

Лк-34

Напомним физическую модель.

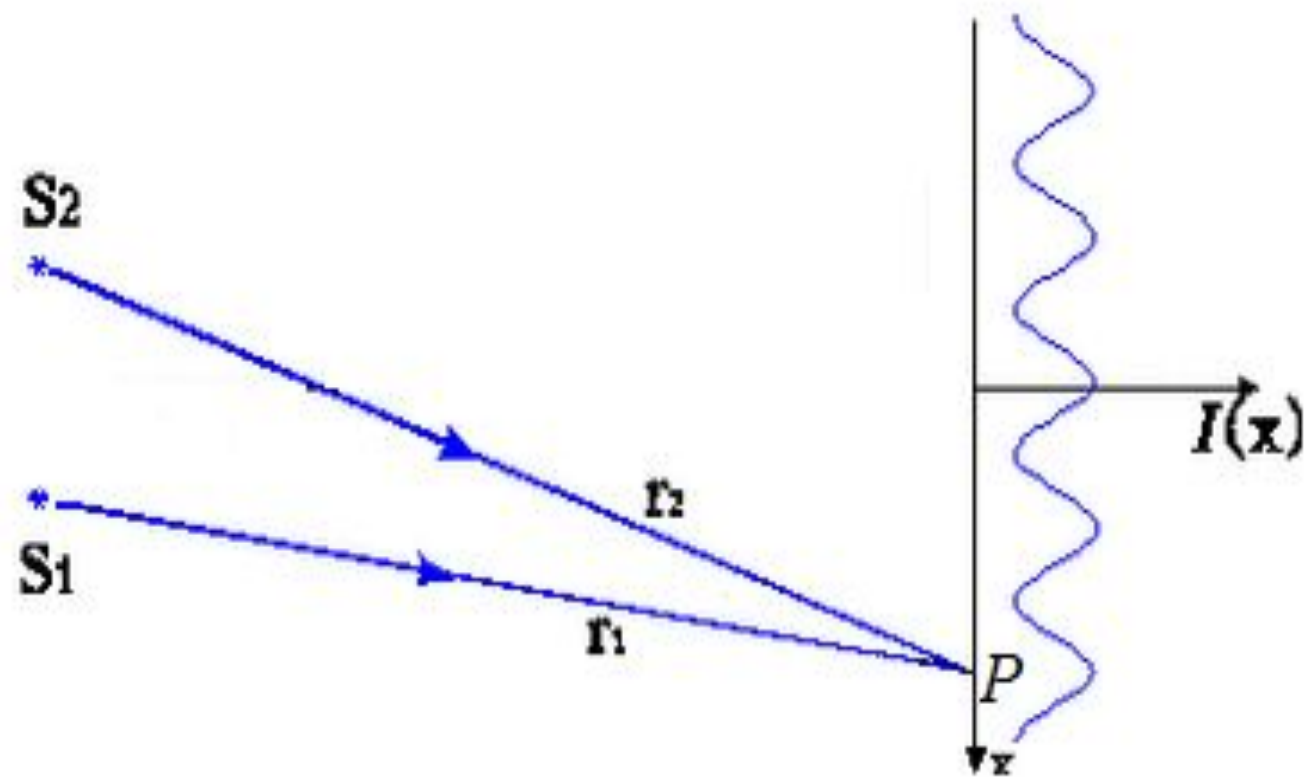
Две когерентные волны от источников  $S_1$  и  $S_2$

распространяются в одном пространстве. Рассмотрим результат их сложения в точке  $P$ . Световой вектор  $E$  запишется в виде суммы уравнений волн:

$$E = E_{m1} \cos(\omega t - k_1 r_1) + E_{m2} \cos(\omega t - k_2 r_2) \quad (34.1)$$

Для вычисления освещенности в точке  $P$  следует найти интенсивность волны, т.е. квадрат амплитуды светового вектора:

$$I \sim E_{m1}^2 + E_{m2}^2 + 2E_{m1}E_{m2} \cos(k_1 r_1 - k_2 r_2) \quad (34.2)$$



Первые два слагаемых в правой части – это интенсивности первой и второй волн. Третье слагаемое -

$$2E_{m1}E_{m2} \cos(k_1r_1 - k_2r_2) \quad (34.3)$$

называют интерференционным. В зависимости от аргумента косинуса -  $k_1r_1 - k_2r_2$  это слагаемое может принимать любое значение в диапазоне от  $-2E_{m1}E_{m2}$  до  $+2E_{m1}E_{m2}$ . Оба предельных случая соответствуют равенству  $k_1r_1 - k_2r_2 = \pi n$ , где  $n$  – целое число.

Если  $n$  – нечетное число, то  $E_m^2 = (E_{m1} - E_{m2})^2$ . В этом случае интенсивность света в точке наблюдения минимальна. Если же  $n$  – четное, то  $E_m^2 = (E_{m1} + E_{m2})^2$  - максимум интенсивности в точке P.

Если плавно изменять положение точки P, то освещенность в ней будет плавно изменяться, проходя минимумы и максимумы.

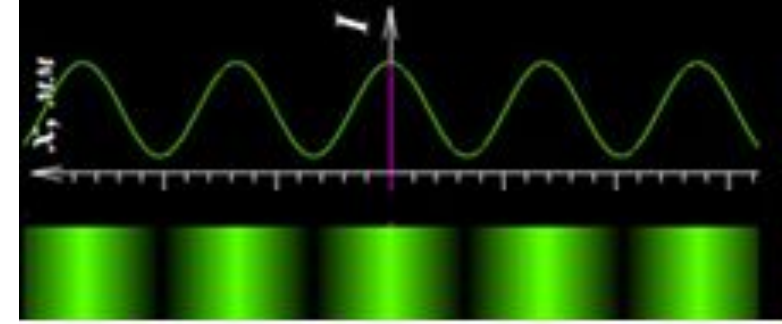
На рисунке показан график зависимости интенсивности от координаты  $x$  –

смещения точки экрана относительно

центра отрезка, который соединяет источники волн. Видно, что интенсивность периодически изменяется, достигая в точках максимумов

величины  $(E_{m1} + E_{m2})^2$  и в точках минимумов -  $(E_{m1} - E_{m2})^2$ .

На рисунке показана также видимая на экране картина. Образование различной освещенности экрана при облучении его когерентными волнами легко понять. Если колебания, доставляемые в какую-либо точку первой и второй волнами окажутся синфазными, они при сложении усилят друг друга и дадут максимум освещенности. Если же колебания будут противофазными, они при сложении взаимно ослабятся, и дадут минимум освещенности.



Интерференционное слагаемое  $2E_{m1}E_{m2} \cos(k_1r_1 - k_2r_2)$ , определяющее освещенность какой-либо точки экрана, зависит от разности величин  $kr$  суммируемых волн. Волновой вектор  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ . Длина волны  $\lambda$  выражается через длину волны в вакууме  $\lambda_0$

и показатель преломления среды  $n$ : 
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Поскольку волны когерентны длины волн  $\lambda_0$  у них совпадают. Тогда

