

Интерференция света

Тема 5 лекция 7

Интерференция волн. Стационарная и нестационарная интерференция. Когерентность интерференционной картины. Осуществление когерентных колебаний в оптике.

Интерференционные схемы с делением волн по фронту. Расчет интерференционной картины. Влияние размеров источника света на контрастность интерференционной картины. Интерференция в немонохроматическом излучении. Временная и пространственная когерентность.

Интерференция

- ▶ При соблюдении некоторых условий наблюдается отклонение от закона независимости световых пучков. Действие, производимое несколькими световыми лучами отличается от суммы воздействий всех лучей. Такое явление называется **интерференцией**
- ▶ При интерференции происходит увеличение средней интенсивности света в одних областях и уменьшение в других

Интерференция света (от лат. *inter* – взаимно, между собой и *ferio* – ударяю, поражаю) – **пространственное перераспределение энергии света при наложении двух или нескольких световых волн.**

Интерференция волн – одно из основных свойств волн любой природы (упругих, электромагнитных, в т.ч. световых и др.). Такие характерные волновые явления, как излучение, распространение и дифракция, тоже связаны с интерференцией.

Интерференцией света объясняются окраска тонких масляных пленок на поверхности воды, металлический отлив в окраске крыльев насекомых и птиц, появление цветов побежалости на поверхности металлов, голубоватый цвет просветленных линз оптических приборов и пр.

Некоторые явления интерференции света исследовались еще И. Ньютоном в XVII в., но не могли быть им объяснены с точки зрения его корпускулярной теории. Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Т. Юнгом и О. Френелем.

Когерентность и Монохроматичность

- ▶ Необходимыми условиями возникновения интерференции являются монохроматичность и когерентность световых потоков
- ▶ **Монохроматичность** световых волн означает неизменность во времени их длин и частот колебаний
- ▶ Любой световой поток можно представить как суперпозицию монохроматических волн

Когерентность и монохроматичность

- ▶ Интерферировать между собой могут только монохроматические составляющие нескольких световых потоков. При этом суммарная интерференционная картина является наложением всех монохроматических интерференционных картин

Когерентность и монохроматичность

- Строго монохроматическое излучение получить невозможно
- При излучении света одной длины волны источником, происходит случайное изменение фазы колебаний, это приводит к случайным быстрым изменениям интерференционной картины. Инерционный фоточувствительный прибор при этом не успевает зарегистрировать её

Когерентность и монохроматичность

- ▶ Стабильную интерференционную картину можно получить используя когерентные источники
- ▶ **Когерентность** источников излучения означает, что колебательные процессы протекают в них согласованно во времени

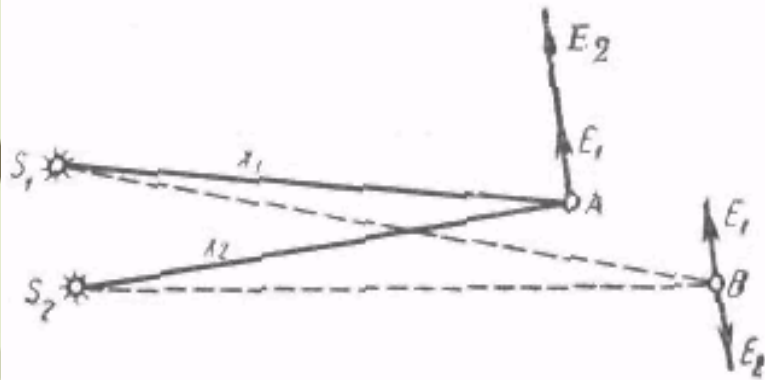
Когерентность и монохроматичность

Когерентное излучение можно получить двумя способами

1. От нескольких независимых источников света высокой степени монохроматичности (лазеров)
2. Выделяя лучи от одного и того же источника

Второй способ получил наибольшее распространение

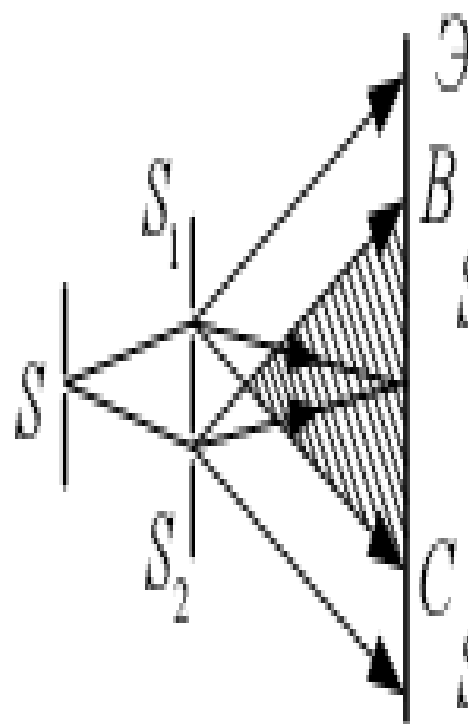
Пусть в точку А одновременно поступает монохроматическое плоскополяризованное излучение от двух источников света S_1 и S_2 . Если векторы напряженности электрических полей этих волн E_1 и E_2 имеют в точке А одинаковое направление, то в этой точке А суммарная напряженность поля $E = E_1 + E_2$.



