

ОПТИКА

Лекция 27.

Тема: Интерференция света

Учебник:

Трофимова Т.И. Курс физики : учеб. пособ. для вузов / Т. И. Трофимова. - М.: Академия, 2007.- с. **315-327**.

к.ф.-м.н.
Курочкин А.

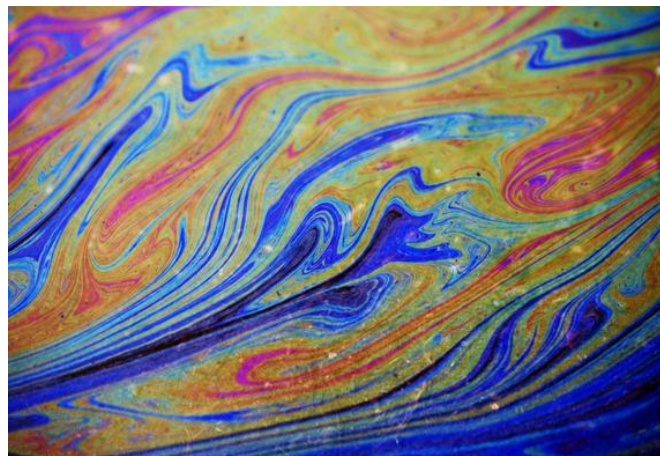
Использование интерференции в технике

Проверка качества обработки поверхности до одной десятой длины волны. несовершенство обработки определяют по искривлению интерференционных полос, образующихся при отражении света от проверяемой поверхности.

Интерферометры служат для точного измерения показателя преломления газов и других веществ, длин световых волн.

Просветление оптики. Объективы фотоаппаратов и кинопроекторов, перископы подводных лодок и другие оптические устройства состоят из большого числа оптических стекол, линз, призм. Каждая отполированная поверхность стекла отражает около 5% падающего на нее света. Чтобы уменьшить долю отражаемой энергии, используется явление интерференции света.

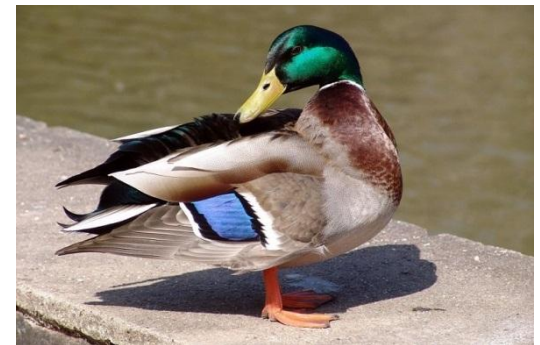
Интерференция света – это наложение нескольких когерентных световых волн в результате чего происходит пространственное перераспределение светового потока, в одних местах возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности.



Плѐнка
Бензина



Мыльный
пузырь



Волновой фронт – геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t .

Волновая поверхность – это множество всех точек пространства, в которых фаза колебаний в данный момент времени имеет одно и то же значение.

Луч – это линия в пространстве, которая в каждой своей точке перпендикулярна волновой поверхности, проходящей через эту точку.

Виды волн

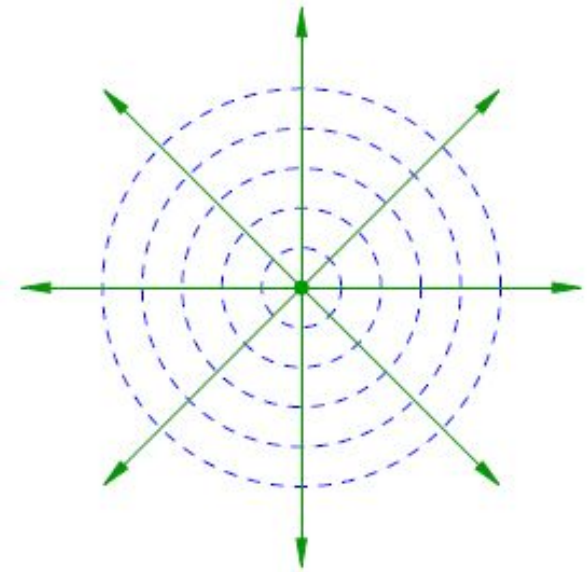
1. Сферическая.

Обладает волновыми
сферическими
поверхностями.

$$\xi(r, t) = \frac{A_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi_0),$$

r – расстояние от источника волны до рассматриваемой точки

- - лучи, перпендикулярные волновым поверхностям;
----- - волновые поверхности.

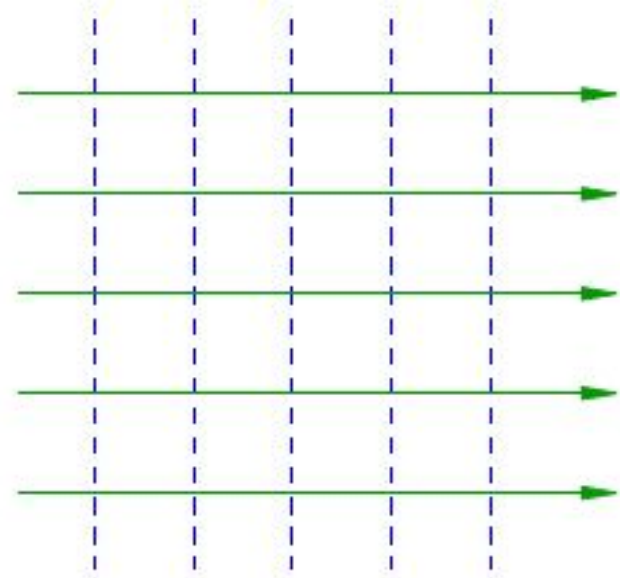


Пояснение: в однородной среде
(физические свойства одинаковы во всех направлениях)
источник света излучает **сферические волны**.

2. Плоская.

Волновые поверхности –
плоскости.

$$\xi(x, t) = A \cos(\omega t - kx + \varphi_0),$$



- - лучи, перпендикулярные волновым поверхностям;
----- - волновые поверхности (параллельные плоскости).

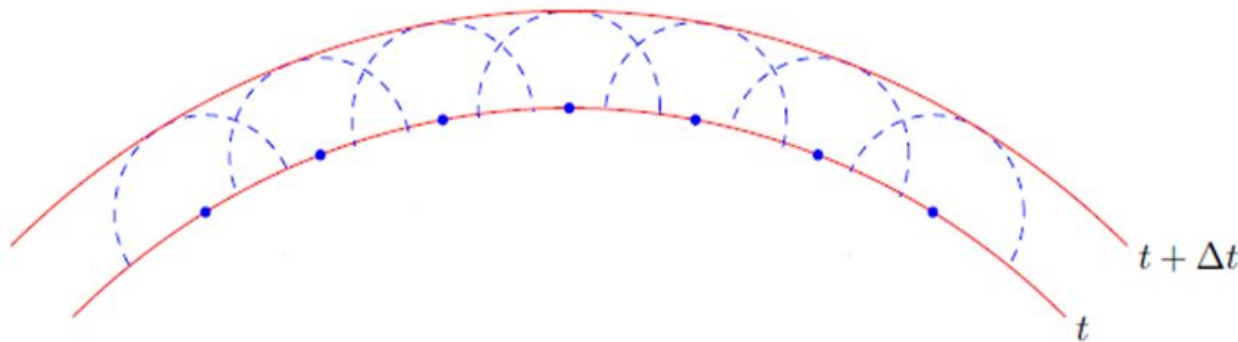
Пояснение: в случае нахождения на достаточно большом расстоянии от источника, можно пренебречь искривлением сферической волновой поверхности и считать волну приблизительно **плоской**.

Принцип Гюйгенса

Каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн дает положение волнового фронта в следующий момент времени.



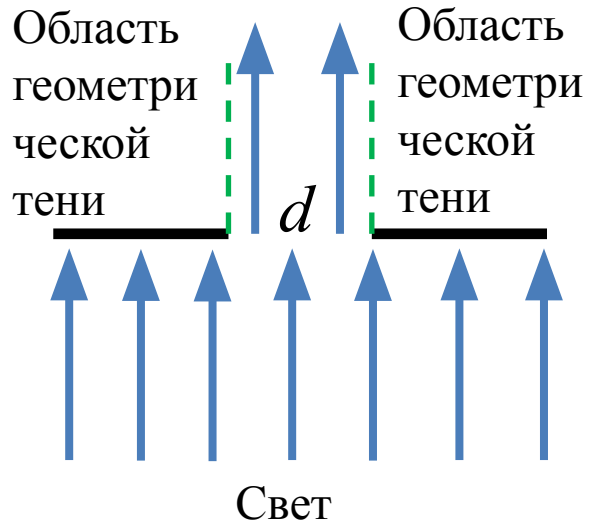
Гюйгенс
Христиан
(1629-1695)



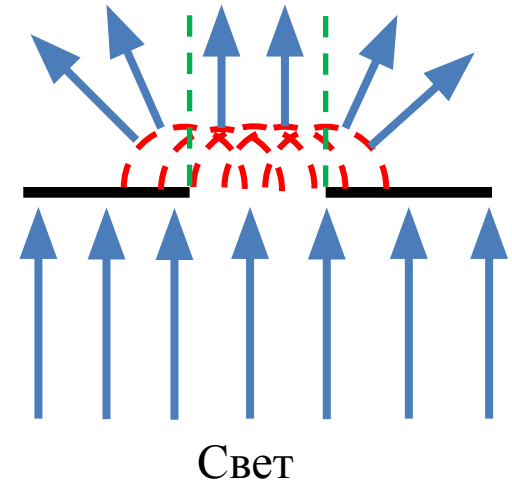
- Каждую точку исходной волновой поверхности мы рассматриваем как **источник вторичных волн**.
- За время Δt **вторичные волны** пройдут расстояние $c\Delta t$.
- Из каждой точки старой волновой поверхности строим сферы радиуса $c\Delta t$; новая волновая поверхность будет **касательной** ко всем этим сферам.

