

The background of the slide is a light gray gradient, decorated with numerous realistic water droplets of various sizes. The droplets are rendered with soft shadows and highlights, giving them a three-dimensional appearance. They are scattered across the page, with a higher concentration in the top-left and bottom-right corners.

# ЛЕКЦИЯ 8

## *ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА*

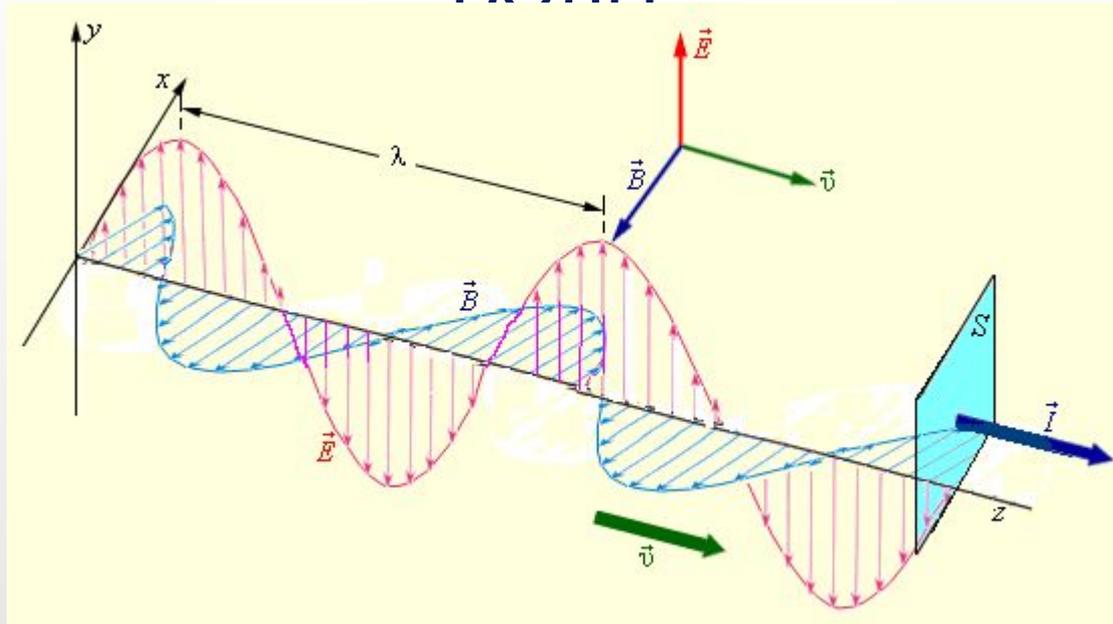
**ОПТИКА** – РАЗДЕЛ ФИЗИКИ, ИЗУЧАЮЩИЙ СВОЙСТВА И ФИЗИЧЕСКУЮ ПРИРОДУ СВЕТА, А ТАКЖЕ ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВЕЩЕСТВОМ. УЧЕНИЕ О СВЕТЕ ПРИНЯТО ДЕЛИТЬ НА ТРИ ЧАСТИ:

**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  $\vec{E}$  И  $\vec{B}$  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

