

# 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)**.

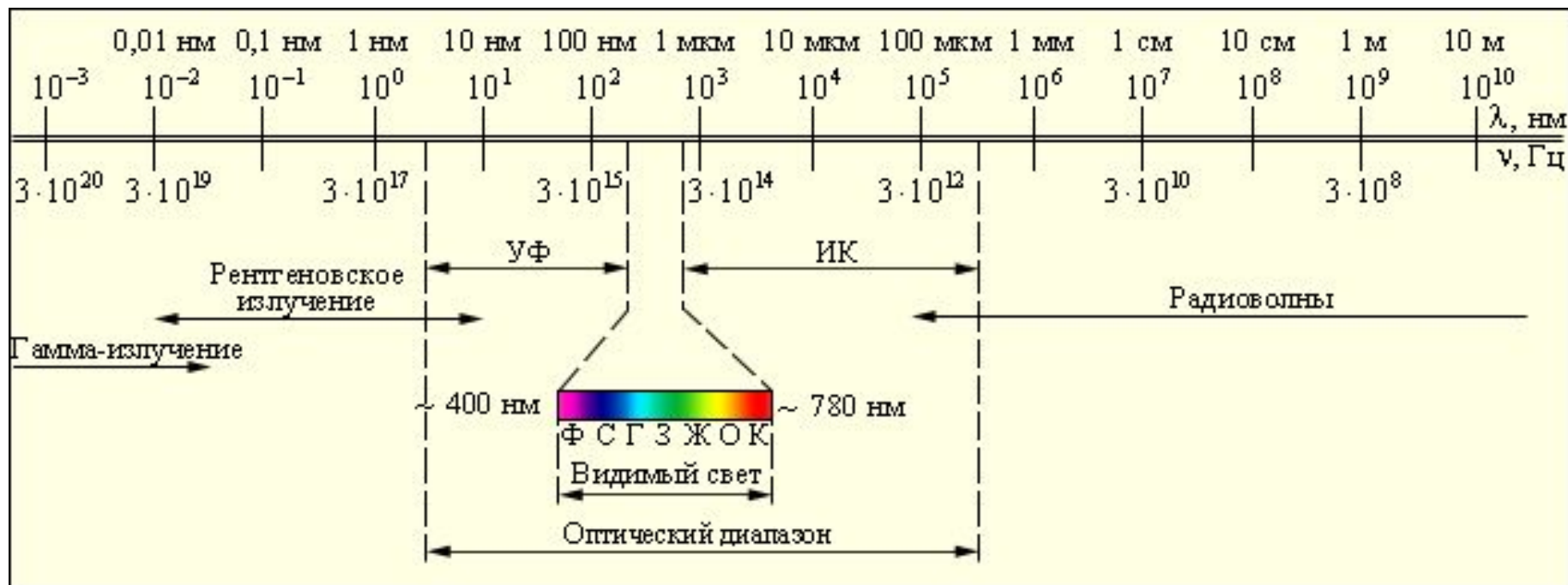
**Волновые** свойства света позволяют дать объяснение явлениям **дифракции, интерференции, поляризации**.

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

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

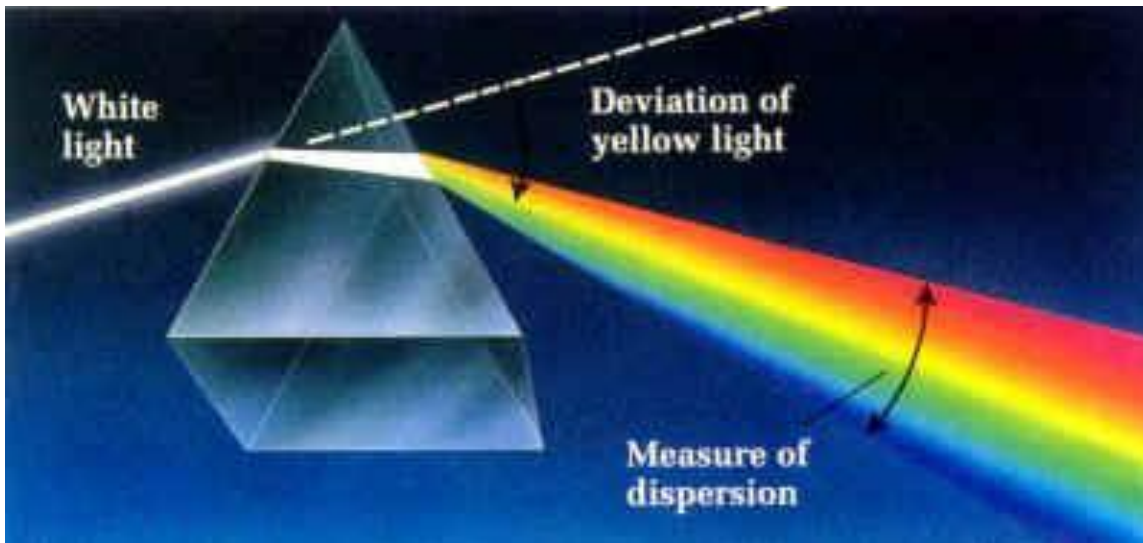
Учитывая  $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu\epsilon_0\mu_0}}$  и  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$  получаем

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

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

Показатель преломления характеризует **оптическую плотность среды**

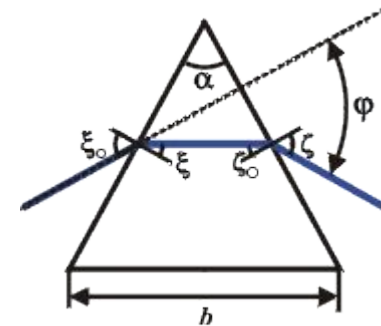
Совокупность явлений обусловленных зависимостью показателя преломления от длины волны (от частоты) называют **дисперсией**.



