

Интерференция света

Содержание лекции:

- Принцип Гюйгенса
- Интерференция
- Классические интерференционные опыты
- Пространственная когерентность
- Временная когерентность
- Интерференция в тонких пленках

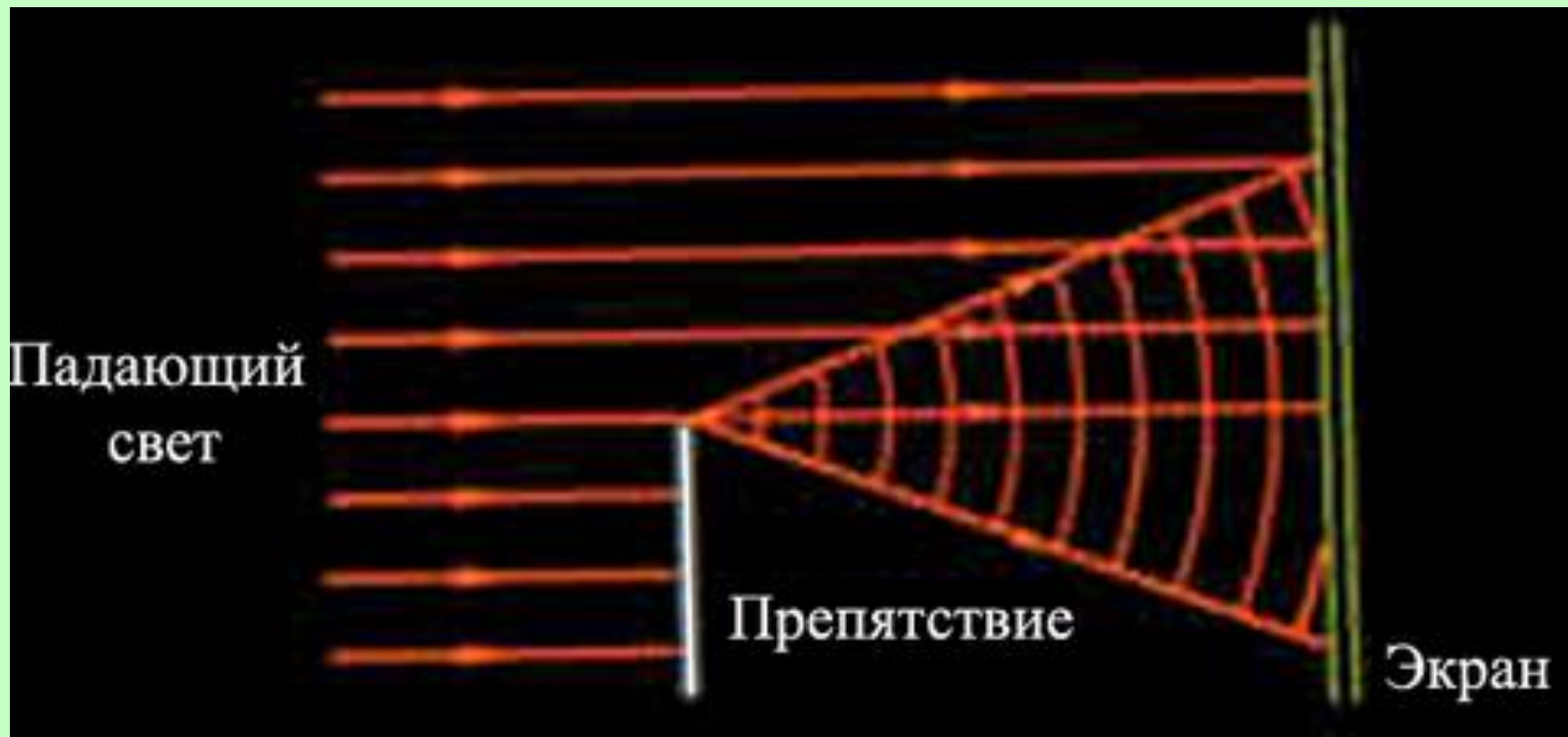
1. Принцип Гюйгенса

Приближения геометрической оптики неправомерны при описании процессов, происходящих при падении световой волны на преграду с отверстиями:

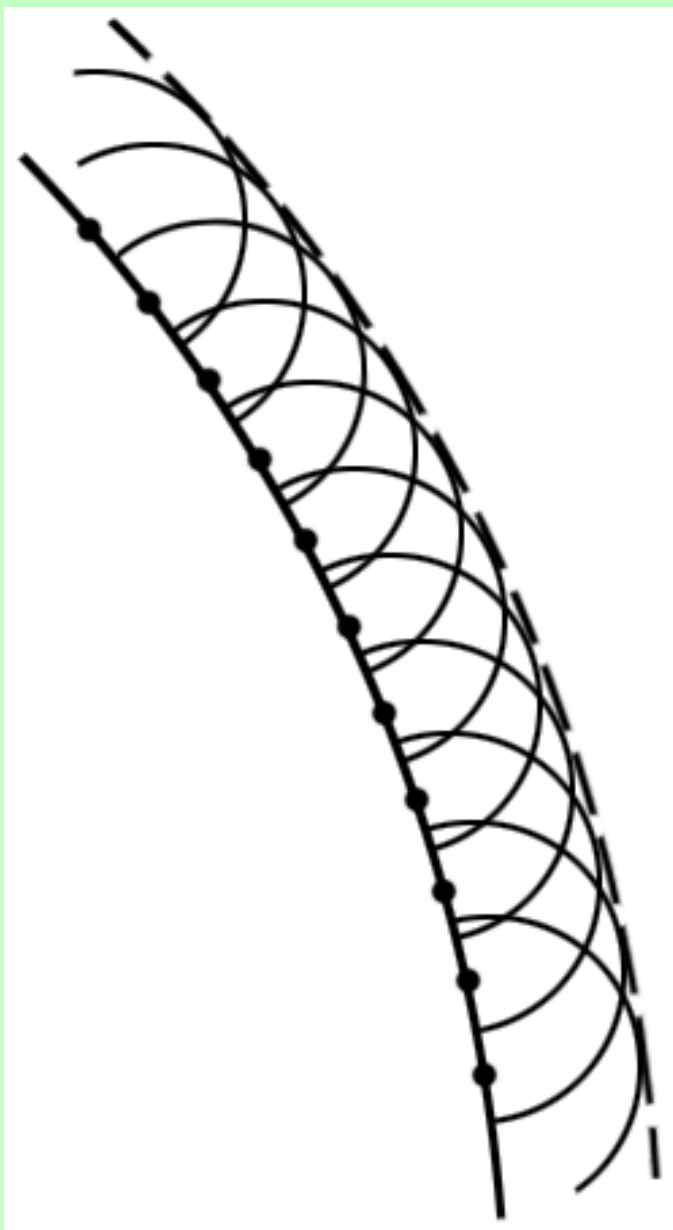
- в приближении геометрической оптики свет за преградой не проникает в область геометрической тени
- в действительности свет проникает в область геометрической тени, причем проникновение тем больше, чем меньше размеры отверстий. Если эти размеры сравнимы с длиной волны, законы геометрической оптики совершенно неправомерны.