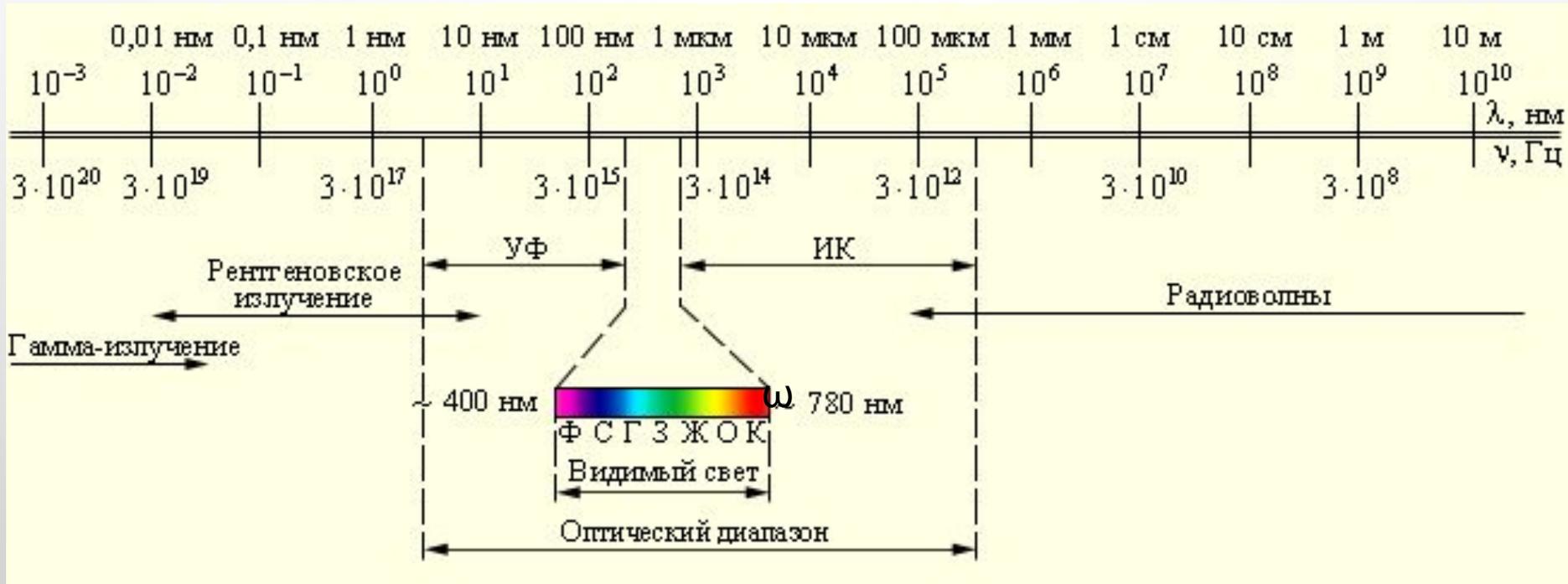
$$B = \frac{\sqrt{\varepsilon\mu}}{c} E$$

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

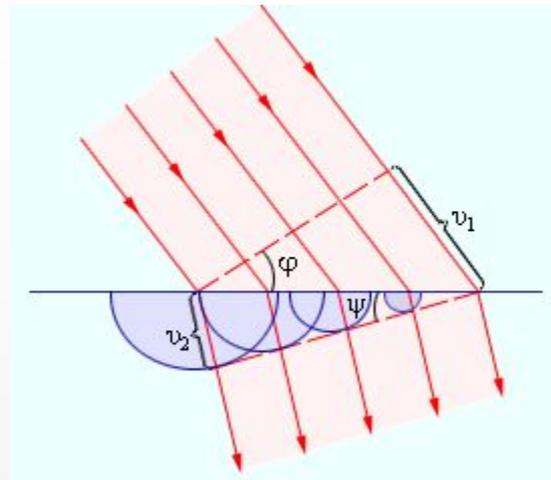


ЭНЕРГИЯ КВАНТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ (ФОТОНОВ) ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

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

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

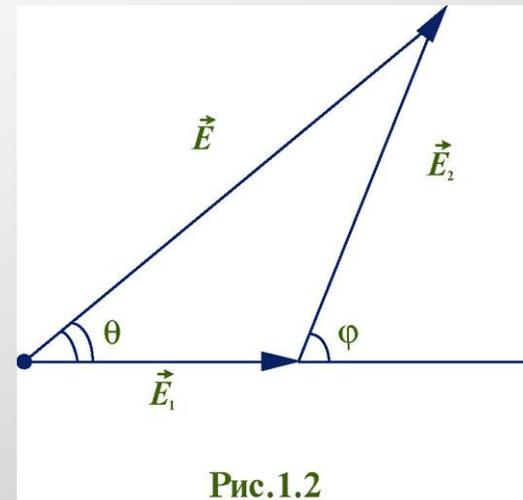
ЯВЛЕНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩЕГО СОБОЙ СУММУ ДВУХ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ ВОЛН ОДНОЙ ЧАСТОТЫ, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ РАЗНОСТИ ФАЗ НАЗЫВАЕТСЯ **ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ**

