

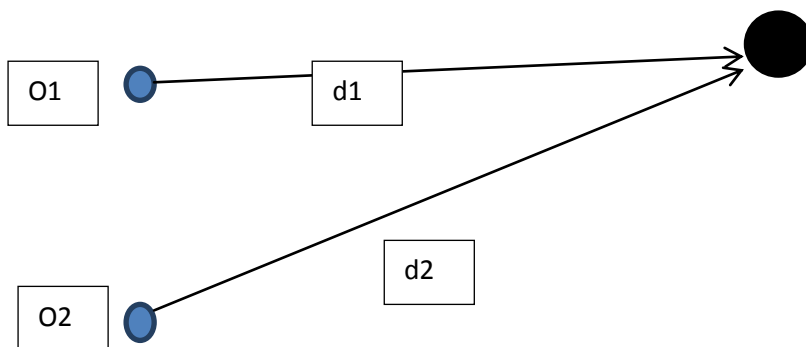
Тема : интерференция света

Интерференция – одно из ярких проявлений волновой природы света. Это интересное и красивое явление наблюдается при наложении двух или нескольких световых пучков. Интенсивность света в области перекрывания пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интенсивность больше, а в минимумах меньше суммы интенсивностей пучков. При использовании белого света интерференционные полосы оказываются окрашенными в различные цвета спектра. С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен на асфальте, окраска замерзающих оконных стекол, причудливые цветные рисунки на крыльях некоторых бабочек и жуков – все это проявление интерференции света.

Вспомним как изменяется амплитуда колебаний при наложении одного колебания на второе

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

Рассмотрим распространение волн в воде (например 2 поплавков)



Запишем уравнения распространения волн для первого источника и для второго

$$S_1(t) = A_1\cos(\omega_1t - k_1d_1 + \varphi_{01})$$

$$S_2(t) = A_2\cos(\omega_2t - k_2d_2 + \varphi_{02})$$

Аргументы, стоящие в скобках это фаза волны

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$$

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= (\omega_1 t - k_1 d_1 + \varphi_{01}) - (\omega_2 t - k_2 d_2 + \varphi_{02}) \\ &= (\omega_1 - \omega_2)t + (d_2 k_2 - d_1 k_1) + (\varphi_{01} - \varphi_{02})\end{aligned}$$

Когда $\Delta\varphi$ не зависит от времени:

А) $\omega_1 = \omega_2$

Б) $\varphi_{01} - \varphi_{02} = \text{const}$

Источник волн, удовлетворяющий этим условиям называется когерентным.

Источники волн, частоты которых одинаковы и разность начальных фаз не меняется со временем называются когерентными.

$$\Delta\varphi = k(d_2 - d_1) + (\varphi_{01} - \varphi_{02})$$

Обозначим $d_2 - d_1 = \Delta$ - разность хода волн

Вспомним $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

Для удобства будем считать, что $\varphi_{01} = \varphi_{02}$, тогда

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$$

Амплитуда будет максимальной $A=\text{max}$, если $\Delta\varphi = 2\pi m$ где $m=0;\pm 1;\pm 2;\dots\dots\dots$

Тогда приравняем правые части $\frac{2\pi}{\lambda} \Delta = 2\pi m$

$$\Delta = m\lambda$$

Условие максимумов

Разность хода волн равна целому числу волн

Амплитуда будет минимальной $A=\text{min}$, если $\Delta\varphi = 2\pi m + \pi$ где $m=0;\pm 1;\pm 2;\dots\dots\dots$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta = 2\pi m + \pi$$

$$\frac{2}{\lambda} \Delta = 2m + 1$$

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

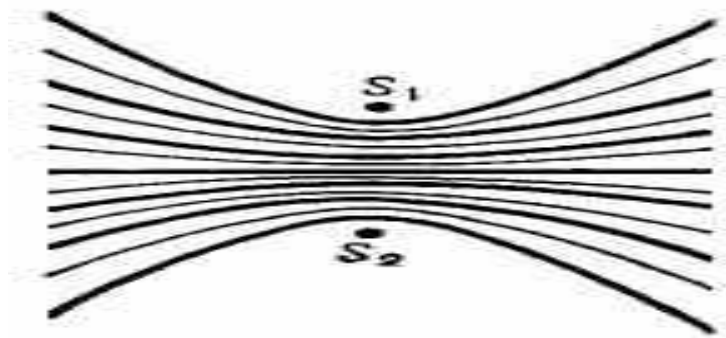
Условие минимумов

Разность хода волн равна не целому числу волн

Таким образом в одних точках пространства выполняется условие максимумов, а в других условие минимумов.