Если размеры препятствия много больше длины волны, то волны за него не проникают, создается область тени



Огибание электромагнитными волнами препятствий и проникновение их в область геометрической тени наиболее отчетливо обнаруживается в тех случаях, когда размер огибаемых препятствий соизмерим с длиной волны



Объяснение поведению света за преградой с отверстием дает **принцип Гюйгенса**:

каждая точка, до которой доходит волновое движение, служит источником вторичных волн; их огибающая дает положение фронта волны в следующий момент.

Вторичными волнами называются волны, идущие от точек волновых поверхностей как от изотропных точечных источников.

2. Интерференция

Рассмотрим две волны одинаковой частоты, накладывающиеся друг на друга и возбуждающие в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

Амплитуда результирующего колебания в данной точке есть

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

*Если разность фаз возбуждаемых волнами колебаний остается постоянной во времени, то такие волны называются **когерентными***

В случае некогерентных волн:

$$\varphi_2 - \varphi_1 \neq \text{const}$$

- разность фаз непрерывно меняется
(вследствие ее среднее по времени
значение равно нулю)

Интенсивность результирующей волны всюду одинакова и
равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в
отдельности:

$$J = J_1 + J_2$$

В случае когерентных волн:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \text{const}$$

- разность фаз постоянна во времени (но
для каждой точки пространства своя)

Интенсивность результирующей волны

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad - \text{интерференционный член}$$

- Если $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$, интенсивность $I > I_1 + I_2$
- Если $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, интенсивность $I < I_1 + I_2$

Таким образом, *при наложении когерентных световых волн происходит перераспределение светового потока в пространстве с образованием максимумов и минимумов интенсивности – интерференция.*

В случае, если интенсивность обоих источников одинакова:

- в максимуме $I = 4I_1$
- в минимумах $I = 0$

Естественные источники света некогерентны, поскольку излучение светящегося тела складывается из волн, испускаемыми многими атомами (причем фаза нового цуга не связана с фазой предыдущего цуга).

Когерентные волны можно получить разделением волны, излучаемой одним источником, на 2 части:

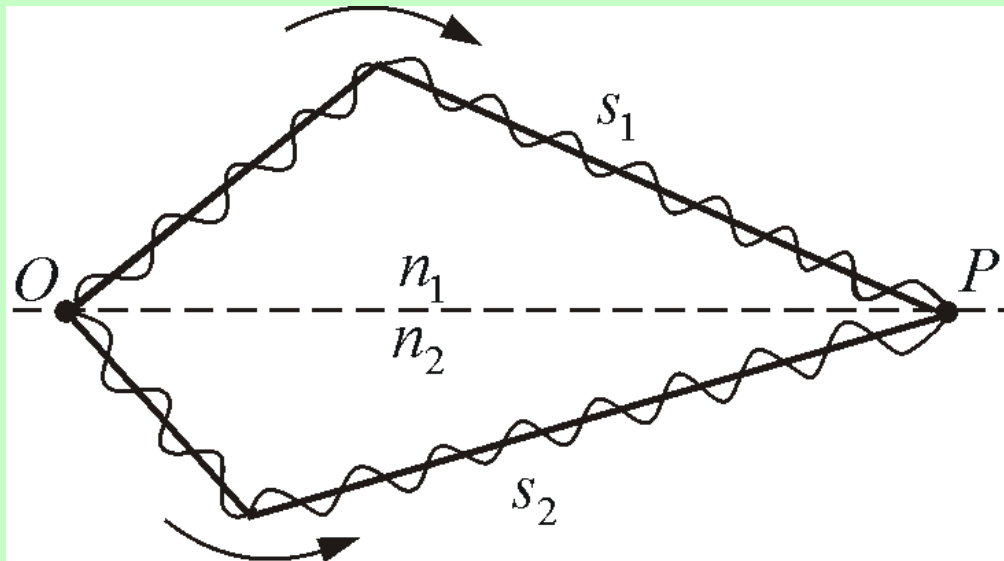
- если полученные волны заставить пройти разные оптические пути (их разность должна быть небольшой, т.к. складывающиеся колебания должны принадлежать одному цугу волн)
- далее наложить их друг на друга, - образуется интерференционная картина.

Рассмотрим данный процесс детально:

пусть в т. O происходит разделение волны на 2 когерентные ($\varphi_0 = 0$):

I волна проходит путь s_1 в среде с показателем преломления n_1 ;

II волна проходит путь s_2 в среде с показателем преломления n_2



В точке P:

I волна возбуждит колебание

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{s_1}{v_1} \right)$$

II волна

$$x_2 = A_2 \cos \omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right)$$

где v_1, v_2 – фазовые скорости волн.

Можно показать, что разность фаз двух когерентных волн есть

$$\delta = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

где λ_0 – длина волны в вакууме;

$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$$

– оптическая разность хода

L – оптическая длина пути.

- Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн

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

- условие интерференционного максимума

В этом случае разность фаз кратна 2π , колебания синфазны.

m - порядок интерференции.

- Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн:

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

*- условие
интерференционного
минимума.*

В этом случае разность фаз равна $\pm(2m + 1)\pi$, колебания находятся в противофазе.

Расстояние между интерференционными полосами – это расстояние между соседними максимумами.

Ширина интерференционной полосы – расстояние между соседними минимумами интенсивности.

