

Часть 4. Оптика

Лекция 25. Интерференция света

1. Развитие представлений о природе света
2. Интерференция света. Когерентность волн. Время и длина когерентности
3. Условия усиления и ослабления света при интерференции
4. Интерференционный опыт Юнга
5. Интерференция света в тонких плёнках. Кольца Ньютона
6. Применение интерференции света

В конце 17 века сформировались две теории света: *корпускулярная* (И. Ньютон) и *волновая* (Х. Гюйгенс и Р. Гук).

Корпускулярная теория: свет — поток мельчайших частиц (корпускул), испускаемых светящимися телами.

«За»: прямолинейность светового луча, равенство углов падения и отражения света.

«Против»: $v > c$ (должно быть по теории); проявление волновых свойств света; пересекающиеся пучки корпускул не влияют друг на друга.

Волновая теория: свет — волновой процесс, подобный механическим волнам, распространяющийся в упругом эфире. Волновая теория основывалась на **принципе Гюйгенса:**



Христиан Гюйгенс

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

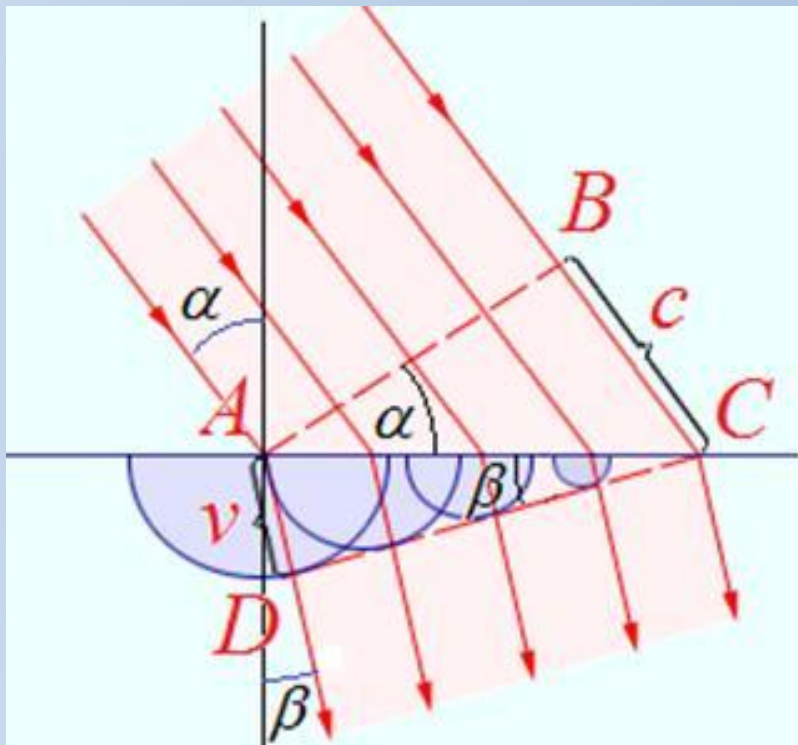
Вывод закона преломления света из принципа Гюйгенса:

$$BC = c \cdot t; AD = v \cdot t$$

$$AC = \frac{BC}{\sin \alpha} = \frac{AD}{\sin \beta},$$

$$\frac{ct}{\sin \alpha} = \frac{vt}{\sin \beta}$$

$$\frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{c}{v} = n.$$



«За»: $v < c$ (подтверждение на опыте!); объяснение явлений интерференции и дифракции света, законов отражения и преломления света.

- «Против»: невозможность объяснить прямолинейное распространение света в неограниченном однородном и изотропном пространстве;
- трудность в объяснении различия скорости света в различных средах;
- трудность в объяснении физической природы наличия разных цветов.

Конец 19 века: электромагнитная теория света Максвелла

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}.$$

электронная теория дисперсии света Лоренца:

Трудности:

$$n = f(v).$$

- невозможность объяснения: процессов испускания и поглощения света;
- фотоэлектрического эффекта;
- эффекта Комптона;
- распределения энергии по длинам волн при тепловом излучении нагретых тел.