Энергия в единице объема, подсчитанная по суммарной напряженности E :

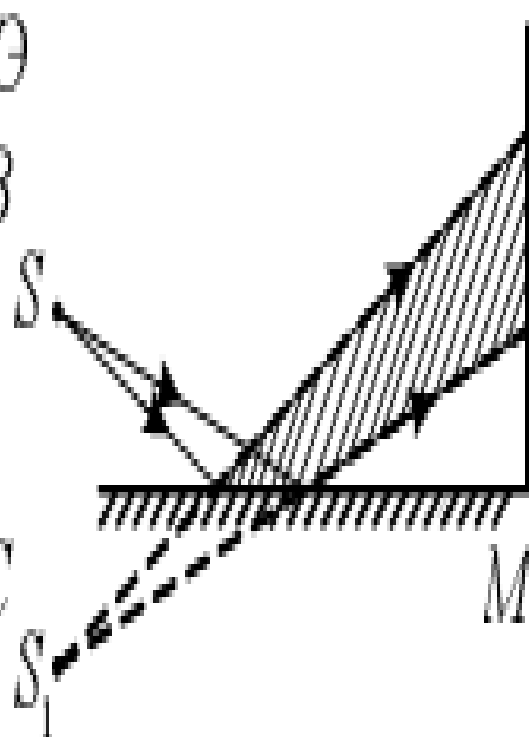
$$\frac{\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 (E_1 + E_2)^2}{2} = \frac{\varepsilon_0 E_1^2}{2} + \frac{\varepsilon_0 E_2^2}{2} + \varepsilon_0 E_1 E_2$$

оказывается больше суммы энергий, подсчитанных по напряженностям E_1 и E_2 .



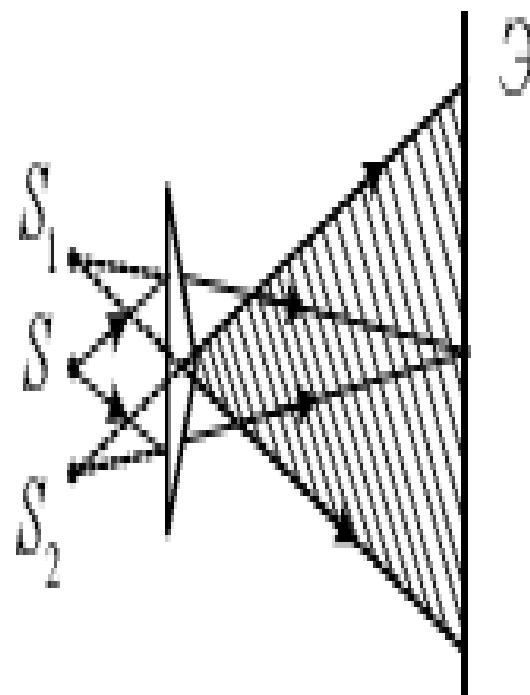
метод Юнга

а)



Зеркало Ллойда

б)



бипризма Френеля

в)

Рассмотрим простейший случай интерференции монохроматических световых волн от двух одинаковых источников, которые стали излучать одновременно, поэтому фазы векторов E_1 и E_2 зависят только от расстояний x_1 и x_2

$$E_1 = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x_1}{c} \right), \quad E_2 = E_0 \sin \omega \left(t - \frac{x_2}{c} \right)$$

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos \omega \frac{x_2 - x_1}{2c} \sin \omega \left(t - \frac{x_1 + x_2}{2c} \right)$$

т.к. $\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2 = 2 \cos \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} \cdot \sin \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)}{2}$