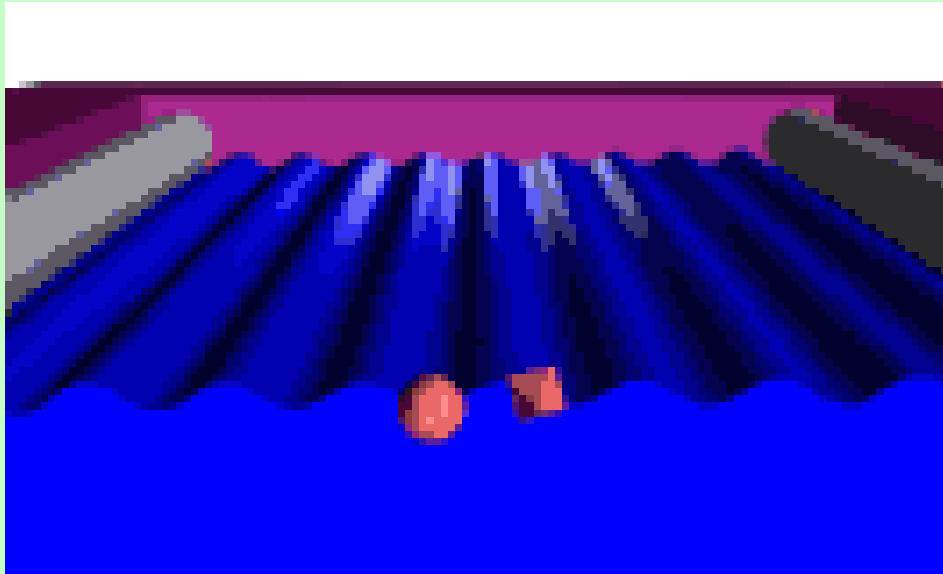
Одной из важных характеристик наблюдаемой интерференционной картины является *видность V , которая характеризует контраст интерференционных полос:*

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

где $I_{\max}$ и $I_{\min}$ — соответственно максимальное и минимальное значения интенсивности в интерференционной картине.

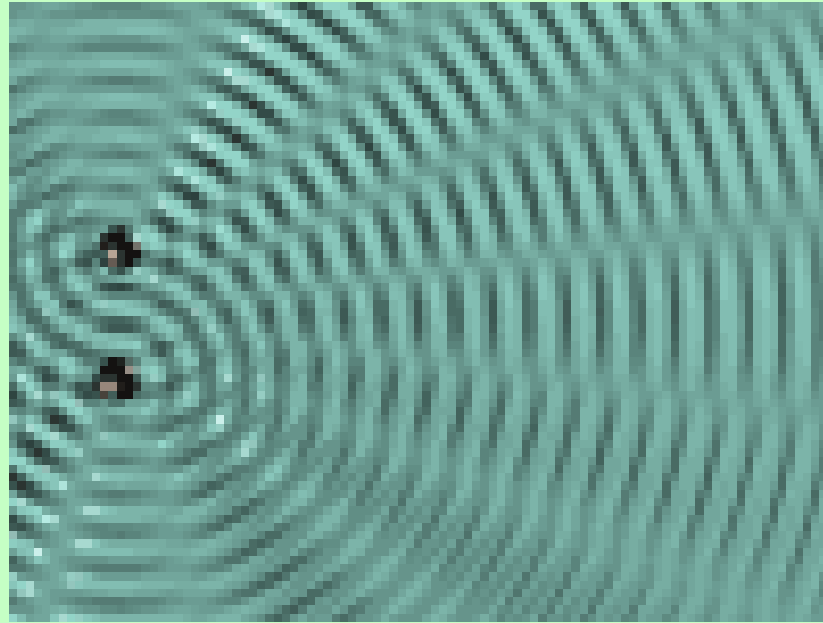
При интерференции монохроматических волн видность V зависит только от соотношения интенсивностей интерферирующих пучков света :

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$



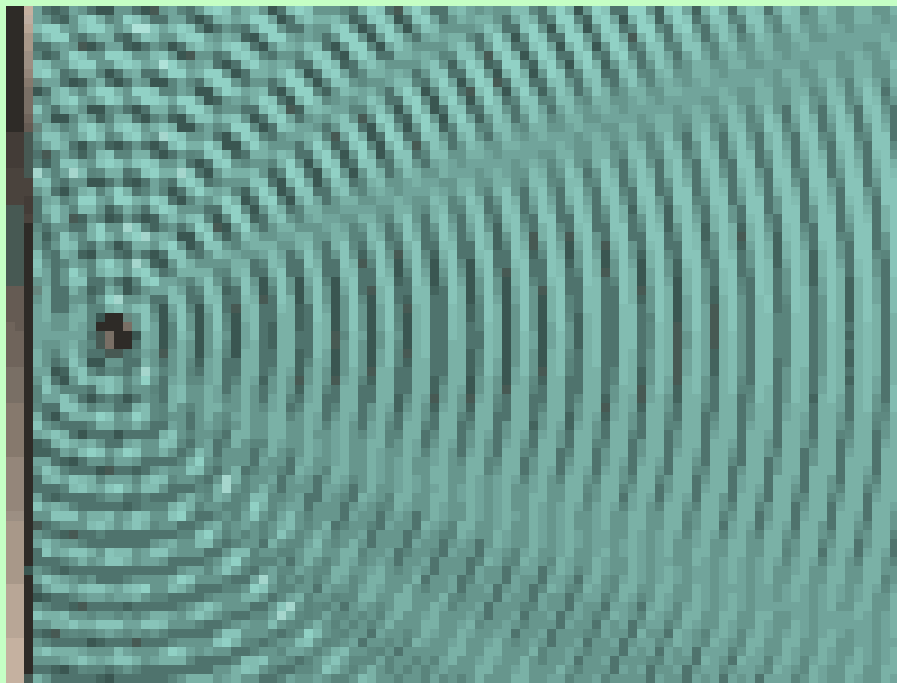
Интерференция двух волн на поверхности жидкости, возбуждаемых вибрирующими стержнями

Волны распространяются в противоположных направлениях и интерферируют с образованием стоячей волны. Красный шарик расположен в пучности стоячей волны и колеблется с максимальной амплитудой. Параллелепипед расположен в узле интерференционной картины и амплитуда его колебаний равна нулю (он совершает лишь вращательные движения, следуя наклону волны)



