

Оптика

Всем микрообъектам одновременно присущи **корпускулярные и волновые** характеристики. Это универсальное свойство природы получило название **корпускулярно-волнового дуализма**.

Впервые корпускулярно-волновой дуализм был установлен для **фотонов (1900г. Макс Планк)**.

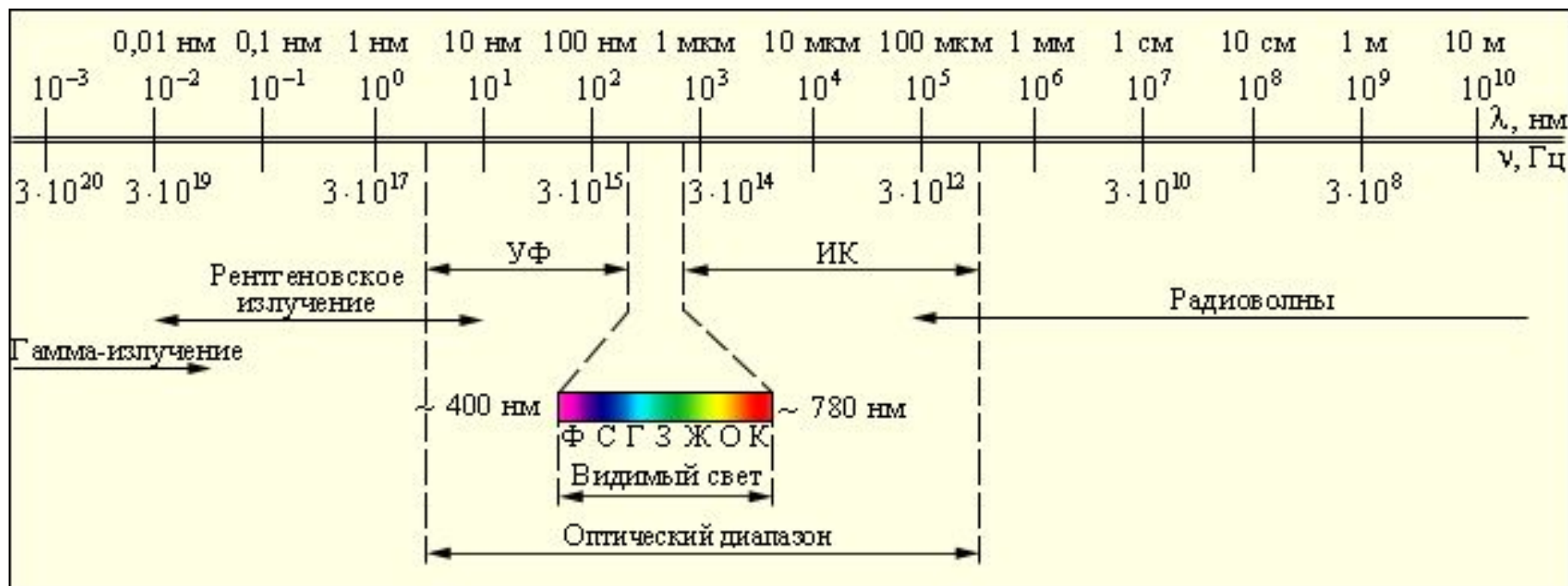
Волновые свойства света позволяют дать объяснение явлениям **дифракции, интерференции, поляризации**.

Процессы **фотоэлектронной эмиссии, теплового излучения** и т.п. можно объяснить, только привлекая представления о свете как о потоке частиц – **фотонов**.

Условно оптику (учение о свете) можно разделить на две части: **волновую** и **квантовую**.

Электромагнитные волны

Шкала электромагнитных волн



Светом называют часть электромагнитного излучения, воспринимаемую человеческим глазом (400 - 780 нм).

Т.к. E и H однозначно связаны, то можно рассматривать один из них

$$E = A \sin(\omega t - kx + \alpha)$$

A - модуль амплитуды

Интенсивностью называют **модуль среднего значения плотности потока энергии**

$$I = |\langle \mathbf{S} \rangle| = |\langle [\mathbf{E}\mathbf{H}] \rangle| \sim nA^2$$

Оптика

$$\frac{c}{V} = n \quad \text{- Показатель преломления}$$

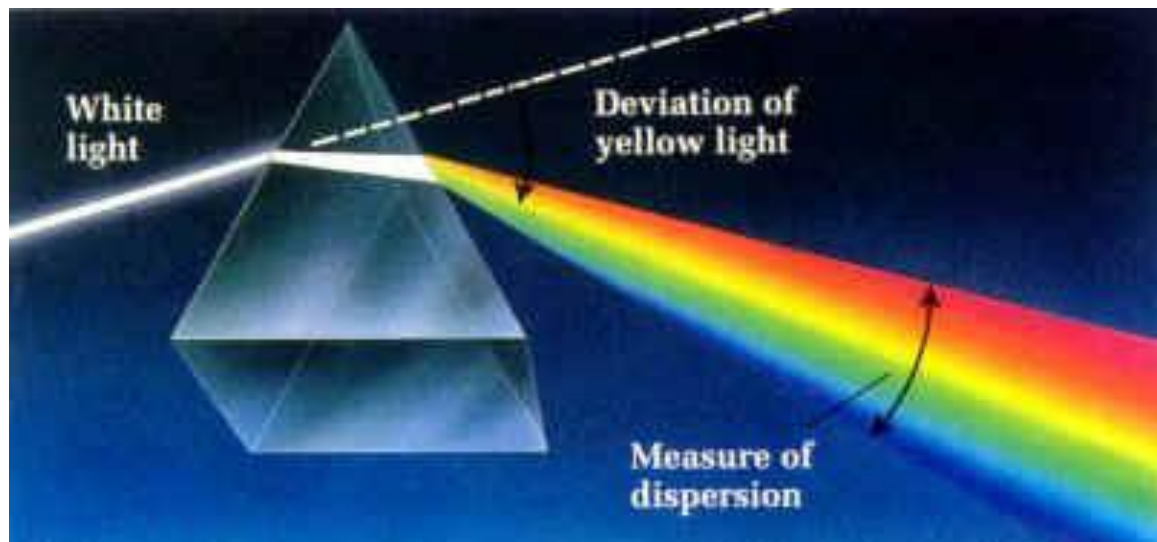
Учитывая $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu\epsilon_0\mu_0}}$ и $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$ получаем

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon}$$

Т.к. для веществ прозрачных в
оптическом диапазоне $\mu = 1$

Показатель преломления характеризует **оптическую плотность среды**

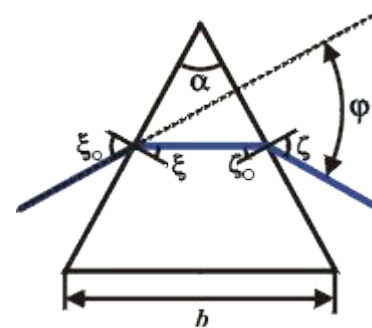
Совокупность явлений обусловленных зависимостью показателя преломления от длины волны (от частоты) называют **дисперсией**.



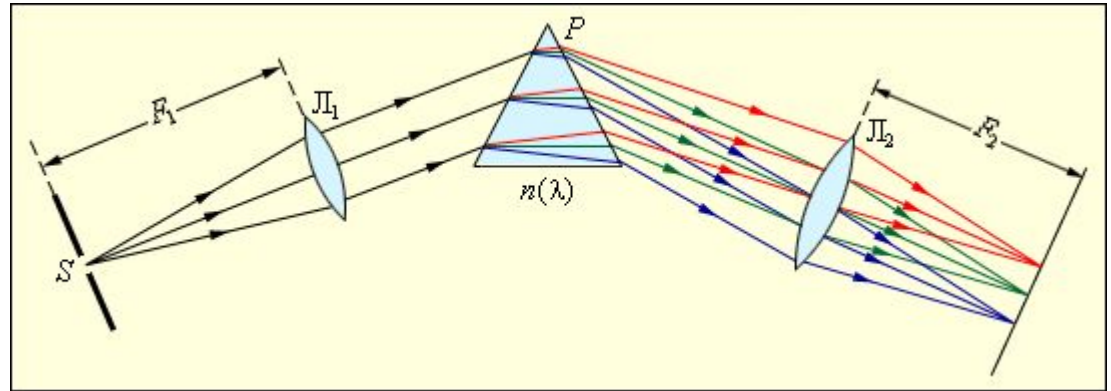
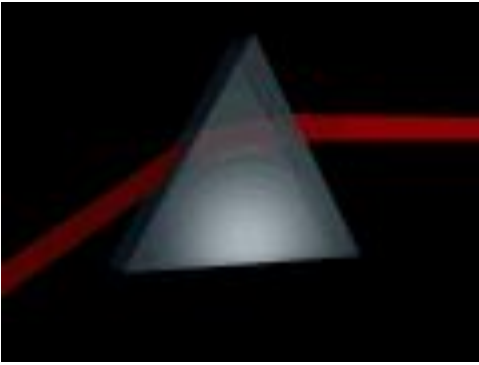
Дисперсия может быть использована для того, чтобы разложить свет на спектральные составляющие.