Поведение света за преградой с отверстием

$$d \gg \lambda, \lambda \approx 10^{-7}$$



$$d \approx \lambda, \lambda \approx 10^{-7}$$



Пусть на плоскую преграду с отверстием $d \approx \lambda$ падает плоская волна.

Тогда по Гюйгенсу, построив огибающую вторичных сферических волн, можно увидеть, что за отверстием волна проникает в область геометрической тени.

Когерентность

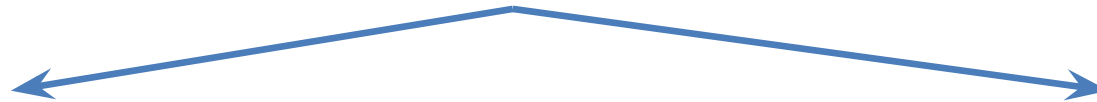
Когерентностью называется согласованное протекание нескольких колебательных или волновых процессов.

Два источника называются **когерентными**, если они имеют:

1. одинаковую частоту (являются монохроматическими);
2. постоянную, не зависящую от времени разность фаз;
3. одинаковую плоскость поляризации.

Волны, возбуждаемые такими источниками, также называются **когерентными**.

Когерентность



Пространственная

Временная

Монохроматическая волна — гармоническая волна с постоянными во времени частотой, амплитудой и начальной фазой.

1. Временная когерентность

Реальная световая волна образуется наложением огромного числа **цугов** всевозможных начальных фаз и частот заключённых в конечном интервале $\Delta\omega$.



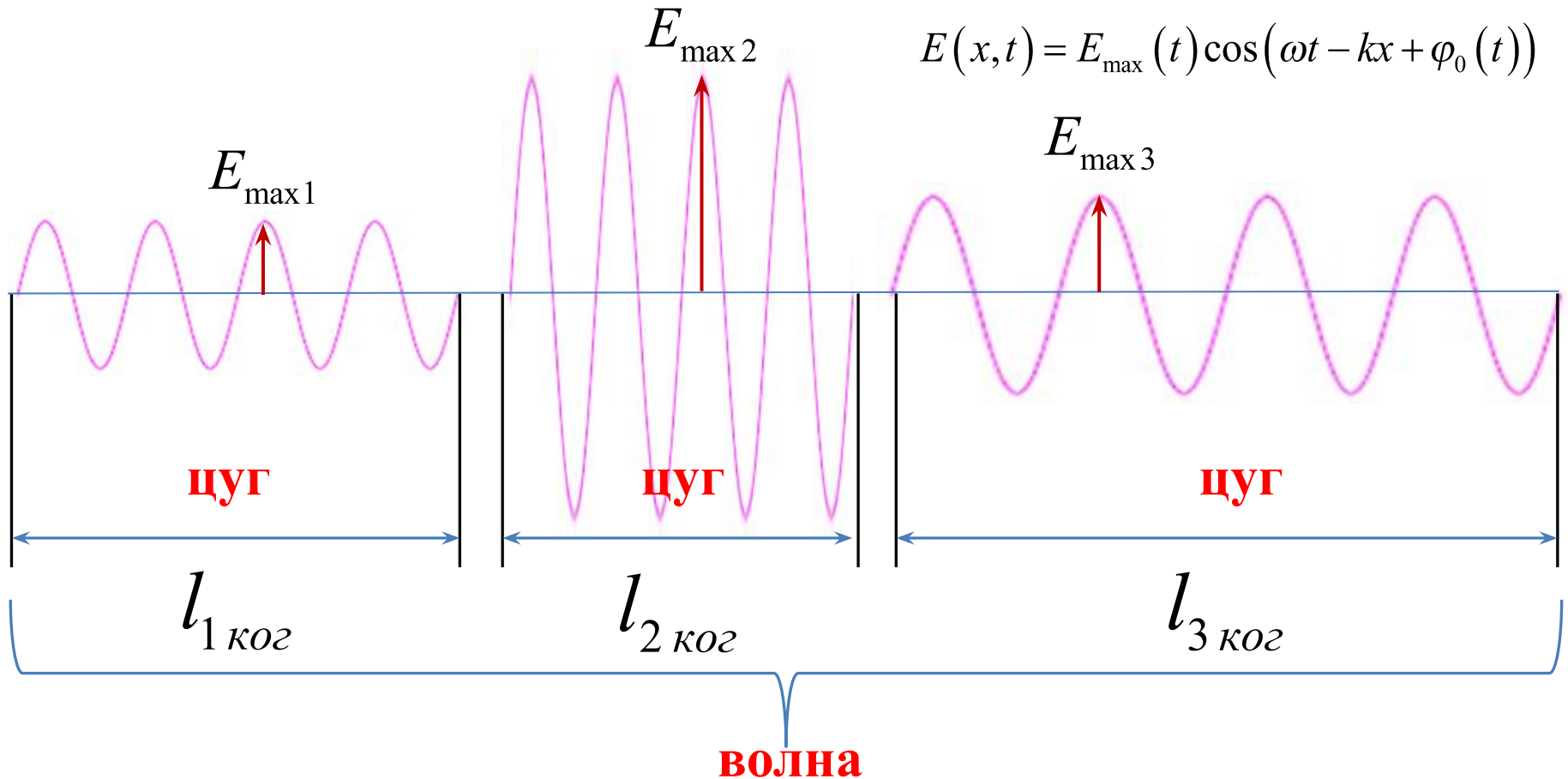
Амплитуда и фаза волны претерпевают со временем непрерывные случайные изменения

$$E(x, t) = E_{\max}(t) \cos(\omega t - kx + \varphi_0(t))$$

Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$ – время, за которое случайное изменение фазы волны достигает порядка π .

За это время колебание как бы забывает свою первоначальную фазу и становится некогерентными по отношению к самому себе.

$$E(x, t) = E_{\max}(t) \cos(\omega t - kx + \varphi_0(t))$$



Длину когерентности $l_{\text{ког}}$ определяет расстояние, на которое волна распространяется за время, пока её амплитуда и фаза остаются постоянными.

$$l_{\text{ког}} = \tau_{\text{ког}}$$

Важно!!!

Для получения интерференционной картины путём деления естественной волны на две части необходимо, чтобы оптическая разность хода ΔL была меньше, чем длина когерентности $l_{\text{ког}}$.

$$\Delta L < l_{\text{ког}}$$

Чем шире интервал частот, представленных в данной световой волне, тем меньше время когерентности этой волны.

$$\tau_{\text{ког}} \propto \frac{1}{\Delta \nu}$$

Перейдём к интервалу длин волн

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad d\lambda = -\frac{c}{\nu^2} d\nu$$

$$\Delta \nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta \lambda$$

Длина когерентности

$$\tau_{\text{ког}} \propto \frac{1}{\Delta \nu} \propto \frac{\lambda^2}{c \Delta \lambda}$$

$$l_{\text{ког}} = \tau_{\text{ког}} \cdot \frac{\lambda^2}{c \Delta \lambda} \propto \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

Предельное число различимых полос при интерференции

Для получения интерференционной картины путём деления естественной волны на две части необходимо, чтобы оптическая разность хода ΔL была меньше, чем длина когерентности $l_{\text{ког}}$.

$$\Delta L = 2m \frac{\lambda_{\text{вак}}}{2} \approx 2m \frac{\lambda}{2}$$

Условие
интерференционного
максимума m порядка

$$l_{\text{ког}} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

$$2m \frac{\lambda}{2} \approx \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

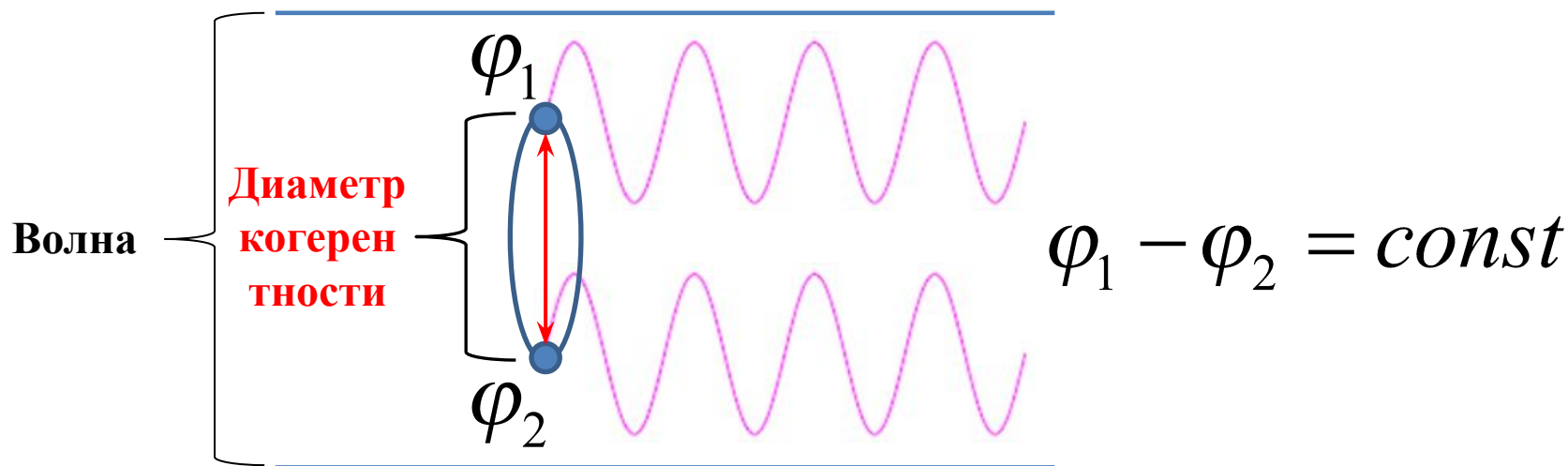
$$m_{\text{предельный}} \approx \frac{\lambda}{\Delta \lambda}$$

Число наблюдаемых интерференционных полос возрастает при уменьшении интервала длин волн.