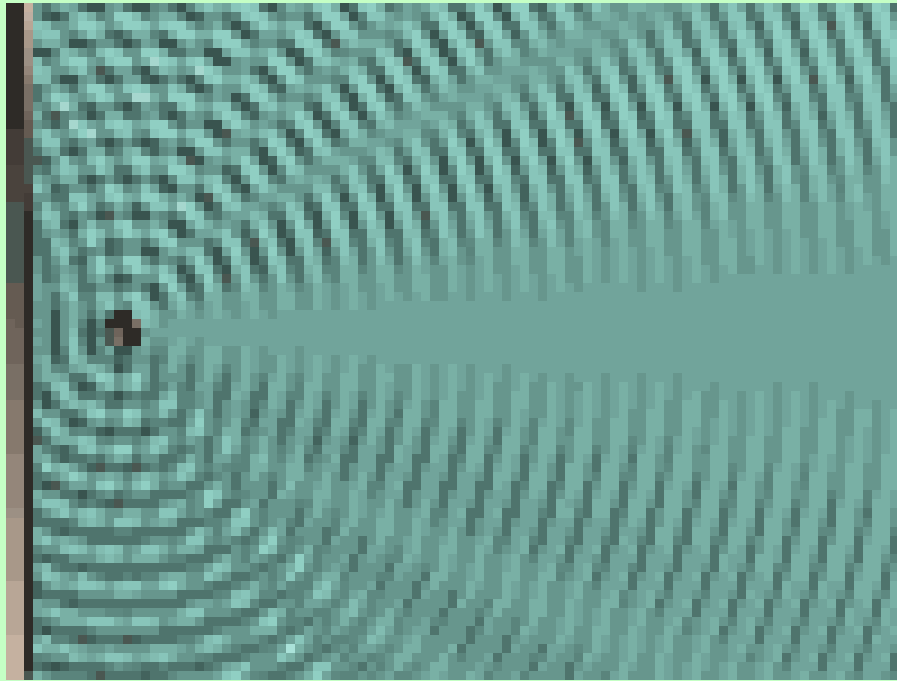
Интерференция поверхностных волн от двух точечных источников

В точках, для которых $r_2 - r_1 = \lambda (1/2 + n)$, поверхность жидкости не колеблется
(узловые точки (линии))



Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки

Расстояние от источника до стенки r кратно целому числу полуволн, исходная круговая волна интерферирует с волной, отражённой от стенки. Согласно пр. Гюйгенса, **отражённая волна совпадает с той, которая бы возбуждалась фиктивным точечным источником, расположенным по другую сторону стенки симметрично реальному источнику**. Т.к. r кратно целому числу полуволн, то справа от источника на оси соединяющей фиктивный и реальный источник разность фаз будет кратна целому числу волн, и круговая волна накладывается **в фазе с волной**, отражённой от стенки, увеличивая высоту гребней в интерференционной картине