Одним из устройств, используемых для этих целей, является стеклянная призма.

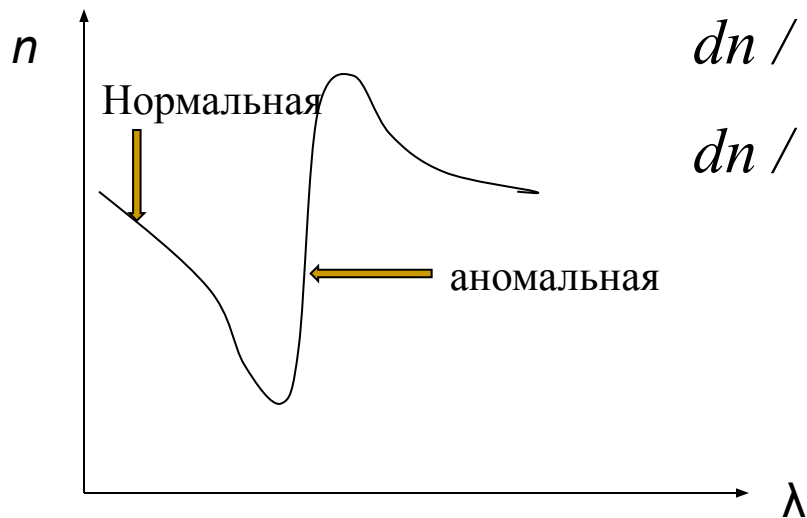
Коэффициент преломления любого материала в той или иной степени зависит от длины волны света. Это свойство, называется дисперсией.



Дисперсия света



$dn/d\lambda$ – численно характеризует зависимость и называется дисперсией

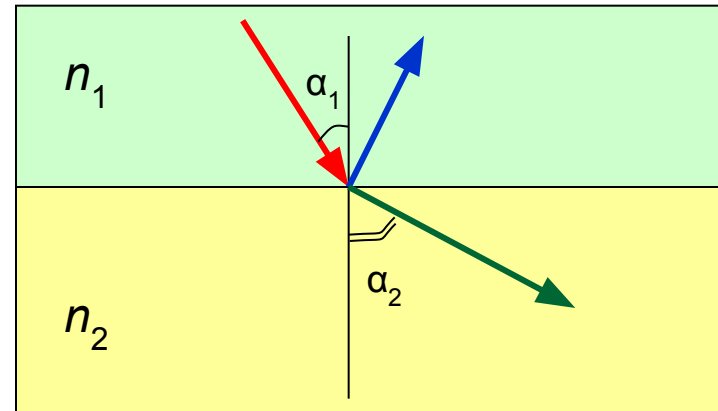
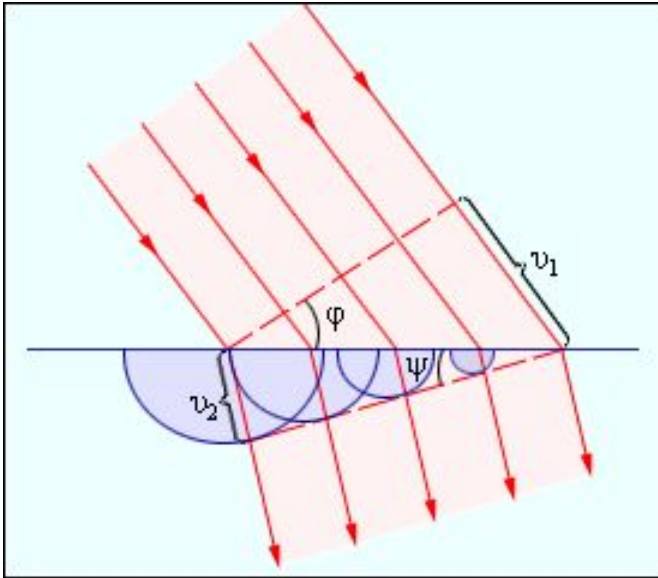


$dn/d\lambda < 0$ - нормальная дисперсия

$dn/d\lambda > 0$ – аномальная дисперсия

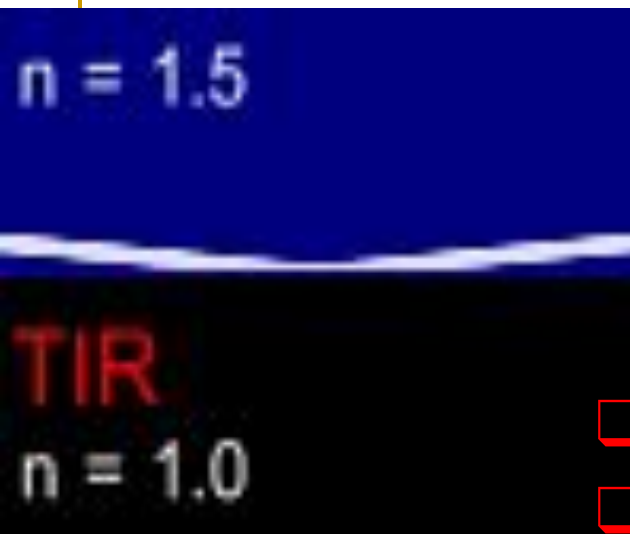
$$\varepsilon = 1 + \frac{4\pi N e^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

Преломление и отражение света



1. Угол падения = углу отражения
2. $\sin \alpha_1 / \sin \alpha_2 = n_2 / n_1 \equiv n$

Преломление и отражение света



Суммарная энергия отраженного и преломленного луча в точности равна энергии падающего луча,

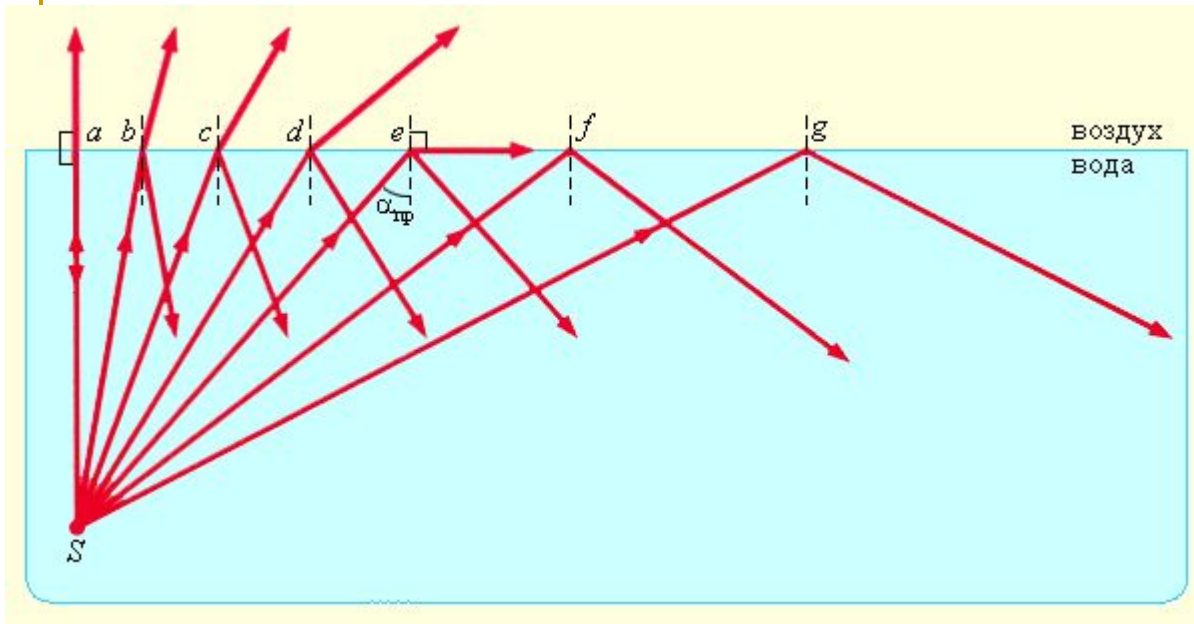
но соотношение интенсивностей этих лучей будет зависеть

- от разницы показателей преломления сред,
- от угла падения

При нормальном падении луча:

$$\frac{E^2_{отр}}{E^2_{пад}} = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