2. Пространственная когерентность

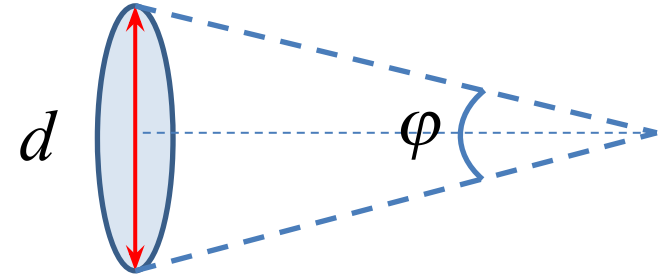
Характеризует наличие взаимной когерентности двух световых пучков, взятых из различных точек сечения волны.

Диаметр когерентности – наибольший диаметр круга, мысленно вырезаемый в поперечном сечении волны, при котором любые два пучка, исходящие из различных точек внутри этого круга, ещё остаются взаимно когерентными.



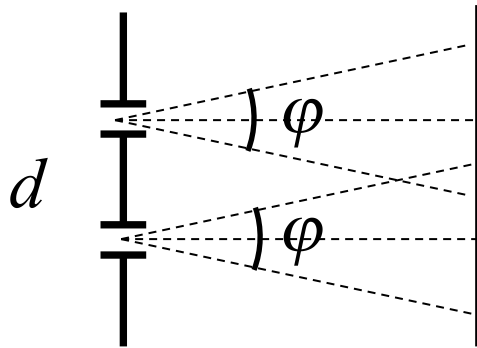
Условие наблюдения интерференции от протяжённого источника

Протяжённый источник имеет форму диска, видимого из данной точки под углом φ .

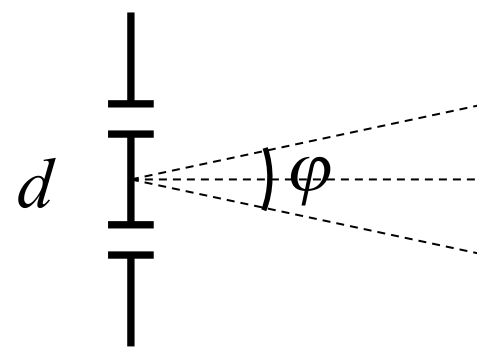


$$d < \frac{\lambda}{\varphi}$$

Наибольшее расстояние между щелями, при котором можно наблюдать интерференцию



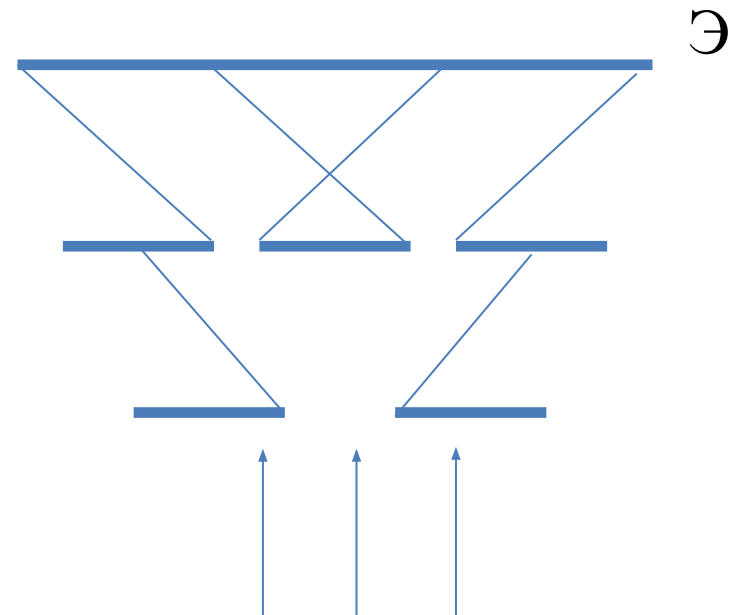
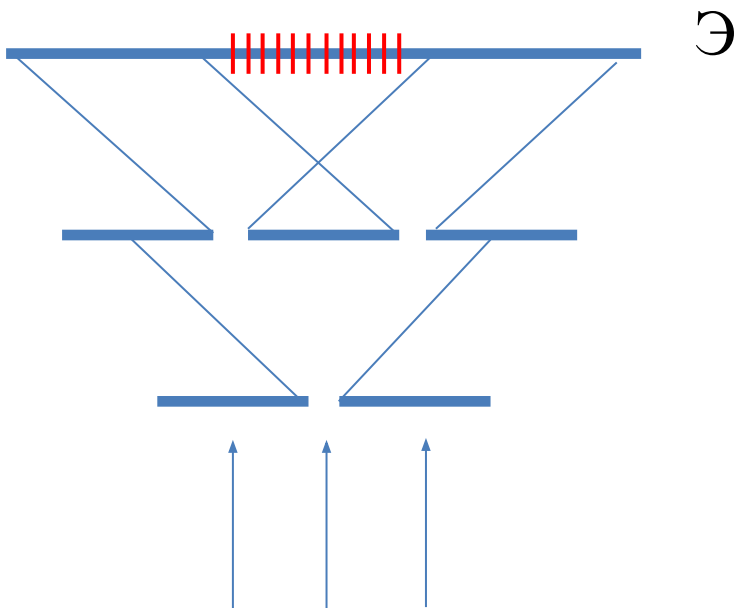
экран



экран

$$d < \frac{\lambda}{\varphi}$$

- У тепловых источников мала не только длина когерентности, но и пространственная когерентность по сечению пучка.
- Поэтому, для получения чёткой интерференционной картины необходим источник малых размеров.
- При увеличении источника интерференционная картина исчезает.



Пример

Бросим в воду горсть камней. От каждого камня пойдёт круговая волна с центром в точке падения камня. Эти круговые волны, накладываясь друг на друга, создадут **общую волновую картину** на поверхности воды.

Все **круговые волны** и порождённая ими волновая картина будут существовать и после того, как камни опустятся на дно. Следовательно, непосредственной причиной исходных круговых волн служат не сами камни, а **локальные возмущения** поверхности воды в тех местах, куда камни упали.

Для описания последующего волнового процесса существенно только то, что в начальный момент времени в определённых точках поверхности воды возникли **круговые волны**.

Сложение колебаний

Принцип суперпозиции волн. Если две волны накладываются друг на друга в определённой области пространства, то они порождают новый волновой процесс. При этом значение колеблющейся величины в любой точке данной области равно сумме соответствующих колеблющихся величин в каждой из волн по отдельности.

При наложении двух электромагнитных волн напряжённость электрического поля в данной точке равна сумме напряжённостей в каждой волне (и то же самое для индукции магнитного поля).

Принцип суперпозиции справедлив не только для двух, но и вообще для любого количества накладываются волн.

Результирующее колебание в данной точке всегда равно сумме колебаний, создаваемых каждой волной по отдельности.

Рассмотрим пример наложения двух волн одинаковой амплитуды и частоты.

$$A = \text{const},$$

$$v = \text{const}.$$

1. Фазы в накладываются волнах совпадают



Максимумы красной волны приходятся в точности на максимумы синей волны, минимумы красной волны - на минимумы синей (левая часть рисунка).

Красная и синяя волны складываются в фазе и усиливают друг друга, порождая колебания удвоенной амплитуды.

2. Фазы в накладываются волнах не совпадают



Сдвинем синюю синусоиду относительно красной на половину длины волны. Тогда максимумы синей волны будут совпадать с минимумами красной и наоборот - минимумы синей волны совпадут с максимумами красной.

Колебания, создаваемые этими волнами, будут происходить **в противофазе** — **разность фаз колебаний станет равна π** .
Результирующее колебание окажется равным **нулю**.

Некогерентность макроскопических источников света

Возьмем две одинаковые лампочки. Включим сначала одну, а потом рядом вторую.

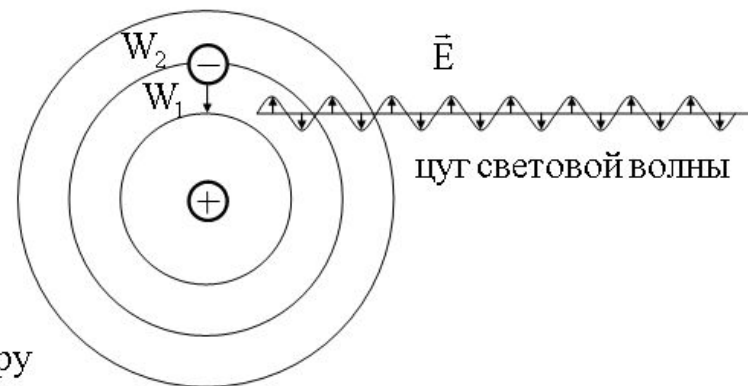
Произойдёт равномерное увеличение освещённости в окружающем пространстве. Но никакой **интерференции** наблюдаться не будет!

