

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The largest droplet is in the top left corner, and another large one is in the bottom right corner. There are also many smaller droplets of different shapes and sizes.

# ЛЕКЦИЯ 8

## *ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА*

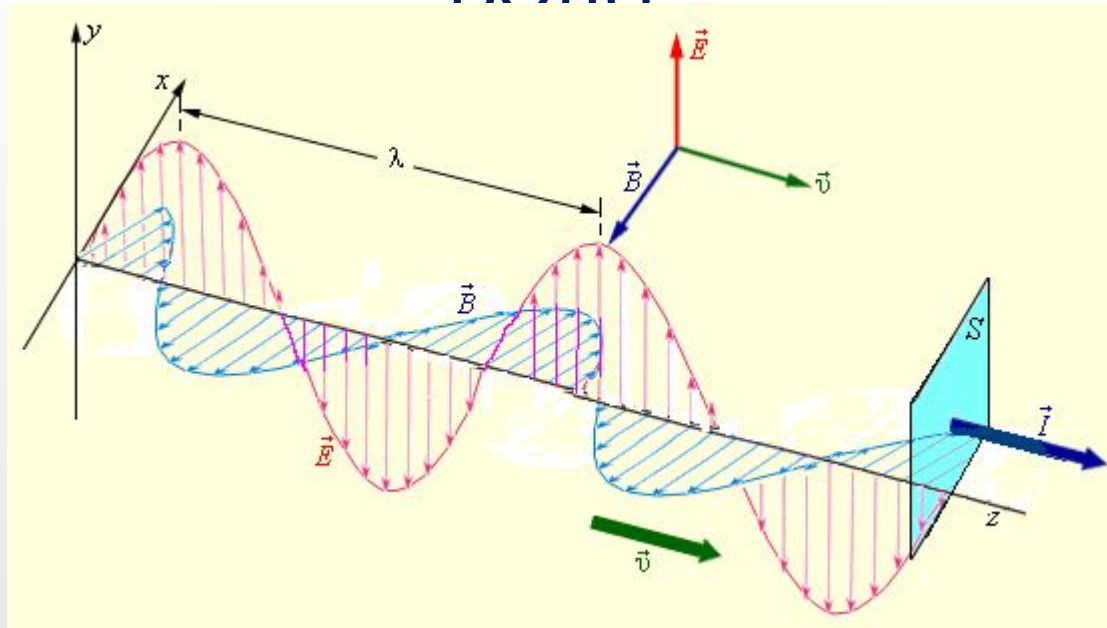
**ОПТИКА** – РАЗДЕЛ ФИЗИКИ, ИЗУЧАЮЩИЙ СВОЙСТВА И ФИЗИЧЕСКУЮ ПРИРОДУ СВЕТА, А ТАКЖЕ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВЕЩЕСТВОМ. УЧЕНИЕ О СВЕТЕ ПРИНЯТО ДЕЛИТЬ НА ТРИ ЧАСТИ:

**ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИЛИ ЛУЧЕВАЯ ОПТИКА**, В ОСНОВЕ КОТОРОЙ ЛЕЖИТ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О СВЕТОВЫХ ЛУЧАХ;

**ВОЛНОВАЯ ОПТИКА**, ИЗУЧАЮЩАЯ ЯВЛЕНИЯ, В КОТОРЫХ ПРОЯВЛЯЮТСЯ ВОЛНОВЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА;

**КВАНТОВАЯ ОПТИКА**, ИЗУЧАЮЩАЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СВЕТА С ВЕЩЕСТВОМ, ПРИ КОТОРОМ ПРОЯВЛЯЮТСЯ КОРПУСКУЛЯРНЫЕ СВОЙСТВА СВЕТА.

# СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН



1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ **ПОПЕРЕЧНЫ** – ВЕКТОРЫ  $\mathbf{E}$  И  $\mathbf{B}$  ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫ ДРУГ ДРУГУ И ЛЕЖАТ В ПЛОСКОСТИ, ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ НАПРАВЛЕНИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ
2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ РАСПРОСТРАНЯЮТСЯ В ВЕЩЕСТВЕ С

**КОНЕЧНОЙ СКОРОСТЬЮ**  $v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$

3. В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЕ ПРОИСХОДЯТ ВЗАИМНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ. ЭТИ ПРОЦЕССЫ ИДУТ ОДНОВРЕМЕННО, И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ И МАГНИТНОЕ ПОЛЯ ВЫСТУПАЮТ КАК РАВНОПРАВНЫЕ «ПАРТНЕРЫ». ПОЭТОМУ ОБЪЕМНЫЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ РАВНЫ ДРУГ ДРУГУ:  $w_{\text{э}} = w_{\text{м}}$ .

$$\frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

ОТСЮДА СЛЕДУЕТ, ЧТО В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЕ МОДУЛИ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ  $\mathbf{B}$  И НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  $\mathbf{E}$  В КАЖДОЙ ТОЧКЕ ПРОСТРАНСТВА СВЯЗАНЫ СООТНОШЕНИЕМ

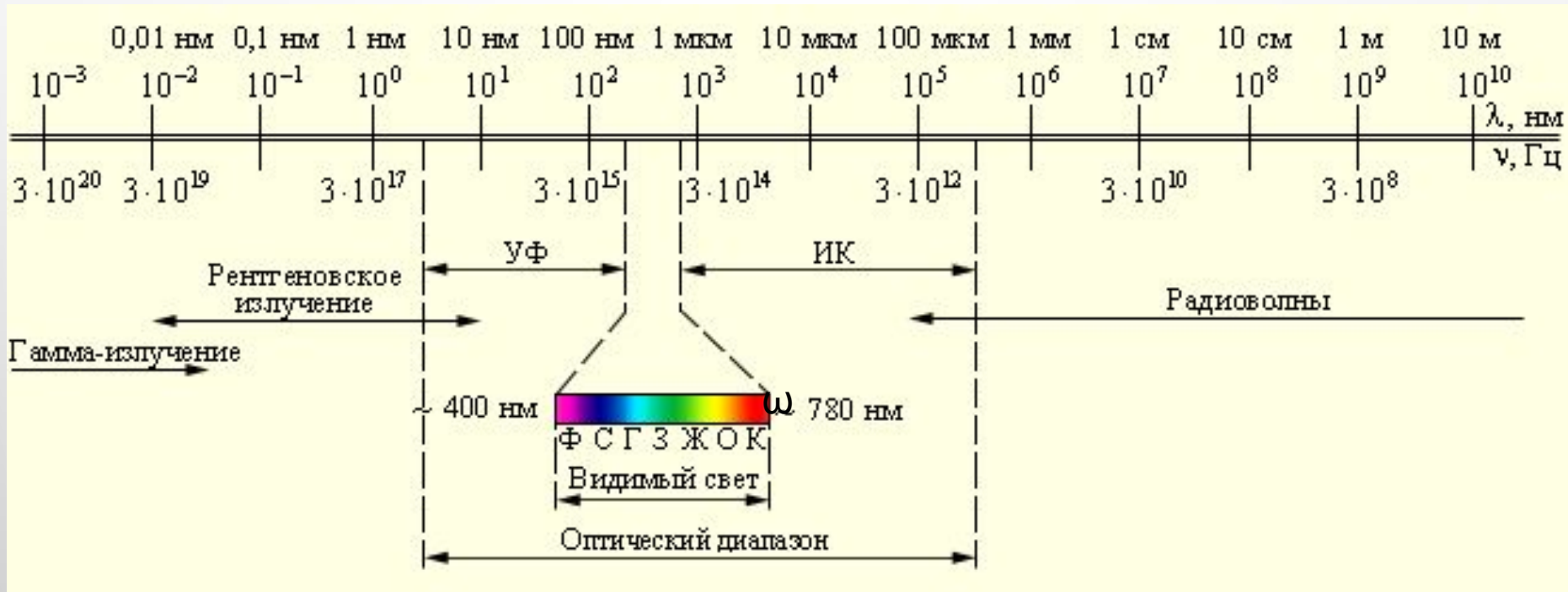
$$B = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} E$$