Начало 20 века: М. Планк, А. Эйнштейн. Квантовая теория света. Свет — это поток световых квантов — фотонов.

$$\varepsilon_{\phi} = h\nu; \quad m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Середина 20 века: А. М. Прохоров, Н. Г. Басов, Ч. Таунс) — открытие вынужденного излучения атомов и молекул. Создание оптического квантового генератора (лазера)

Современные представления о свете:

- свет имеет сложную природу — обладает одновременно как волновыми, так и корпускулярными свойствами;
- чем больше длина волны света, тем больше проявляются его волновые свойства и в меньшей степени корпускулярные;
- чем меньше длина волны — тем труднее обнаруживаются волновые свойства и легче корпускулярные.
- современная оптика успешно развивается на стыке квантовой электроники и квантовой электродинамики.

Интерференция света. Когерентность волн.

Время и длина когерентности

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

Этому условию удовлетворяют волны: одинаковой частоты (монохроматические волны); имеющие постоянную разность начальных фаз.

Излучение света атомами в виде отдельных коротких импульсов («оборванных» синусоид) называется *волновым цугом.*

Продолжительность одного цуга называется *временем когерентности*.

Длина когерентности — путь проходимый волной за время когерентности:

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

Вывод: наблюдение интерференции света возможно лишь при оптических разностях хода двух волн меньших длины когерентности используемого источника света.

Условия усиления и ослабления света при интерференции

Для получения когерентных световых волн применим метод разделения волны, излучаемой одним источником, на две части, которые после прохождения разных оптических путей накладываются друг на друга и происходит интерференция света.

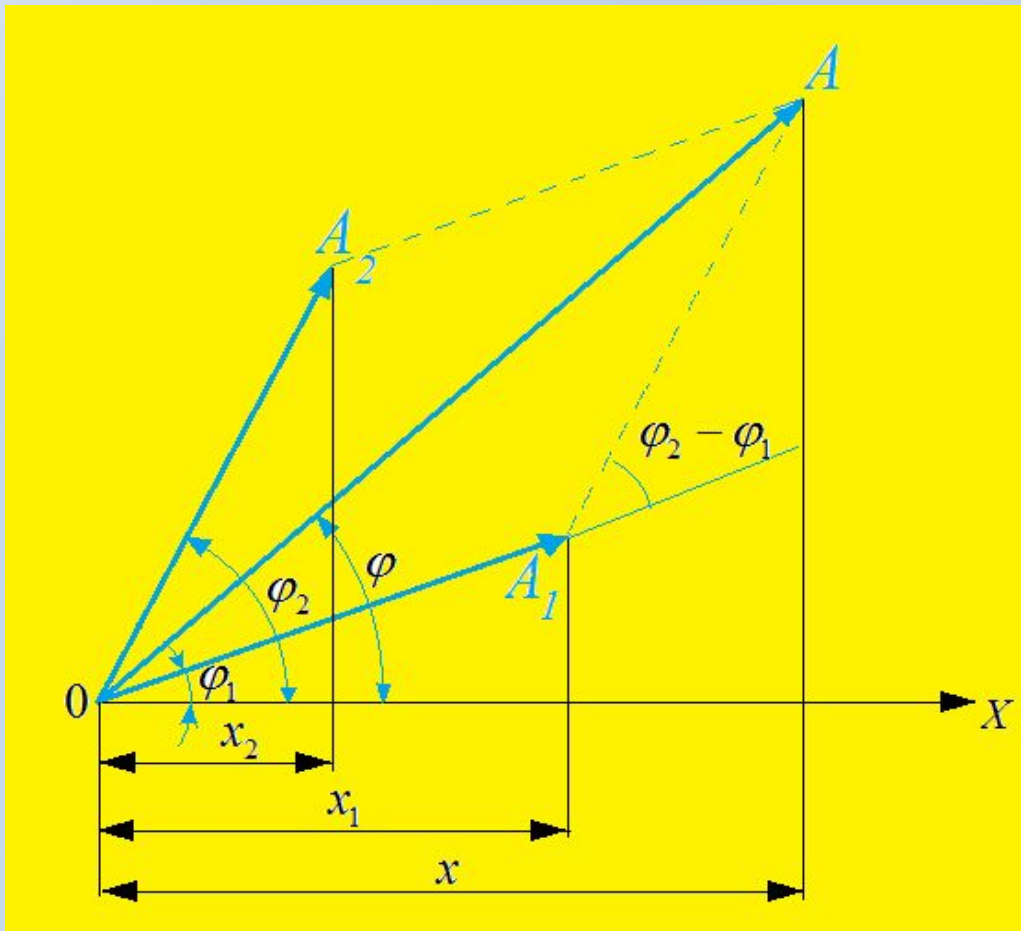
$$\xi_1(x, t) = A_1 \cos \left[\omega \left(t - \frac{s_1}{v_1} \right) \right] = A_1 \cos \varphi_1;$$

$$\xi_2(x, t) = A_2 \cos \left[\omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right) \right] = A_2 \cos \varphi_2.$$