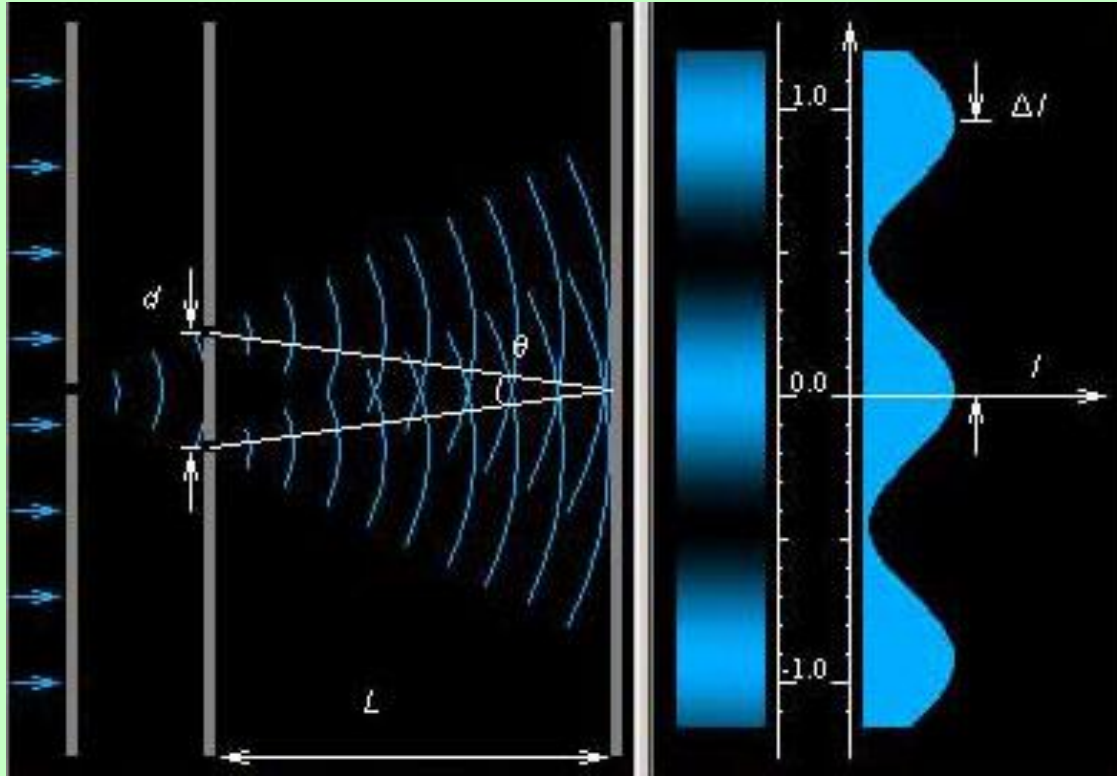


Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки

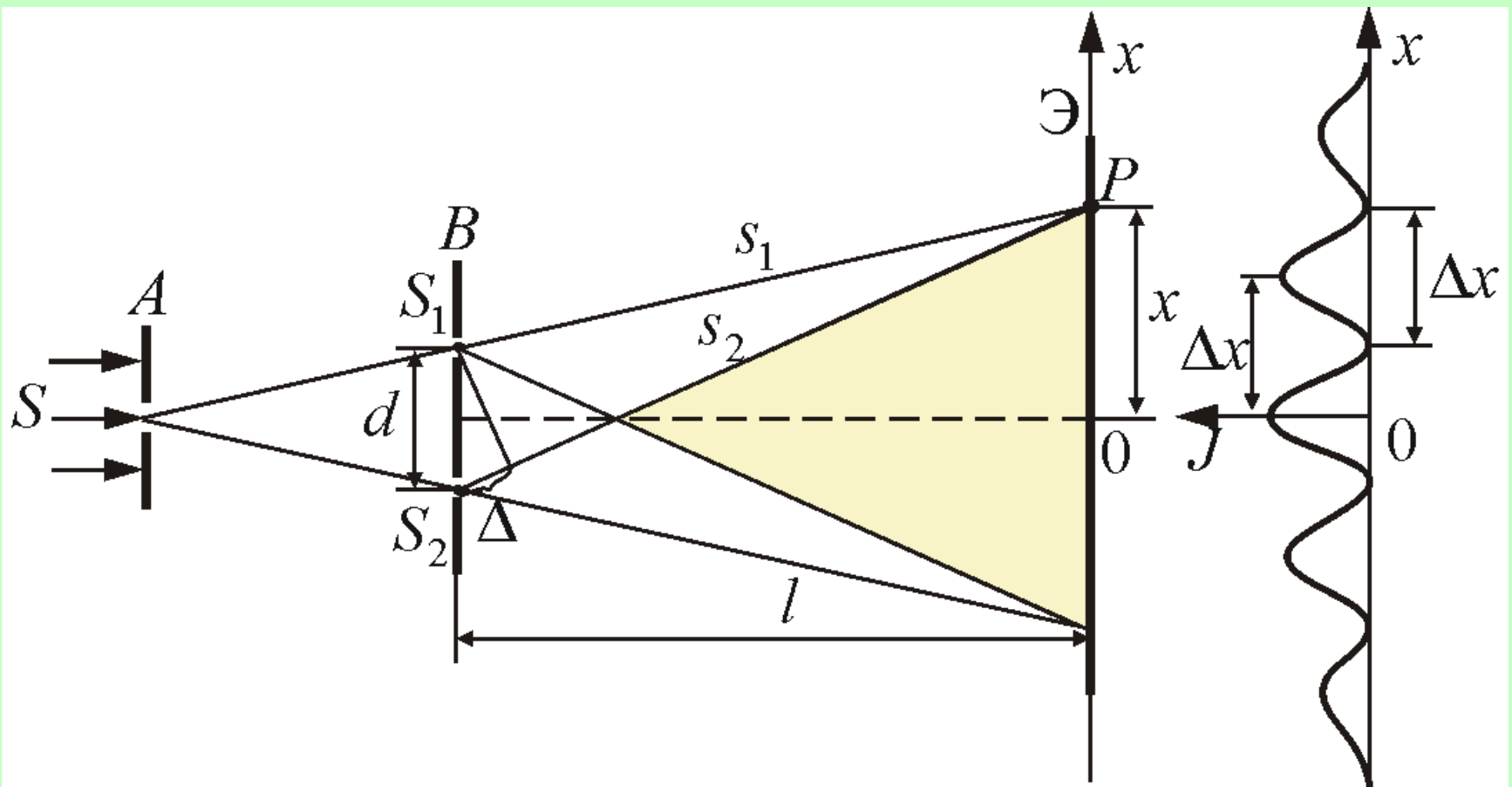
Расстояние между точечным источником и стенкой кратно целому числу полуволн плюс четверть волны. При этом справа от источника круговая волна накладывается в противофазе с волной, отражённой от стенки. В результате в широкой полосе справа от источника колебания жидкости отсутствуют

3. Классические интерференционные опыты

1. Интерференционный опыт Юнга



Параллельный пучок света падает на экран с небольшим отверстием. Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана, в котором проделаны две щели. Когерентные пучки, излучаемые каждой из щелей, интерferируют на третьем экране.