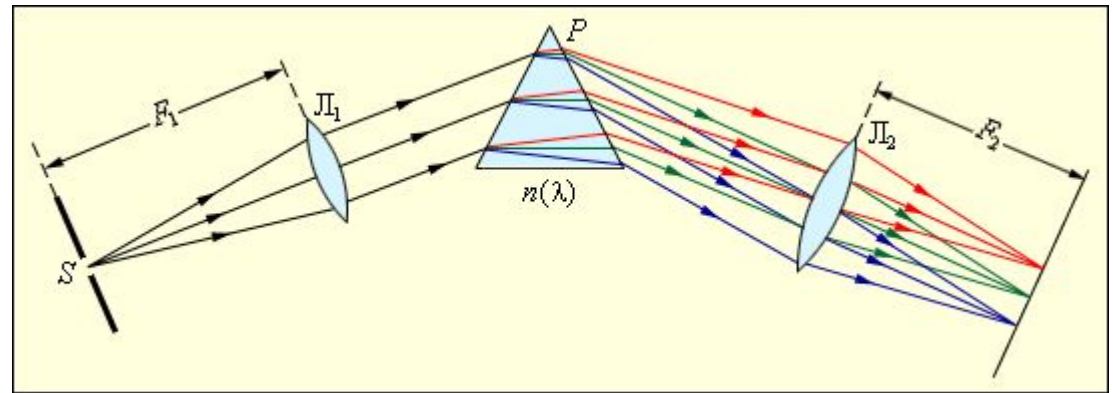
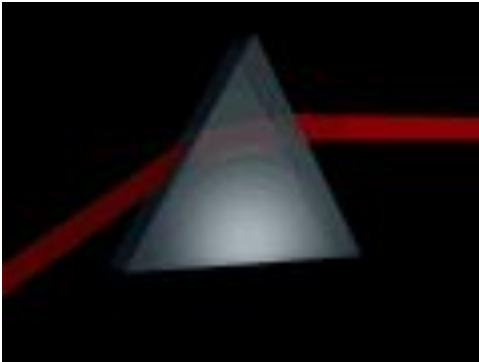
Дисперсия может быть использована для того, чтобы разложить свет на спектральные составляющие.

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

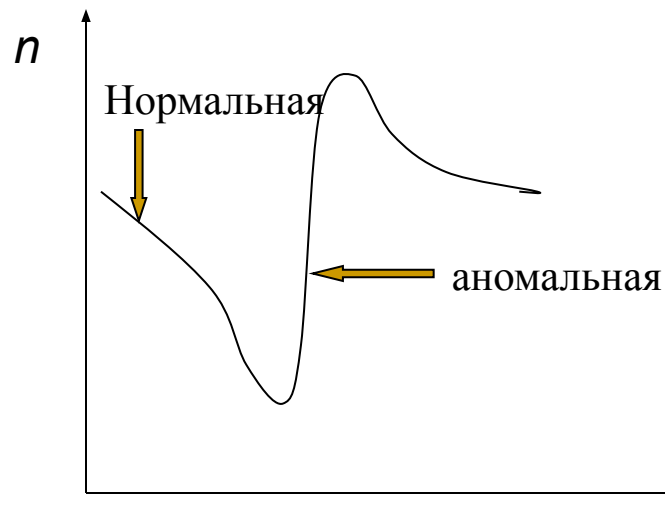
Коэффициент преломления любого материала в той или иной степени зависит от длины волны света. Это свойство, называется дисперсией.



# Дисперсия света



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

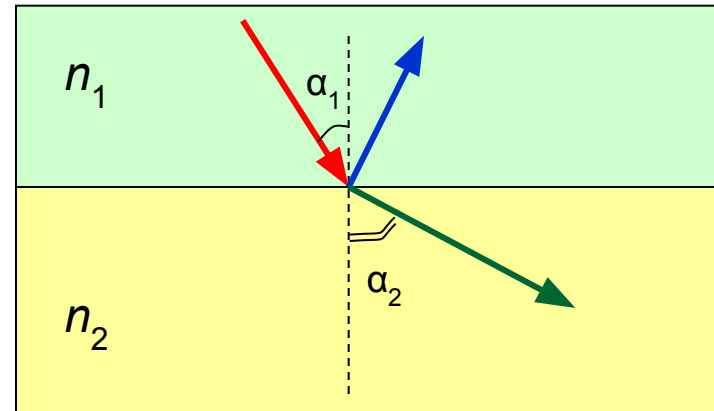
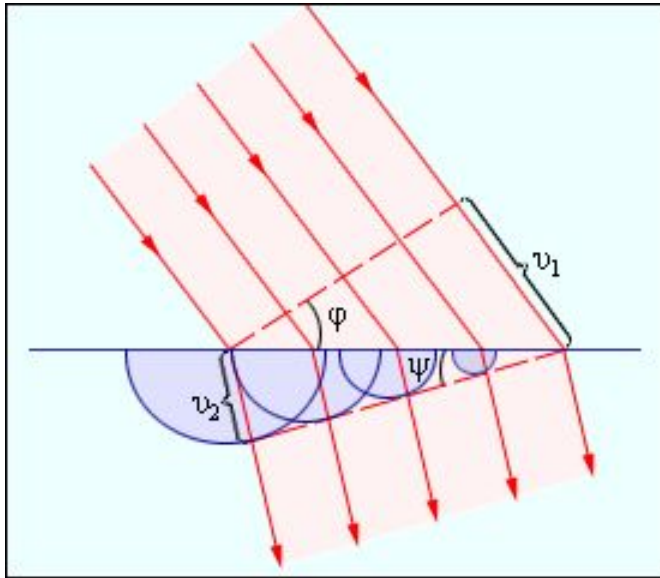