Видимый свет излучается атомами.

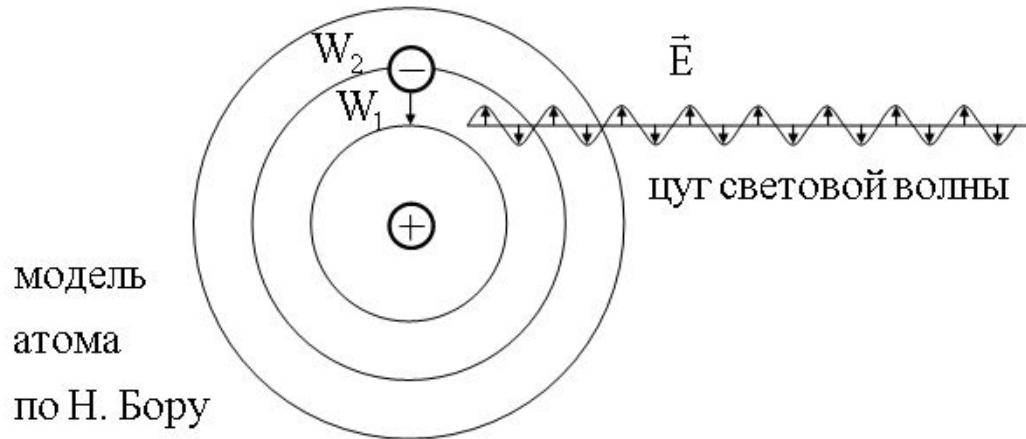
Атом может находиться в двух состояниях:

- 1. основном** (в состоянии с наименьшей энергией) и
- 2. возбуждённом.**

модель
атома
по Н. Бору



- **Основное состояние** характеризуется тем, что электроны заполняют **ближайшие** к ядру атома орбиты.
- **Возбуждённое состояние** характеризуется тем, что электроны переходят на **более дальние** орбиты в результате какого-либо внешнего воздействия.



Электроны за **10^{-8} с** вновь переходят на прежнюю орбиту, излучая при этом энергию в виде световой волны.

Характерное время τ излучения составляет $\approx 10^{-8}$ с.

Это время называется **временем когерентности $\tau_{\text{ког}}$** .

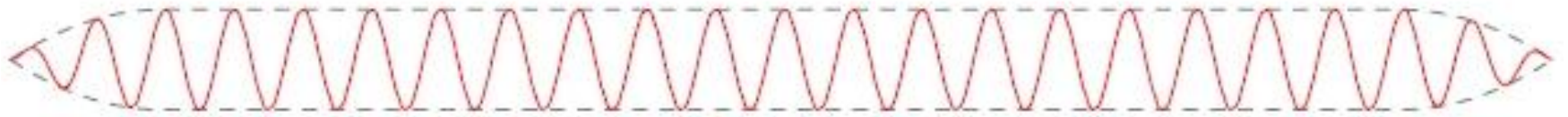
Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$ – максимально возможное время отставания одного луча по отношению к другому, при котором их взаимная когерентность ещё сохраняется.

Время когерентности $\tau_{\text{ког}}$ является мерой **временной когерентности**.

Временная когерентность волны характеризует сохранение взаимной когерентности при временном отставании одного из таких лучей по отношению к другому.

Временная когерентность определяется **степенью монохроматичности**.

В результате перехода из возбуждённого состояния в основное атом излучает электромагнитную волну конечной длительности - **волновой цуг**.



Длина цуга (**длина когерентности $l_{\text{ког}}$**) $= c\tau_{\text{ког}} \approx 3$ м.

- Переход возбуждённого атома в основное состояние происходит в случайный, непредсказуемый момент времени.
- Моменты испускания цугов различными атомами никак не согласованы между собой.
- Цуги, образующие свет, даже если и обладают одной частотой, имеют совершенно произвольные начальные фазы.

Рассмотрим **две монохроматические световые волны**, которые, накладываясь друг на друга, возбуждают в определенной точке пространства колебания напряжённости поля одинакового направления:

$$E_1 = E_{\max 1} \cos(\omega t + \varphi_1) \text{ и } E_2 = E_{\max 2} \cos(\omega t + \varphi_2)$$

Амплитуда результирующего колебания в данной точке

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

Мы знаем, что $I \sim A^2$, поэтому

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1).$$

Проанализируем данное выражение:

- **Волны некогерентные** (разность фаз бесконечно меняется во времени)

$$\langle \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \rangle = 0$$

$$I = I_1 + I_2$$

- **Волны когерентные. Наложение происходит в одинаковой фазе**

$$\varphi_2 = \varphi_1$$

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

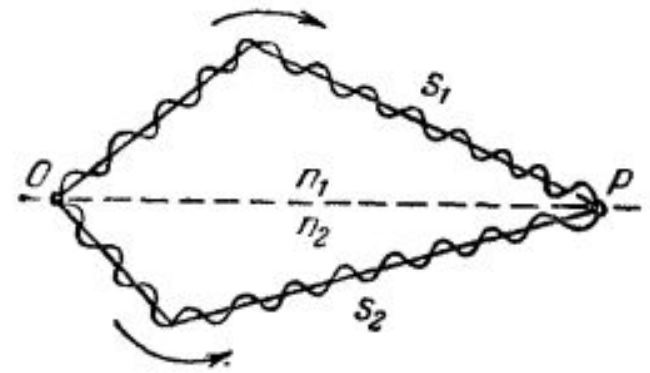
- **Волны когерентные. Наложение происходит в противоположных фазах**

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$$

$$I = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1I_2}.$$

Чтобы получить **интерференцию световых волн**, необходимо разделить волну на две части. Позже, эти две части волны, накладываясь друг на друга, создадут **интерференционную картину**.

Разделим источник на две когерентные волны в точке O .



Одна волна пройдет путь s_1 в среде с показателем преломления n_1 , а вторая – путь s_2 (n_2).

В точку P (где наблюдается интерференционная картина)

- первая волна возбуждит колебание

$$E_{\max 1} \cos \omega \left(t - \frac{s_1}{v_1} \right),$$

- вторая волна возбуждит колебание

$$E_{\max 2} \cos \omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right).$$

Разность фаз колебаний $\Delta\varphi$ в точке ***P***

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \omega \left(\frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \omega \left(\frac{s_2 n_2}{c} - \frac{s_1 n_1}{c} \right) = \frac{\omega}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \\ &= \frac{2\pi\nu}{c} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{вак}}} \Delta L, \\ &\left(n_1 = \frac{c}{v_1}, n_2 = \frac{c}{v_2}, \lambda_{\text{вак}} = \frac{c}{\nu} \right)\end{aligned}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{вак}}} \Delta L$$

$L = n \cdot s$ - **оптическая длина пути.**

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

- Условие **интерференционного максимума**:

Если оптическая разность хода
равна

$$\boxtimes L = \pm 2m \frac{\lambda_{\text{вак}}}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

то разность фаз $\boxtimes \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{вак}}} \cdot 2m \frac{\lambda_{\text{вак}}}{2} = 2\pi m$

Следовательно, колебания в рассматриваемой точке пространства будут происходить с одинаковой фазой.

- Условие **интерференционного минимума**:

Если оптическая разность
хода равна

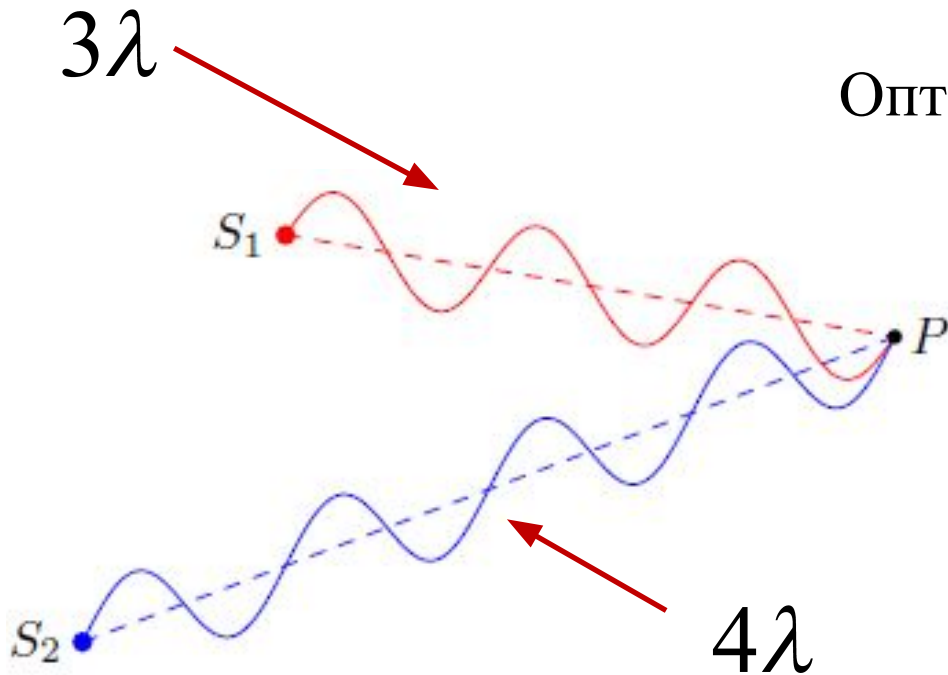
$$\boxtimes L = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_{\text{вак}}}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

то разность фаз $\boxtimes \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{вак}}} \cdot (2m + 1) \frac{\lambda_{\text{вак}}}{2} = (2m + 1)\pi$

Следовательно, колебания в рассматриваемой точке пространства будут происходить в противофазе.