Здесь $\xi_1(x, t)$ и $\xi_2(x, t)$ — напряжённость электрического или магнитного полей электромагнитной волны;

v_1 и v_2 — фазовые скорости первой и второй волны;

s_1 и s_2 — пути, которые прошли первая и вторая волны от источника колебаний до точки, в которой наблюдается интерференционная картина.



Амплитуду
резльтирующего
колебания найдем с
помощью *метода*
вращающегося
вектора амплитуды.

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

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

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \left[\left(\frac{s_1}{v_1} - \frac{s_2}{v_2} \right) \right] =$$

$$= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \left(2\pi \frac{I_1 + I_2}{\lambda} \cos \delta \sqrt{I_1 I_2} \right)$$

Здесь I — интенсивность света: $I \sim A^2$.

$$\delta = \omega \left(\frac{s_1}{v_1} - \frac{s_2}{v_2} \right) = \omega \left(\frac{s_1}{c/n_1} - \frac{s_2}{c/n_2} \right) =$$

$$= \omega \left(\frac{s_1 n_1}{c} - \frac{s_2 n_2}{c} \right) = \frac{\omega}{c} (s_1 n_1 - s_2 n_2) =$$

$$= \frac{2\pi}{Tc} (s_1 n_1 - s_2 n_2) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta.$$

оптическая разность хода

Если оптическая разность хода равна целому числу волн в вакууме: $\Delta = \pm m\lambda_0$ ($m = 0, 1, 2, \dots$), то $\delta = \pm 2m\pi$, и $\cos 0 >$ колебания обеих волн будут происходить в одинаковой фазе, и колебания будут усиливать друг друга.

Тогда $I > I_1 + I_2$, а равенство

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

является *условием интерференционного максимума*.

Если оптическая разность хода равна

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

то $\delta = \pm(2m + 1)\pi$, $\delta \cos 0 <$

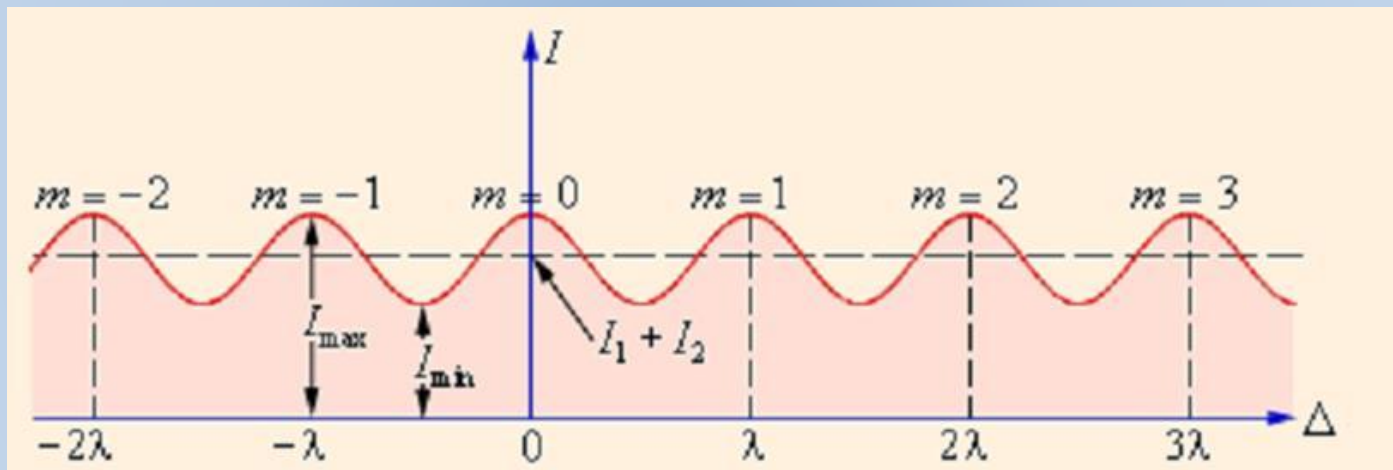
В этом случае колебания обеих волн будут происходить в противофазе и $I < I_1 + I_2$, а равенство

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

является *условием интерференционного минимума*.