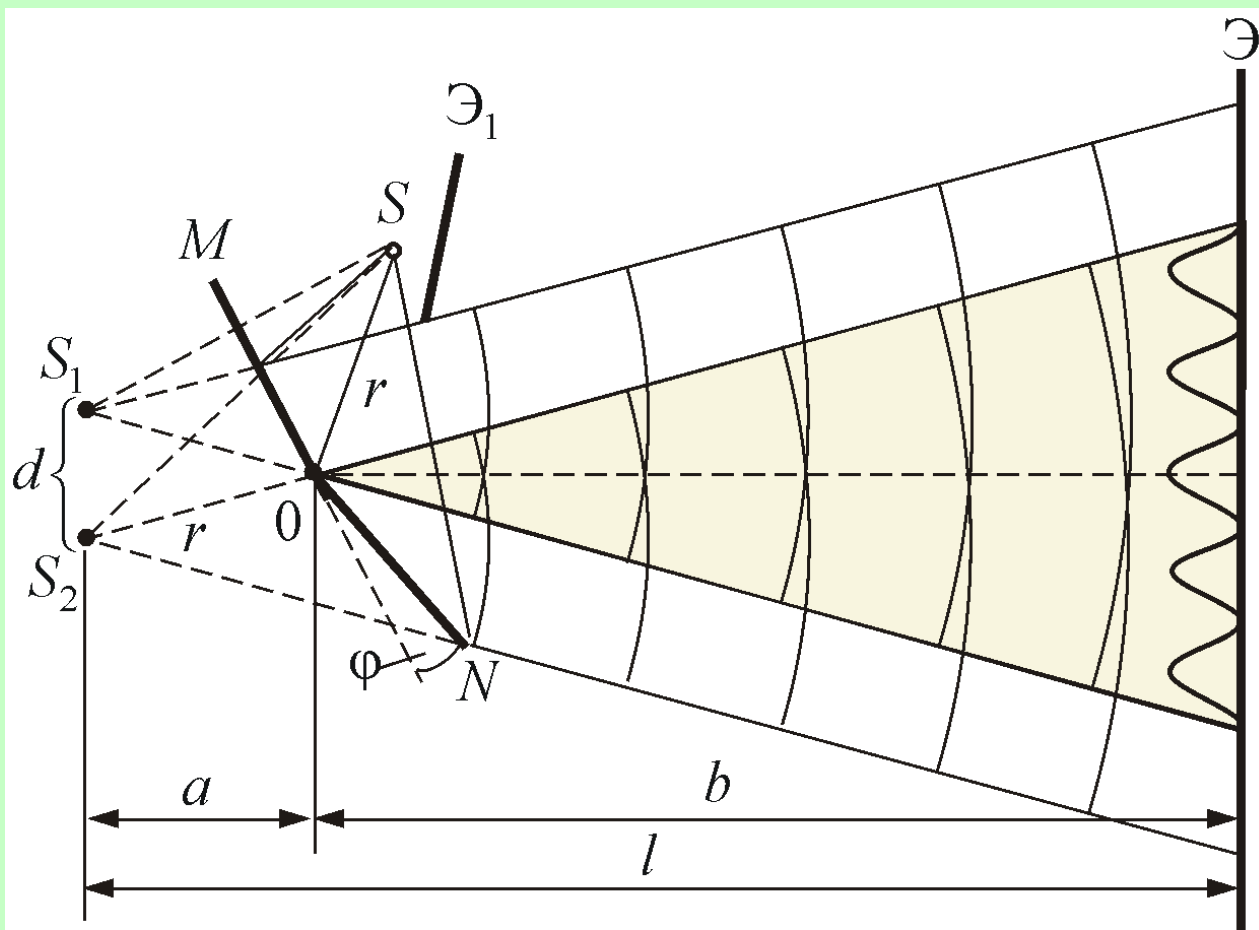


l - расстояние от щелей до экрана;
 d – расстояние между щелями.

$$l \gg d$$

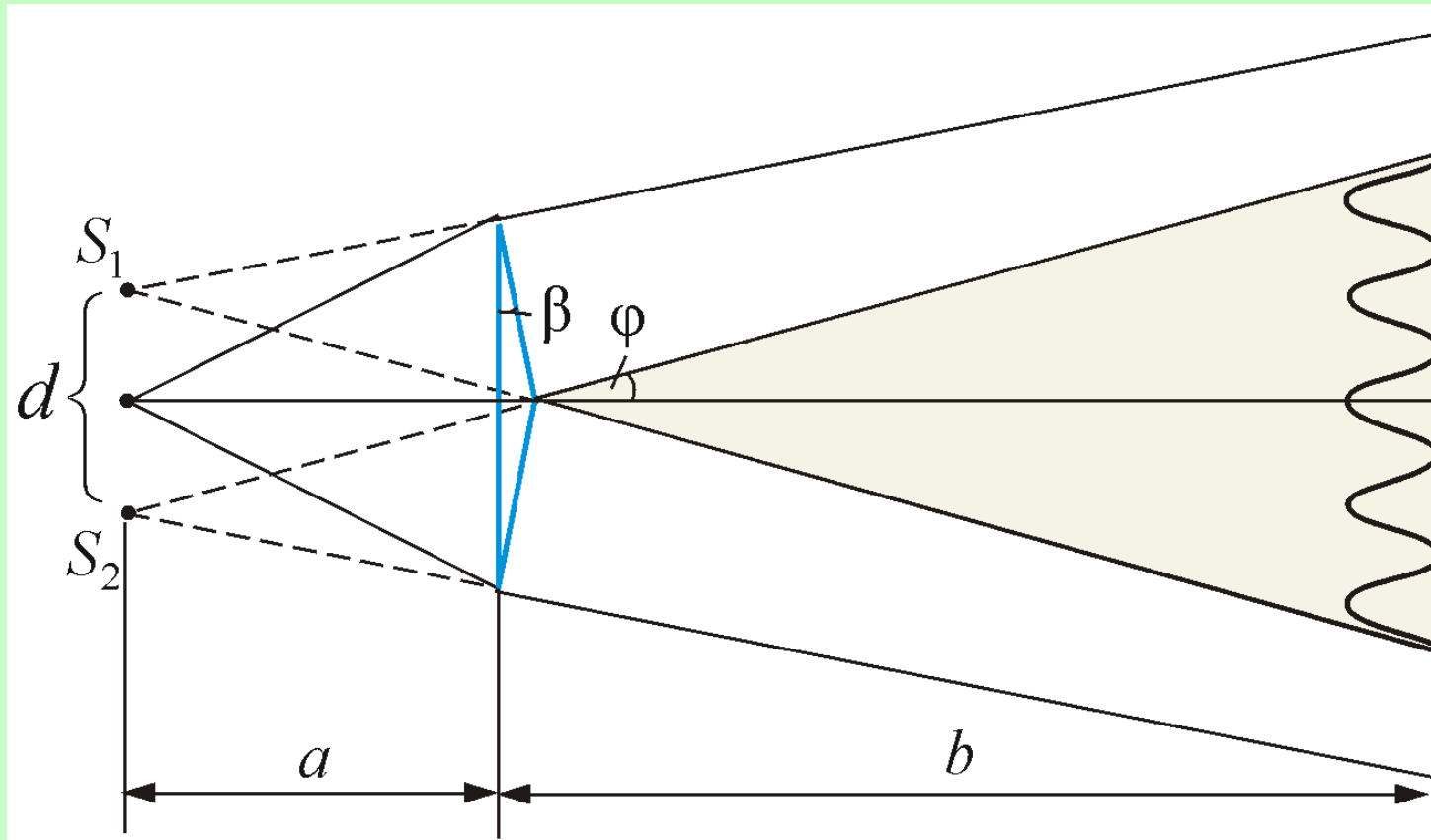
Главный (нулевой) максимум соответствует $m = 0$ (по центру),
 по обе стороны от него располагаются максимумы (минимумы)
 1-го порядка ($m = 1$), 2-го ($m = 2$) и т.д...