Условие максимума

Рассмотрим два **когерентных** источника S_1 и S_2 .



Оптическая разность хода $\Delta L = \lambda$

В точке P наблюдается **интерференционный максимум.**

$$A=2A_1,$$
$$I=4I_1.$$

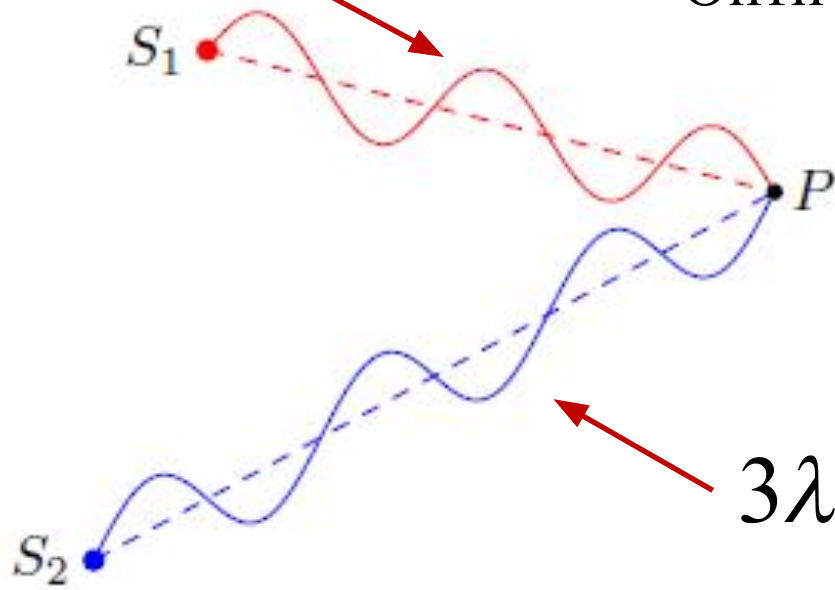
Условие максимума. При наложении когерентных волн колебания в данной точке будут иметь максимальную амплитуду, если разность хода равна целому числу длин волн:

$$\Delta L = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

Условие минимума

$2,5\lambda$

Оптическая разность хода $\Delta L = \frac{\lambda}{2}$



В точке P наблюдается
интерференционный минимум.

Условие минимума. Когерентные волны, складываясь, **гасят** друг друга, если разность хода равна нечётному числу длин полуволин:

$$\delta = n\lambda + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

Интерференция волн двух точечных источников

Цвета точек **интерференционной картины** на рисунке меняются от чёрного до белого через промежуточные оттенки серого.

Чёрный цвет - интерференционные минимумы,

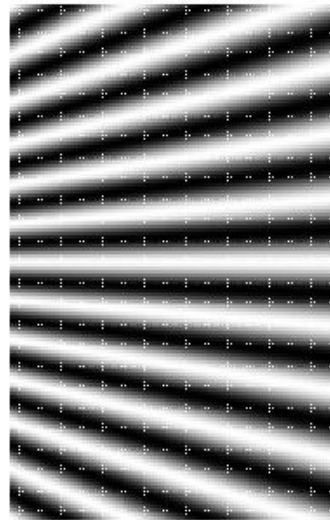
белый цвет - интерференционные максимумы;

серый цвет - промежуточное значение амплитуды, и чем больше амплитуда в данной точке, тем светлее сама точка.

S_1 •



S_2 •



На прямой белой полоске, которая идёт вдоль оси симметрии картины, расположены **центральные максимумы**. Любая точка данной оси равноудалена от источников (разность хода равна нулю), так что в этой точке будет наблюдаться **интерференционный максимум**.

Интерференция волн

Интерференционная картина - фиксированное, не зависящее от времени распределение амплитуд колебаний.

Интерференция - это взаимодействие волн, в результате которого возникает устойчивая **интерференционная картина**, то есть не зависящее от времени распределение амплитуд результирующих колебаний в точках области, где волны накладываются друг на друга.

Если волны, перекрываясь, образуют устойчивую **интерференционную картину**, то говорят, что волны **интерферируют**.

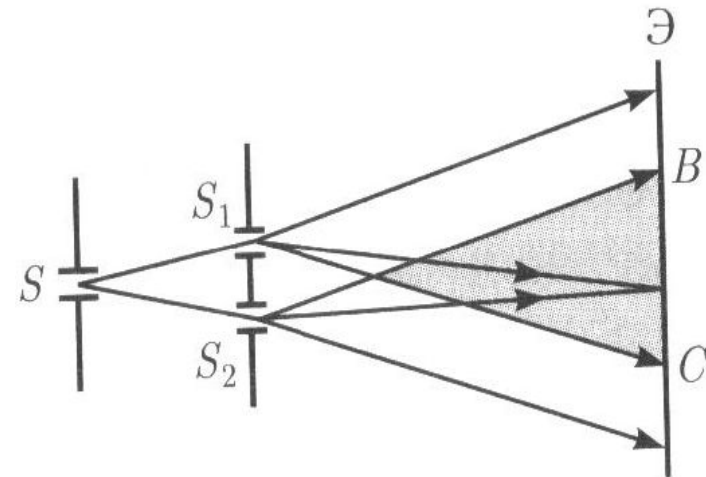
Но! **интерферировать** могут только **когерентные** волны.

Методы наблюдения интерференции

Когерентные световые пучки получают разделением волны, излучаемой одним источником, на две части, которые после прохождения разных **оптических путей** накладываются друг на друга и наблюдается **интерференционная картина**.

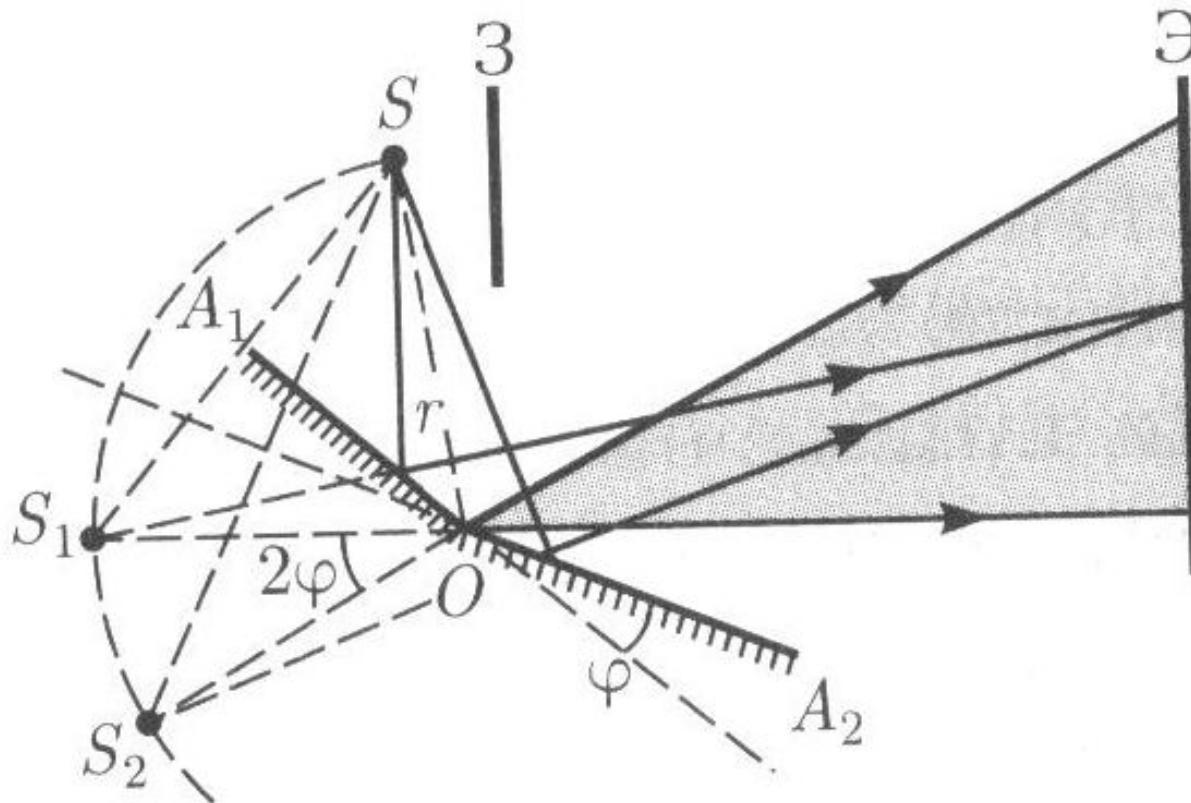
1. Метод Юнга.

Свет от ярко освещенной щели S падает на две щели S_1 и S_2 , играющие роль когерентных источников. На экране наблюдается **интерференционная картина BC** .