$dn/d\lambda < 0$  - нормальная дисперсия

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

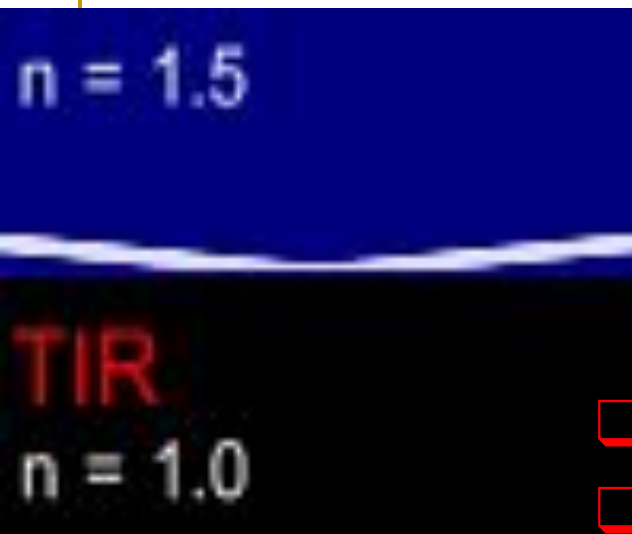
$$\varepsilon = 1 + \frac{4\pi N e^2}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

## 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

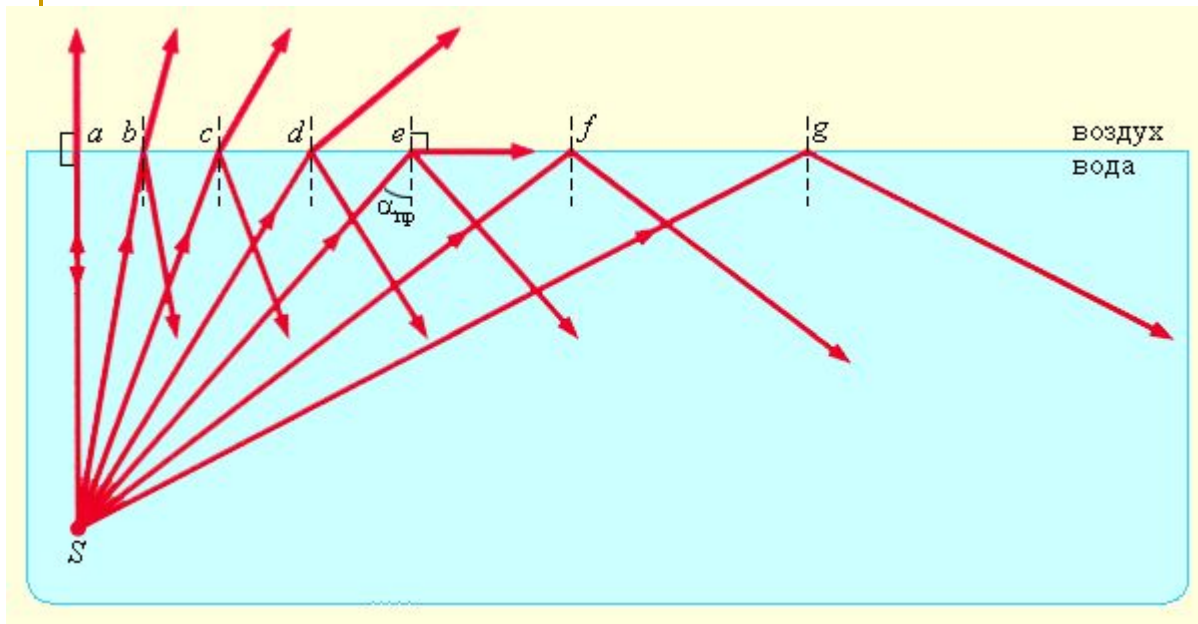
- от разницы показателей преломления сред,
- от угла падения

При нормальном падении луча:

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

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

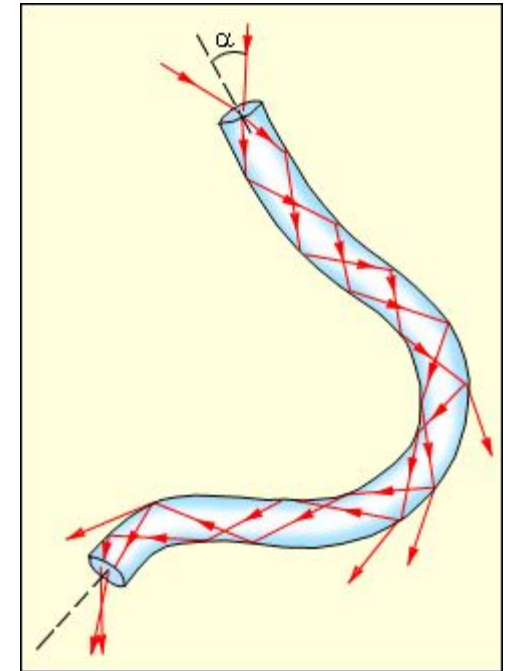




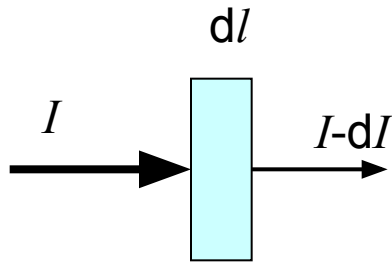
При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную  $n_2 < n_1$  (например, из стекла в воздух) можно наблюдать явление **полного отражения**, то есть исчезновение преломленного луча. Это явление наблюдается при углах падения, превышающих некоторый критический угол  $\alpha_{\text{кр}}$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