Интерференцией волн называется образование устойчивого пространственного распределения амплитуд колебаний, создаваемых несколькими когерентными источниками волн.

Интерференционная картина



Когда используются световые источники волн, волна ведет себя иначе, чем волны в воде, звуке, твердом теле.

Интерференция света

При рассмотрении интерференции света справедливы записанные нами условия максимумов и минимумов

Условие максимумов $\Delta = m\lambda$

Условие минимумов $\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$

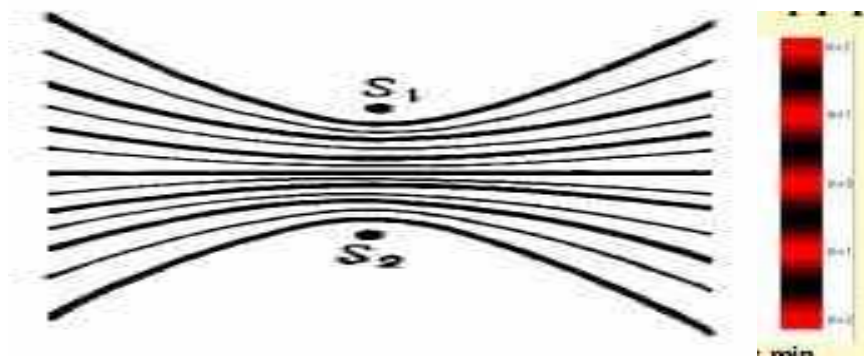
Очень красиво выглядит интерференционная картинка, для интерференции света

Интерференционная картинка это картинка, когда в одних точках среды наблюдается условие максимумов, а в других условие минимумов.

Возможна только при выполнении условия когерентности.

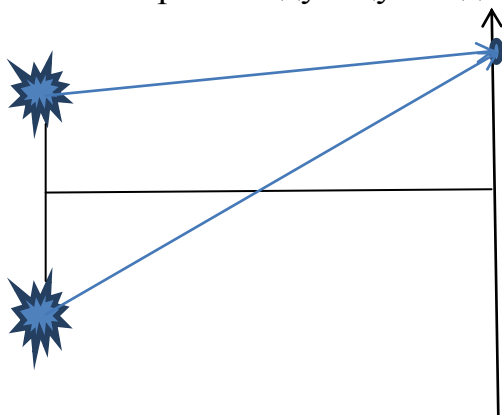
Получить интерференционную картинку для света сложно, т.к. например если взять обычную лампочку, то она излучает свет различных длин волн, а соответственно $\nu_1 \neq \nu_2$

Единственный способ получить интерференционную картинку для света – это использовать 1 пучок света от 1 источника.



Интерференционные полосы

Рассмотрим следующую задачу



B(x) - точка наблюдения

O - начало координат

$$\Delta = S_2B - S_1B$$

Дано: d, L, x

Найти Δ - ?

Решение: Рассмотрим треугольник S_2A_2B

$$(S_2B)^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 \quad (1)$$

Треугольник S_2A_2B

$$(S_1B)^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2 \quad (2)$$

(1)-(2)

$$(S_2B)^2 - (S_1B)^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 - L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2$$

Разложим разность квадратов

$$(S_2B + S_1B)(S_2B - S_1B) = x^2 + xd + \frac{d^2}{4} - x^2 + xd - \frac{d^2}{4}$$

Поскольку размер x очень мал по сравнению с расстоянием L , то

$$x \ll L \text{ следовательно } S_2B = S_1B = L$$

$$2L\Delta = 2xd$$

$$L\Delta = xd$$

$$\Delta = x \frac{d}{L}$$

В каких точках экрана будет наблюдаться интерференционный максимум и минимум.

$$\Delta = m\lambda$$

$$x_{\max} \frac{d}{L} = m\lambda$$

$$x_{\max} = \frac{m\lambda L}{d}$$

Расстояние между соседними максимумами

$$\delta = x_{\max(m+1)} - x_{\max(m)} = (m + 1) \frac{\lambda L}{d} - m \frac{\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d}$$

$$\delta = \frac{\lambda L}{d}$$

Расстояние между соседними максимумами

δ – расстояние между светлыми полосами, темными полосами, ширина светлых полос и темных полос.