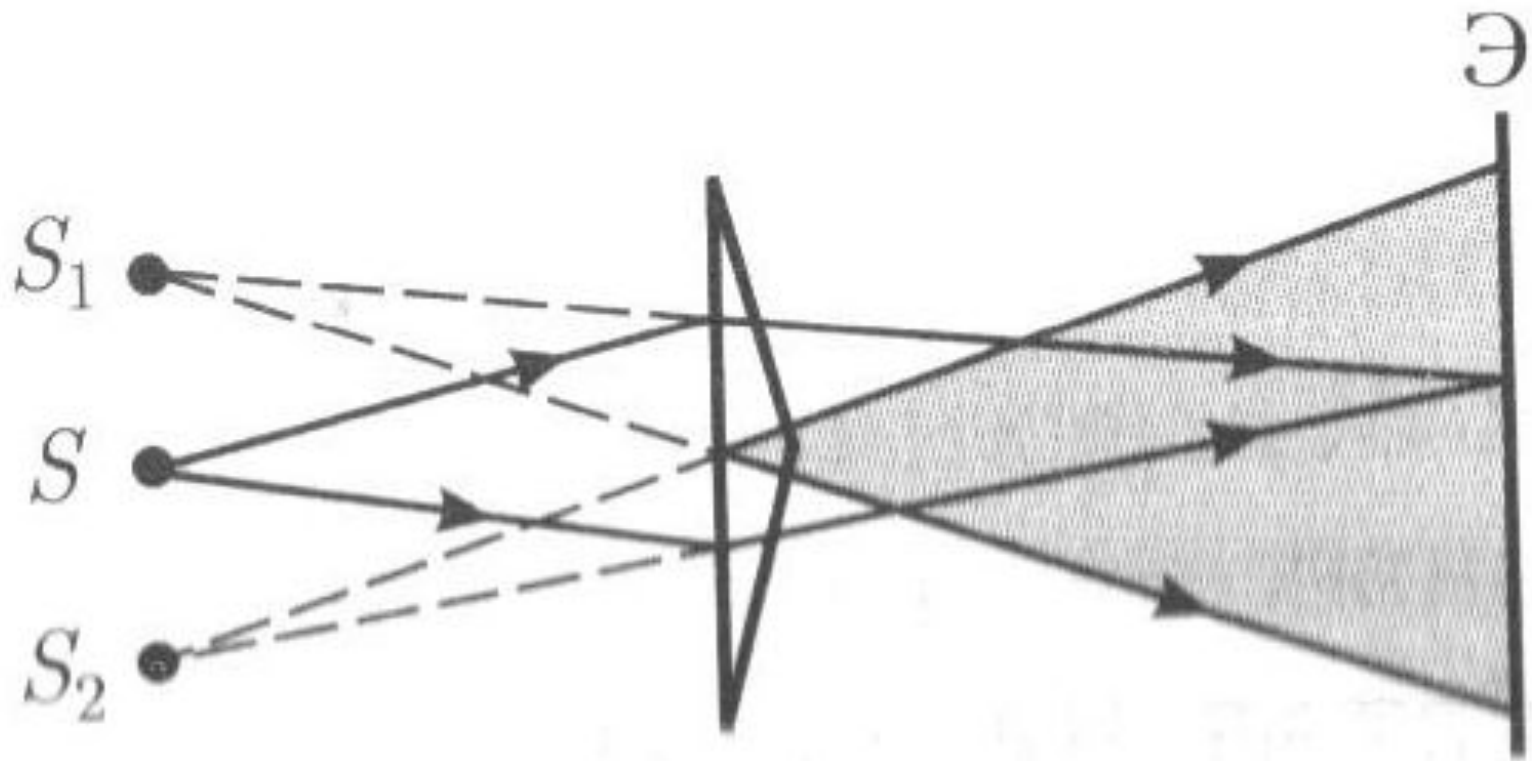
2. Зеркала Френеля.

Свет от источника S падает расходящимся пучком на два плоских зеркала A_1O и A_2O , расположенных под малым углом φ . Роль **когерентных** источников играют мнимые S_1 и S_2 изображения источника S .



3. Бипризма Френеля.

Свет от источника S преломляется в призмах, в результате чего за бипризмой распространяется световые лучи, как бы исходящие из мнимых **когерентных** источников S_1 и S_2 .



Интерференционная картина от двух щелей

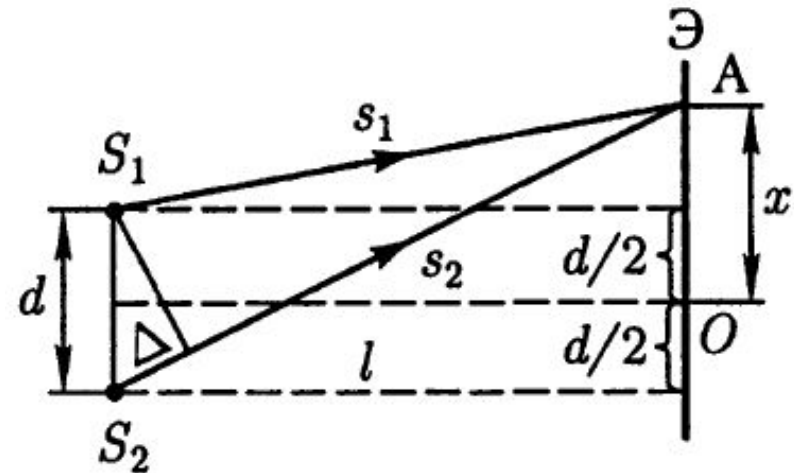
Щели S_1 и S_2 находятся на расстоянии d друг от друга и являются **когерентными** источниками света.

Максимумы интенсивности

$$x_{\max} = \pm m \frac{l}{d} \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Минимумы интенсивности

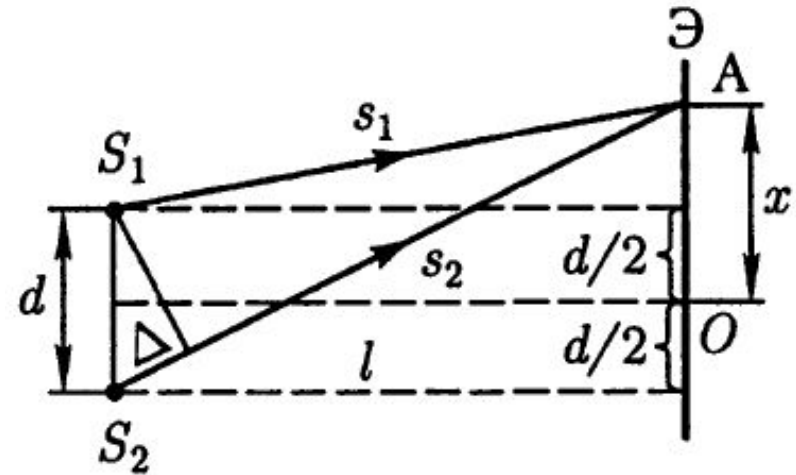
$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2} \right) \frac{l}{d} \lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$



$$\lambda = \text{const},$$
$$l \gg d.$$

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

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



1. Δx не зависит от порядка интерференции (величины m) и является постоянной для l , d и λ .
2. **Интерференционная картина** представляет собой чередование светлых и темных полос, параллельных друг другу.

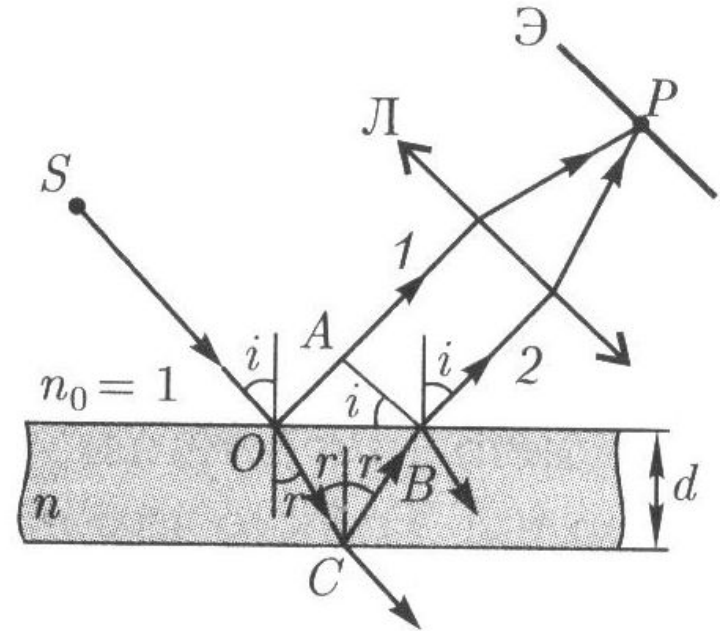
Интерференция света в тонких пленках

1. Полосы равного наклона

$$\lambda = \text{const}$$

Описание.

На плоскопараллельную прозрачную плёнку с показателем преломления n и толщиной d падает под углом i плоская **монохроматическая** волна.