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

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



## Поглощение света

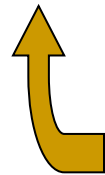


$$dI = -k I dl \quad \text{или} \quad \frac{dI}{I} = -k dl$$

$k$  – коэффициент поглощения

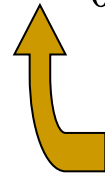
$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^l k dl \quad \longrightarrow \quad \ln I - \ln I_0 = -kl$$

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



Закон Бугера

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



Закон Бугера- Ламберта-Бера,

$\epsilon$  – коэффициент экстинкции,

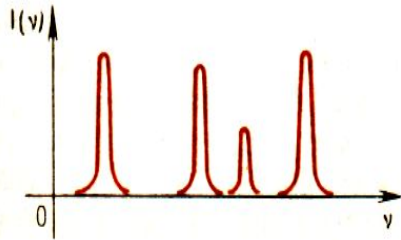
$c$  – концентрация

**Коэффициент поглощения – зависит от длины волны.**

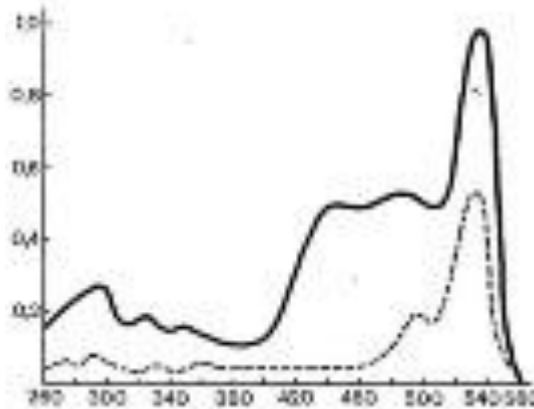
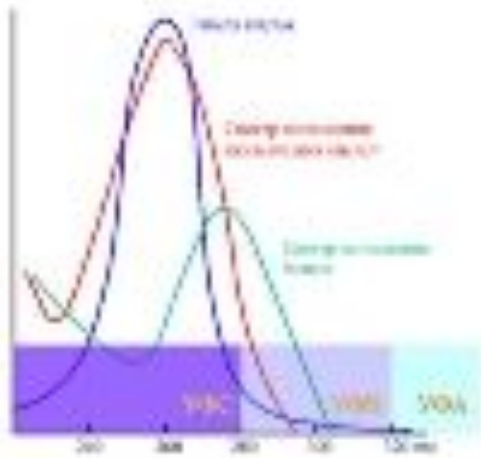
## Поглощение света

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.

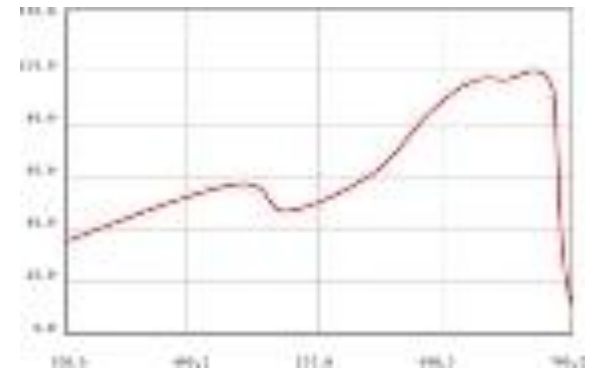
*Изолированные атомы поглощают строго определенные длины волн.*



Молекулярные спектры поглощения - сплошные

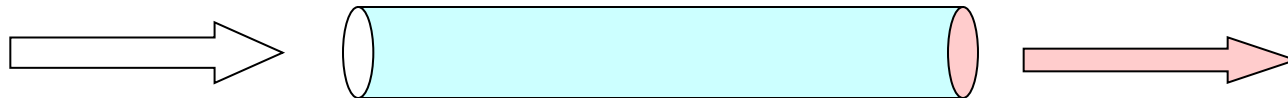


Витамин А

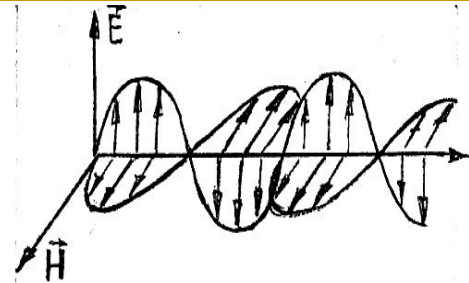


Хлорофил

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  $\omega$ , 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  $\delta$  взаимодействующих волн **со временем не изменяется**, то в тех точках, для которых