2. Зеркала Френеля



Свет от источника S отражается от двух зеркал, расположенных под достаточно малым углом ϕ . Волны, падающие на экран, могут рассматриваться как волны от двух мнимых изображений источника S в обоих зеркалах. Непрозрачный экран $\mathcal{E}_1$ преграждает свету путь от источника S к экрану $\mathcal{E}$

3. Бипризма Френеля



Состоит из двух стеклянных призм с малыми преломляющими углами, сложенными основаниями. Источник света – щель S , параллельная ребру бипризмы. Преломляясь в бипризме, падающий пучок света разделяется на 2 когерентных пучка с вершинами в мнимых изображениях S_1 и S_2 щели S . При перекрывании этих пучков на экране образуется система параллельных интерференционных полос

4. Пространственная когерентность

***Когерентностью** называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.*

Термином «**пространственная когерентность**» объединяется круг вопросов, возникающих при использовании в интерференционных опытах **протяженных источников**.

Протяженный источник света можно рассматривать как **совокупность точечных некогерентных источников**, в этом случае интерференционная картина, возникающая на экране, будет наложением интерференционных картин, создаваемых каждым из участков в отдельности.

Таким образом, увеличение размеров источника приводит к **ухудшению контрастности интерференционных полос и даже к их полному исчезновению**.

Критерий наблюдения интерференции при протяженном источнике:

$$b \leq b_{\max} = \frac{\lambda}{\Omega}$$

- интерференционные схемы с большой апертурой требуют источников малых размеров.

b - допустимый размер источника;

λ — длина волны;

Ω - *апертура интерференции* — угол между выходящими из источника интерферирующими лучами.

Введем понятие *радиуса пространственной когерентности* (*длины пространственной когерентности*):

- это максимальное поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции.

$$\rho_k = \frac{\lambda}{\theta}$$

ρ_k — радиус пространственной когерентности;

λ — длина волны;

θ — угловой размер источника.

Физический смысл понятия радиуса пространственной

когерентности протяжённого источника состоит в представлении о возможности наблюдения интерференционной картины от протяжённого источника, если он размещается внутри круга, диаметр которого равен $2\rho_k$.

Пространственно когерентными источниками называются источники, размеры и взаимное расположение которых позволяют (при необходимой степени монохроматичности света) наблюдать интерференцию.

Условия пространственной когерентности двух волн (в фиксированный момент времени):

1) постоянная во времени разность фаз:

$$\omega_1 t + \varphi_{01} - \omega_2 t - \varphi_{02} = \text{const},$$

откуда следует

$$(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_{01} - \varphi_{02} = \text{const}.$$

Это справедливо лишь при

$$\omega_1 = \omega_2$$

Таким образом, условие постоянства во времени разности фаз эквивалентно **условиям одинаковости для когерентных лучей циклических частот, частот и длин волн в вакууме.**

2) соизмеримость амплитуд интерферирующих волн,

3) одинаковое состояние поляризации,

4) лучи, пройдя разные пути, встречаются в некоторой точке пространства.

5. Временная когерентность

Всякий прибор, с помощью которого можно наблюдать интерференционную картину (человеческий глаз, фотопластинка, ...) обладает **инерционностью**: усредняет информацию, полученную в течение некоторого промежутка времени.

- Если за это время среднее значение интерференционного члена равно нулю, интерференция отсутствует;
- Если отлично от нуля, прибор обнаружит интерференцию.

Атом излучает цуг в течение 10^{-8} с, а по истечении этого времени **первое условие когерентности нарушается** за счет хаотичного изменения начальной фазы каждого из цугов, полученных при излучении естественных источников.

Инерционность человеческого глаза составляет 0,1 с,
и в результате глаз видит равномерно освещенное поле вместо интерференционной картины

Фаза реальной волны за счет хаотичного изменения
начальной фазы каждого из цугов непрерывно меняется:

*Время, за которое случайное изменение фазы волны достигает значения порядка π , называется **временем когерентности** (**длительность цуга**) (за это время колебание «забывает» первоначальную фазу и становится некогерентным по отношению к самому себе).*

*Расстояние, на которое сместится волна за это время, называется **длиной когерентности**.*

Для получения интерференционной картины путем деления естественной волны на 2 части необходимо, чтобы **оптическая разность хода была меньше длины когерентности.**

Влияние немонохроматичности:

Когерентными являются **монохроматические волны** - *неограниченные в пространстве волны одной определенной и строго постоянной частоты*.

Ни один реальный источник не дает строго монохроматического света, немонохроматичность света (как и увеличение размеров источника) ведет к ухудшению контрастности интерференционных полос, а затем к их полному исчезновению.

*Когерентность колебаний, которые совершаются в одной и той же точке пространства, определяемая степенью монохроматичности волн, называется **временной когерентностью***.

Можно показать ,что

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$$

- чем шире интервал частот, представленных в данной волне, тем меньше время когерентности.

Предельный наблюдаемый порядок интерференции

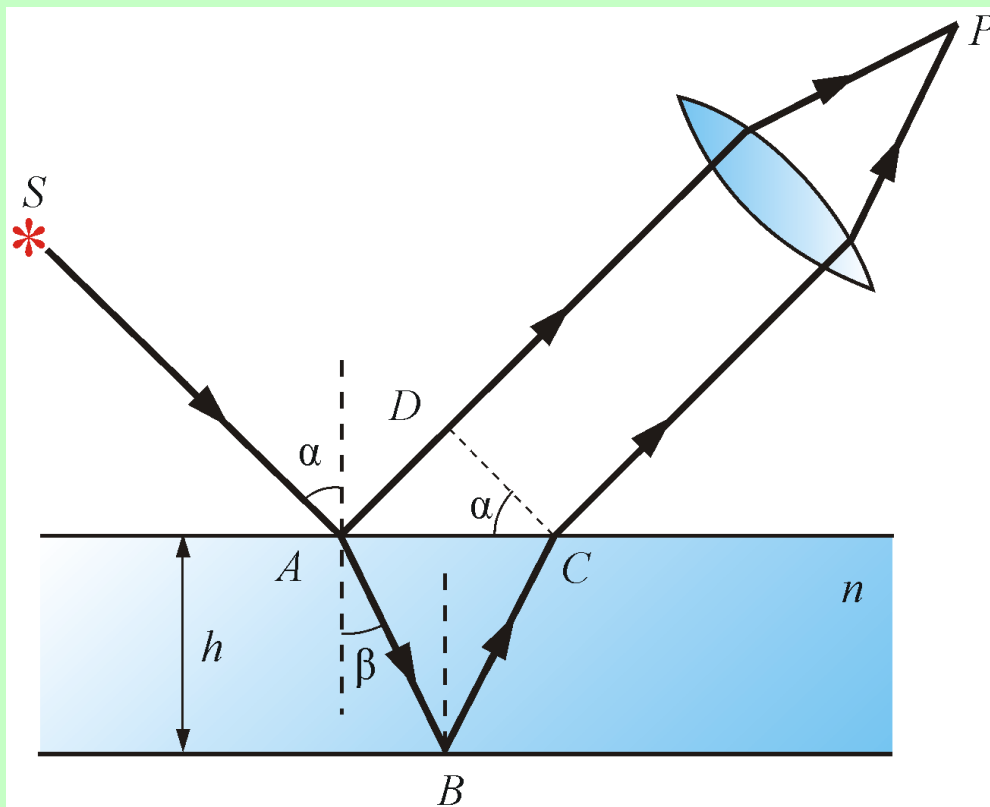
$$m_{\text{пред}} = \frac{\omega}{\Delta\omega} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