$$k_1r_1 - k_2r_2 = \frac{2\pi}{\lambda_0} (r_1n_1 - r_2n_2) \quad (34.4)$$

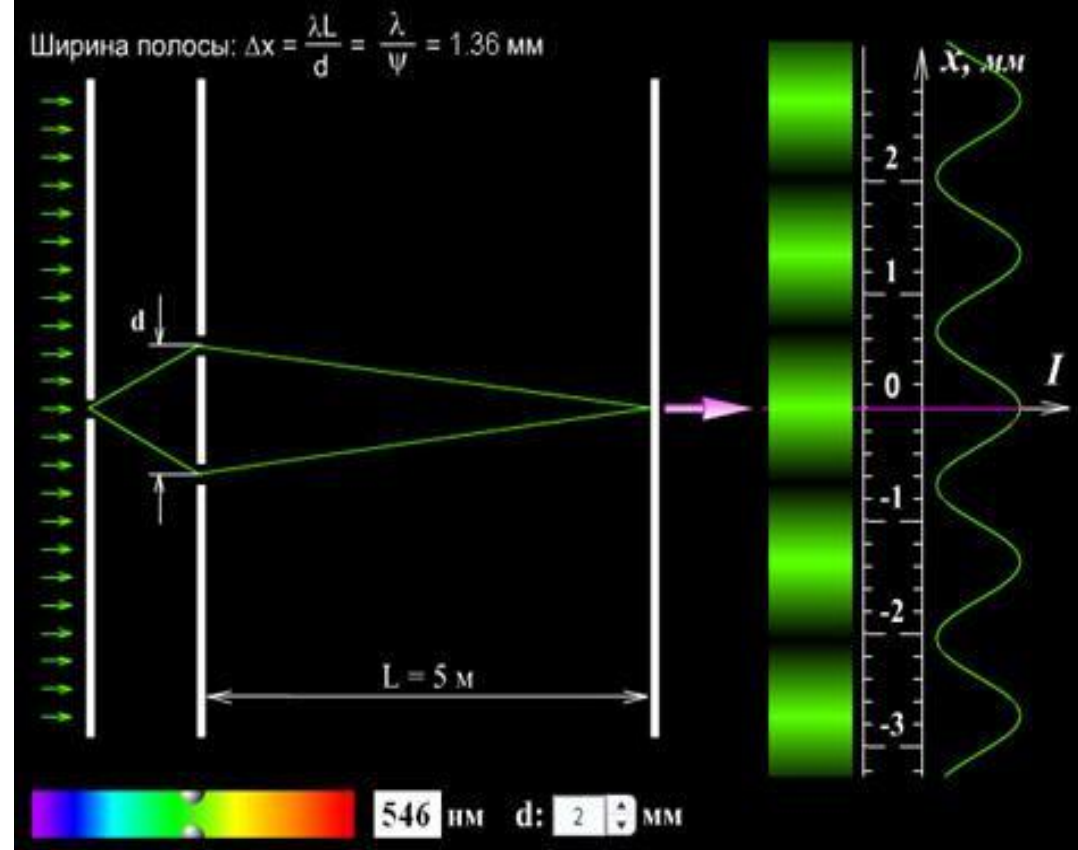
***Произведение расстояния  $r$ , пройденного волной на показатель преломления среды -  $rn$  называется оптической длиной пути.***

Т.о. Величина интерференционного члена определяется разностью оптических путей складываемых волн.

В точках экрана, где эта разность равна нулю или целому числу длин волн  $\lambda_0$ , будет интерференционный максимум освещенности. В точках экрана, где оптическая разность хода равна нечетному числу полуволн, наблюдается минимум освещенности.

**Формирование когерентных волн.** Излучение двух независимых источников никогда не будут когерентными. Атомы нагретого вещества излучают свет отдельными волновыми порциями – цугами. Длительность цуга составляет около  $10^{-8}$  с. За это время свет успевает пройти расстояние около 3 м. Оно называется длиной когерентности. Для получения интерференционной картины необходимо сложить волны одного цуга. Это достигается путем пропускания светового потока через узкую щель, деления полученной

Одним из первых был опыт Юнга, в котором мощный световой поток пропускался через узкую щель, а затем еще через две параллельные щели и падал на экран. Две вторичные щели являются когерентными источниками света, и волны от них создают на экране интерференционную картину в виде полос, параллельных щелям. Расстояние между максимумами освещенности соседних полос (или минимумами) называется шириной интерференционной полосы. Его легко вычислить для опыта Юнга, поскольку обе волны распространяются в одной среде ( $n_1 = n_2$ ) и расстояние между источниками когерентных волн –  $d$ , а также расстояние от них до экрана –  $l$  известны



Направим ось  $X$  вдоль экрана, как показано на рис. Начало координат расположим напротив одной из щелей. При этих условиях квадраты расстояний от щелей до точки наблюдения с координатой  $x$  определяются теоремой Пифагора:

$$r_1^2 = l^2 + x^2 \qquad r_2^2 = l^2 + (x + d)^2 \qquad (34.5)$$

Вычитая из второго равенства первое, получим для разности расстояний:

$$r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_1 + r_2} \approx \frac{xd}{l} \qquad (34.6)$$

Условие максимумов – это равенство оптической разности хода целому числу длин волны:  $n(r_2 - r_1) = m\lambda_0$ . Для среды в виде воздуха  $n=1$ , а для соседних полос разность хода должна отличаться на  $\lambda_0$ , т.е.  $r_2 - r_1 = \lambda_0$ .



Соответствующее этой разности хода приращение  $x$  будет шириной интерференционной полосы:

$$\Delta x = \frac{l\lambda_0}{d} \quad (34.7)$$

Благодаря возможности сделать большое отношение  $l/d$  получают макроскопический размер интерференционных полос. При  $d=2$  мм,  $l=5$  м и  $\lambda_0=500$  нм, получим  $\Delta x=1.25$  мм. Поскольку ширина полос зависит от длины волны, интерференция в белом свете даст радужные полосы.

**Пятиминутка 3.** В опыте Юнга расстояние между щелями 1 мм, расстояние от щелей до экрана 1 м, используется красный свет ( $\lambda=720$  нм). Определить ширину интерференционных полос.