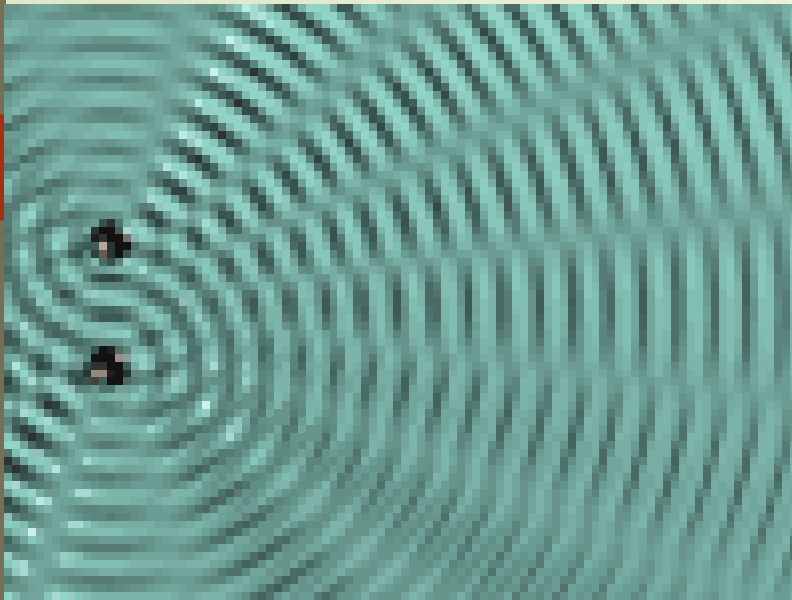
В точках, где аргумент косинуса равен нечетному числу $\pi/2$, $\cos\omega(x_2-x_1)/2c = 0$, суммарная напряженность электрического поля E в любой момент времени равна нулю, и световые волны взаимно «гасятся».

Подставляя $\omega = 2\pi/T = 2\pi c/\lambda$, можно найти расположение тех точек, в которых происходит взаимное «гашение» двух монохроматических световых волн (с одинаковой амплитудой E_0):

$$2\pi \frac{c}{\lambda} \frac{x_2 - x_1}{2c} = (2k + 1) \frac{\pi}{2}$$

$$x_2 - x_1 = \frac{\lambda}{2} (2k + 1)$$

В точках, отстоящих от источников света S_1 и S_2 на расстояниях, удовлетворяющих условию, света не будет.



***Волновые
свойства света***
наиболее отчетливо
обнаруживают себя в
интерференции и
дифракции.

Пусть две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

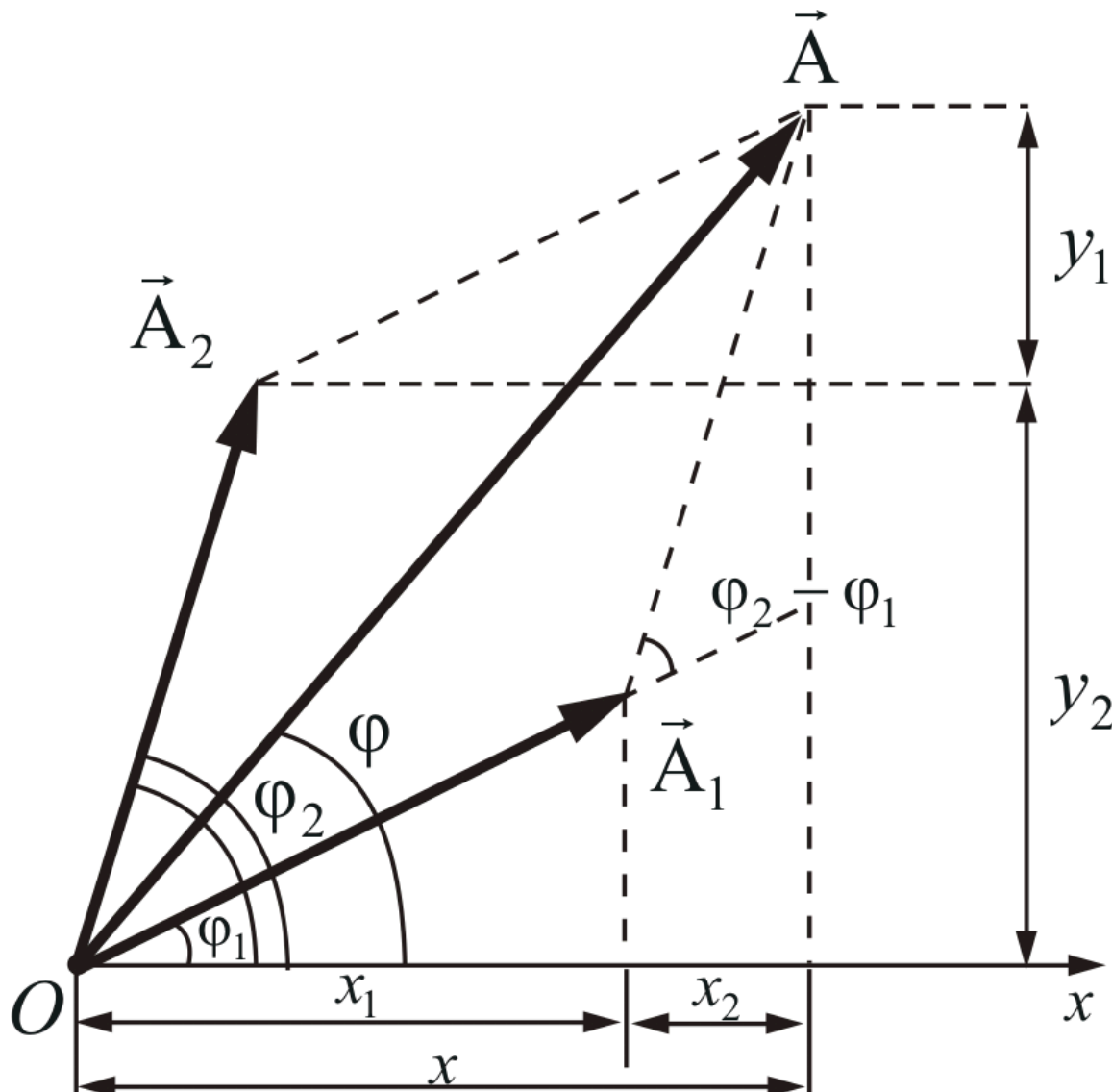
$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