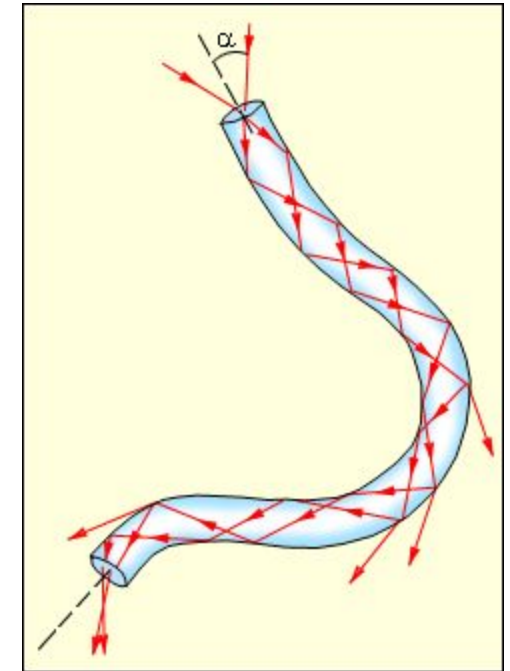
$$\frac{E^2_{прел}}{E^2_{пад}} = \frac{4n^2}{(n + 1)^2}$$



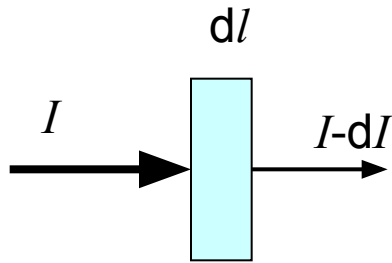
При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную $n_2 < n_1$ (например, из стекла в воздух) можно наблюдать явление **полного отражения**, то есть исчезновение преломленного луча. Это явление наблюдается при углах падения, превышающих некоторый критический угол $\alpha_{\text{пр}}$, который называется **предельным углом полного внутреннего отражения**

Для угла падения $\alpha = \alpha_{\text{пр}}$ $\sin \beta = 1$

$$\sin \alpha_{\text{пр}} = n_2 / n_1$$



Поглощение света



$$dI = -k I dl \quad \text{или} \quad \frac{dI}{I} = -k dl$$

k – коэффициент поглощения

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^l k dl \quad \longrightarrow \quad \ln I - \ln I_0 = -kl$$

$$I = I_0 e^{-kl}$$

Закон Бугера

$$I = I_0 e^{-\epsilon cl}$$

Закон Бугера- Ламберта-Бера,

ϵ – коэффициент экстинкции,

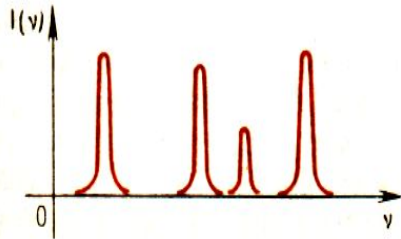
c – концентрация

Коэффициент поглощения – зависит от длины волны.

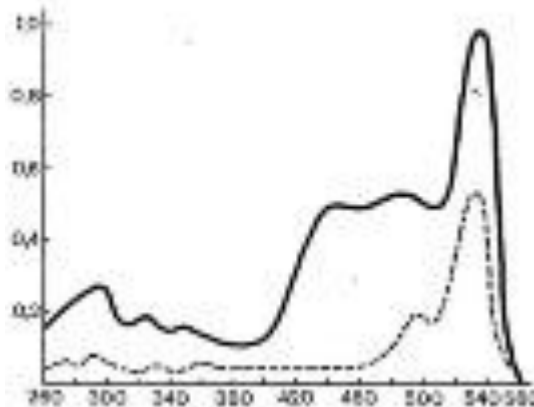
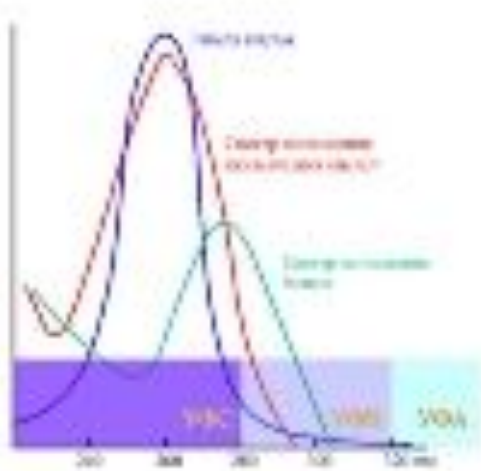
Поглощение света

Линейчатые спектры дают все вещества в газообразном атомарном (но не молекулярном) состоянии. В этом случае свет поглощают атомы, которые практически не взаимодействуют друг с другом.

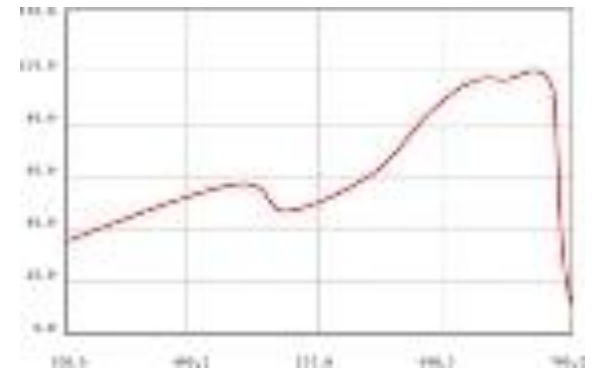
Изолированные атомы поглощают строго определенные длины волн.



Молекулярные спектры поглощения - сплошные

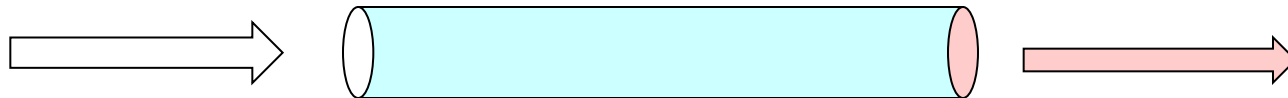


Витамин А

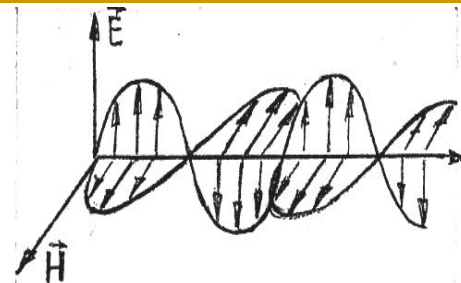


Хлорофил

Закон Релея - $I \sim \omega^4$ или $I \sim 1/\lambda^4$



Интерференция



Допустим, что в какой-либо точке пространства происходит сложение двух колебаний одинаковой частоты ω , вызванных прохождением двух волн :

$$\underline{E}_1 = \underline{E}_{01} \cos(\omega t + \alpha_1)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{E}_{02} \cos(\omega t + \alpha_2)$$

Согласно принципу суперпозиции напряженность результирующего поля равна :

$$\underline{E} = \underline{E}_1 + \underline{E}_2$$

В эксперименте, как правило, регистрируется интенсивность световой волны – I , которая для плоской или сферической волн пропорциональна E^2 . Можно показать, что

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cos \delta \sqrt{I_1 I_2}$$

$$\delta = \alpha_1 - \alpha_2$$

Интерференция

Если разность фаз δ взаимодействующих волн **со временем не изменяется**, то в тех точках, для которых

$$\cos\delta > 0,$$

$$\cos\delta < 0,$$

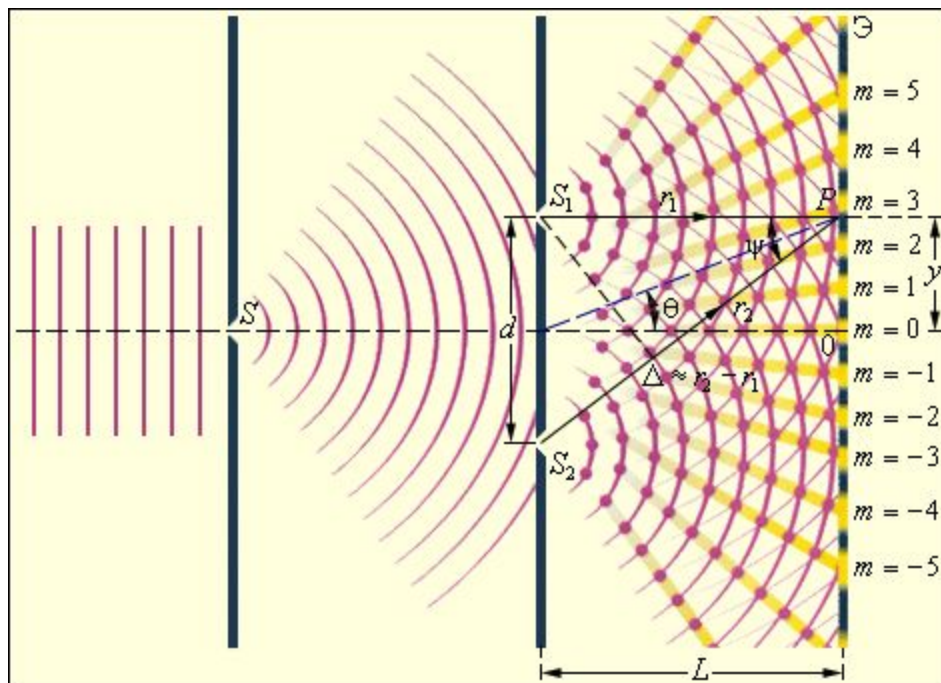
$$I > I_1 + I_2$$

$$I < I_1 + I_2$$

Произойдет перераспределение светового потока в пространстве, в результате чего в одних местах возникнут **максимумы** освещенности, в других - **минимумы**.