$$\cos\delta > 0,$$

$$\cos\delta < 0,$$

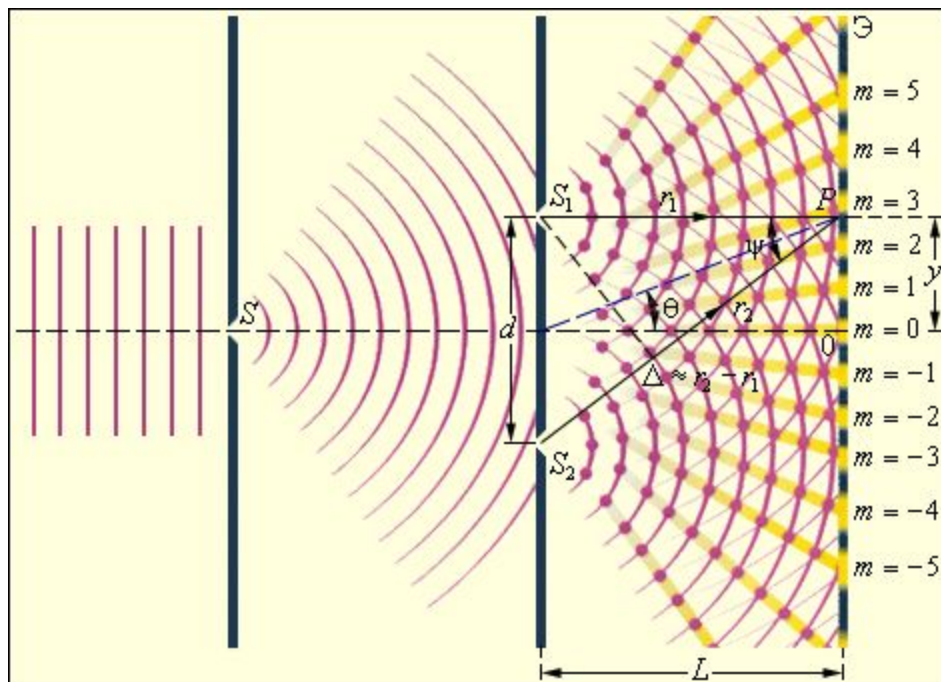
$$I > I_1 + I_2$$

$$I < I_1 + I_2$$

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

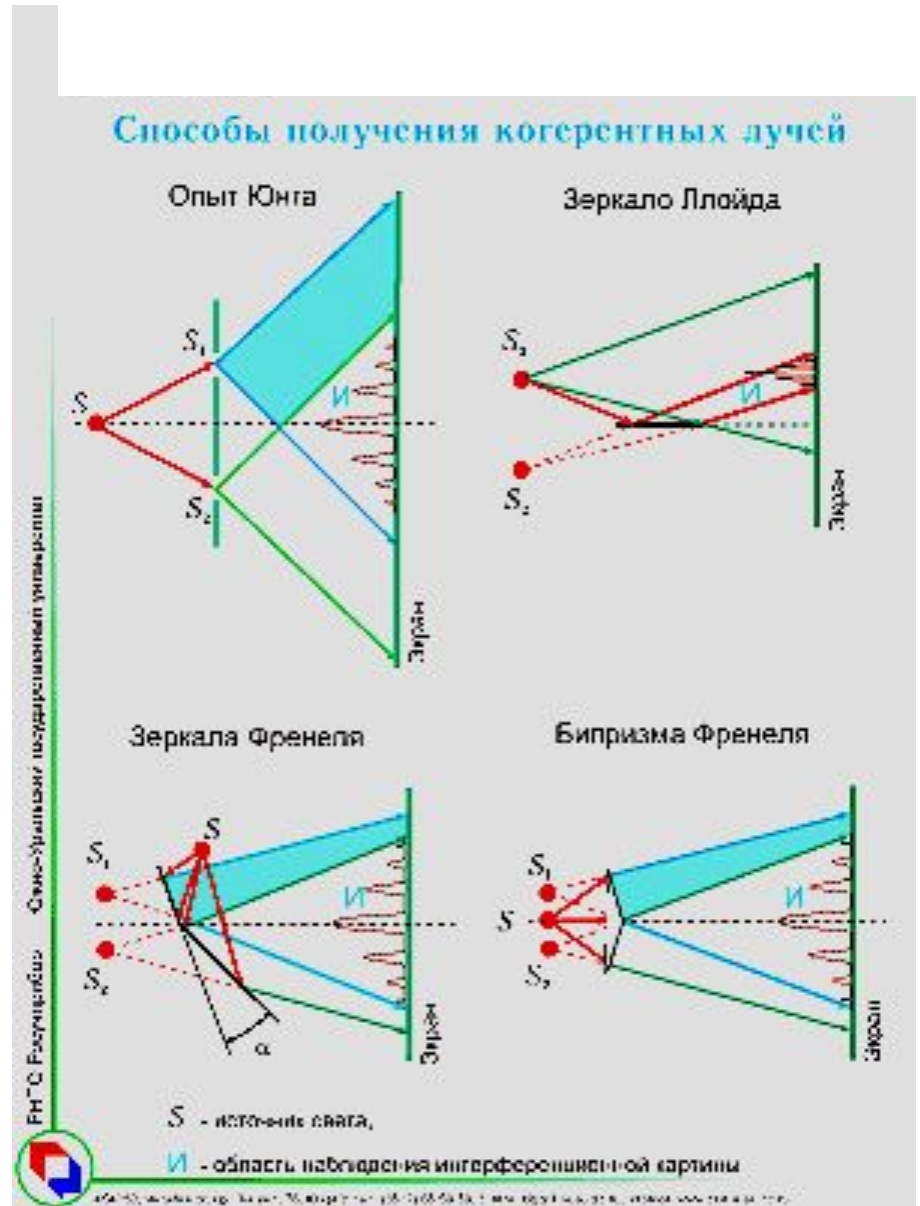
в **максимумах** учетверенной исходной  $I = 4 \times I_1$ ,