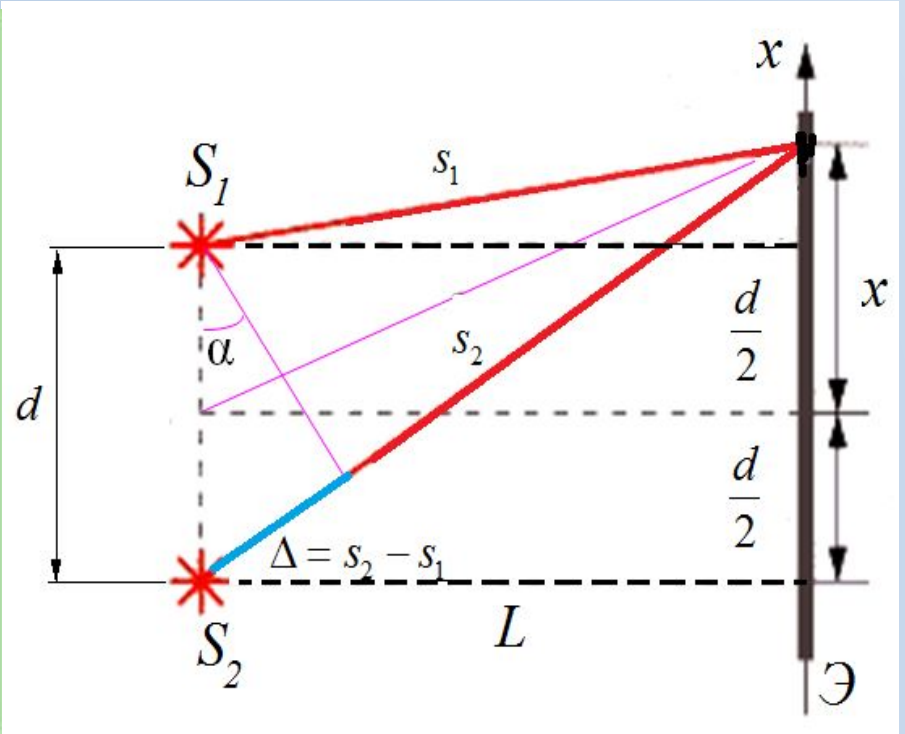
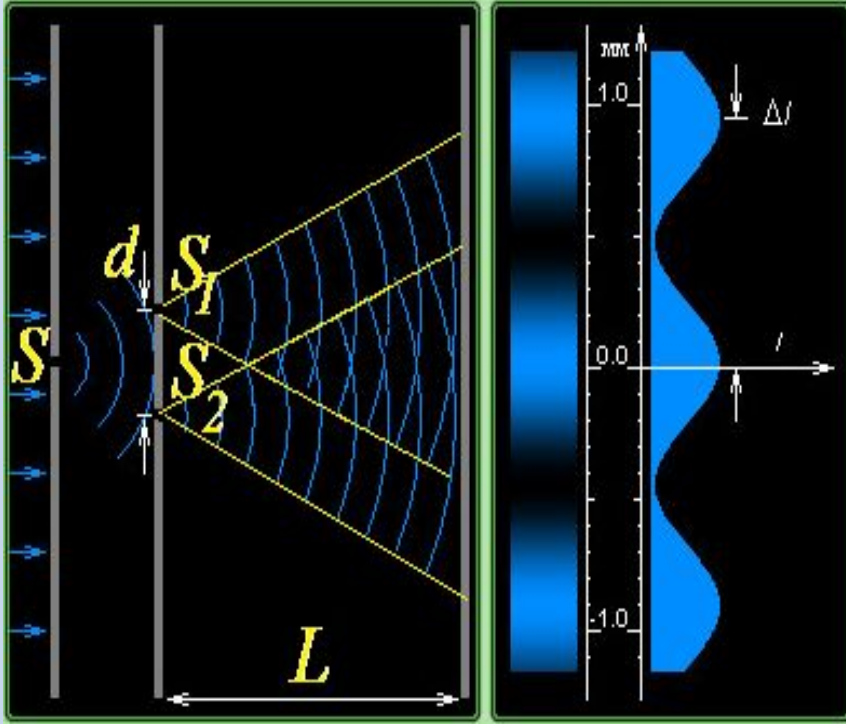
Для некогерентных источников разность фаз δ непрерывно изменяется, а интенсивность результирующей волны всюду одинакова и равна сумме интенсивностей каждой из волн в отдельности:

$$I = I_1 + I_2.$$



Распределение интенсивности света в интерференционной картине. m — порядок интерференционного максимума.

Интерференционный опыт Юнга



$$s_2^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2; \quad s_1^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2.$$

$$s_2^2 - s_1^2 = 2xd \quad \text{и} \quad \Delta = s_2 - s_1 = \frac{2xd}{s_1 + s_2} \approx \frac{xd}{L}.$$

Это приближенное равенство следует из условия опыта Юнга: $L \gg d \Rightarrow s_1 + s_2 \approx 2L$.

Отсюда максимум интенсивности света (светлая полоса) будет наблюдаться при:

$$\frac{x_{\max} d}{L} = \pm m \lambda_0 \Rightarrow x_{\max} = \pm m \frac{L}{d} \lambda_0;$$

а минимум (темная полоса) – при

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

Ширина интерференционной полосы:

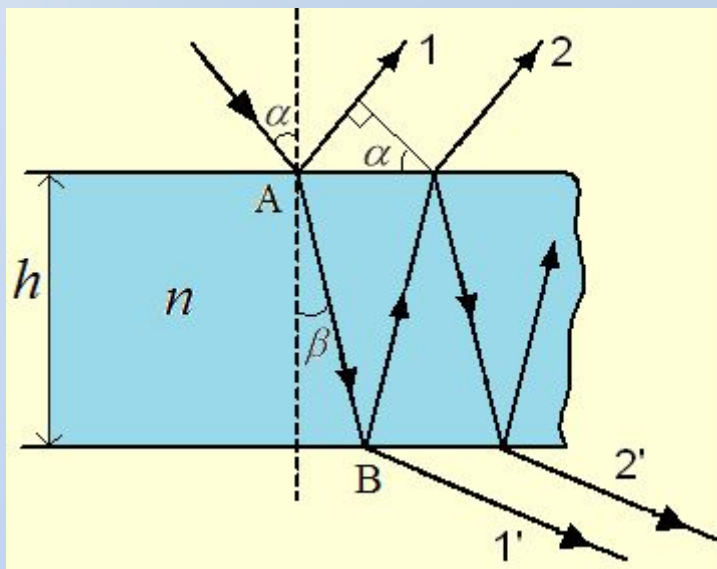
$$\Delta l = \frac{L}{d} \lambda_0$$

Интерференция света в тонких плёнках. Кольца Ньютона.

Явление интерференции света можно наблюдать в естественных условиях.