4. ПОТОК ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЕ МОЖНО ЗАДАВАТЬ С ПОМОЩЬЮ ВЕКТОРА  $\mathbf{I}$  НАПРАВЛЕНИЕ КОТОРОГО СОВПАДАЕТ С НАПРАВЛЕНИЕМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ

$$\vec{I} = [\vec{E} \cdot \vec{H}]$$

ЭТОТ ВЕКТОР НАЗЫВАЮТ **ВЕКТОРОМ УМОВА-ПОЙНТИНГА** (1885 Г.).

# ОПТИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

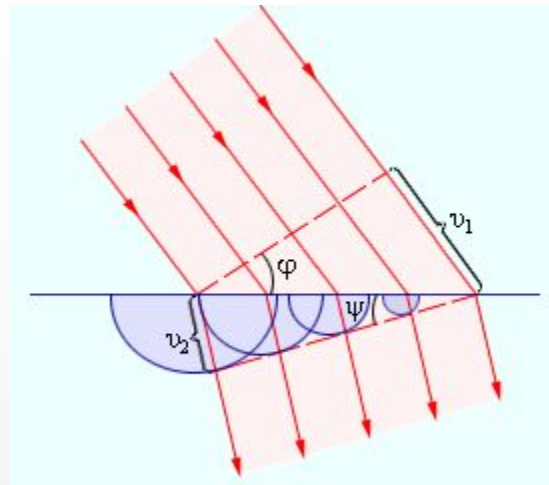


ЭНЕРГИЯ КВАНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ (ФОТОНОВ) ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

$$E = (2,6 - 5,2) \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 - 3,2 \text{ эВ.}$$

ВИДИМЫЙ ДИАПАЗОН

$$f = (4 - 8) \cdot 10^{14} \text{ Гц} \quad \omega = (2,5 - 5,0) \cdot 10^{15} \text{ Гц, где } \omega = 2\pi f$$



ПОСТРОЕНИЯХ ГЮЙГЕНСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНЫ, ПРЕЛОМЛЕННОЙ НА ГРАНИЦЕ ДВУХ ПРОЗРАЧНЫХ СРЕД

**ЗАКОН ПРЯМОЛИНЕЙНОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЕТА.**

**ЗАКОН ОТРАЖЕНИЯ СВЕТА**

**ЗАКОН ПРЕЛОМЛЕНИЯ СВЕТА**

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

$n$  НАЗЫВАЮТ **ОТНОСИТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ** ВТОРОЙ СРЕДЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПЕРВОЙ

# ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ ДЛЯ ВОЛН ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ ПЛОСКИХ И СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛН

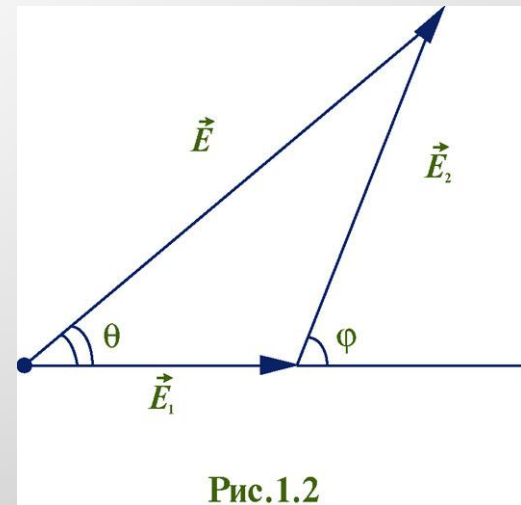
*ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩЕГО СОБОЙ СУММУ ДВУХ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛН ОДНОЙ ЧАСТОТЫ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ РАЗНОСТИ ФАЗ НАЗЫВАЕТСЯ **ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ***