Интерференция



Интерференция

- Интерференция волн заключается в **пространственном перераспределении интенсивности** результирующей волны в зависимости от поведения во времени амплитуд, фаз, частот, направлений поляризации интерферирующих волн.
- Необходимым условием существования устойчивой во времени интерференционной картины является **согласованное протекание колебательных процессов** в накладываются волнах.
- Для этого необходимо, чтобы эти волны были **одинаковой частоты** ($\omega_1 = \omega_2$) и чтобы **разность фаз** для каждой точки была **постоянной** ($\delta = \text{const}$)..
 - Такие волны называют **когерентными**

Интерференция

В случае **некогерентных** волн, когда разность фаз $\delta = \alpha_1 - \alpha_2$, принимает с равной вероятностью любые значения, **среднее значение $\cos\delta$** будет равно нулю, интерференционный член будет отсутствовать а результирующая интенсивность равна обычной сумме $I = I_1 + I_2$,

Наиболее отчетливо интерференция проявляется, когда две волны имеют одинаковую поляризацию, а их интенсивности равны $I_1 = I_2$ тогда интенсивность света будет равна

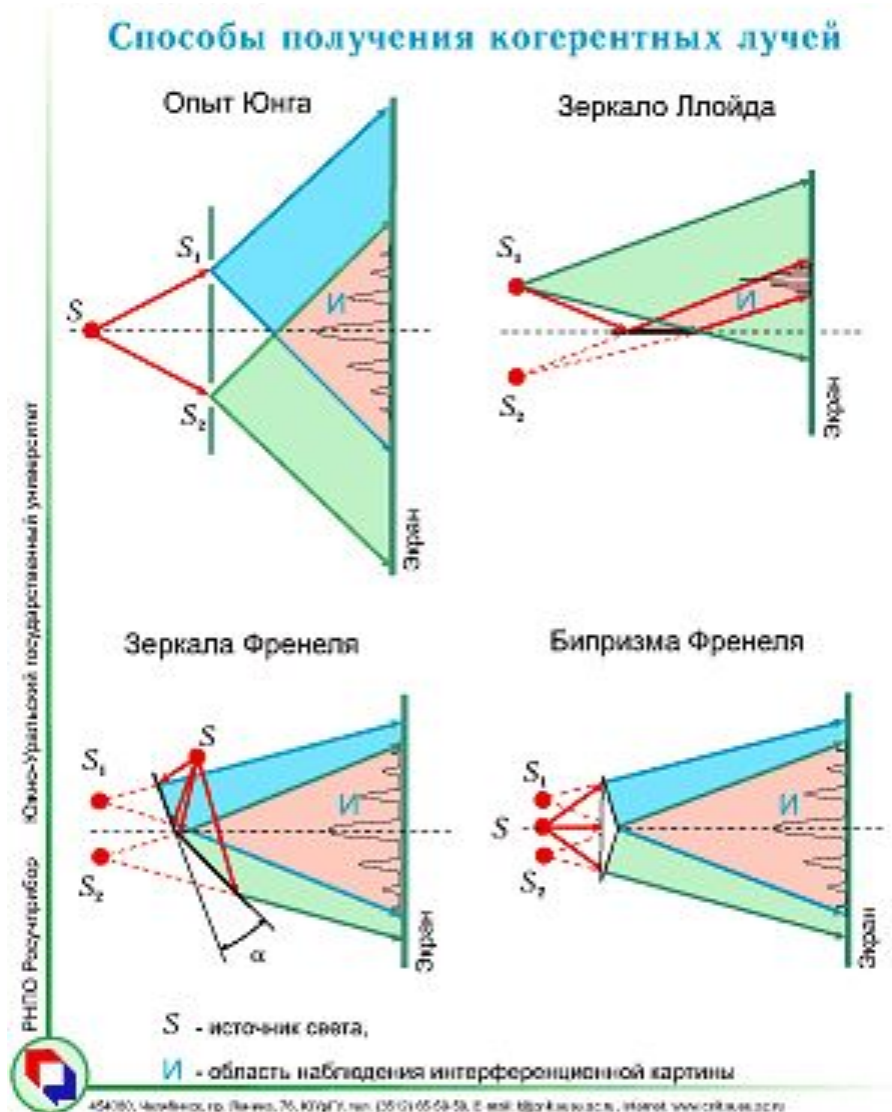
в **максимумах** учетверенной исходной $I = 4 \times I_1$,

а в **минимумах** $I = 0$

Интерференция

Когерентные волны можно получить, разделив (при помощи преломления или отражения) волну, излучаемую одним точечным источником.

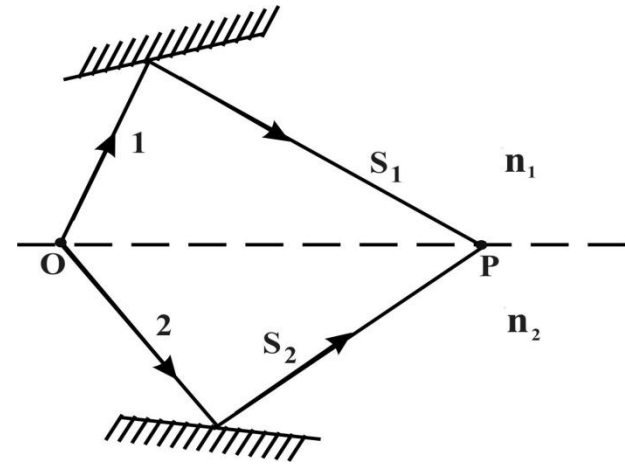
Если эти волны пройдут различные оптические пути, то при их последующем наложении будет наблюдаться интерференционная картина.



Интерференция

Пусть разделение волны происходит в точке **O**, а встречаются волны в точке **P**

Волна 1 проходит в среде с показателем преломления n_1 путь S_1 , а волна 2 – в среде с n_2 – путь S_2 , тогда разность фаз δ колебаний волн 1 и 2 в точке P будет равна



$$\delta = \omega \left(\frac{S_2}{V_2} - \frac{S_1}{V_1} \right) = (n_2 S_2 - n_1 S_1) \frac{\omega}{C}$$

Величина $\Delta = (n_2 S_2 - n_1 S_1)$ называется **оптической разностью хода**.

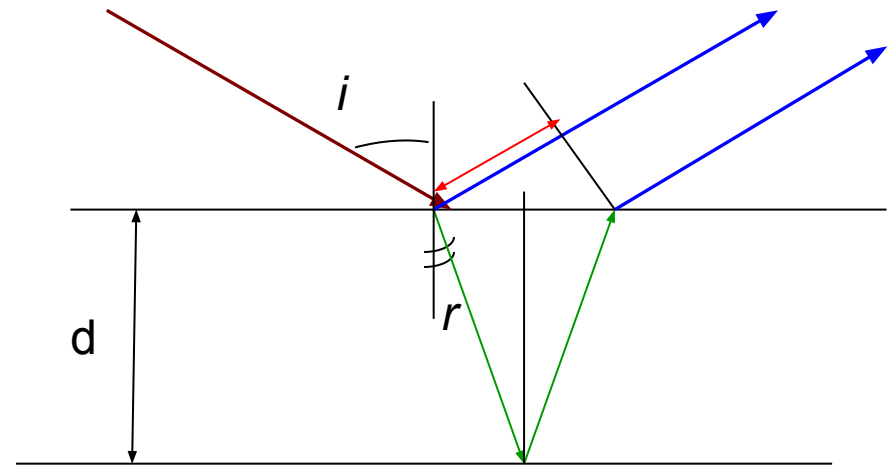
$$\delta = \frac{\omega \Delta}{C} = \frac{2\pi \nu \Delta}{C} = \frac{2\pi \Delta}{\lambda_0}$$