От чего же зависит δ ?

1. От расстояния от источника волн до экрана
2. От длины волны.

λ зависит от цвета, т.к. у разного цвета разная длина волны.

Первый эксперимент по наблюдению интерференции света в лабораторных условиях принадлежит И. Ньютону. Он наблюдал интерференционную картину, возникающую при отражении света в тонкой воздушной прослойке между плоской стеклянной пластиной и плосковыпуклой линзой большого радиуса кривизны (рис. 1). Интерференционная картина имела вид концентрических колец, получивших название колец Ньютона (рис. 2).

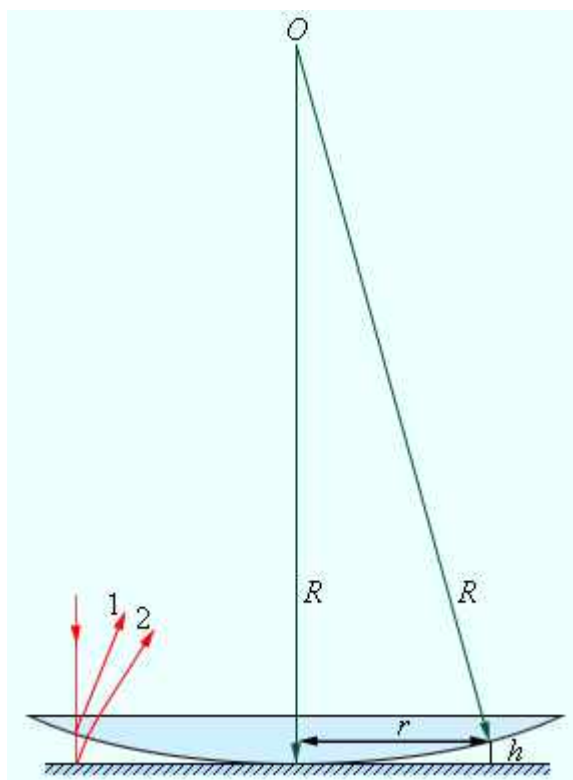


Рисунок 1. Наблюдение колец Ньютона. Интерференция возникает при сложении волн, отразившихся от двух сторон воздушной прослойки. «Лучи» 1 и 2 – направления распространения волн; h – толщина воздушного зазора

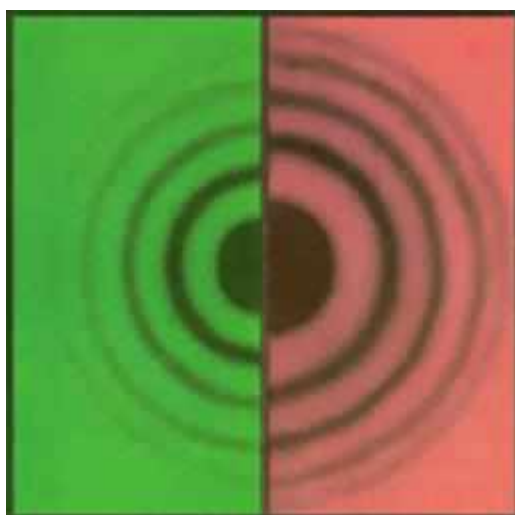


Рисунок 2. Кольца Ньютона в зеленом и красном свете

Ньютон не смог с точки зрения корпускулярной теории объяснить, почему возникают кольца, однако он понимал, что это связано с какой-то периодичностью световых процессов.

Первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, явился опыт Юнга (1802 г.). В опыте Юнга свет от источника, в качестве которого служила узкая щель S , падал на экран с двумя

близко расположенными щелями S_1 и S_2 (рис. 3). Проходя через каждую из щелей, световой пучок уширялся вследствие дифракции, поэтому на белом экране Э световые пучки, прошедшие через щели S_1 и S_2 , перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

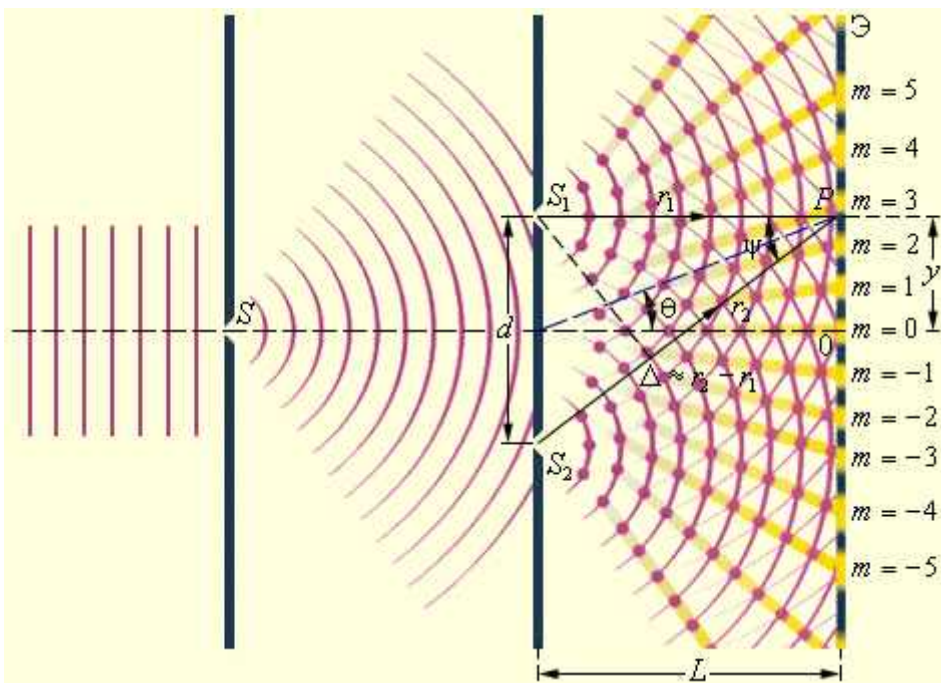


Рисунок 3.Схема интерференционного опыта Юнга

Юнг был первым, кто понял, что нельзя наблюдать интерференцию при сложении волн от двух независимых источников. Поэтому в его опыте щели S_1 и S_2 , которые в соответствии с принципом Гюйгенса можно рассматривать как источники вторичных волн, освещались светом одного источника S . При симметричном расположении щелей вторичные волны, испускаемые источниками S_1 и S_2 , находятся в фазе, но эти волны проходят до точки наблюдения P разные расстояния r_1 и r_2 . Следовательно, фазы колебаний, создаваемых волнами от источников S_1 и S_2 в точке P , вообще говоря, различны. Таким образом, задача об интерференции волн сводится к задаче о сложении колебаний одной и той же частоты, но с разными фазами. Утверждение о том, что волны от источников S_1 и S_2 распространяются независимо друг от друга, а в точке наблюдения они просто складываются, является опытным фактом и носит название принципа суперпозиции.

Монохроматическая (или синусоидальная) волна, распространяющаяся в направлении радиус-вектора \mathbf{r} , записывается в виде $E = a \cos (\omega t - \mathbf{k} \mathbf{r})$,

где a – амплитуда волны, $k = 2\pi / \lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $\omega = 2\pi\nu$ – круговая частота. В оптических задачах под E следует понимать модуль вектора напряженности электрического поля волны. При сложении двух волн в точке P результирующее колебание также происходит на частоте ω и имеет некоторую амплитуду A и фазу φ : $E = a_1 \cdot \cos(\omega t - kr_1) + a_2 \cdot \cos(\omega t - kr_2) = A \cdot \cos(\omega t - \varphi)$.

Приборов, которые способны были бы следить за быстрыми изменениями поля световой волны в оптическом диапазоне, не существует; наблюдаемой величиной является поток энергии, который прямо пропорционален квадрату амплитуды электрического поля волны. Физическую величину, равную квадрату амплитуды электрического поля волны, принято называть интенсивностью: $I = A^2$.

Несложные тригонометрические преобразования приводят к следующему выражению для интенсивности результирующего колебания в точке P :

$$I = A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1a_2 \cos k\Delta = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos k\Delta,$$

где $\Delta = r_2 - r_1$ – так называемая разность хода.