а в **минимумах**  $I = 0$

# Интерференция

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

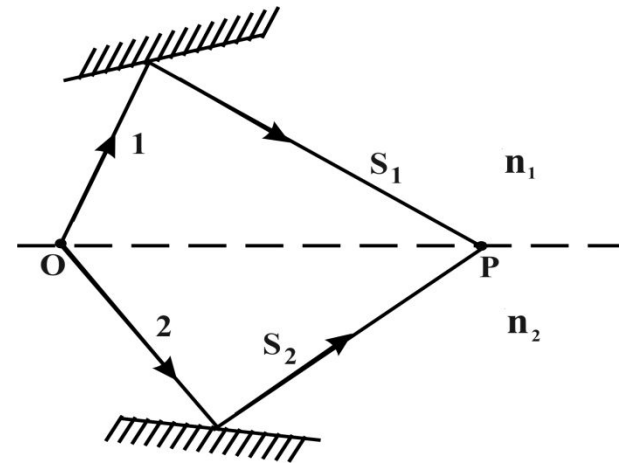
**Если эти волны пройдут различные оптические пути, то при их последующем наложении будет наблюдаться интерференционная картина.**



# 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  $\delta$  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**.

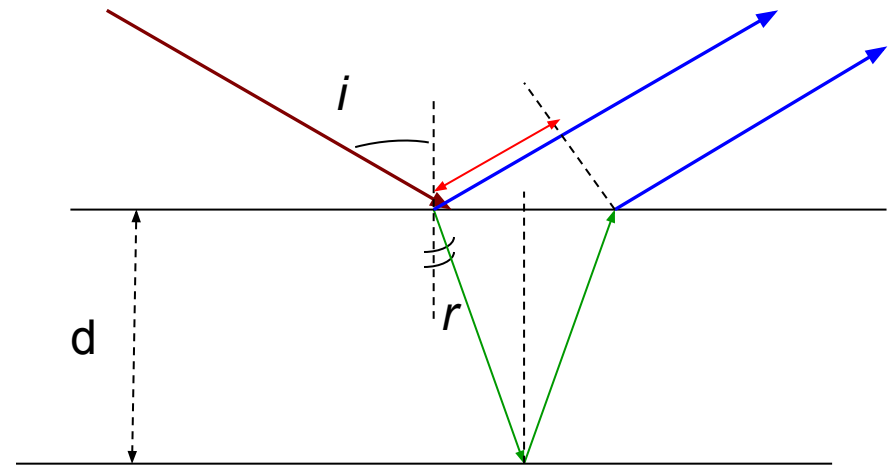
$$\delta = \frac{\omega \Delta}{C} = \frac{2\pi \nu \Delta}{C} = \frac{2\pi \Delta}{\lambda_0}$$

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

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

# Интерференция

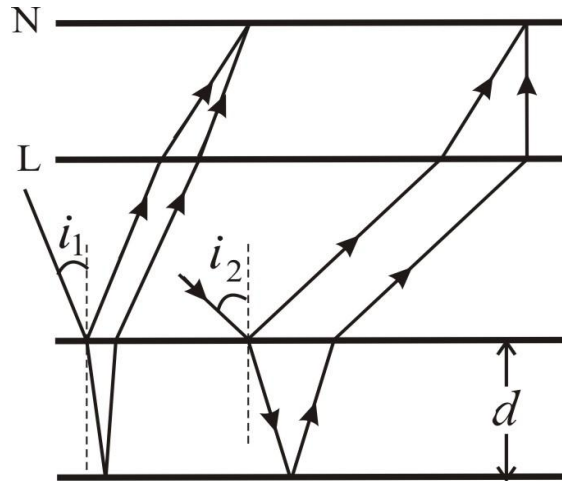
Явление интерференции можно наблюдать при освещении **тонких прозрачных пленок**, когда разделение световой волны на два когерентных пучка происходит вследствие отражения света от **двух поверхностей пленки**. В результате такого отражения возникают когерентные световые волны, которые при наложении дают 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