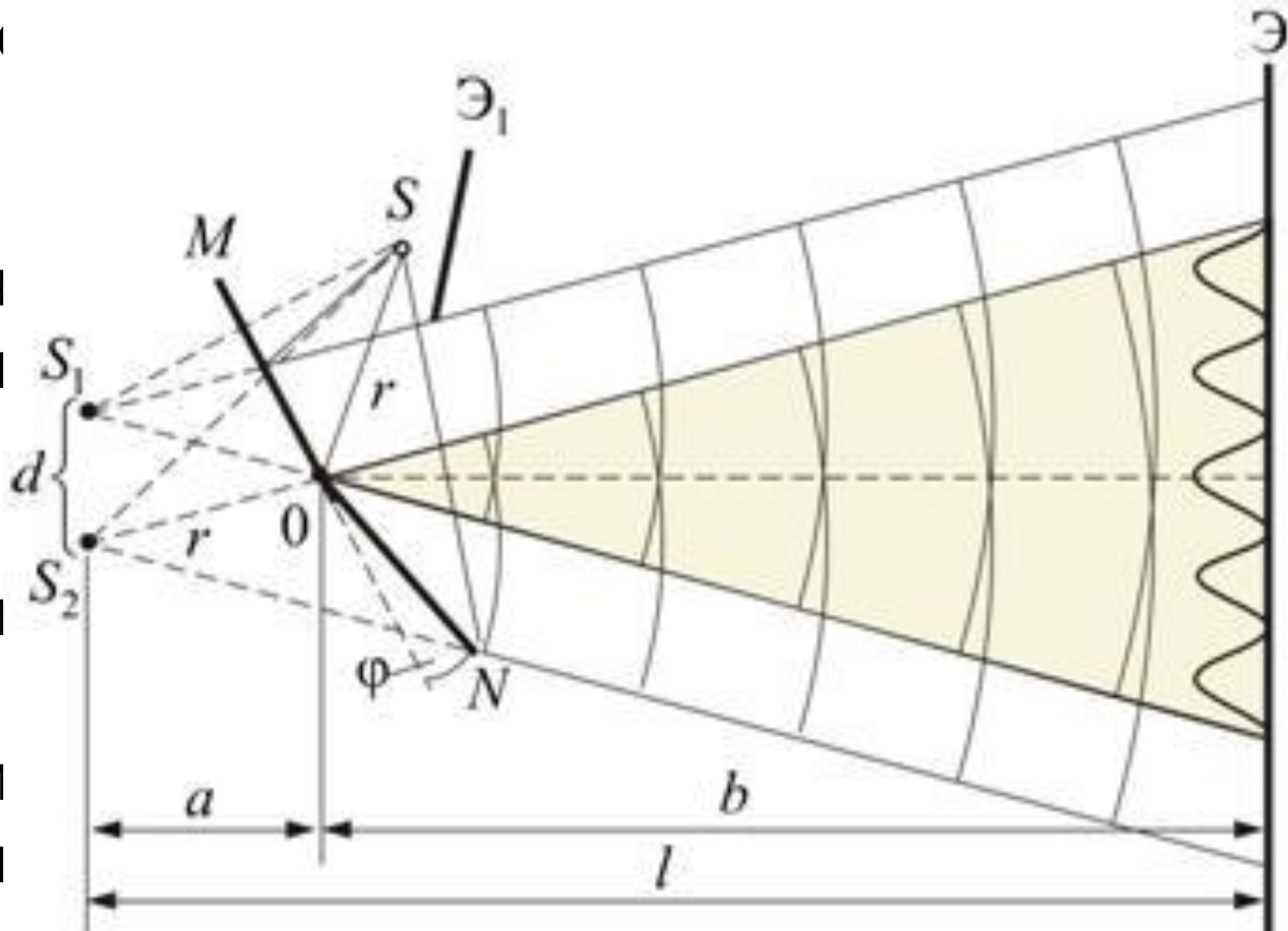
# Другие схемы получения интерференции

## Света

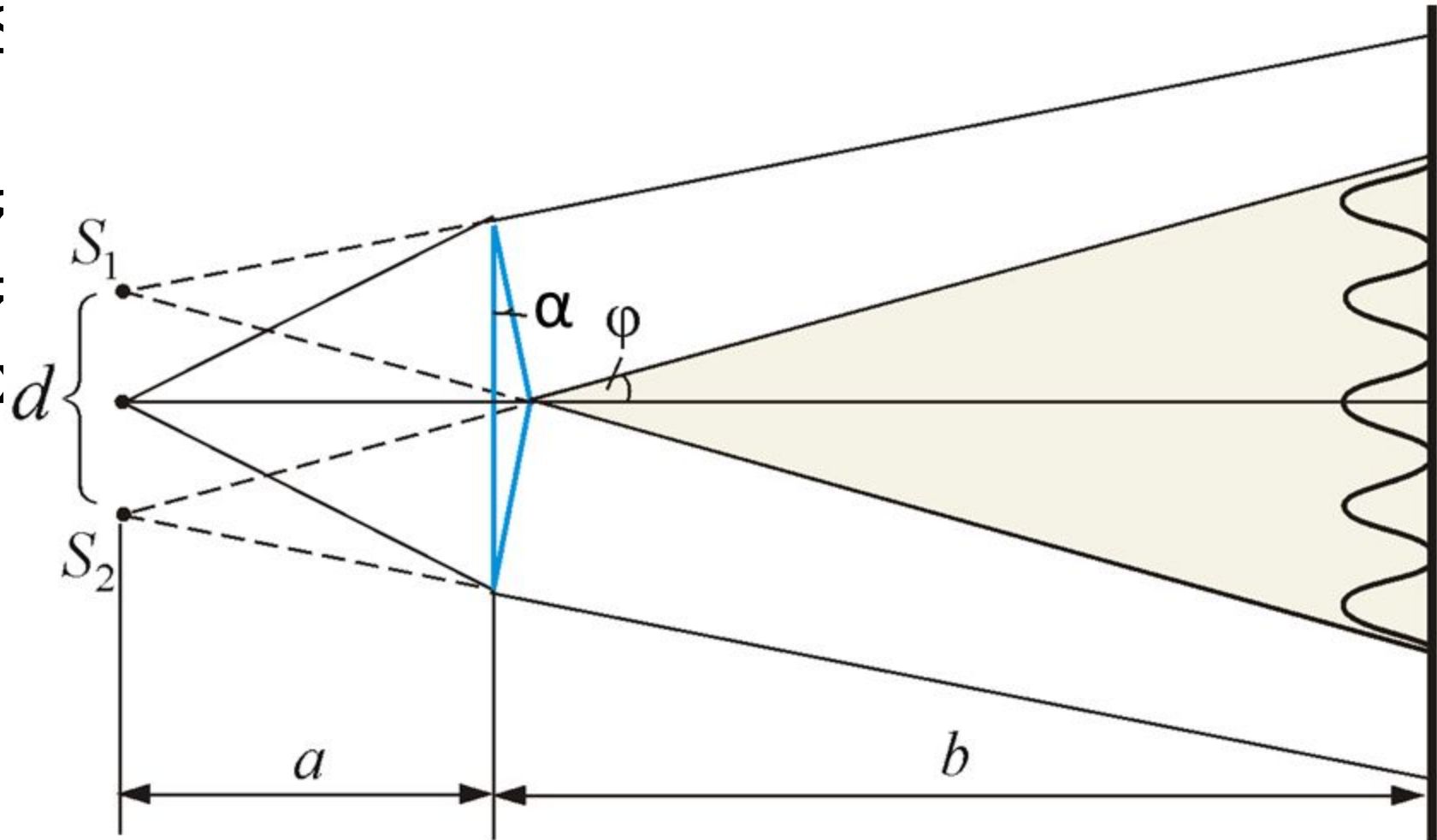
Бизеркало Френеля. Разделение луча происходит с помощью двойного зеркала, в котором угол  $\phi$  очень мал.

Зеркала дают два мнимых изображения источника  $S$ . Источник – узкая освещенная щель.

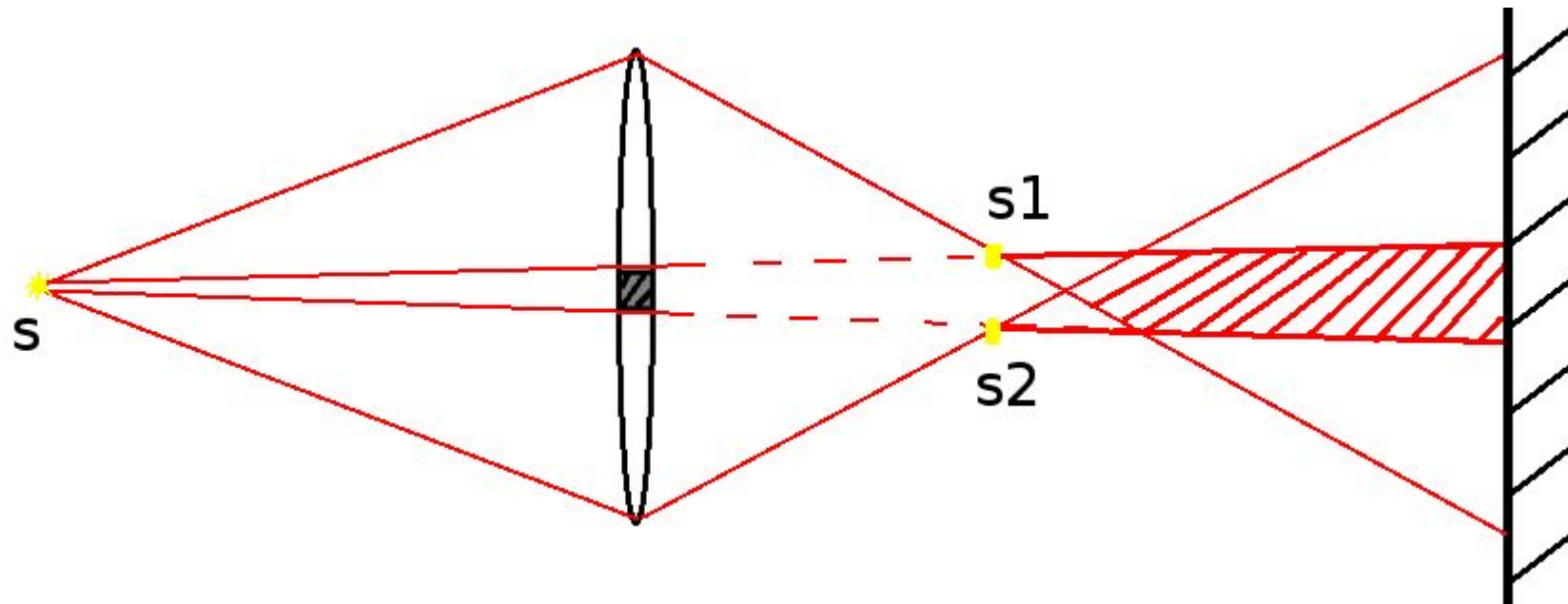
Найдя расстояние между ними, а так же от источников до экрана, получим схему, не отличающуюся от опыта Юн



Бипризма Френеля. Бипризма состоит из двух одинаковых трехгранных призм с малыми преломляющими углами -  $\alpha$ . Свет от щели или светящейся нити -  $S$ , параллельной ребру призмы, преломляется в ней и распространяется, соответственно мнимым источникам  $S_1$  и  $S_2$ . Интерференционная картина наблюдается в области перекрытия лучей от этих мнимых источников.