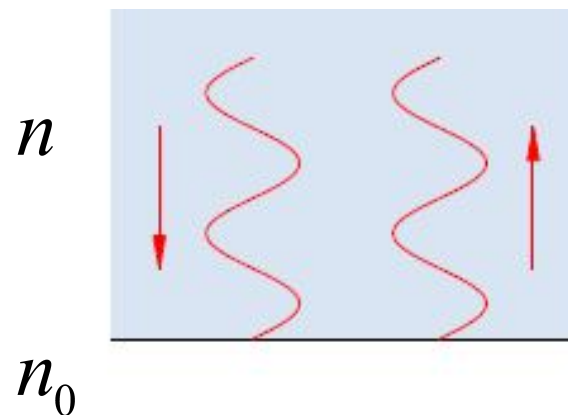
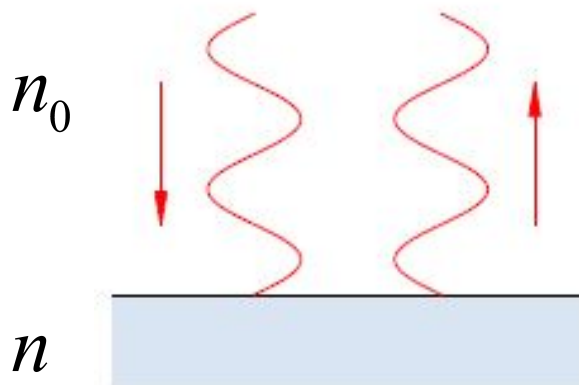
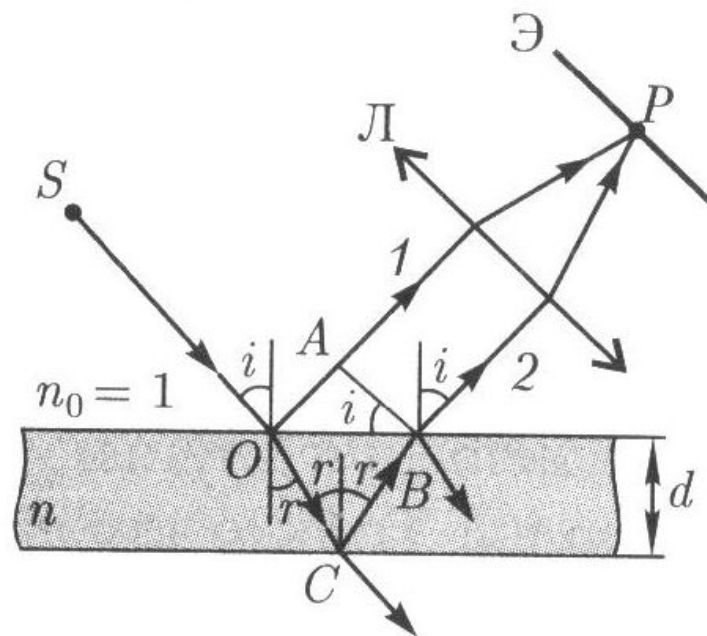


В точке O луч частично отразится, а частично преломится, и после отражения от нижней поверхности пластины в точке C выйдет из пластины в точке B .

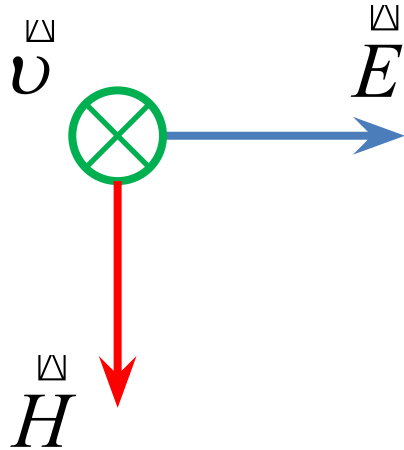
С помощью собирающей линзы их можно свести в точку P .

Важная деталь:

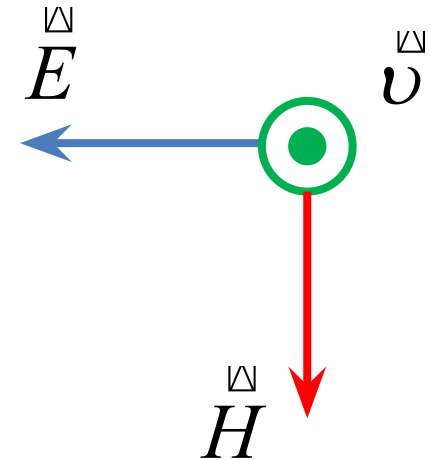
При отражении света от оптически более плотной среды ($n_0 < n$) фаза волны претерпевает скачок волны на π . Изменение фазы на π равносильно потере полуволны при отражении.



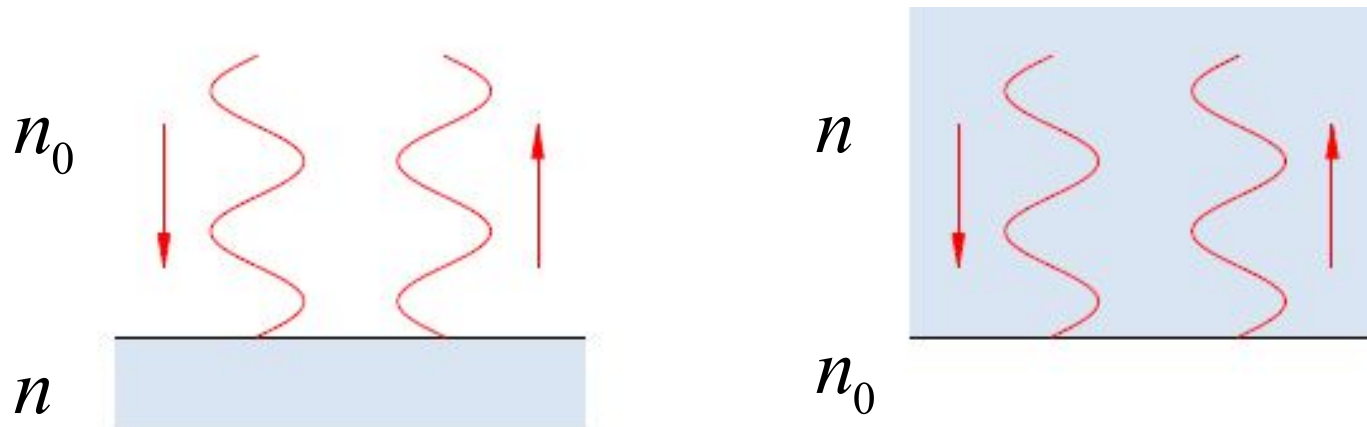
Мгновенный снимок колебаний векторов напряжённости электрического и магнитного поля волны при её отражении от оптически более плотной среды



Вид сверху



При отражении света от оптически более плотной среды ($n_0 < n$) фаза волны претерпевает скачок волны на π . Изменение фазы на π равносильно потере полуволны при отражении.



В точке P будет наблюдаться:

**интерференционный
максимум**

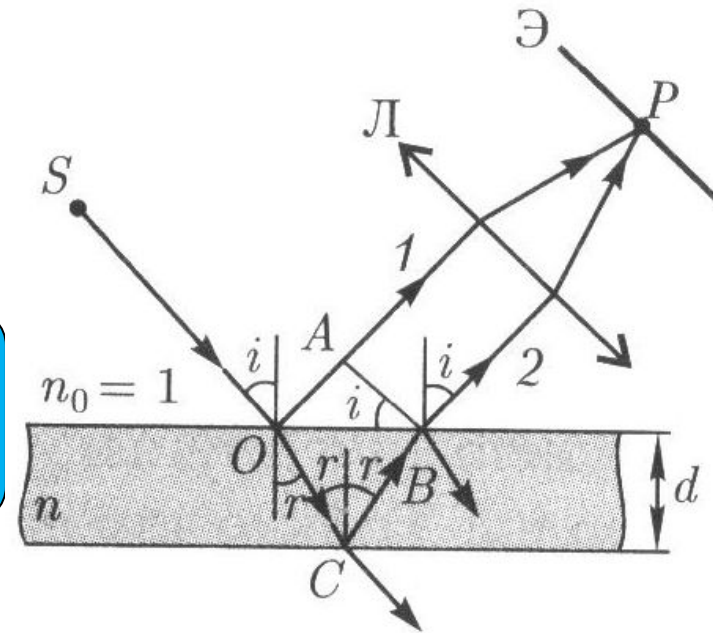
$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} = m\lambda \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

**интерференционный
минимум**

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots).$$

Условие возникновения интерференции:

удвоенная толщина пластинки должна быть меньше
длины когерентности падающей волны.



Допустимая толщина плёнок

Для получения интерференционной картины путём деления естественной волны на две части необходимо, чтобы оптическая разность хода ΔL была меньше, чем длина когерентности $l_{\text{ког}}$.

$$\Delta L < l_{\text{ког}}$$

$$\begin{cases} \Delta L = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2}, \\ l_{\text{ког}} = \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}. \end{cases}$$

$$2d\sqrt{n^2 - \sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} < \frac{\lambda^2}{\Delta \lambda}$$

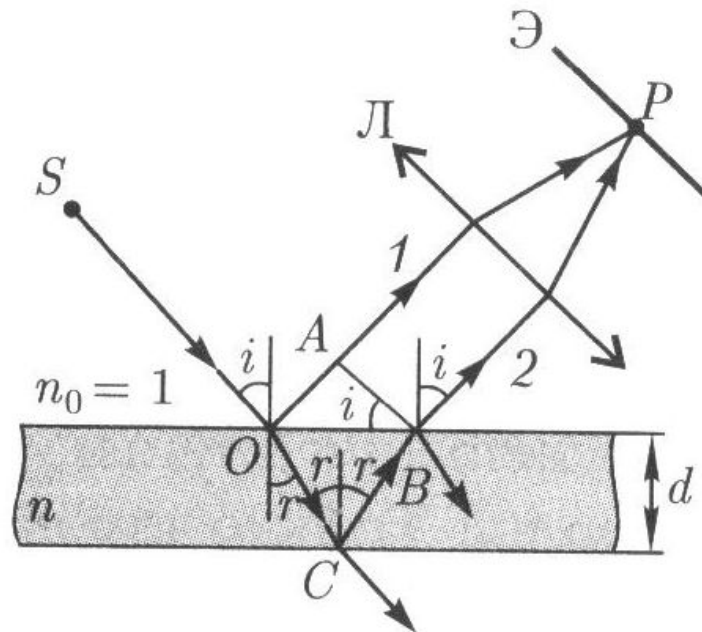
≈ 1

$$d < \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\lambda}{\Delta \lambda} + \frac{1}{2} \right)$$