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

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

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

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

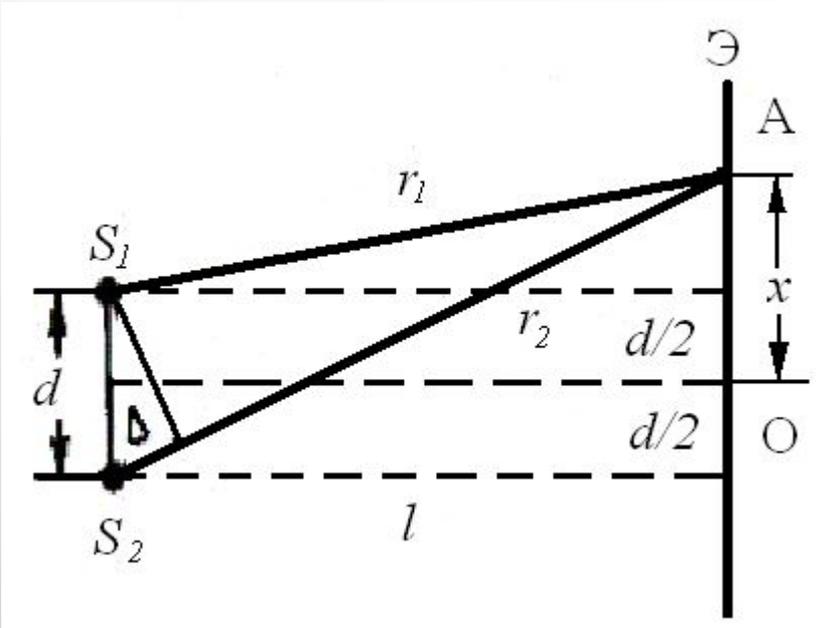


$$\begin{aligned}
I &= \langle E^2 \rangle = \langle (E_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_1) + E_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi_2))^2 \rangle = \\
&= E_0^2 \cdot \langle \cos^2(\omega t + \varphi_1) + 2 \cos(\omega t + \varphi_1) \cdot \cos(\omega t + \varphi_2) + \cos^2(\omega t + \varphi_2) \rangle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

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.

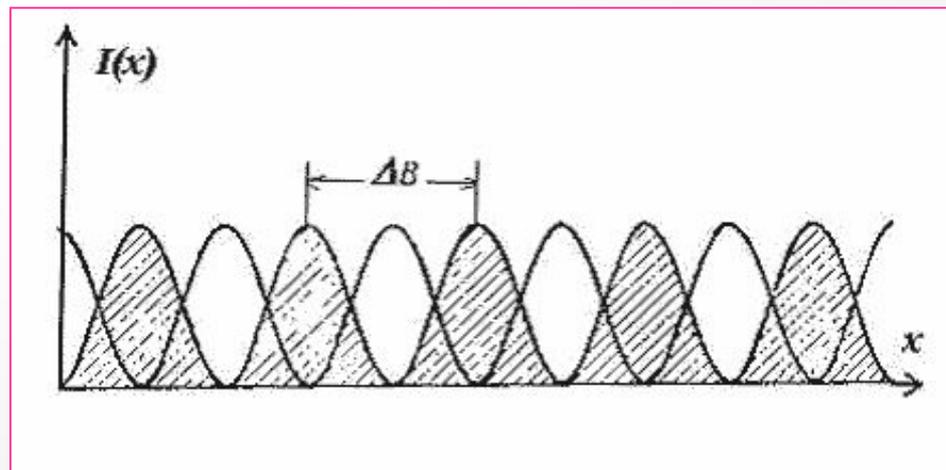
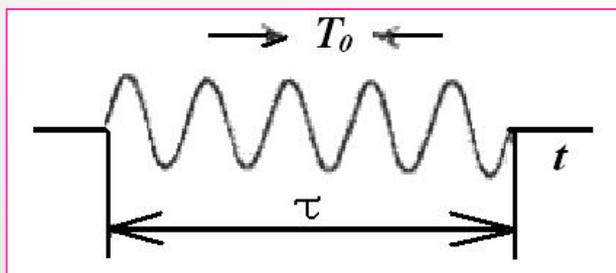
# КОГЕРЕНТНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

**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  $t$ :

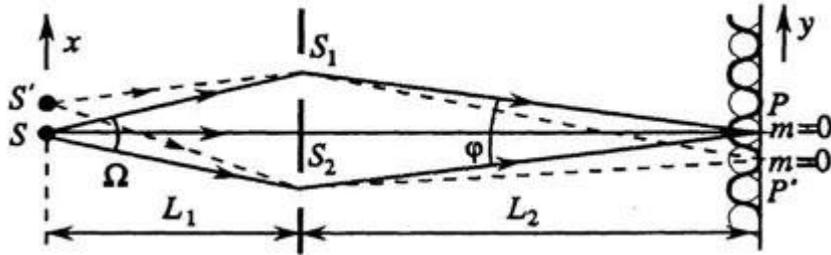
где  $\varphi_1(x,y,z)$ ,  $\varphi_2(x,y,z)$  – соответственно полные фазы первой и второй волны; черта над разностью фаз означает её среднее значение по времени. среднее по времени это

# 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 наблюдении 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.