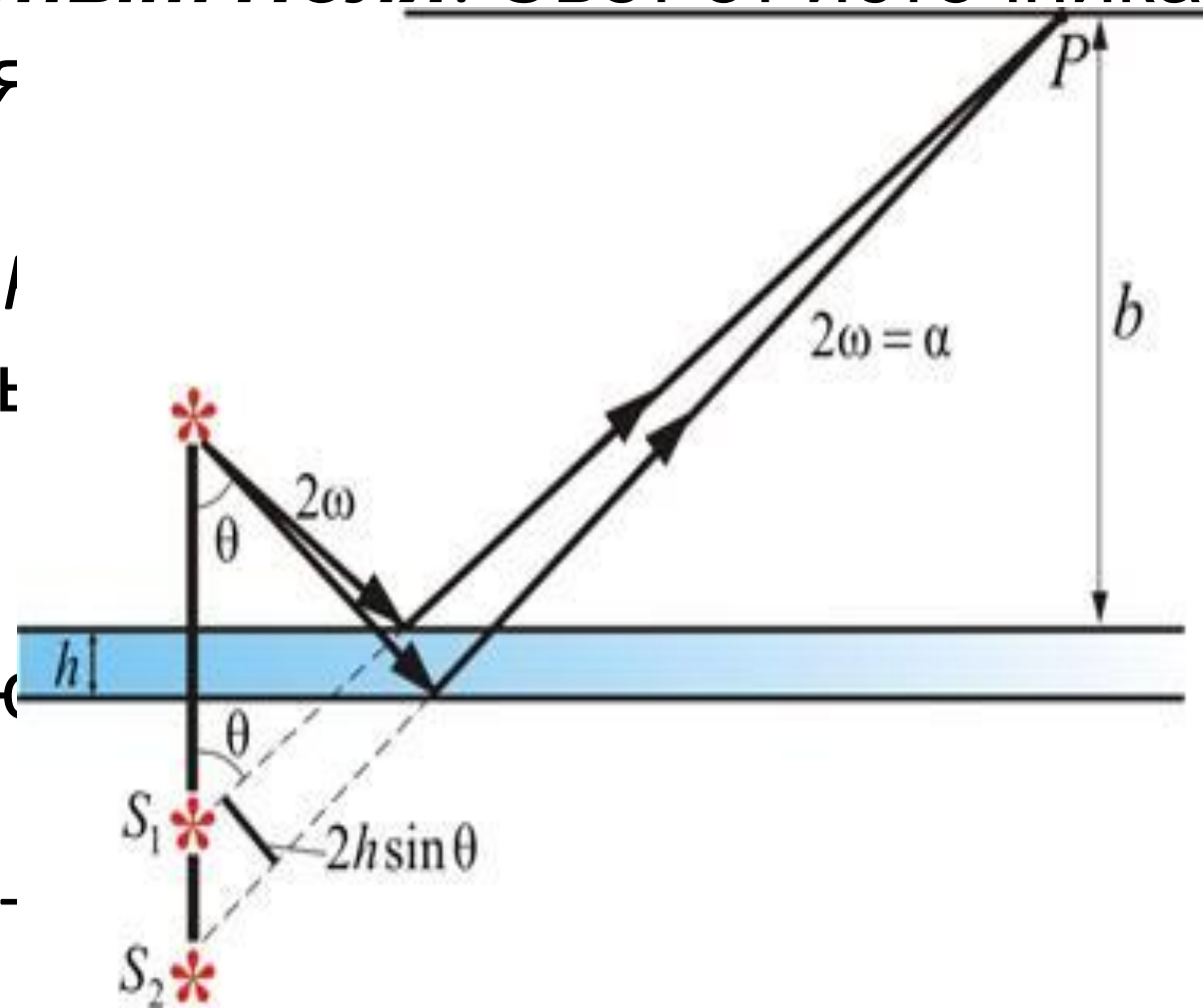
Билинза Бийе состоит из двух половинок собирающей линзы, которая разрезана по диаметру. Половинки слегка раздвинуты, благодаря чему, появляются два действительных изображения щели или светящейся нити -  $S$ , параллельной разрезу линзы. Эти изображения  $S_1$  и  $S_2$  являются когерентными источниками света и дают интерференционную картину. Она представляет собой полосы, параллельные разрезу линзы..



# Интерференция в тонких пленках

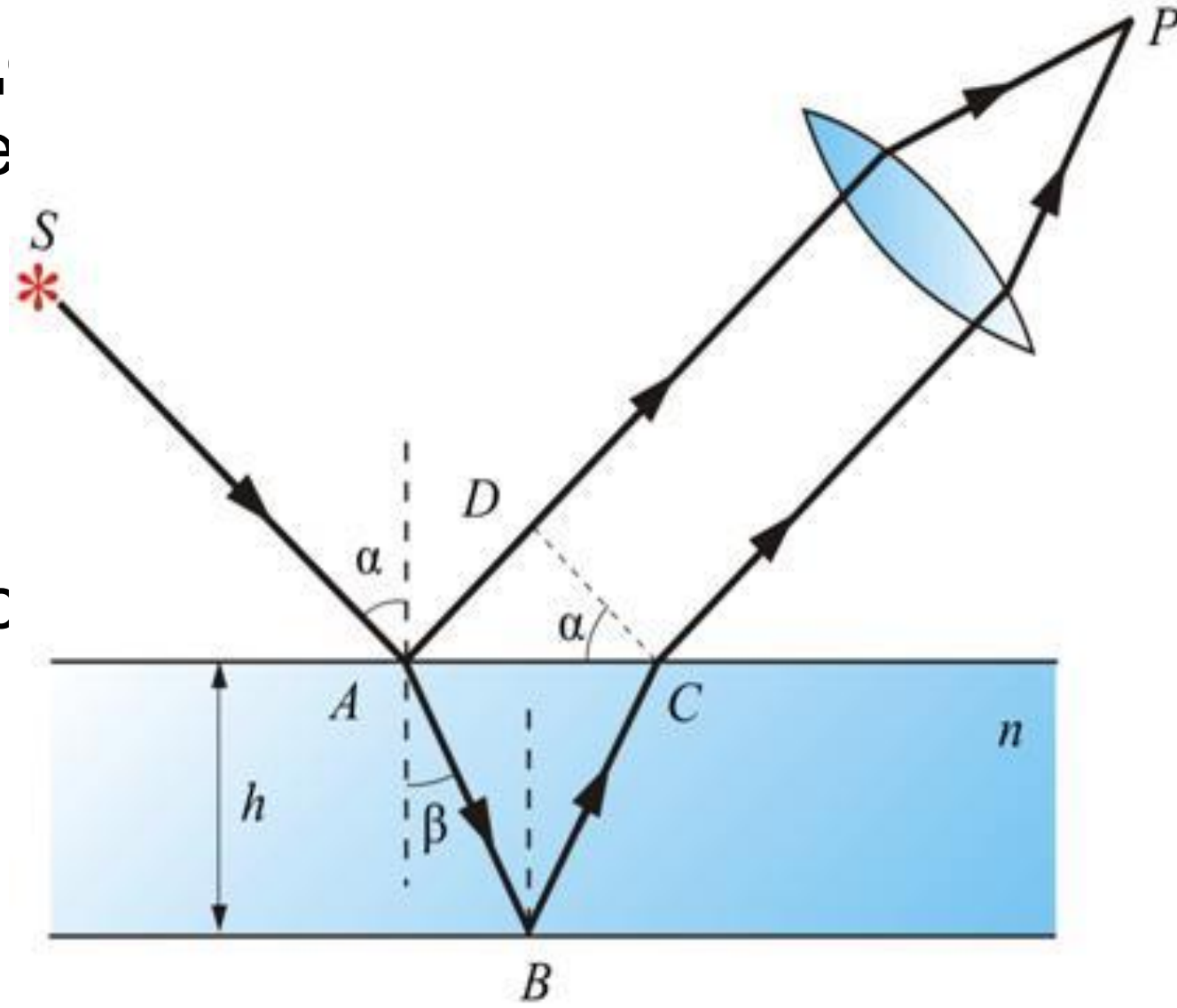
В рассмотренных схемах получения интерференции света использовался метод деления волнового фронта, при котором интерферирующие потоки формировались из разных участков фронта волны первичного источника. Другим способом получения когерентных световых потоков является деление амплитуд исходной волны с помощью частично отражающих поверхностей: прозрачных тел или полупрозрачных зеркал.