- число наблюдаемых интерференционных полос возрастает при уменьшении спектрального интервала.

6. Интерференция в тонких пленках

При падении световой волны на тонкую прозрачную пленку (пластинку) происходит отражение от обеих поверхностей пленки – возникают 2 световые волны, которые могут интерферировать.

1. Плоскопараллельная пластинка

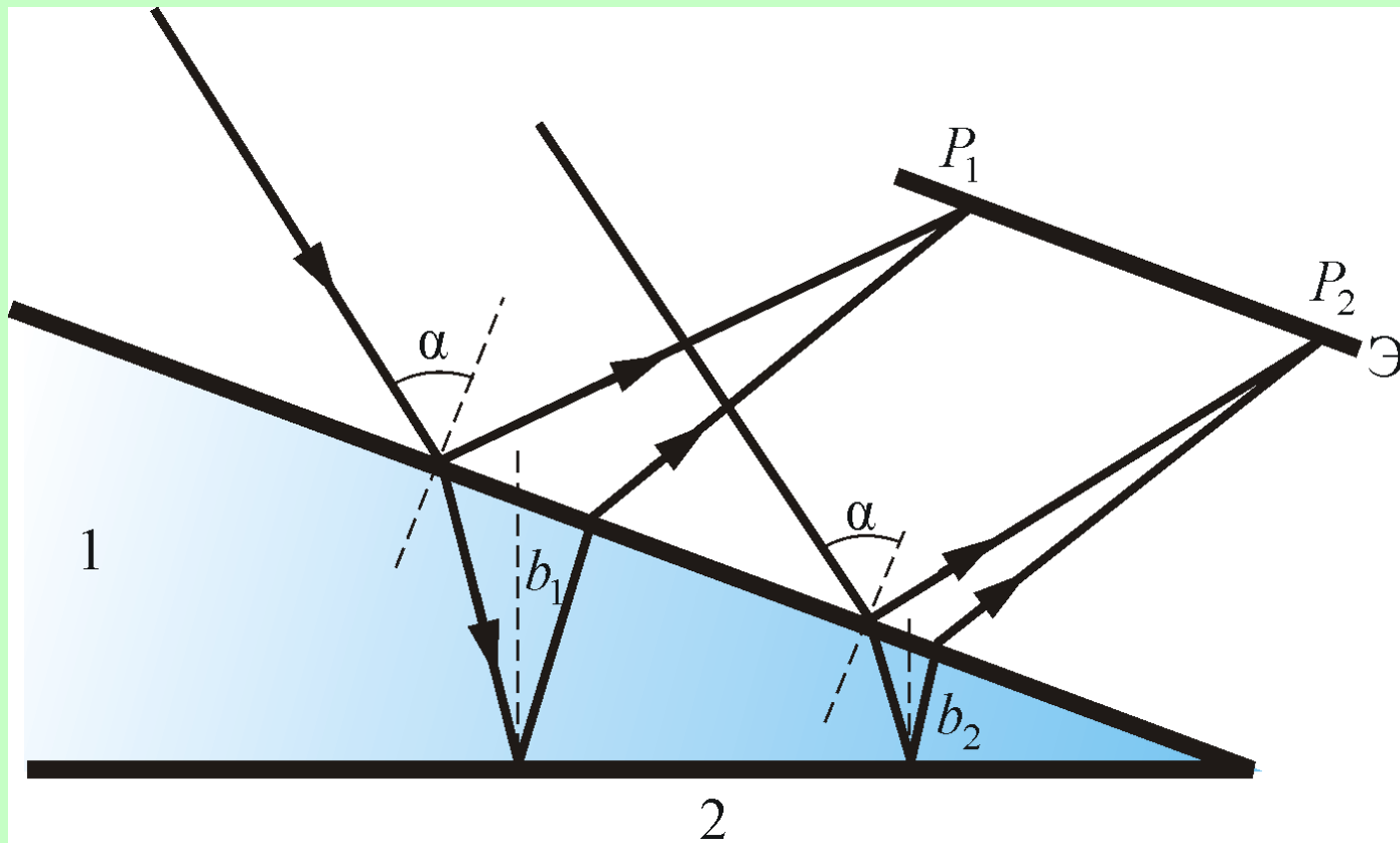


При падении на пластинку плоской волны образуются 2 отраженные волны, разность хода которых есть

$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda_0}{2}$$

Наблюдаемая интерференционная картина – **полосы равного наклона**.

2. Пластика переменной толщины (клин)



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

Кольца Ньютона



Кольцевые **полосы равной толщины**, наблюдаемые в воздушном зазоре *между соприкасающимися выпуклой сферической поверхностью линзы малой кривизны и плоскопараллельной толстой стеклянной пластинкой*, называют **кольцами Ньютона**.

При нормальном падении света полосы равной толщины имеют вид концентрических окружностей, при наклонном — эллипсов.

Радиусы колец Ньютона:

$$r = \sqrt{\frac{R\lambda_0 (m-1)}{2}} \quad (m = 1, 2, 3...)$$

- Четные m – светлые кольца;
- Нечетные m – темные кольца:

$m = 1$ – точка в месте касания
пластинки и линзы (**минимум**
интенсивности,
соответствующий изменению
фазы на π при отражении
световой волны от пластинки).