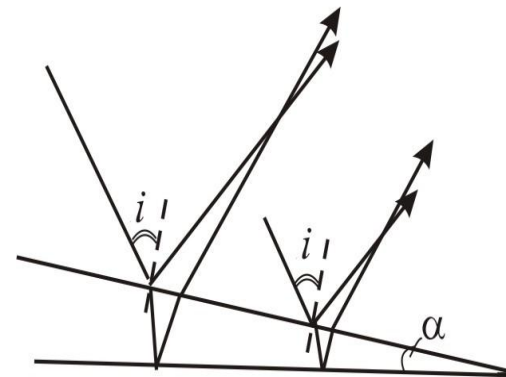


## «полосы равной толщины»

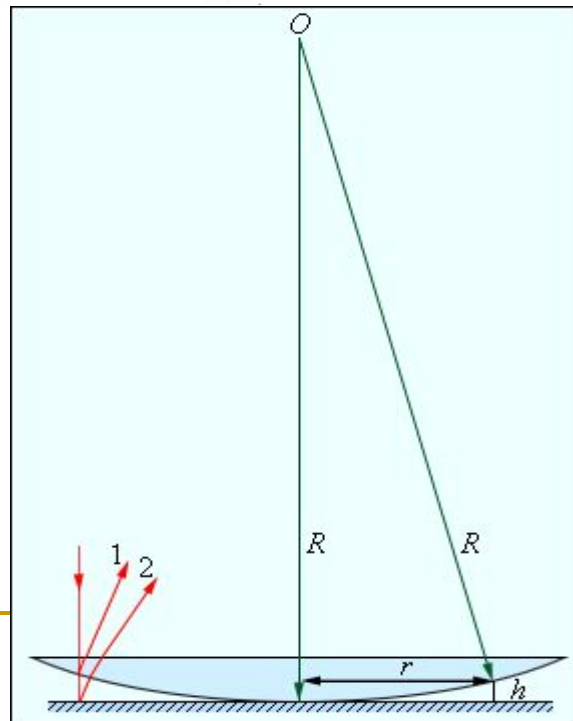
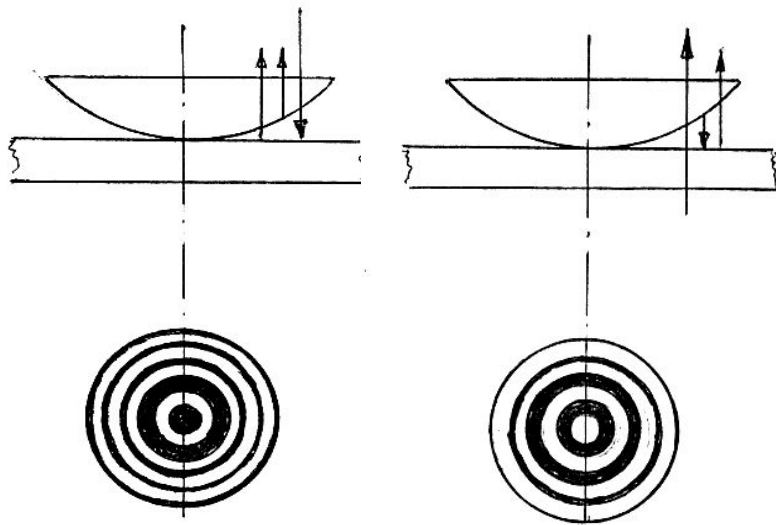
пластина имеет форму тонкого клина ( $d \neq \text{const}$ ) и освещается параллельным пучком света ( $i = \text{const}$ )  
разность хода зависит от **толщины пластины** в том или ином ее месте

## «полосы равного наклона».

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



# Интерференция

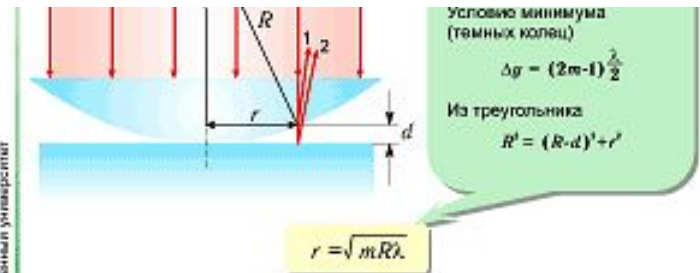


## Кольца Ньютона

ОПТИКА

ФИЗИКА

188



Красный свет

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

Зеленый свет

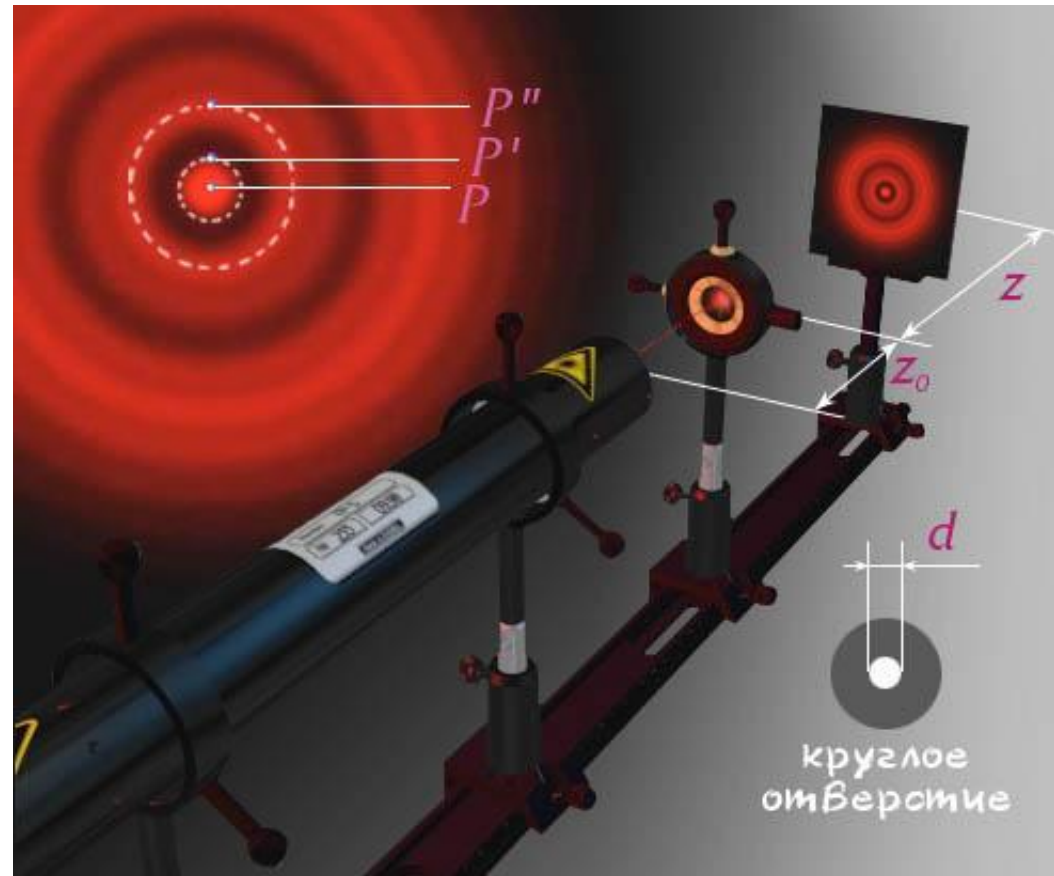
$$\lambda_2 \approx 5,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$r_1 > r_2$$