Интерференцию света по *методу деления амплитуды* во многих отношениях наблюдать проще, чем в опытах с *делением волнового фронта*. Один из способов, использующих такой метод, – **опыт Поля**. Свет от источника  $S$  отражается двумя поверхностями плоскопараллельной пластинки. В любую точку  $I$  находящуюся с той же стороне от пластинки, что и источник, приходят два луча. Эти лучи образуют интерференционную картину в виде концентрических колец с центром над источником света.



## ***Полосы равного наклона***

Особенно важен частный случай интерференции света, отраженного двумя поверхностями плоскопараллельной пластинки, когда точка наблюдателя находится в бесконечности, т.е. наблюдение ведется либо глазом, аккомодированным на бесконечность, либо на экране, расположенном в фокальной плоскости собирающей линзы.



В этом случае оба луча, идущие от  $S$  к  $P$ , порождены одним падающим лучом и после отражения от передней и задней поверхностей пластинки параллельны друг другу. Оптическая разность хода между ними в точке  $P$  такая же, как на линии  $DC$ :

$$\Delta = n(|AB| + |BC|) - |AD| \quad (4.5)$$

Здесь  $n$  – показатель преломления материала пластинки. Предполагается, что над пластинкой  $n=1$ . Так как

$$|AB| = |BC| = \frac{h}{\cos(\beta)}; \quad |AD| = 2htg(\beta)\sin(\alpha)$$

То для разности хода интерферирующих волн получаем формулу:

$$\Delta = 2nh\cos(\beta) \quad (4.6)$$

Следует также учесть, что при отражении волны от верхней поверхности пластинки ее фаза изменяется на  $\pi$ . Поэтому разность хода получает дополнительное приращение  $\lambda/2$ .



Результирующая разность хода, которую получают интерферирующие лучи будет равна:

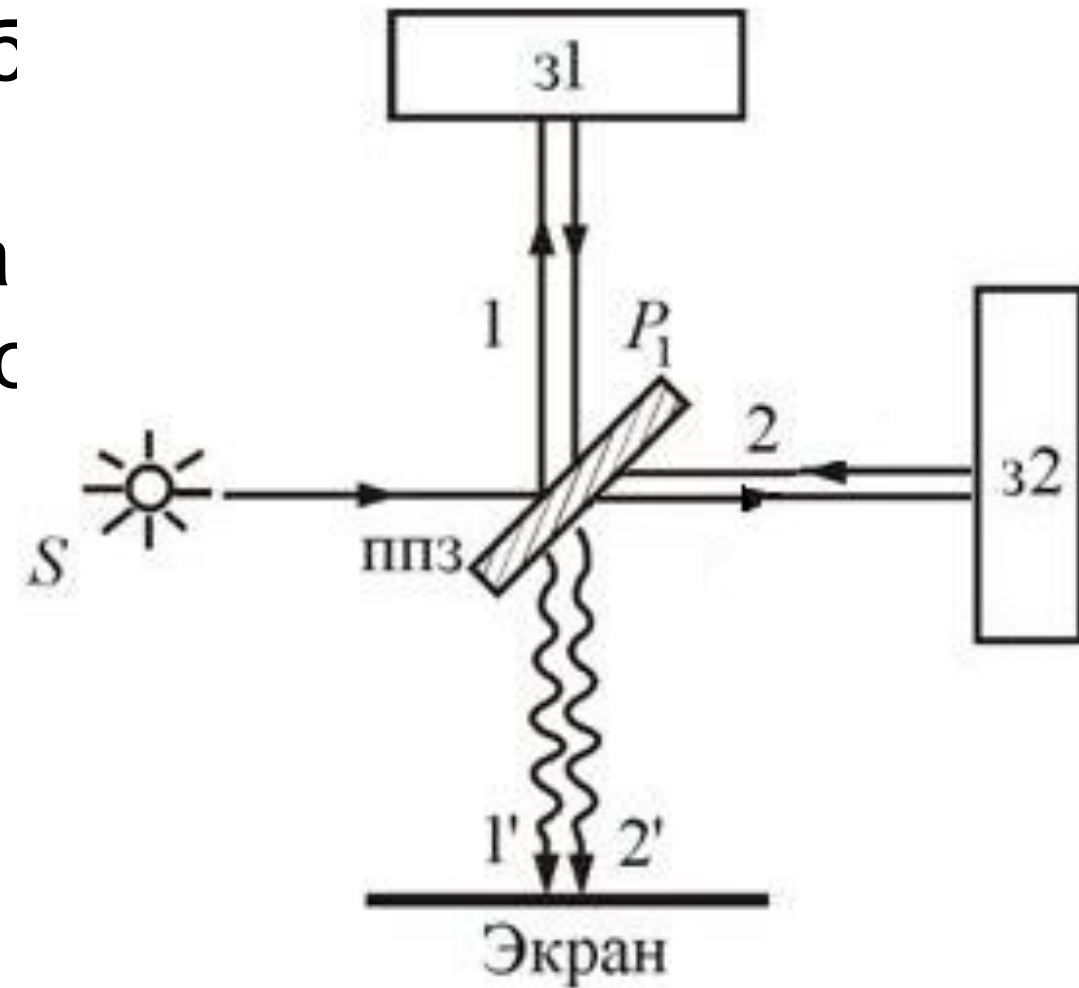
$$\delta = \Delta + \frac{\lambda}{2} = 2nh\cos(\beta) + \frac{\lambda}{2} \quad (4.7)$$

В точках экрана, где разность хода равна целому числу длин волн ( $\delta=m\lambda$ ), будет наблюдаться интерференционный максимум интенсивности света. В точках же, где разность хода равна нечетному числу длин полуволен ( $\delta=m\lambda+\lambda/2$ ) будет минимум интенсивности. При неизменной толщине пластинки разность хода зависит только от угла преломления или угла падения света на пластинку, поэтому интерференционную картину, имеющую вид полос, называют ***полосами равного наклона***.

Если ось объектива расположена перпендикулярно пластинке, полосы имеют вид концентрических колец с центром в фокусе, причем в центре картины порядок интерференции максимален.