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

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

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad - \text{ амплитуда}$$

результатирующего
колебания



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

Если разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ колебаний возбужденных волнами в некоторой точке пространства остается постоянной во времени, то такие волны называются когерентными.

В случае некогерентных волн разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ непрерывно изменяется.

Интенсивность световой волны J равна квадрату амплитуды A . Тогда суммарная интенсивность:

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.2.2)$$

Последнее слагаемое в этом выражении

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

В случае когерентных волн

$$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \text{const}$$

$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$ $J > J_1 + J_2$; *в максимуме* ,

$$J = 4J_1$$

где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, интенсивность

$J < J_1 + J_2$; *в минимуме*

$$J = 0$$

Для некогерентных источников интенсивность результирующей волны
всюду одинакова и, равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:

$$J = J_1 + J_2 = 2J_1$$

Некогерентность естественных источников света обусловлена тем, что излучение тела складывается из волн, хаотически испускаемых многими атомами.

Фазы каждого *цуга волны, испускаемого отдельным атомом* никак не связаны друг с другом.
Атомы излучают хаотически.



*Периодическая последовательность горбов и впадин волны и образующиеся в процессе акта излучения одного атома, называется цугом волн или **волновым цугом**.*

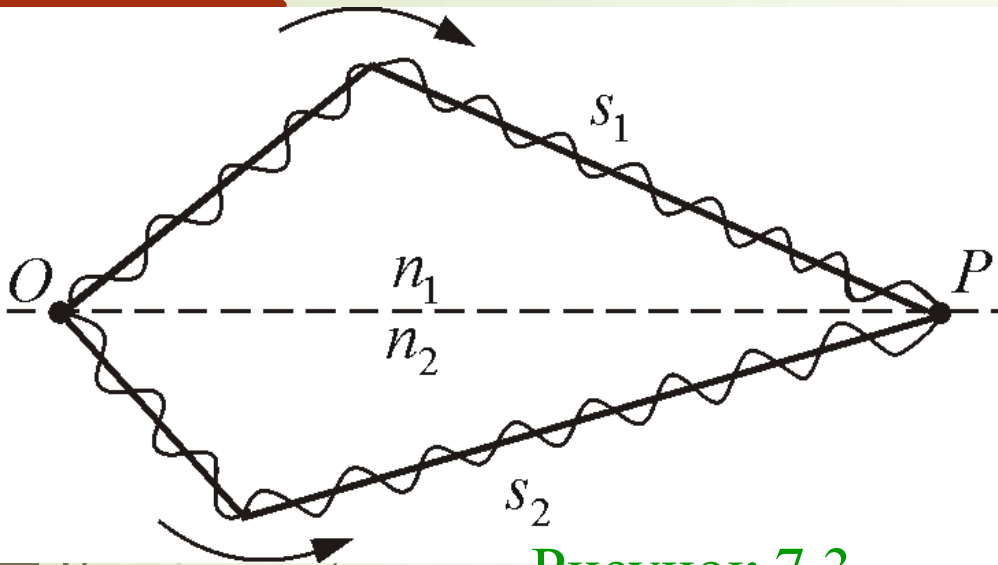
Процесс излучения одного цуга атома длится 10^{-8} с.

Длина цуга $l = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 3$ м

В одном цуге укладывается примерно 10^7

длин волн.

Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн:



Первая волна

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

вторая

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

Рисунок 7.3

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

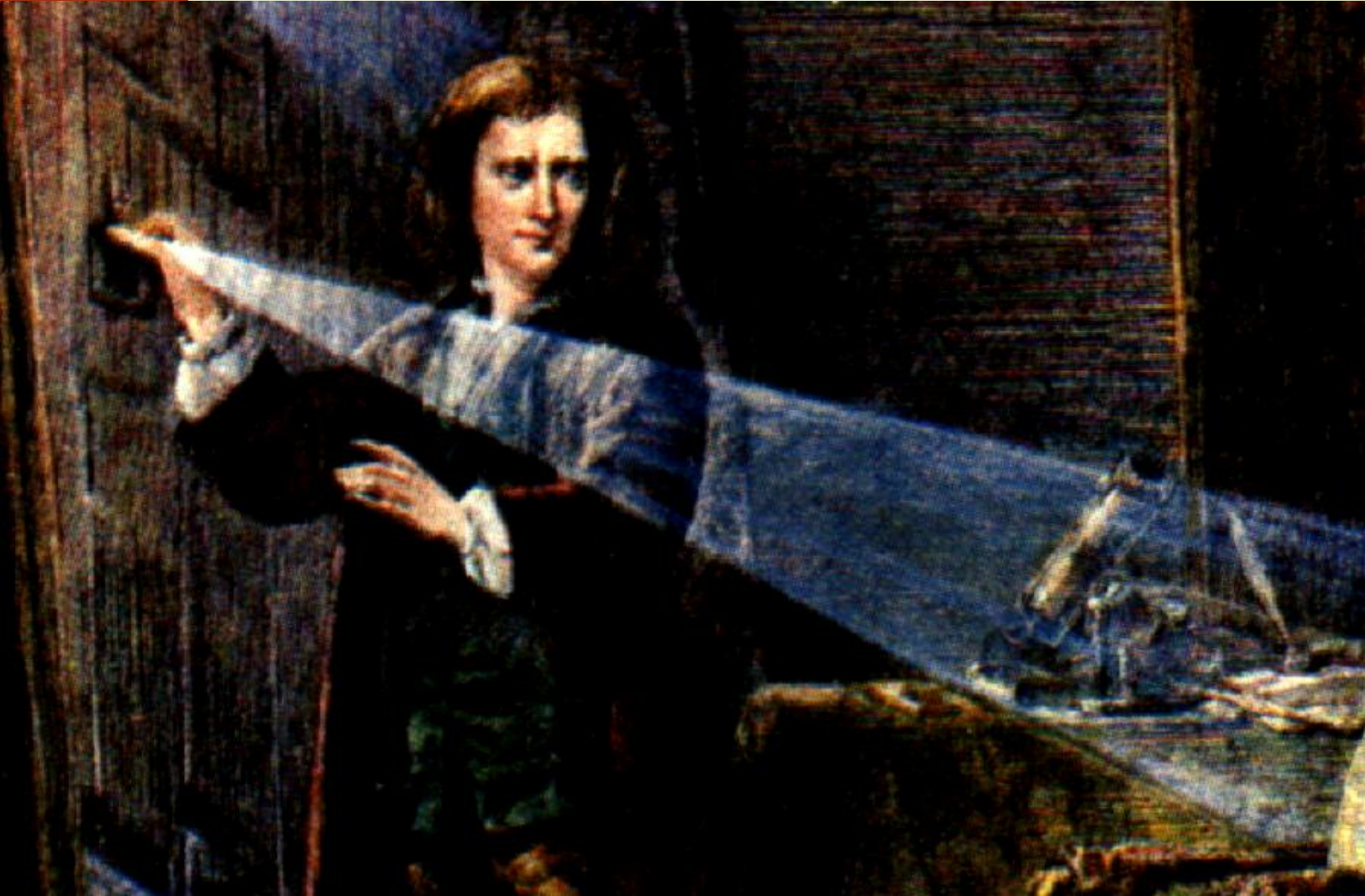
Разность фаз двух когерентных волн -

Оптическая разность хода -

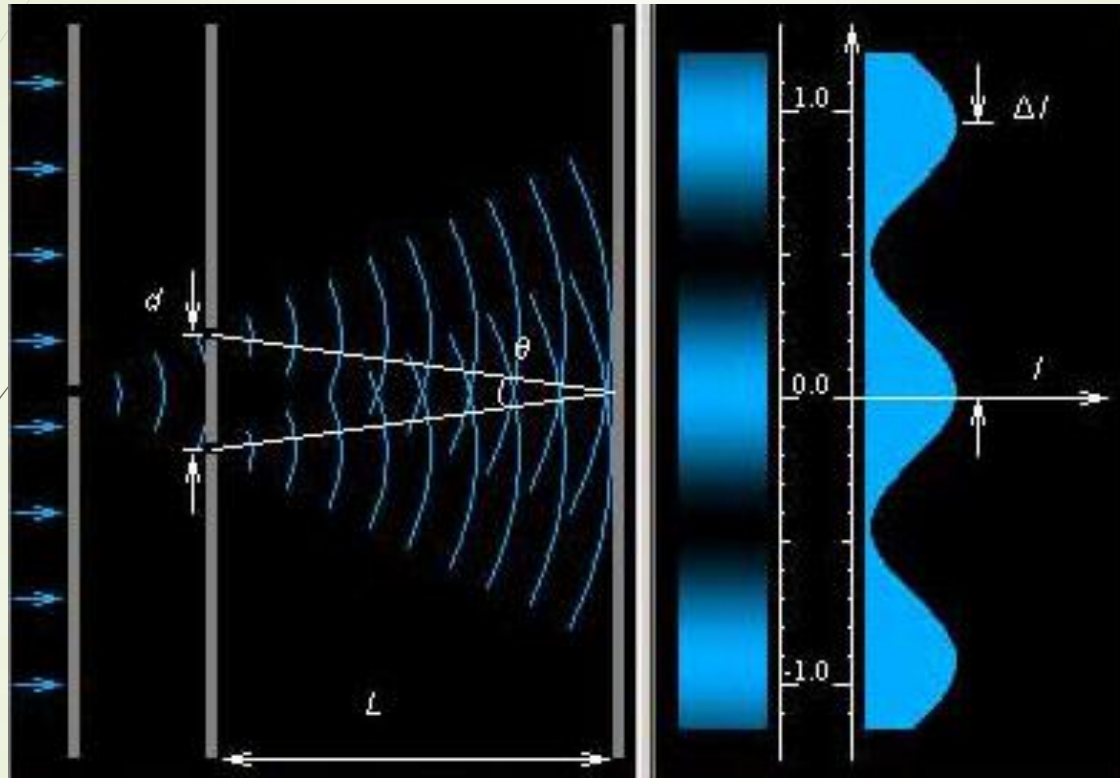
$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$$

L – оптическая длина пути; **s** – геометрическая длина пути; **n** – показатель преломления среды.

Опыт Юнга



Классический 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, интерферируют на третьем экране.