$$\Delta = \pm m \lambda, \quad (m = 0, 1, 2) \quad \text{максимум}$$

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

Интерференция

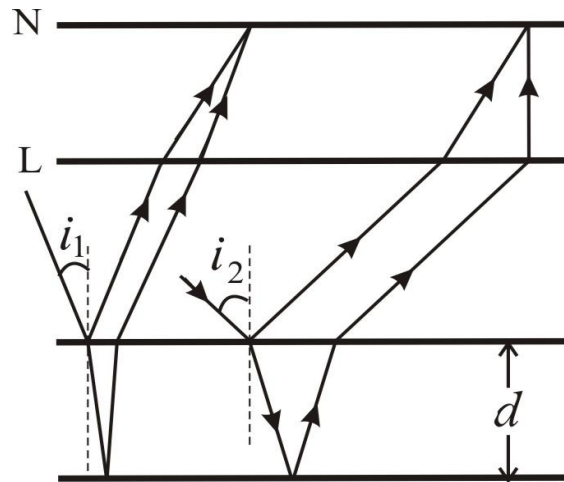
Явление интерференции можно наблюдать при освещении **тонких прозрачных пленок**, когда разделение световой волны на два когерентных пучка происходит вследствие отражения света от **двух поверхностей пленки**. В результате такого отражения возникают когерентные световые волны, которые при наложении дают локализованные интерференционные картины. Место локализации зависит от формы пленок, условий наблюдения и освещения.



$$\Delta = n_2 \frac{2d}{\cos r} - n_2 \frac{2d \tan r \sin r \sin i}{\sin i} = n_2 2d \frac{1 - \sin^2 r}{\cos r} = 2n_2 d \cos r.$$

$$\Delta = 2n_2 d \cos r \pm \lambda/2$$

Интерференция

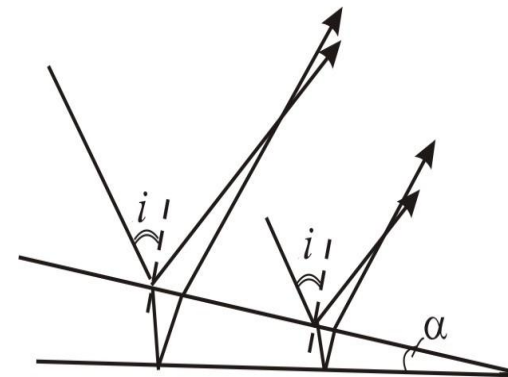


«полосы равного наклона».

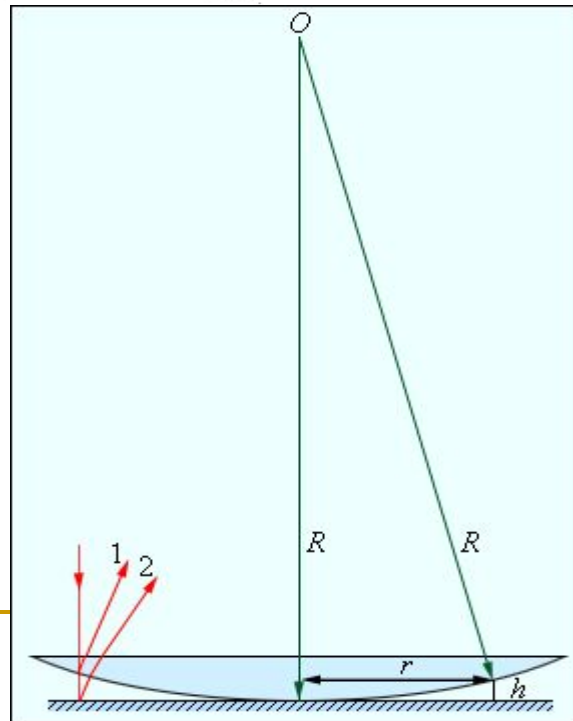
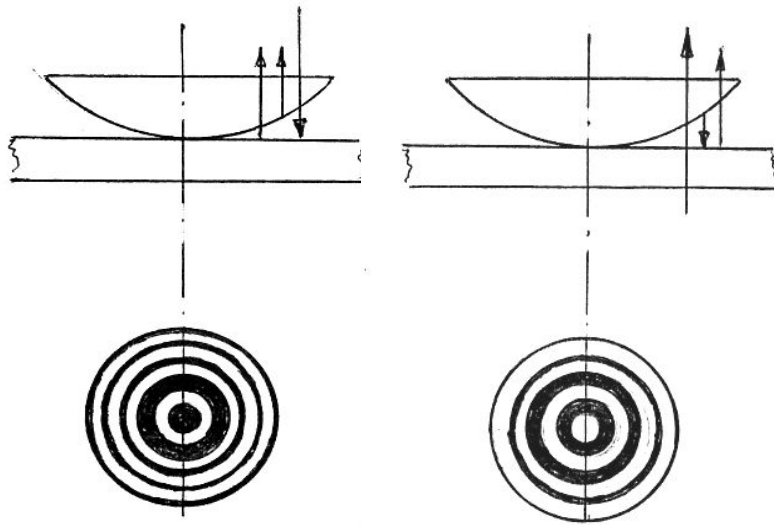
При $d = \text{const}$
(плоскопараллельная пластина)
разность хода определяется
только **углом падения**

«полосы равной толщины»

пластина имеет форму
тонкого клина ($d \neq \text{const}$) и
освещается параллельным
пучком света ($i = \text{const}$)
разность хода зависит от
толщины пластины в том или
ином ее месте



Интерференция

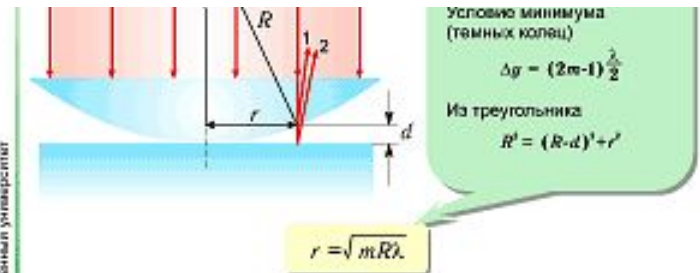


Кольца Ньютона

ОПТИКА

ФИЗИКА

188



Красный свет

$$\lambda_1 \approx 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

Зеленый свет

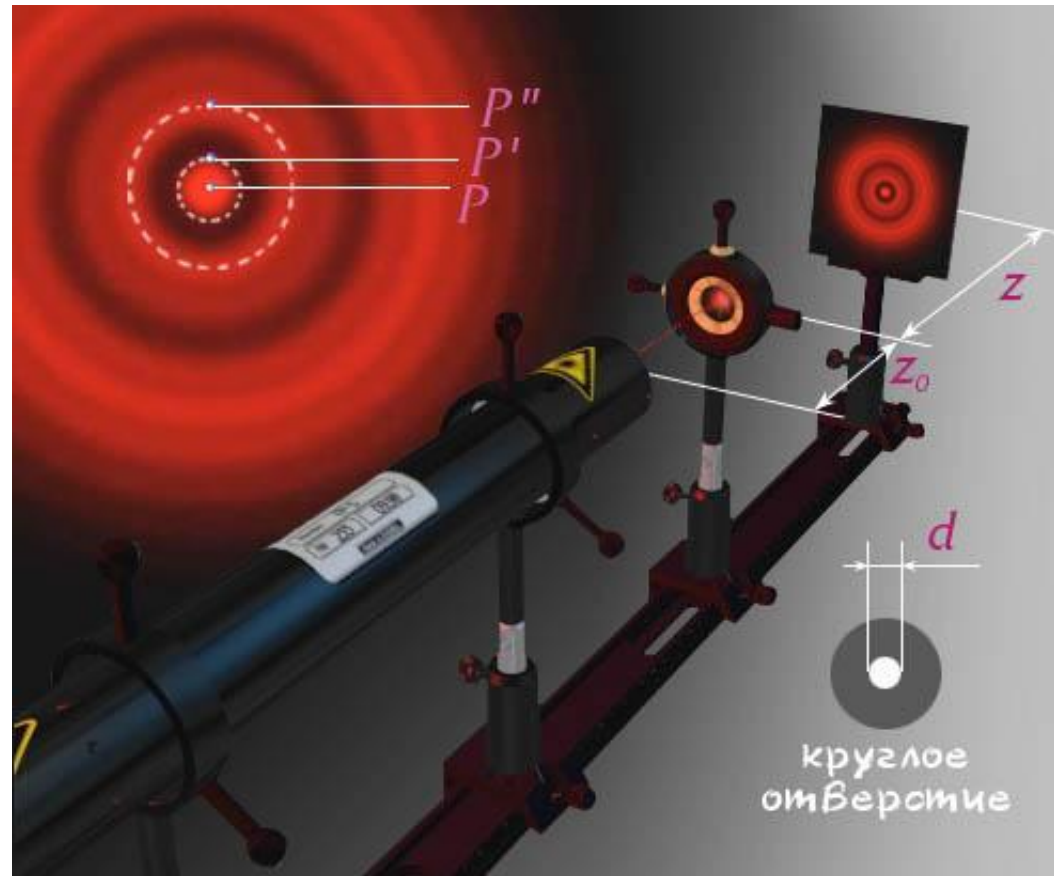
$$\lambda_2 \approx 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