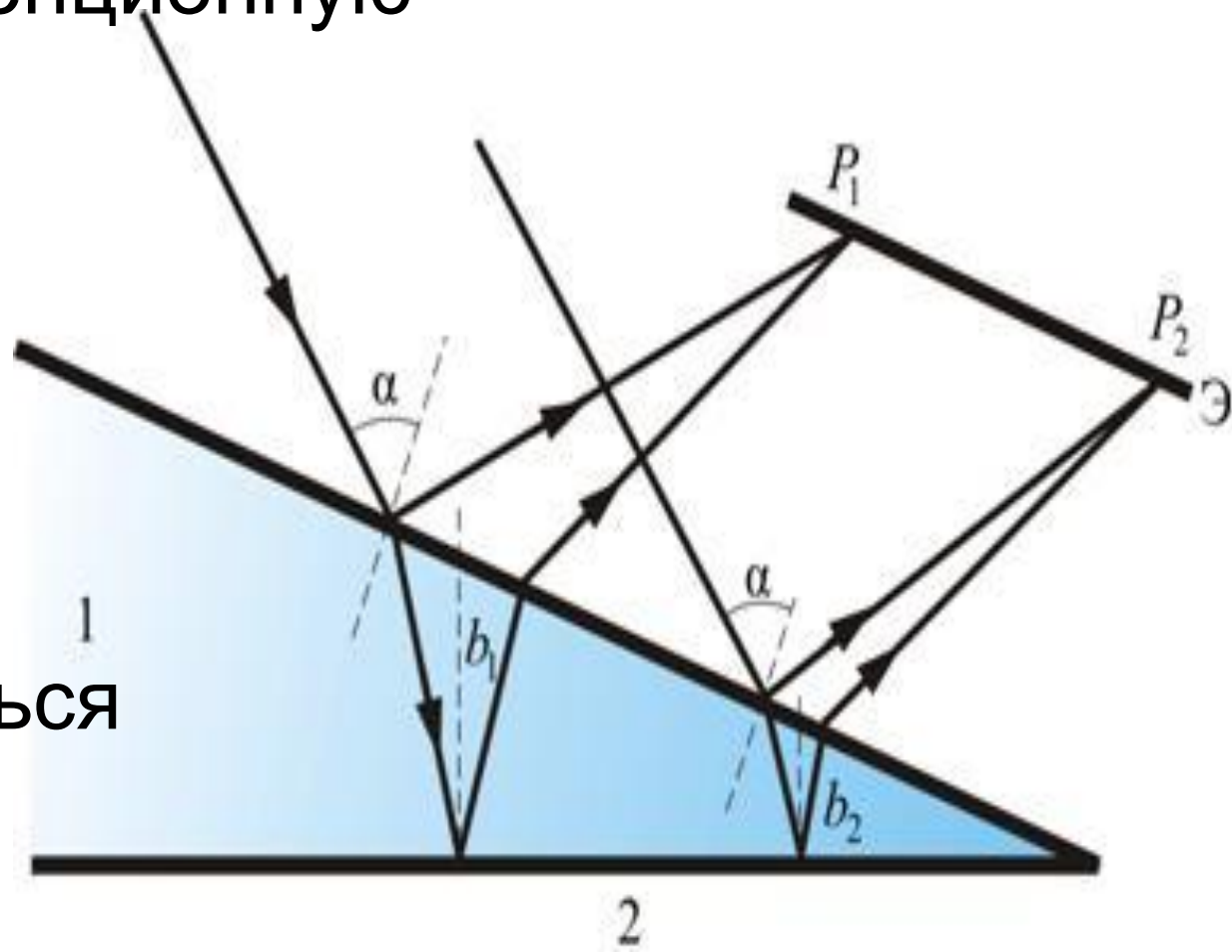
Для получения полос равного наклона вместо плоскопараллельной пластинки удобен **интерферометр Майкельсона**.

Рассмотрим схему интерферометра Майкельсона. 31 и 32 – зеркала.  $P_1$  – полупрозрачное зеркало, делит луч на две части. Луч 1 отражаясь от 31 дает Луч 1', а луч 2, отражается от 32 и дает Луч 2'. Лучи 1' и 2' когерентны и дают Интерференционную картину.



Мы рассмотрели интерференционные опыты, в которых деление амплитуды световой волны от источника происходило в результате частичного отражения на поверхностях плоскопараллельной пластинки. Локализованные полосы при протяженном источнике можно наблюдать и в других условиях. Оказывается, что для достаточно тонкой пластинки или пленки (поверхности которой не обязательно должны быть параллельными и вообще плоскими) можно наблюдать интерференционную картину, локализованную вблизи отражающей поверхности. Возникающие при этих условиях полосы называют *полосами равной толщины*. В белом свете интерференционные полосы окрашены. Поэтому такое явление называют *цветами тонких пленок*. Его легко наблюдать на мыльных пузырях, на тонких пленках масла или бензина, плавающих на поверхности воды, на пленках окислов, на поверхности металлов.

Рассмотрим интерференционную картину, получаемую от пластинок переменной толщины (от клина). Направления распространения световой волны, отраженной от верхней и нижней границы клина, не совпадают. Отраженные и преломленные лучи встречаются, поэтому интерференционную картину при отражении от клина можно наблюдать и без использования линзы, если поместить экран в плоскость точек пересечения лучей (хрусталик глаза Аккомодируется автоматически). Интерференция будет наблюдаться только в тонкой области клина, так как в толстой области.



оптическая разность хода будет больше длины когерентности.

Формула для разности хода интерферирующих волн остается

прежней 
$$\delta = \Delta + \frac{\lambda}{2} = 2nh\cos(\beta) + \frac{\lambda}{2} \quad (4.8)$$

Однако теперь переменной величиной является не угол преломления, а

толщина пластинки –  $h$ . В тех точках

Пластинки, где толщина отвечает условию интерференционного максимума

Наблюдается большая освещенность, а в

точках интерференционных минимумов

Пластинка выглядит темной. В белом

Свете получаем радужную расцветку

(мыльные пузыри, пленки масла на воде)



## *Кольца Ньютона*

Если прижать друг к другу плоскую и слегка выпуклую стеклянные пластинки, то в окрестности точки касания наблюдается нечто странное: там возникают кольца. В центре они почти не окрашены, чуть дальше переливаются всеми цветами радуги, а к краю теряют насыщенность цветов, блекнут и исчезают.

Так выглядит эксперимент, в XVII веке положивший начало оптике. Ньютон подробно исследовал это явление.

Эффект получил название Кольца Ньютона.

Это полосы равной толщины на воздушном клине между стеклами.



**Пятиминутка 2.** На мыльную пленку с показателем преломления

$n = 1,33$  падает по нормали монохроматический свет с длиной волны  $\lambda = 0,6$  мкм. Отраженный свет в результате интерференции имеет наибольшую яркость. Какова наименьшая возможная толщина  $d$  пленки? [Отв. 0,113 мкм]

**3.** В опыте Юнга отверстия  $S_1$  и  $S_2$  освещались монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda = 600$  нм. Расстояние  $d$  между отверстиями равно 1 мм. Найдите положение трех первых светлых полос на экране, расположенном на расстоянии  $L = 3$  м от отверстий.

*Ответ:* 1,8 мм; 3,6 мм; 5,4 мм.

4. В опыте Юнга отверстия  $S_1$  и  $S_2$  освещались монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda=600\text{нм}$ . На пути одного из интерферирующих лучей помещалась тонкая стеклянная пластинка, вследствие чего центральная светлая полоса смещалась в положение, первоначально занятое пятой светлой полосой (не считая центральной). Луч падает перпендикулярно к поверхности пластинки, показатель преломления которой  $n = 1,5$ . Какова толщина  $l$  пластинки?  
*Ответ:*  $l = 6 \cdot 10^{-3}$  мм.

5. На пути одного из двух параллельных лучей, распространяющихся в вакууме, поставили плоскопараллельную стеклянную пластинку ( $n = 1,5$ ) толщиной 6 см. Чему будет равно время запаздывания  $\tau$  этого луча?



*Итак, полосы равного наклона получаются при освещении пластинки постоянной толщины ( $h - \text{const}$ ) рассеянным светом, в котором содержатся лучи разных направлений.*