Опыт Юнга

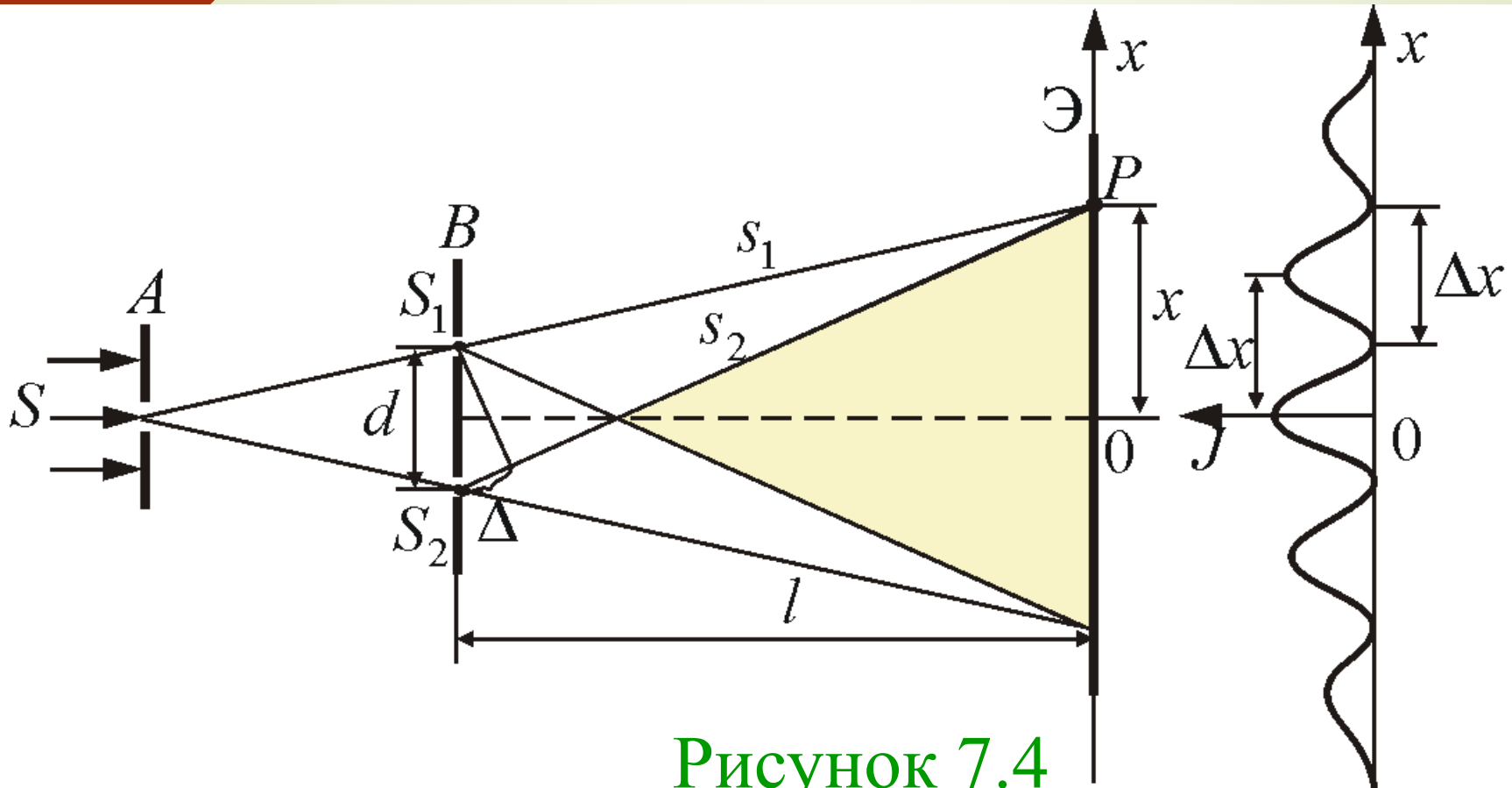