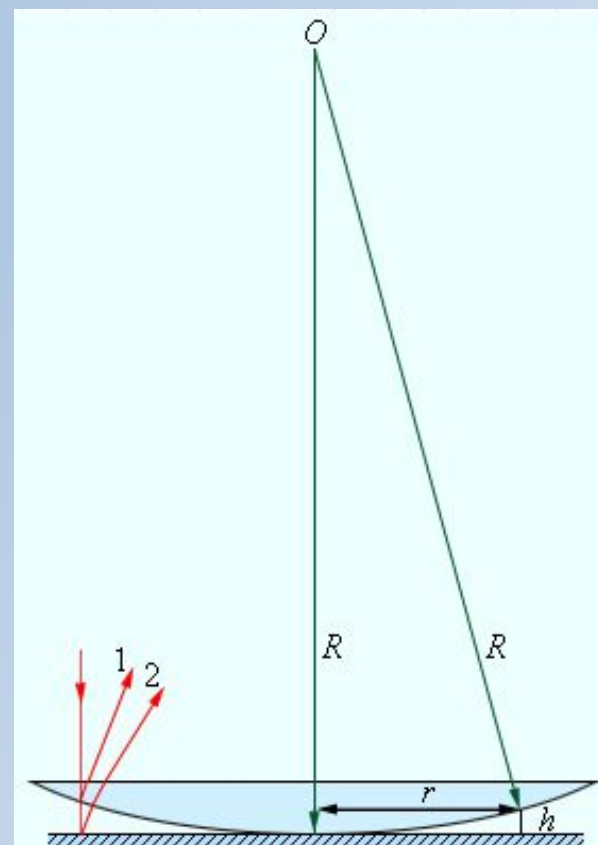


Это радужное окрашивание тонких плёнок (мыльные пузыри, масляные пятна на воде, оксидные пленки на поверхности металлов), возникающие в результате интерференции света, отражённого двумя поверхностями пленки.



Лучи 1 и 2 будут когерентны, если оптическая разность их хода будет мала по сравнению с длиной когерентности падающей волны.

Схема наблюдения колец Ньютона — стационарной картины интерференции света в тонком воздушном слое, образованном между поверхностями плоскопараллельной пластины и плосковыпуклой линзы большого радиуса кривизны.



Из рисунка:

$$\Delta \approx 2h; \quad h \approx \frac{r^2}{2R}.$$

С учётом потери полуволны при отражении второй волны оптическая разность хода:

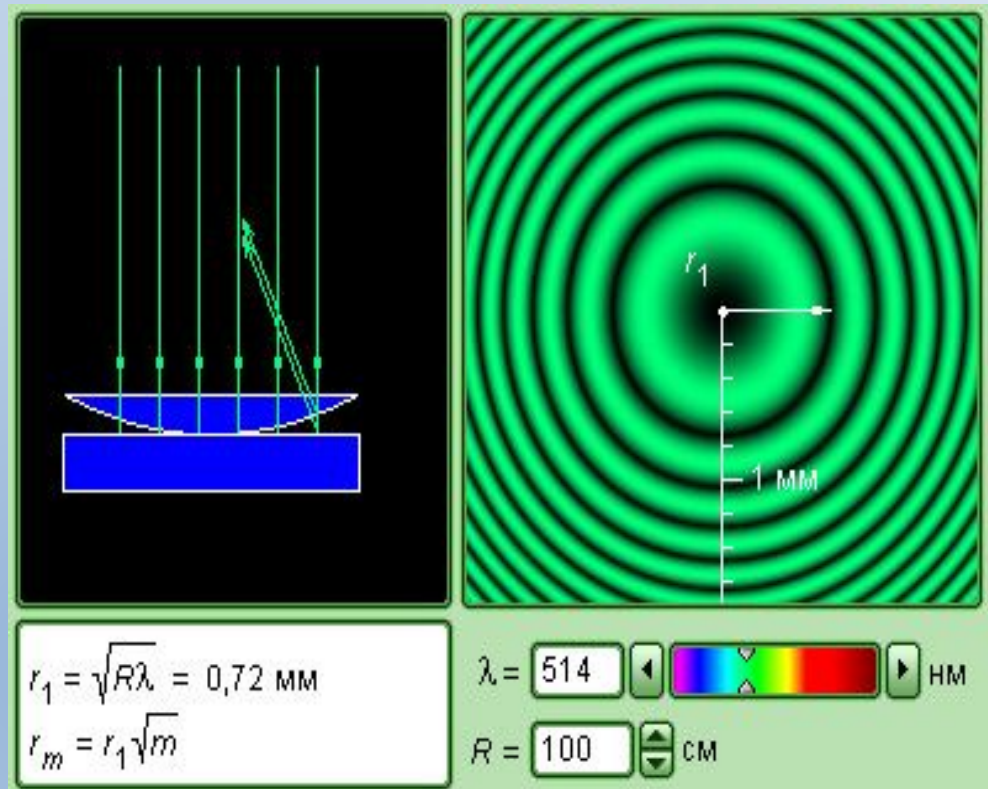
$$\Delta = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2}.$$

Тёмные кольца будут наблюдаться при:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda_0}{2}.$$

Поэтому радиусы темных колец будут равны:

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}.$$



Применение интерференции света

1. Просветление оптики. Высоко отражающие покрытия.
2. Интерференционная спектроскопия.
3. Приборостроение, метрология, контроль качества чистоты обработки поверхности (интерферометры).

Лекция окончена