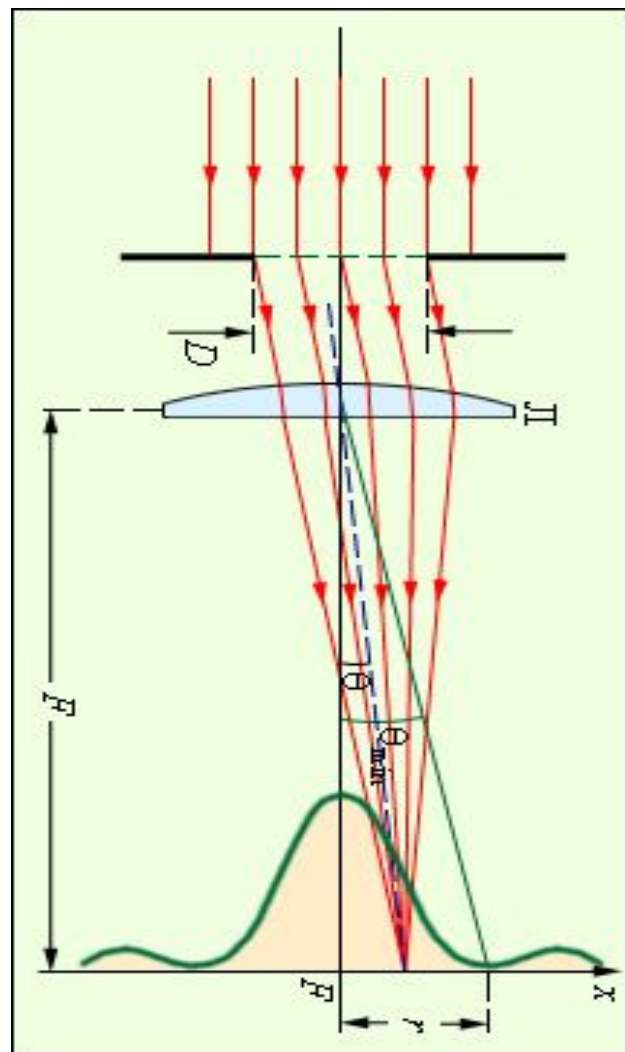
$$r_1 > r_2$$



Дифракция

Отклонение света от прямолинейного распространения в среде с резкими неоднородностями (например, у границ тел, у малых отверстий) называется **ДИФРАКЦИЕЙ**





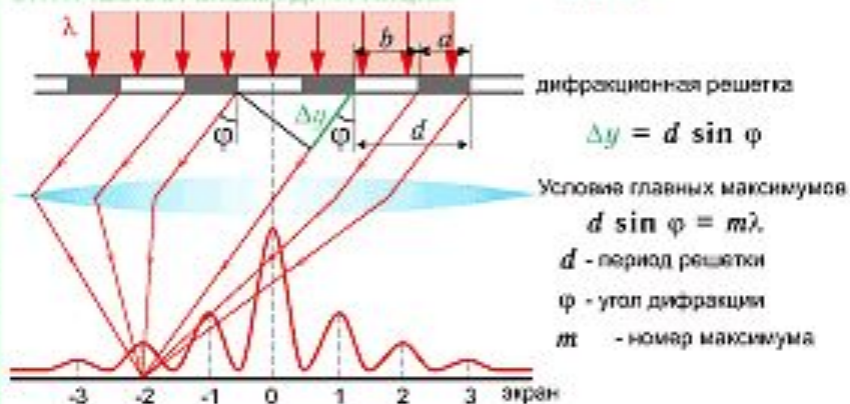
Дифракция света

ПРИНЦИП ГЮЙЕНСА

каждая точка волнового фронта является источником вторичных сферических волн



ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДИФРАКЦИИ



ДИФРАКЦИОННАЯ КАРТИНА

а) белый свет



б) красный свет $\lambda = 7,6 \cdot 10^{-7}$ м



в) фиолетовый свет $\lambda = 4,0 \cdot 10^{-7}$ м



Дифракция

Дифракция приводит к огибанию световыми волнами препятствий и частичному проникновению света в область геометрической тени.

Для объяснения явления дифракции пользуются принципом Гюйгенса,

В случае неограниченной волновой поверхности вторичные волны для любого направления (кроме прямолинейного) в результате интерференции гасят друг друга, так как для каждого элемента волновой поверхности всегда найдется такой же по площади элемент, вторичная волна от которого по данному направлению отстает на $\lambda/2$, то есть создает колебание, происходящее в противофазе по сравнению с первым колебанием. Если же волновая поверхность частично ограничена, то вторичные волны, излучаемые в определенных направлениях элементами открытого участка, не гасятся.

Природа явлений **интерференции** и **дифракции** одинакова.

Оба явления заключаются в

перераспределении светового потока в результате суперпозиции волн.

Дифракция

Дифракция на щели

b - ширина щели

Каждая элементарная зона создаст в точке Р элементарное колебание напряженности электрического поля dE . Амплитуда dA пропорциональна dx ($dA=c dx$). Сумма амплитуд колебаний, возбуждаемых всеми зонами в некоторой точке Р равна:

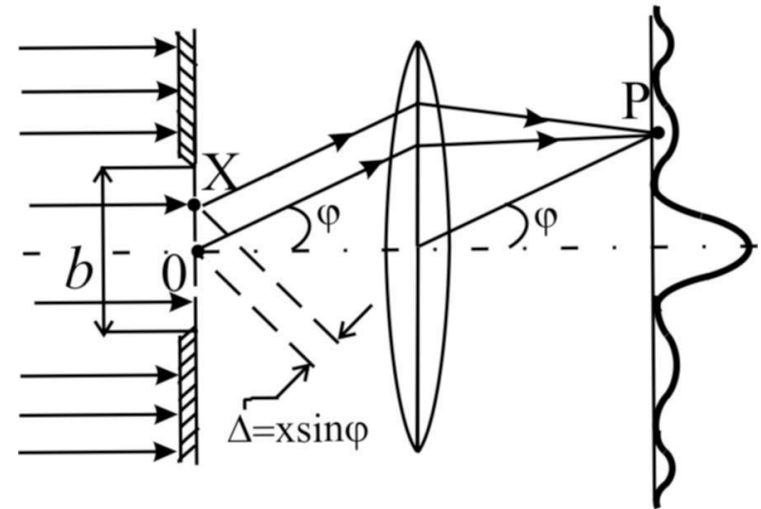
$$A = \int_{-b/2}^{b/2} dA = \int_{-b/2}^{b/2} c dx = bc$$

следовательно $c=A/b$, и $dA= A/b dx$.

Разность фаз между колебаниями, создаваемыми отдельными зонами образуется на пути $\Delta = x \sin\phi$

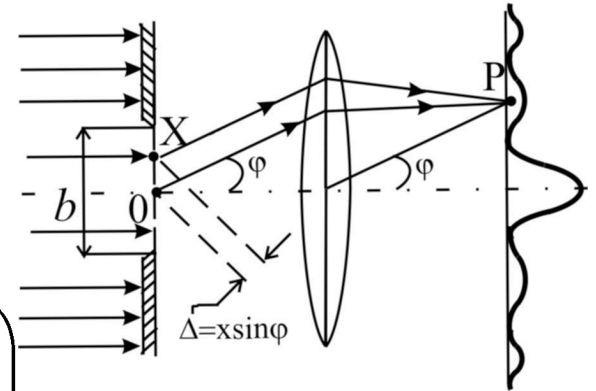
фаза колебания, создаваемого зоной с координатой x , равна: $\delta = 2\pi\Delta/\lambda = 2\pi x \sin\phi / \lambda$.

$$dE = \frac{A}{b} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi x \sin \phi}{\lambda}\right) dx$$



Дифракция

$$E(\varphi) = \left[A \frac{\sin\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\frac{\pi b}{\lambda} \sin \varphi} \right] \cos\left(\omega t + \frac{2\pi x \sin \varphi}{\lambda}\right)$$



Выражение в квадратных скобках – амплитуда. ($I \sim A^2$)