Из этого выражения следует, что интерференционный максимум (светлая полоса) достигается в тех точках пространства, в которых $\Delta = m\lambda$ ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$). При этом $I_{\max} = (a_1 + a_2)^2 > I_1 + I_2$. Интерференционный минимум (темная полоса) достигается при $\Delta = m\lambda + \lambda / 2$. Минимальное значение интенсивности $I_{\min} = (a_1 - a_2)^2 < I_1 + I_2$. На рис. 4 показано распределение интенсивности света в интерференционной картине в зависимости от разности хода Δ .

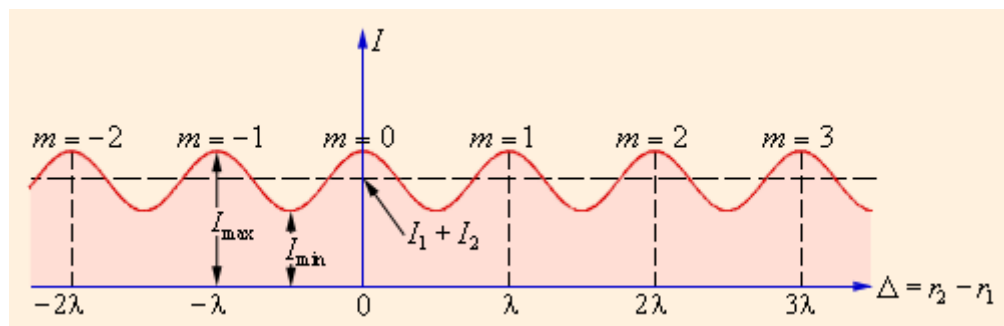


Рисунок 4. Распределение интенсивности в интерференционной картине. Целое число m – порядок интерференционного максимума

В волновой оптике, в отличие от геометрической оптики, понятие луча света утрачивает физический смысл.

При $r = 0$, то есть в центре (точка соприкосновения) $\Delta = \lambda / 2$; поэтому в центре колец Ньютона всегда наблюдается интерференционный минимум – темное пятно. Радиусы r_m последующих темных колец определяются выражением

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

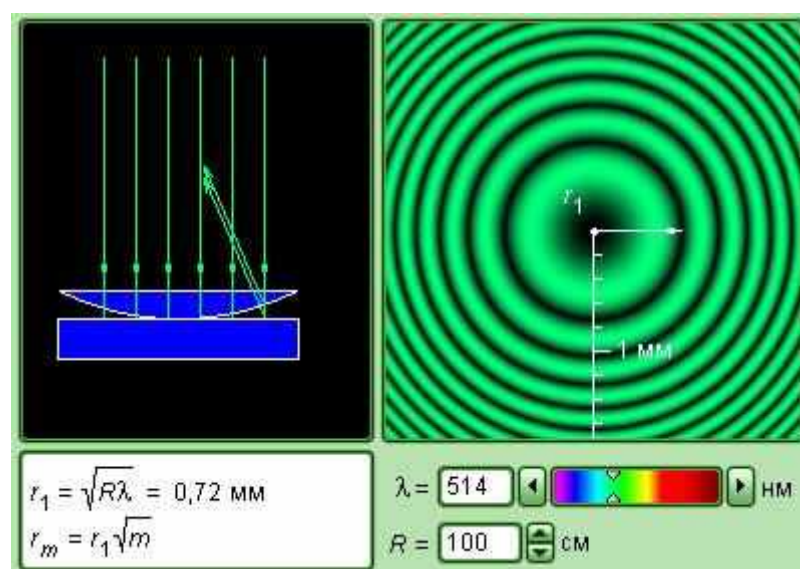
Эта формула позволяет экспериментально определить длину волны света λ , если известен радиус кривизны R линзы.

Проблема когерентности волн. Теория Юнга позволила объяснить интерференционные явления, возникающие при сложении двух монохроматических волн одной и той же частоты. Однако повседневный опыт учит, что интерференцию света в действительности наблюдать не просто. Если в комнате горят две одинаковые лампочки, то в любой точке складываются интенсивности света и никакой интерференции не наблюдается. Возникает вопрос, в каких случаях нужно складывать напряженности (с учетом фазовых соотношений), в каких – интенсивности волн, т. е. квадраты напряженностей полей? Теория интерференции монохроматических волн не может дать ответа на этот вопрос.