Отражённые волны будут когерентными, если толщина плёнки будет

$$d < \frac{\lambda^2}{2\Delta \lambda}$$

$$d_{\text{дм}} \frac{(500 \cdot 10^{-10})^2}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-10}} \approx 0,06$$



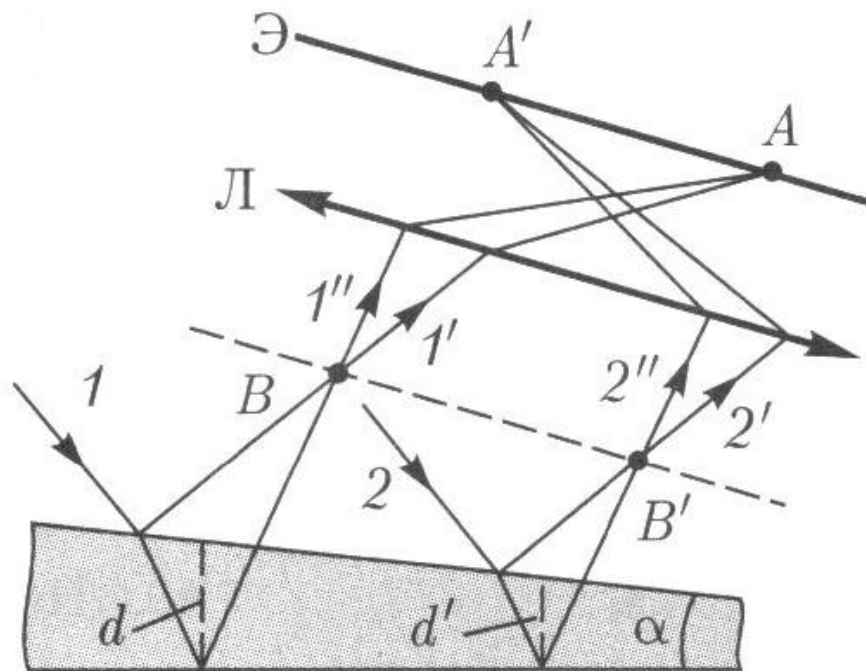
Интерференционные полосы,
возникающие в результате наложения лучей,
падающих на плоскопараллельную пластинку под
одинаковыми углами,
называются **полосами равного наклона.**

2. Полосы равной толщины (интерференция от пластинки переменной толщины)

Описание.

На прозрачную пластинку переменной толщины – клин с малым углом α – падает плоская волна в направлении параллельных лучей 1 и 2.

На экране возникает система **интерференционных полос** – **полос равной толщины** – каждая из которых возникает при отражении от мест пластинки, имеющих **одинаковую** толщину.

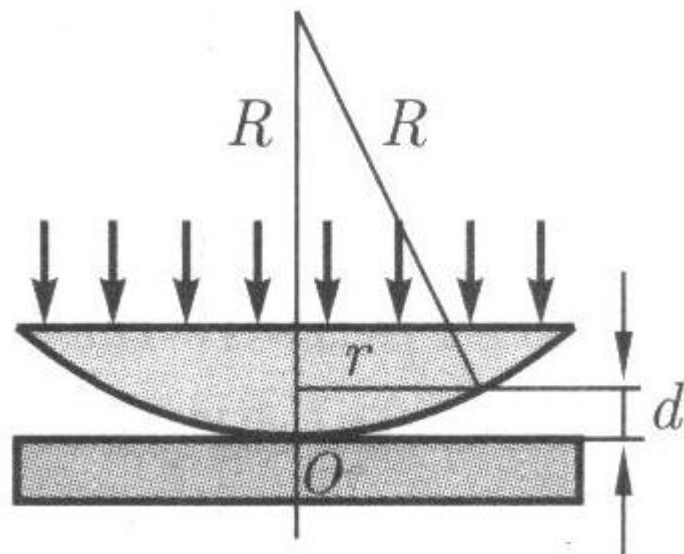


Полосы равной толщины **локализованы** вблизи поверхности клина (в плоскости, отмеченной пунктиром $B-B'$).

3. Кольца Ньютона (полосы равной толщины)

Описание.

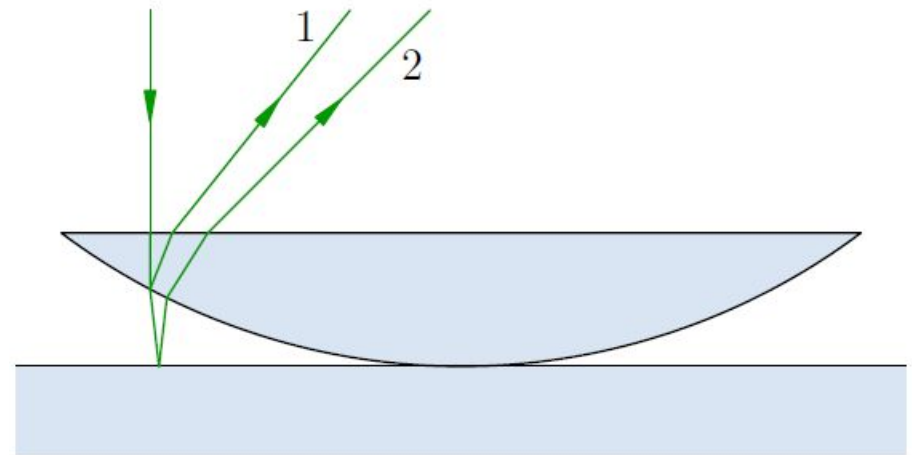
Имеется плоскопараллельная пластинка и соприкасающаяся с ней плосковыпуклая линза с большим радиусом кривизны.



Кольца Ньютона наблюдаются **при отражении света** от воздушного зазора между пластинкой и линзой. Параллельный пучок света падает нормально на плоскую поверхность линзы. **Полосы равной толщины** имеют вид **концентрических окружностей**.

Объяснение.

Падающий луч расщепляется на два луча 1 и 2, отражённых соответственно от сферической поверхности линзы и от пластины; между ними возникает разность хода и они **интерферируют** между собой.



В реальности все три луча почти сливаются друг с другом из-за малой кривизны поверхности линзы.

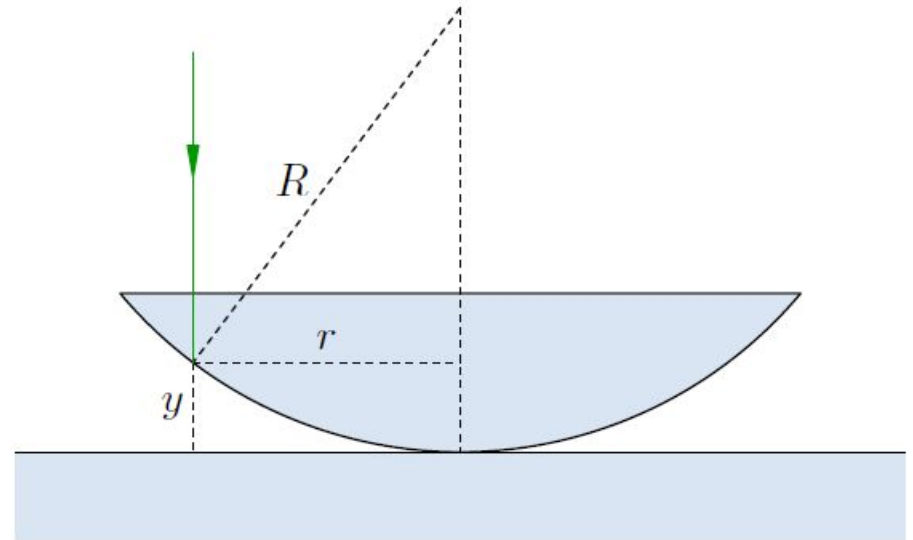
Рассчитаем радиусы колец.

Очевидно, что

$$r^2 = R^2 - (R - y)^2 = 2Ry - y^2.$$

Так как $y \ll R$,

$$r^2 = 2Ry \Rightarrow y = \frac{r^2}{2R} \quad (4).$$



y – толщина воздушной прослойки;
 R – радиус кривизны поверхности линзы;
 r – расстояние от точки падения до оси симметрии линзы.

Важно! Первый луч отражается от поверхности стеклянной пластины и поэтому приобретает дополнительные **полволны** (при отражении от оптически более плотной среды). Второй луч отражается от поверхности линзы **без изменения фазы**.

Поэтому оптическая разность хода между двумя лучами будет равна

$$\Delta = 2y + \frac{\lambda}{2}.$$

Учитывая (4), получим

$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2} \quad (5).$$

Приравняв (5) к условиям **максимума** (2) и **минимума** (3), получим **радиусы** следующих колец

$$r_m(\text{светлое}) = m \sqrt{\left(-\frac{1}{2}R \right) \lambda} \quad m (= 1, 2, 3) \quad (6),$$

$$r_m(\text{тёмное}) = m \sqrt{R \lambda} \quad m (= 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (7).$$

Почему в проходящем свете в центре
наблюдается светлое пятно, а в отражённом
темное?