$I(\phi)$ обращается в НОЛЬ, когда

$$\sin\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right) = 0$$

$$\left(\frac{\pi b \sin \varphi}{\lambda}\right) = \pm k\pi$$

$$b \sin \phi = \pm k\lambda$$

Дифракция

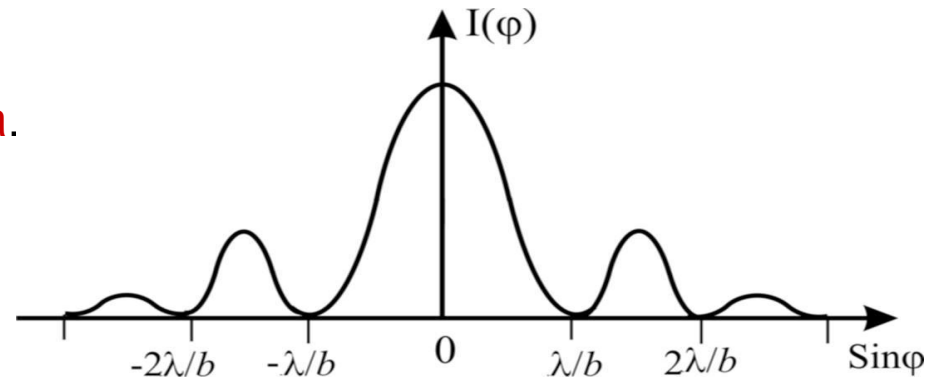
Исключением является случай $\phi = 0$ ($k=0$), для этого угла $A(\phi)=A_0$ и $I(\phi)=I_0$, так как $\lim(\sin\phi / \phi) = 1$.

Это значит, что в фокусе линзы наблюдается **главный или "нулевой" максимум интенсивности**.

Положение **МАКСИМУМОВ** определяется условием

$$b \sin\phi = \pm(2k+1) \lambda/2.$$

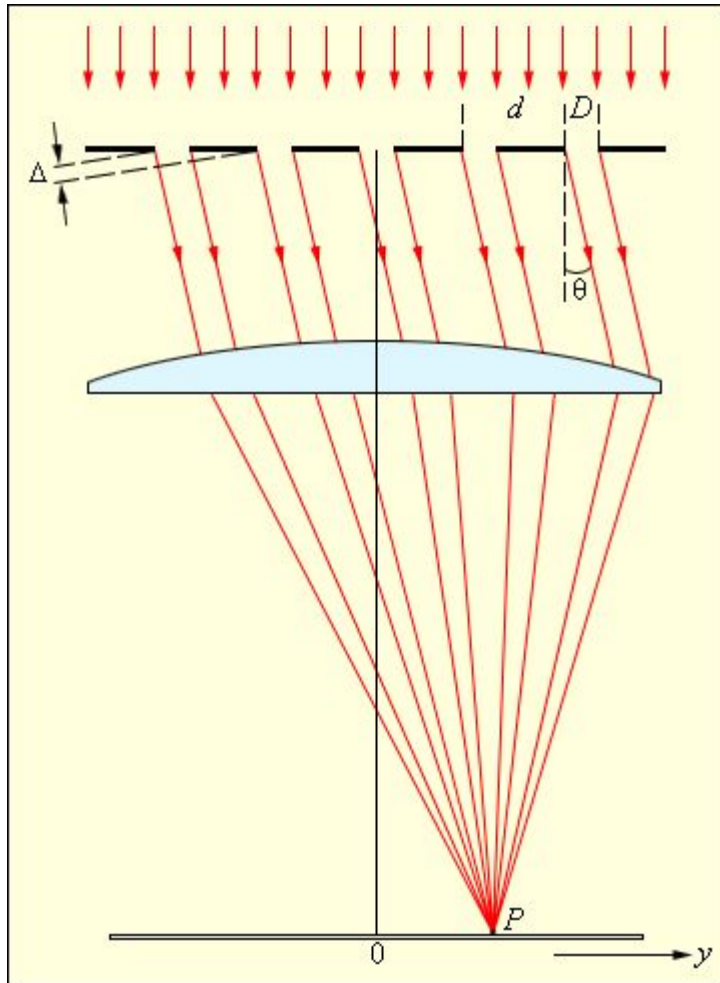
Число k называют **порядком максимума**.



$$I_1 : I_2 : I_3 = 1 : (2/3\pi)^2 : (2/5\pi)^2 = 1 : 0,045 : 0,016$$

Дифракция

Дифракция на дифракционной решетке



ДИФРАКЦИОННАЯ РЕШЕТКА - это оптическое устройство, представляющее собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов.

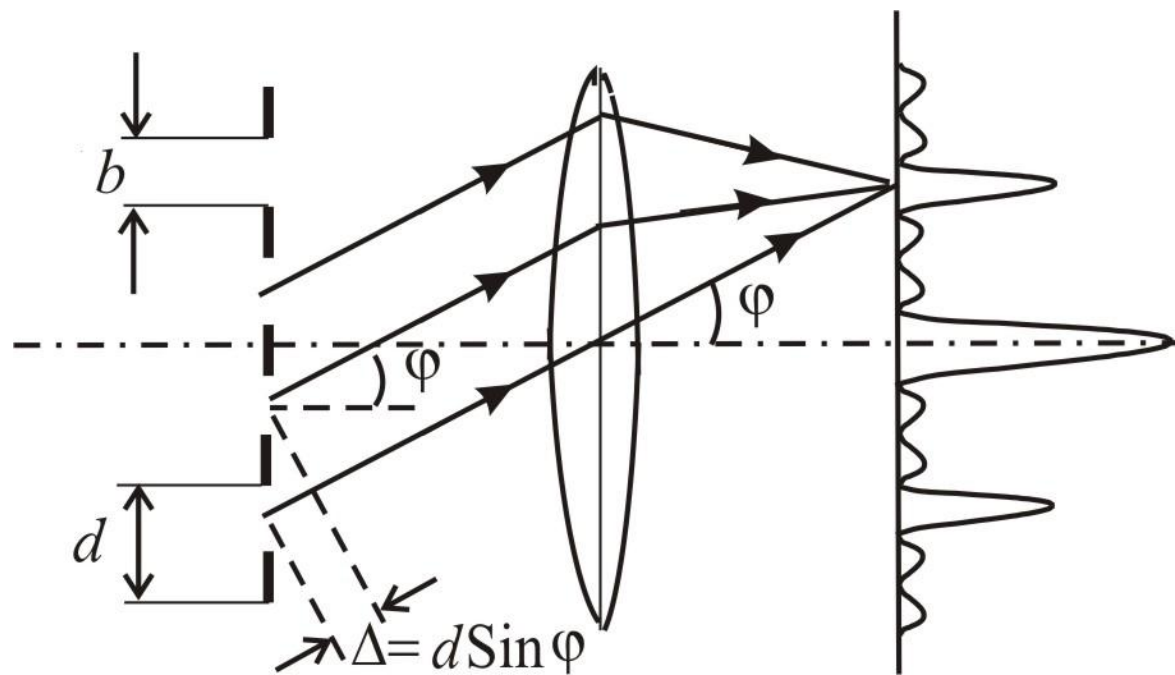
Расстояние между соответствующими точками соседних щелей называется **периодом решетки d** .

Угол, определяющий положение **главных максимумов** в фокальной плоскости линзы, определяется из условия **интерференционного усиления вторичных волн от соседних щелей**.

Разность хода должна быть равна **целому числу длин волн**

$$d \sin \phi = k\lambda, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Дифракция на дифракционной решетке



Чтобы определить амплитуду результирующего колебания, необходимо вычислить сумму N колебаний с одинаковой амплитудой A_ϕ и сдвинутых друг относительно друга по фазе на одну и ту же величину δ .

$$A_{рез} = A_\phi \frac{\sin\left(N \frac{\delta}{2}\right)}{\sin \frac{\delta}{2}} \qquad I_{рез} = I_\phi \frac{\sin^2\left(N \frac{\delta}{2}\right)}{\sin^2 \frac{\delta}{2}}$$

Разность хода Δ от эквивалентных точек соседних щелей $\Delta = d \sin\phi$, тогда разность фаз

$$\delta = 2\pi\Delta/\lambda = 2\pi d \sin\phi / \lambda$$

$$I_{рез} = I_\phi \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi d \sin\phi}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin\phi}{\lambda}\right)}$$

$$I_{рез} = I_{\varphi} \frac{\sin^2\left(\frac{N\pi d \sin \varphi}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin \varphi}{\lambda}\right)}$$