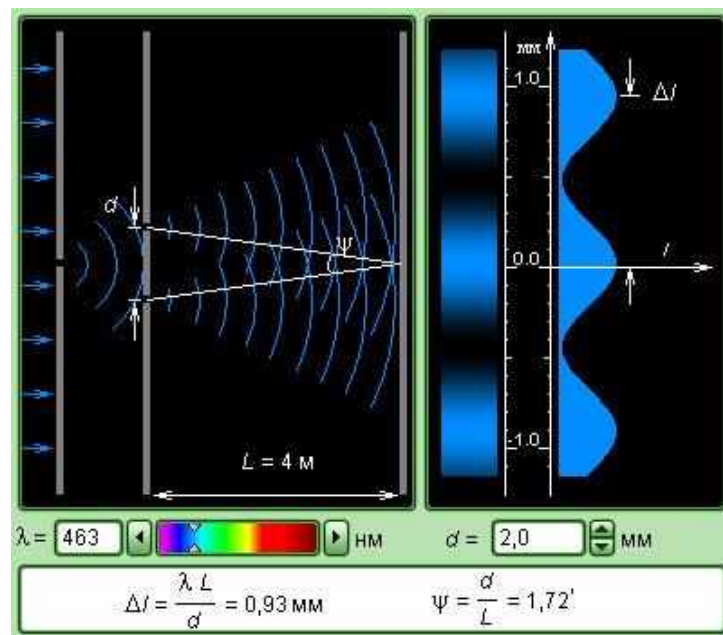
Реальные световые волны не являются строго монохроматическими. В силу фундаментальных физических причин излучение всегда имеет статистический (или случайный) характер. Атомы светового источника излучают независимо друг от друга в случайные моменты времени, и излучение каждого атома длится очень короткое время ($\tau \leq 10^{-8}$ с). Результирующее излучение источника в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа атомов. Через время порядка τ вся совокупность излучающих атомов обновляется. Поэтому суммарное излучение будет иметь другую амплитуду и, что особенно важно, другую фазу. Фаза волны, излучаемой реальным источником света, остается приблизительно постоянной только на интервалах времени порядка τ . Отдельные «обрывки» излучения длительности τ называются цугами. Цуги имеют пространственную длину, равную $c\tau$, где c – скорость света. Колебания в разных цугах не согласованы между собой. Таким образом, реальная световая волна представляет собой последовательность волновых цугов с беспорядочно меняющейся фазой. Принято говорить, что колебания в разных цугах некогерентны. Интервал времени τ , в течение которого фаза колебаний остается приблизительно постоянной, называют временем когерентности.

Интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний, т. е. колебаний, относящихся к одному и тому же цугу. Хотя фазы каждого из этих колебаний также подвержены случайным изменениям во времени, но эти изменения одинаковы, поэтому разность фаз когерентных колебаний остается постоянной. В этом случае наблюдается устойчивая интерференционная картина и, следовательно, выполняется принцип суперпозиции полей. При сложении некогерентных колебаний разность фаз оказывается случайной функцией времени. Интерференционные полосы испытывают беспорядочные перемещения из стороны в сторону, и за время Δt их регистрации, которая в оптических экспериментах значительно больше времени когерентности ($\Delta t \gg \tau$), происходит полное усреднение. Регистрирующее устройство (глаз, фотопластинка, фотоэлемент) зафиксирует в точке наблюдения усредненное значение интенсивности, равное сумме интенсивностей $I_1 + I_2$ обоих колебаний. В этом случае выполняется закон сложения интенсивностей.

Таким образом, интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний. Волны, создающие в точке наблюдения когерентные колебания, также называются когерентными. Волны от двух независимых источников некогерентны и не могут дать интерференции. Т. Юнг интуитивно угадал, что для получения интерференции света нужно волну от источника разделить на две когерентные волны и затем наблюдать на экране результат их сложения. Так делается во всех интерференционных схемах. Однако, даже в этом случае интерференционная картина исчезает, если разность хода Δ превысит длину когерентности σ .



Модель. Кольца Ньютона



Модель. Интерференционный опыт Юнга