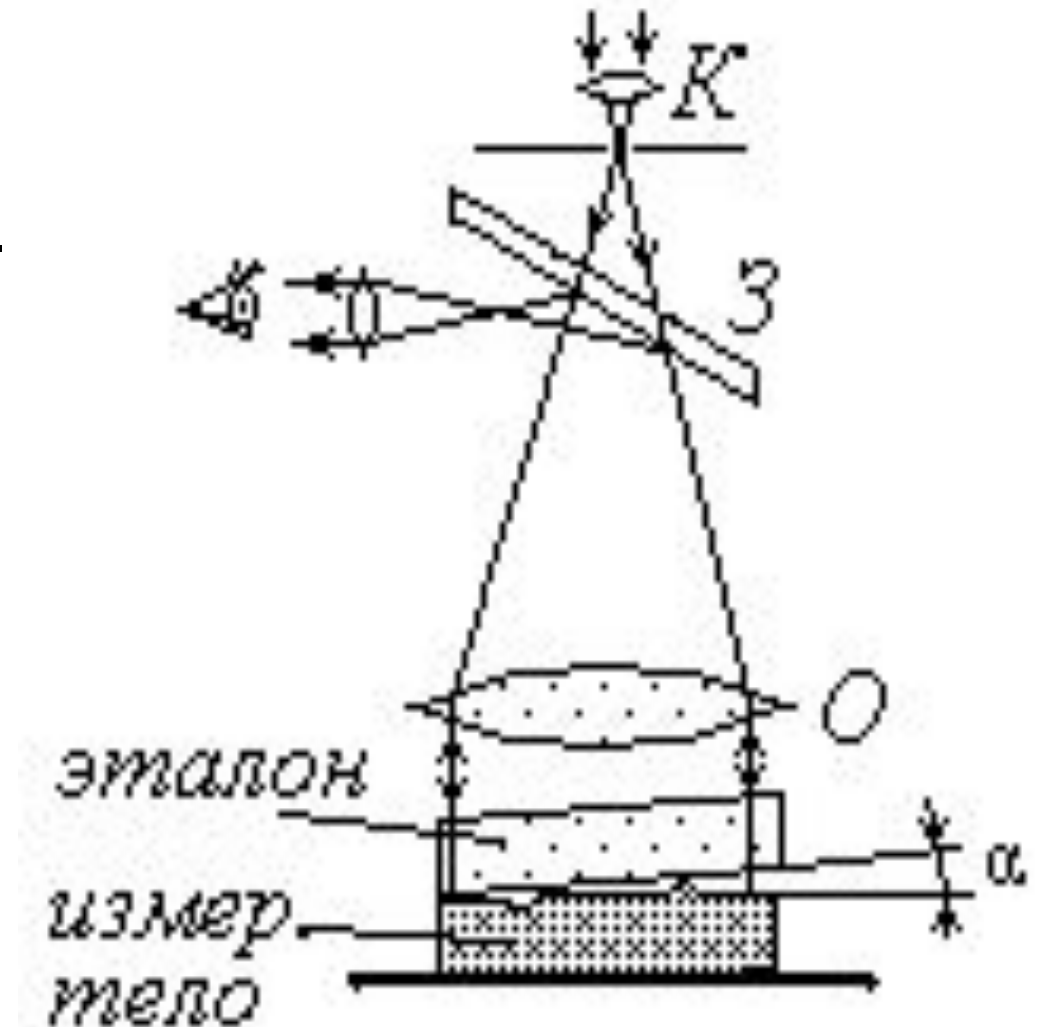
*Полосы равной толщины наблюдаются при освещении пластинки переменной толщины (клина) параллельным пучком света. Полосы равной толщины локализованы вблизи пластинки.*

## **Практическое использование интерференции света.**

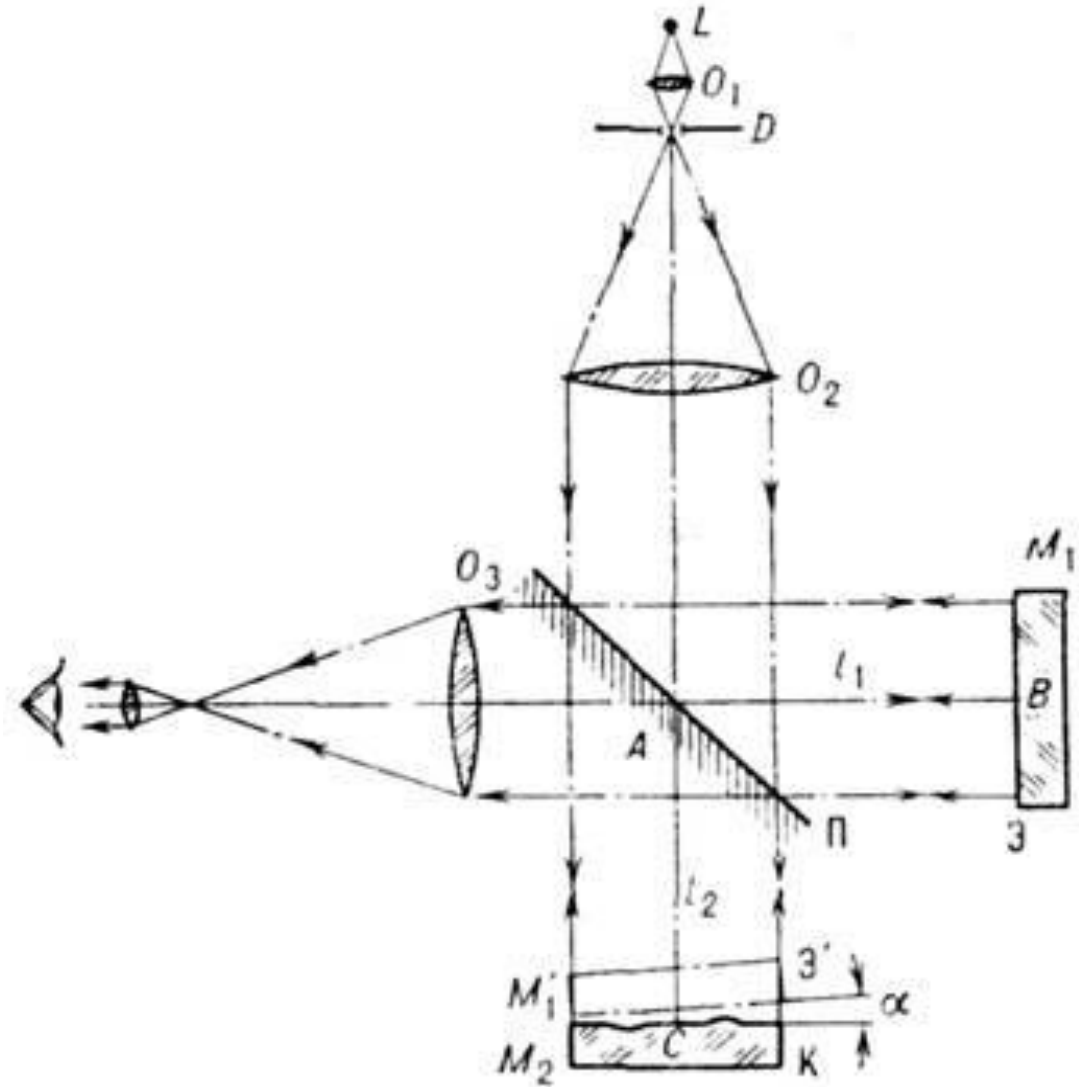
Длина световых волн составляет доли микрона. Непосредственно такие размеры не воспринимаются органами чувств человека. Однако полосы интерференционных картин имеют макроскопические размеры и позволяют сделать ощутимыми микроскопические размеры световых волн и других микроскопических деталей.

Интерферометрия использует интерференцию для измерений различных величин, таких как размеры предметов, показатели преломления веществ, угловые размеры звезд. Разрешающая способность интерферометров, т.е. способность различить две близкие по значению величины, может достигать сотых долей длины используемой световой волны  $\approx 10^{-8}$  м, что недоступно для других типов измерителей.

**Интерферометр Физо.** Используется для определения плоскостности и чистоты обработки поверхности тел. Картина – полосы равной толщины формируется в воздушном клине между измеряемым телом и эталонной стеклянной пластинкой. Наличие на поверхности тела мельчайших бугорков и впадин приводит к искривлению интерференционных полос. В качестве источника света часто используется лазер. В лаб. раб. «Кольца Ньютона» использован интерферометр Физо.



