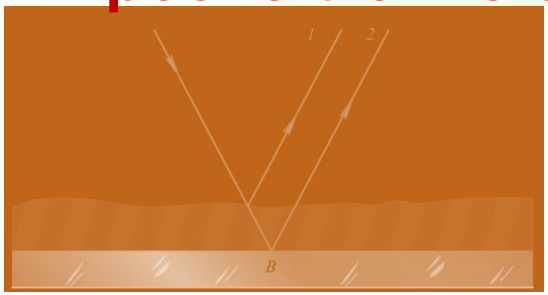
$$\Delta d = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha} + \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta d = k\lambda \Rightarrow d = \frac{\lambda}{4\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}} = 0{,}132\,мкм$$



Интерференция света

Просветление оптики

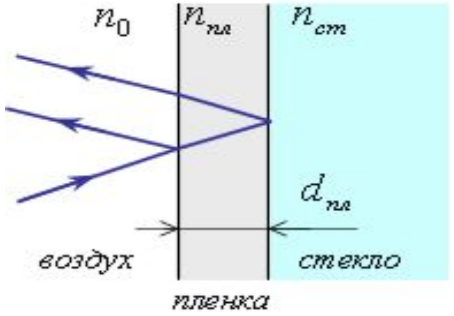


$$2dn + \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$2dn = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow d = \frac{\lambda}{4n_{пл}}$$

Уменьшение отражения света от поверхности линзы в результате нанесения на нее специальной пленки

$$d = \frac{\lambda}{4n_{пл}}$$



Интерференция света

Ключевая ситуация №1 (А)

…При изучении наук задачи полезнее правил…

Ньютон

На поверхность стеклянной призмы нанесена тонкая пленка толщиной d =112,5 нм с показателем преломления меньшим, чем показатель преломления стекла. На пленку по нормали к ней падает свет с длиной волны λ =630 нм. При каком значении показателя преломления пленки она будет «просветляющей»

Дано

$d = 112{,}5 \cdot 10^{-7}\ м$

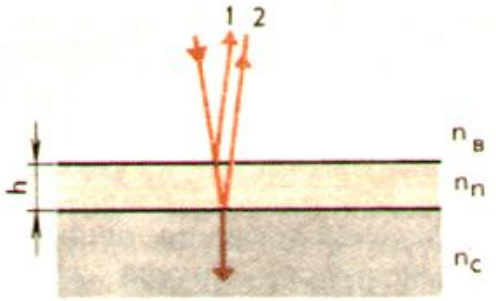
$\lambda = 6{,}3 \cdot 10^{-7}\ м$

$n = ?$

Анализ

$$2dn + \frac{\lambda}{2} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$2dn = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow n = \frac{\lambda}{4d} = 1{,}4$$



$$d = \frac{\lambda}{4n_{пл}}$$