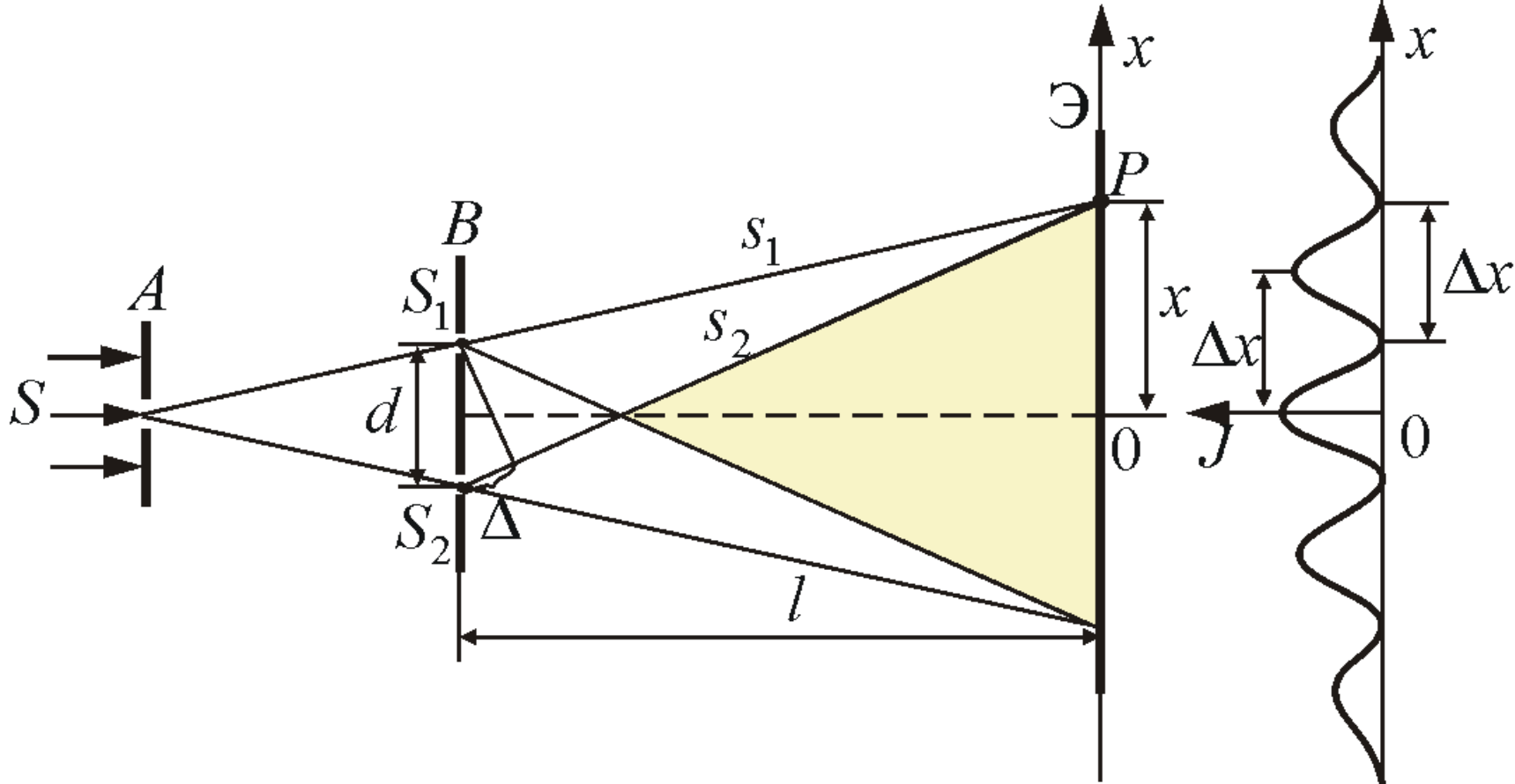