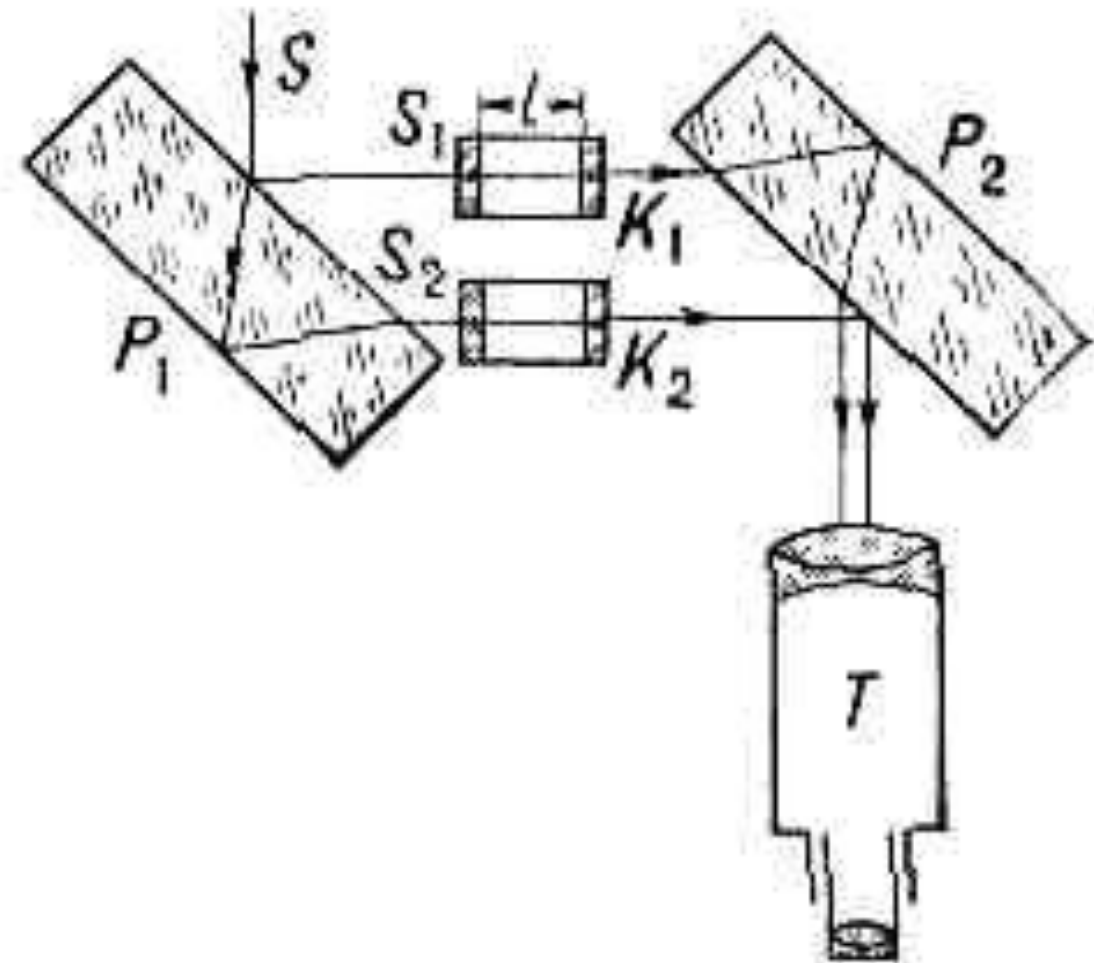
*Интерферометр Майкельсона* позволяет получить интерференцию лучей, отраженных от двух пространственно разнесенных зеркал  $M_1$  и  $M_2$ . Перемещая или наклоняя одно из них можно получить интерференционную картину «полосы Равного наклона» или «полосы равной толщины». В качестве одного из зеркал можно использовать исследуемую поверхность и измерить ее неровность. Лазерные интерферометры Майкельсона позволяют проводить измерения при большой разности хода, фиксируя относительные



*Интерферометр Жамена.* Существуют двулучевые Интерферометры, предназначенные для измерения показателей преломления газов и жидкостей — интерференционные рефрактометры. Один из них - интерферометр Жамена.

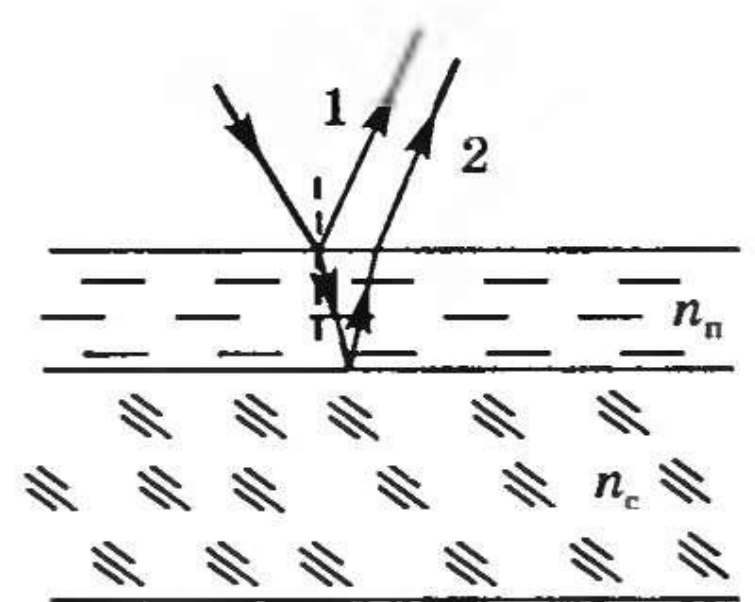
Два луча, формируемые пластинкой  $P_1$  из одного исходного, проходят эталонное и исследуемое тела  $K_1, K_2$ . Затем оба луча сводятся в клиновидной пластинкой  $P_2$  окуляре и дают интерференционную картину «полосы равной толщины».

Малейшее изменение оптических свойств исследуемого тела



**Просветление оптики**, так называется уменьшение отражения света от стеклянной поверхности. Для этого на поверхность оптического стекла наносят тонкую пленку с показателем преломления  $n_{\text{п}}$ , меньшим, чем а показатель преломления стекла  $n_{\text{с}}$ . Необходимо получить интерференционный минимум для отраженных лучей 1 и 2. Условие минимума – разность хода  $= \lambda/2$ . Для этого толщина пленки должна быть равна  $h = \lambda/(4n_{\text{п}})$  (4.10)

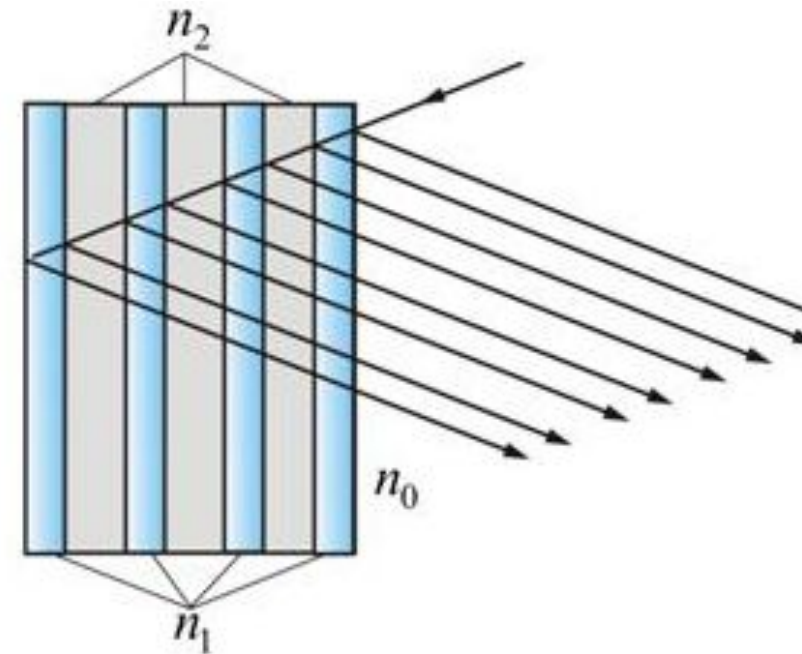
Для полного гашения отраженной волны необходимо выполнение условия  $n_{\text{п}} = \sqrt{n_{\text{с}}}$ . Осуществить просветление для всех волн видимого спектра невозможно. Поэтому условие выполняют только для зеленого цвета.



## *Создание высокоотражающих диэлектрических зеркал.*

Металлические зеркала имеют не очень хороший коэффициент отражения. До 10% света поглощается. Для получения коэффициента отражений, близкого к 1 создаются диэлектрические зеркала с многослойным отражающим слоем. На поверхность стекла наносятся множество прозрачных пленок из материалов с сильно отличающимися показателями преломления. В противоположность задаче просветления здесь

Необходимо создать интерференционный максимум для отраженных от поверхностей раздела лучей. Поэтому внешняя пленка имеет максимальный коэффициент преломления. Удастся получить зеркала с коэффициентом



**Пятиминутка.** Вычислить толщину просветляющей пленки и требуемый показатель преломления ее материала, если ее необходимо нанести на поверхность линзы, сделанной из стекла с показателем преломления  $n=1.5$ .