$$E_1 = E_{01} \cos(\omega t - kr_1) \quad \text{где } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$
$$E_2 = E_{02} \cos(\omega t - kr_2)$$

$$\varphi_1 = 0, \varphi = k(r_2 - r_1)$$

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \varphi$$

$$\bar{E}^2 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} E^2(t) dt$$



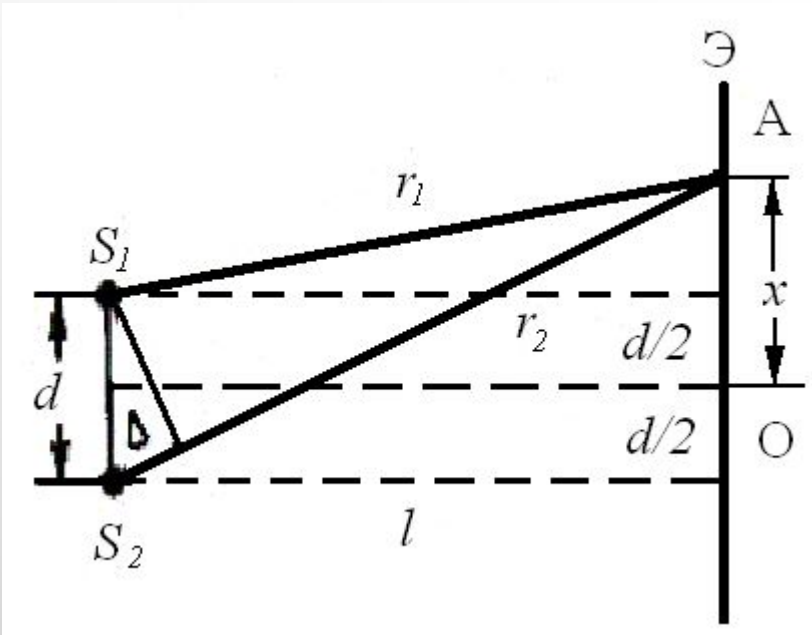
$$\begin{aligned}
I &= \langle E^2 \rangle = \langle (E_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_1) + E_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_2))^2 \rangle = \\
&= E_0^2 \cdot \langle \cos^2(\omega t + \varphi_1) + 2 \cos(\omega t + \varphi_1) \cdot \cos(\omega t + \varphi_2) + \cos^2(\omega t + \varphi_2) \rangle = \\
&= E_0^2 (1 + \langle 2 \cos(\omega t + \varphi_1) \cos(\omega t + \varphi_2) \rangle) = \\
&= E_0^2 (1 + \langle \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) \rangle + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) = \\
&= E_0^2 (1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2)) = \\
&= I_0 (1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2))
\end{aligned}$$

ПРИ СЛОЖЕНИИ ДВУХ ВОЛН ОДИНАКОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ С  
ИНТЕНСИВНОСТЯМИ  $I_1$  И  $I_2$  ИНТЕНСИВНОСТЬ СУММАРНОЙ ВОЛНЫ  
ПОЛУЧАЕМ АНАЛОГИЧНО

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



# СХЕМА ИНТЕРФЕРЕНЦИИ



оптической разностью хода  $\Delta = S_2 - S_1$

$$s_1^2 = l^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$s_2^2 = l^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2$$

Откуда  $s_2^2 - s_1^2 = 2xd$

$$\Delta = S_2 - S_1 = \frac{2xd}{(s_1 + s_2)}$$

Из условия  $l \gg d$  следует, что  $s_1 + s_2 \approx 2l$

поэтому  $\Delta = \frac{xd}{l}$

Максимумы будут при  $\Delta = 2m \frac{\lambda}{2}$

а минимумы при  $\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами), называемое **шириной интерференционной полосы**, равно