Рисунок 7.4

Расстояние l от щелей, причем $l \gg d$
Показатель преломления среды – n .



Главный максимум, соответствующий $m = 0$ проходит через точку O . Вверх и вниз от него располагаются максимумы (минимумы) первого ($m = 1$), второго ($m = 2$) порядков, и т. д.

Максимумы интенсивности будут

наблюдаться **в координатах:**

$$x_{\max} = \pm \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

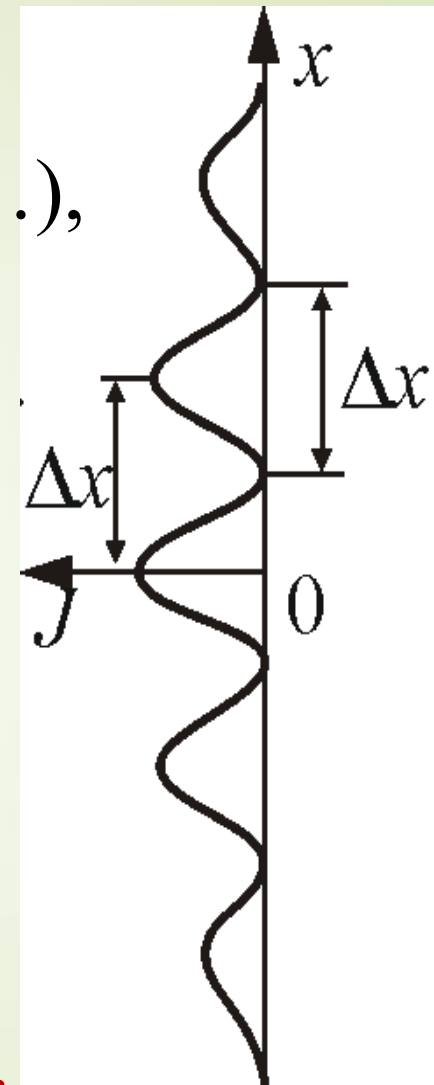
а **минимумы – в координатах:**

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda_0$$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0$$

- ширина интерференционной полосы.



Измерив Δx , зная l и d , можно вычислить длину волны λ . Именно так вычисляют длины волн разных цветов в спектроскопии.

Условие максимума и минимума интерференции:

- *Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн*

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.3)$$

- условие интерференционного максимума.

- *Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн*

$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.4)$$

- условие интерференционного минимума.

Световые волны одинаковой длины волны, которые приходят в данную точку с постоянной (не изменяющейся со временем) разностью фаз, называются **когерентными**. Когерентные волны дают неизменную со временем интерференционную картину (распределение интенсивности света в пространстве или на экране).

Область пространства, в которой амплитуда результирующей волны усиливается, называется областью **конструктивной** интерференции, а в которой ослабляется – **деструктивной**.

Когерентность и монохроматичность

Необходимым условием интерференции волн является их **когерентность**, т.е. согласованное протекание **во времени и пространстве** нескольких колебательных или волновых процессов.

Этому условию удовлетворяют **монохроматические волны** – **волны одной определенной и строго постоянной частоты**.

Волну можно приближенно считать


монохроматической только в течение времени

$$\Delta t \ll \tau_{\text{КОГ}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} \quad (7.4.1)$$

где $\tau_{\text{КОГ}}$ – *время когерентности*

За промежуток времени $\tau_{\text{КОГ}}$
разность фаз колебаний изменится на π .

Время когерентности – время, по истечению которого разность фаз волны в некоторой, но одной и той же точке пространства, изменяется на π .



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

Пространственная когерентность

Два источника, размеры и взаимное расположение которых позволяют наблюдать интерференцию, называются пространственно-когерентными.

Радиусом когерентности (или длиной пространственной когерентности) называется 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.

Условия пространственной когерентности двух волн

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 в вакууме.

2) соизмеримость амплитуд интерферирующих волн,

3) одинаковое состояние поляризации,

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