Если $d \sin \varphi = \pm k\lambda$, $k = 0, 1, 2, \dots$

. То отношение квадратов синусов принимает значение N^2

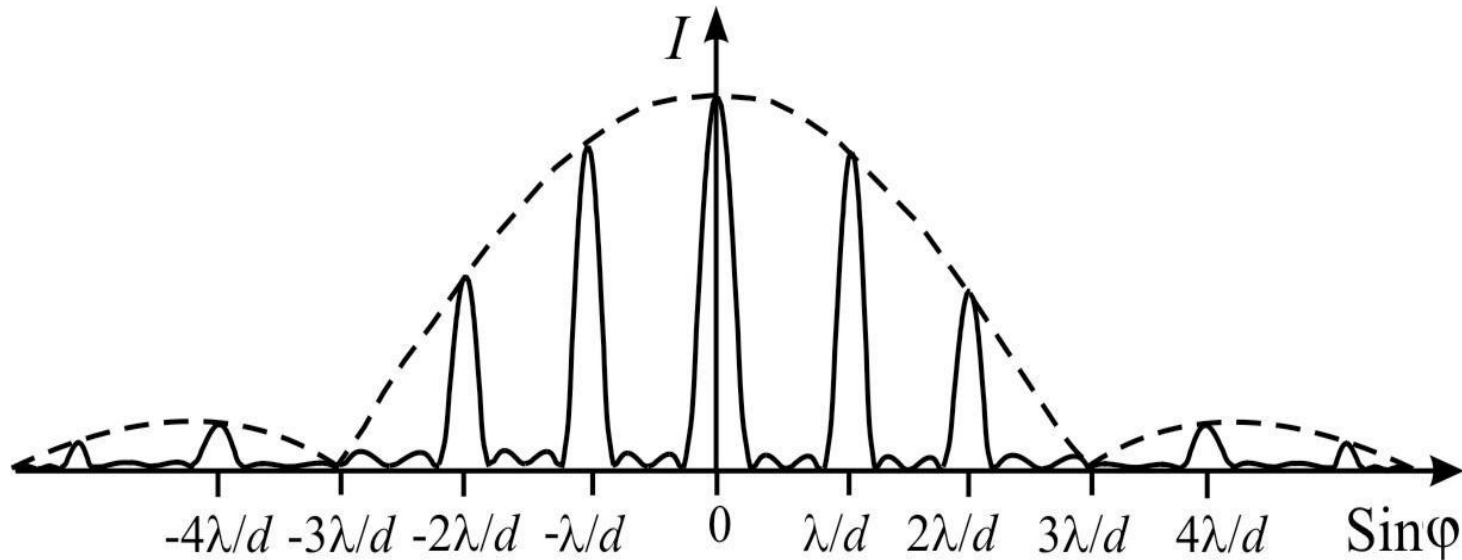
Число k называется **порядком** главных максимумов

Между каждой смежной парой главных максимумов образуется $(N - 1)$ вторичных минимумов, возникающих в тех направлениях, для которых колебания от отдельных щелей взаимно погашают друг друга.

Условие **минимума**

$$d \sin \varphi = \pm \frac{K'}{N} \lambda$$

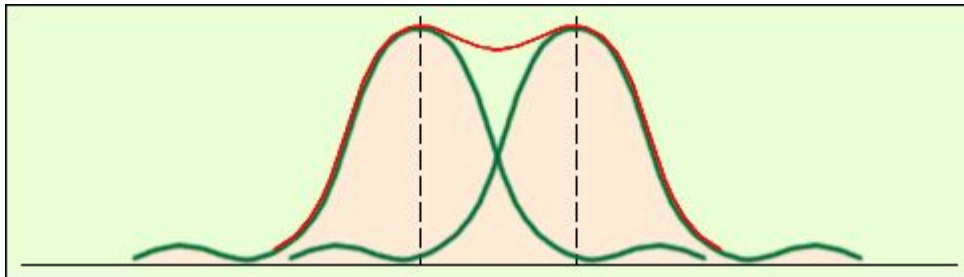
Между вторичными минимумами располагаются вторичные максимумы, число которых равно $N - 2$. Интенсивность вторичных максимумов не превышает $1/23$ (4%) от интенсивности ближайшего главного максимума



Распределение интенсивности от 4 щелей ($N = 4$), для которых отношение $d/b = 3$.

Положение главных максимумов определяется **постоянной решетки d** и **длиной волны λ** .

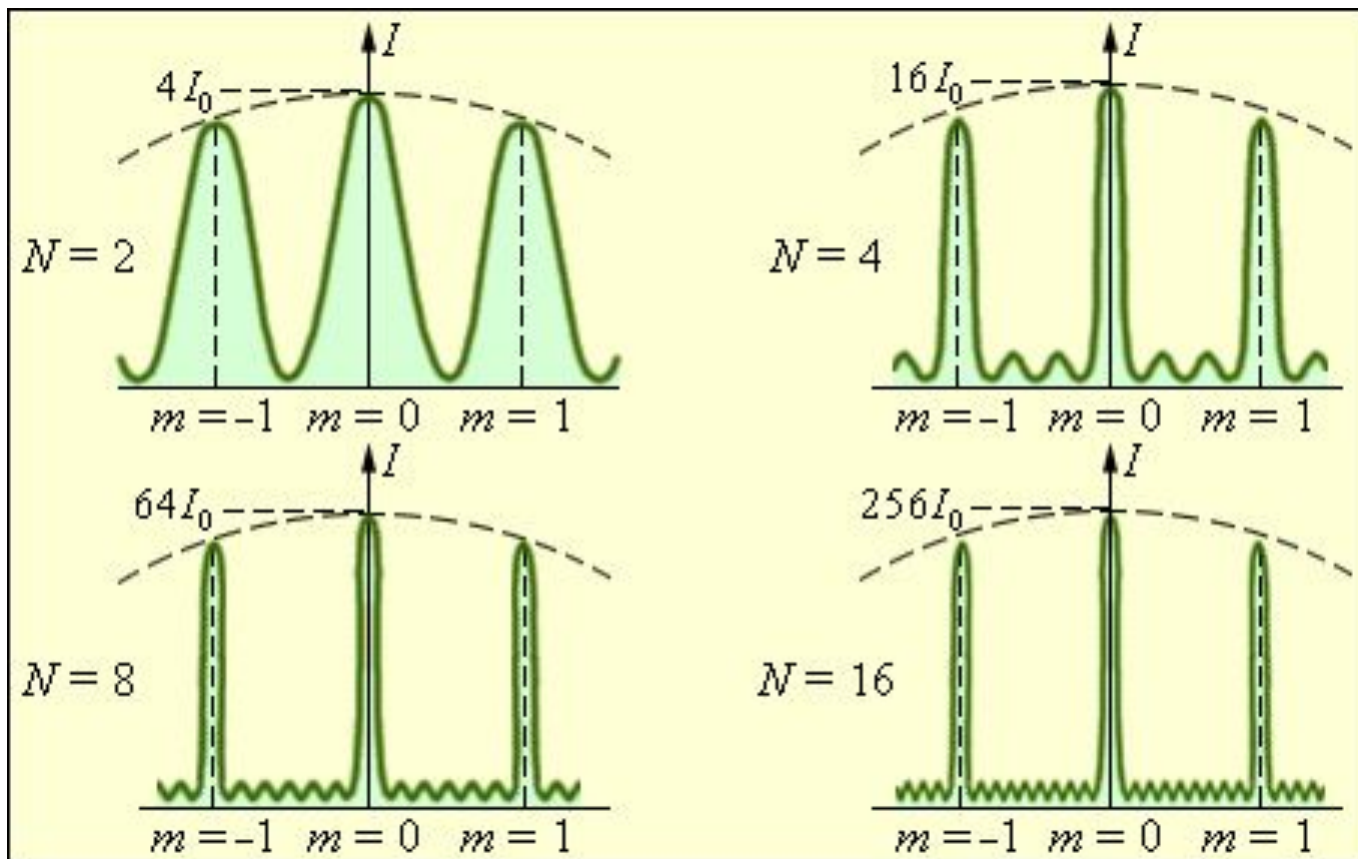
Разрешающая способность спектрального прибора характеризует его возможность разделить излучения с близкими длинами волн. Мерой разрешающей способности принято считать отношение длины волны λ , около которой выполняется измерение к интервалу $\Delta\lambda$ между двумя ближайшими в спектре разрешенными линиями.



$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} \quad \text{Разрешающая способность}$$

Критерий Рэлея – центральный максимум одной линии совпадает с первым минимумом второй

$$R = kN \text{ - то есть определяется } \underline{\text{числом штрихов}} \ N$$



Дифракция на дифракционной решетке

Дисперсия оптического прибора

Угловая – $D_\phi = \delta\phi / \delta\lambda \approx k / d$

Линейная – $D = \delta l / \delta\lambda = f D_\phi$

Дисперсия определяется периодом решетки d

Разрешающая способность - числом штрихов N

$$N_1 = N_2$$

$$d_1 = 2d_2$$

$$d_2 = d_3$$

$$N_2 = 2N_3$$