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

$\Delta x$  не зависит от порядка интерференции (величины  $m$ ) и является постоянной для данных  $l$ ,  $d$  и  $\lambda$ . И  $\Delta x$  обратно пропорционально  $d$ ; следовательно, при большом расстоянии между источниками, например при  $d \approx l$ , отдельные полосы становятся неразличимыми для видимого света  $\lambda \approx 10^{-7}$  м. Поэтому четкая, доступная для визуального наблюдения интерференционная картина имеет место при  $l \gg d$  (это условие и принималось при расчете). По измеренным значениям  $l$ ,  $d$  в  $\Delta x$ , можно экспериментально определить длину волны света. Интерференционная картина, создаваемая на экране двумя когерентными источниками света, представляет собой чередование светлых и темных полос, параллельных друг другу. Главный максимум, соответствующий  $m = 0$ , проходит через точку  $O$ . Вверх и вниз от него на равных расстояниях друг от друга располагаются максимумы (минимумы) первого ( $m = 1$ ), второго ( $m = 2$ ) порядков и т. д.

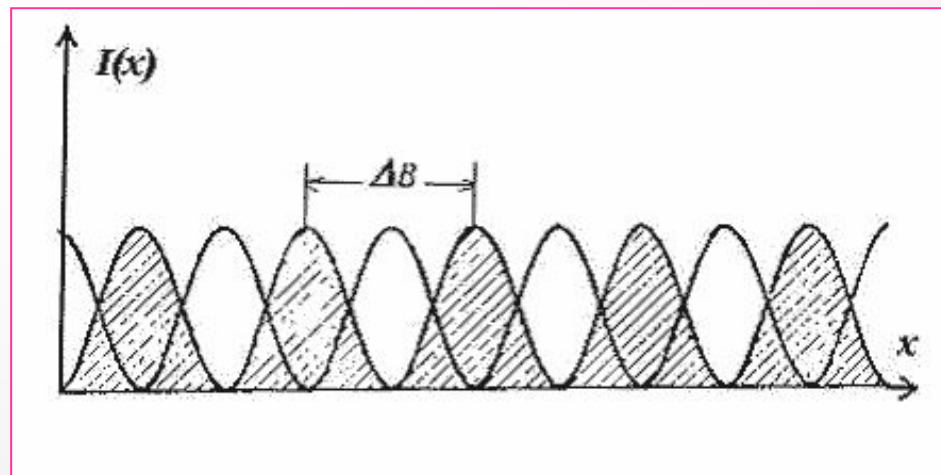
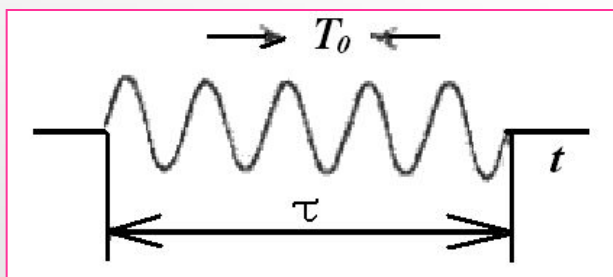
# КОГЕРЕНТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

**когерентностью двух волновых процессов** называется их согласованное протекание

два волновых процесса называются когерентными, если средняя разность их полных фаз  $\overline{\Delta\varphi(x,y,z)}$  в точке наблюдения с координатами  $r, t$  не зависит от времени наблюдения  $t$ :

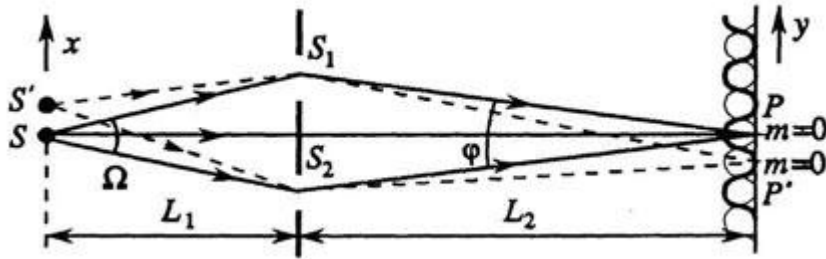
где  $\varphi_1(x,y,z)$ ,  $\varphi_2(x,y,z)$  – соответственно полные фазы первой и второй волны; черта над разностью фаз означает её среднее значение по времени. среднее по времени это

# ВРЕМЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ



время когерентности учитывает тот факт, что реально средняя разность фаз может зависеть от времени. поскольку когерентность двух волн связывается с возможностью наблюдения интерференционной картины, то под временем когерентности понимается время, в течение которого интерференционная картина этих волн может наблюдаться. это время в течение которого видность интерференционной картины отлична от нуля при различии интенсивностей её максимумов и минимумов.

# ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОГЕРЕНТНОСТЬ



пространственная когерентность возникает при использовании в интерференционных опытах протяженных источников

если точечный источник  $S$  находится на оси системы, то разность хода  $\Delta$  обращается в нуль в точке наблюдения  $P$ , также находящейся на оси. Здесь располагается интерференционный максимум нулевого порядка (нулевая интерференционная полоса). для точечного источника  $S'$ , расположенного на расстоянии  $x$  от оси, нулевая полоса (а, следовательно, и вся

интерференционная картина) сместится на некоторое расстояние  $y = -\frac{L_2}{L_1} x$

$d$  – расстояние между щелями  $S_1$  и  $S_2$ , а  $b$  расстояния  $x$  между источниками  $S$  и  $S'$  полагая, что  $L_1, L_2 \gg d$ , и выполнив интегрирование по  $x$  в пределах  $\pm b/2$ , можно получить следующее выражение для распределения интенсивности в суммарной интерференционной картине

$$I(y) = 2I_0 \left[ 1 + \gamma(\Omega) \cos \frac{2\pi}{l} y \right]$$

В этих выражениях  $\Omega$  – апертурный угол,  $l = \frac{\lambda}{\varphi}$  – ширина интерференционных полос,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число.

В качестве критерия наблюдения интерференции при протяженном источнике можно принять условие  $b \leq b_{max} = \frac{\lambda}{\Omega}$ . Получим  $\Omega = \frac{d}{L_1}$ ,  $b_{max} = \frac{\lambda L_1}{d} \rightarrow d = \frac{\lambda L_1}{b_{max}} = \frac{\lambda}{\psi}$ , где  $\psi = \frac{b_{max}}{L_1}$  – угловой размер источника, при котором видность интерференционных полос обращается в нуль.

радиус пространственной когерентности света ( $\rho_c$ ) в плоскости экрана:

$$\rho_c \approx \frac{\lambda}{\psi}$$

Пример: угловые размеры солнца составляют порядка 0,01 рад, а характерная длина видимого света 0,5 мкм, по этому длина пространственной когерентности  $\rho_k \approx 50$  мкм.

Плоской волне соответствует бесконечное значение радиуса пространственной когерентности ( $\rho_c \rightarrow \infty$ ). Если излучение источника монохроматическое, т.е. спектр его излучения  $\Delta F = 0$ , и, следовательно, излучение источника имеет бесконечно большое время когерентности ( $t_c \rightarrow \infty$ ). Отсюда следует вывод, что плоская гармоническая электромагнитная волна является когерентной как во времени, так и в пространстве.

В действительности представление об электромагнитном излучении реальных тел в виде плоской гармонической волны является абстракцией. Окружающие нас объекты повседневной деятельности имеют конечные размеры, а ширина спектра их излучения всегда отлична от нуля.

По этой причине в пространстве вокруг источника электромагнитных волн можно выделить область, внутри которой излучение может считаться когерентным. Объём такой области называется объёмом когерентности  $V_c$  и равен произведению длины когерентности  $l_c$  на площадь круга радиуса  $\rho_c$

$$V_c = \pi l_c \rho_c^2$$

В частности, вопрос о возможности наблюдения интерференции волн от двух щелей при использовании выбранного источника электромагнитного излучения решается положительно, если область экрана, на котором расположены щели, попадает внутрь объёма когерентности источника излучения.