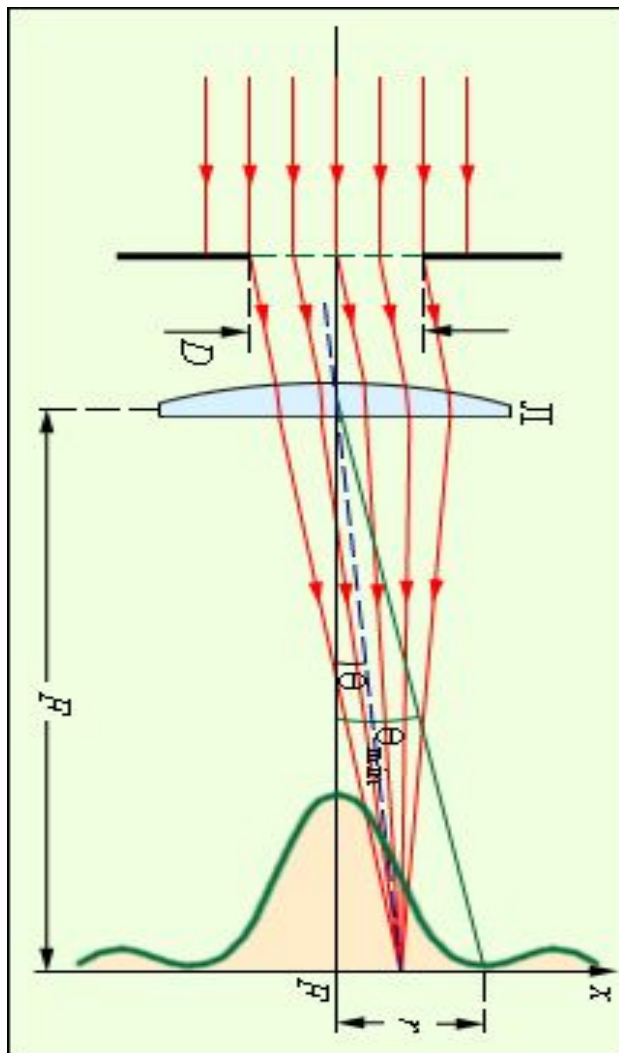
## Дифракция

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





# Дифракция



**ФИЗИКА** 191

## ОПТИКА

### Дифракция света

каждая точка волнового фронта является источником вторичных сферических волн

плоская волна

щель

дифракционная решетка

$$\Delta y = d \sin \varphi$$

Условия главных максимумов

$$d \sin \varphi = m \lambda$$

$d$  - период решетки  
 $\varphi$  - угол дифракции  
 $m$  - номер максимума

-3 -2 -1 0 1 2 3 экран

а) белый свет

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

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

ФНЦ Физика

Санкт-Петербургский государственный университет



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

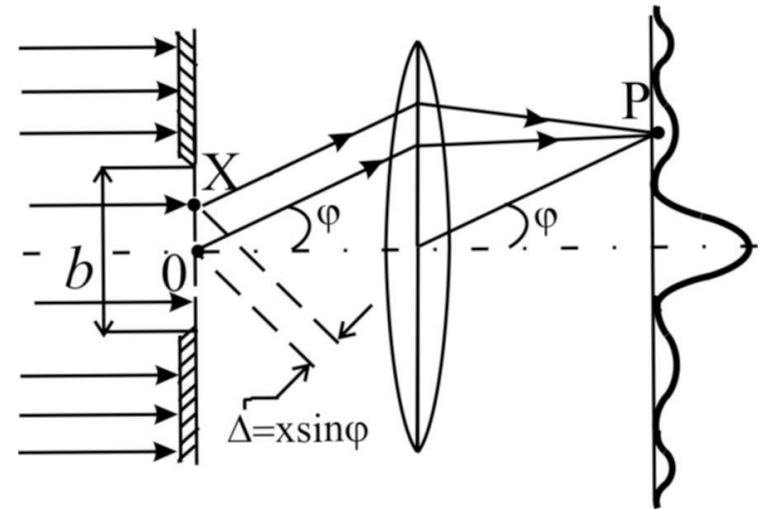
$$A = \int_{-b/2}^{b/2} dA = \int_{-b/2}^{b/2} c dx = bc$$

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

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

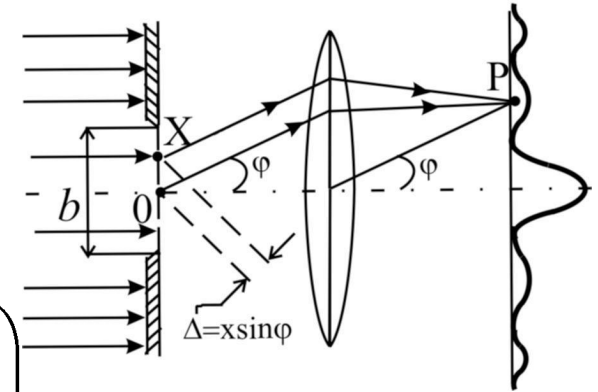
фаза колебания, создаваемого зоной с координатой  $x$ , равна:  $\delta = 2\pi\Delta/\lambda = 2\pi x \sin\phi / \lambda$ .

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



## 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

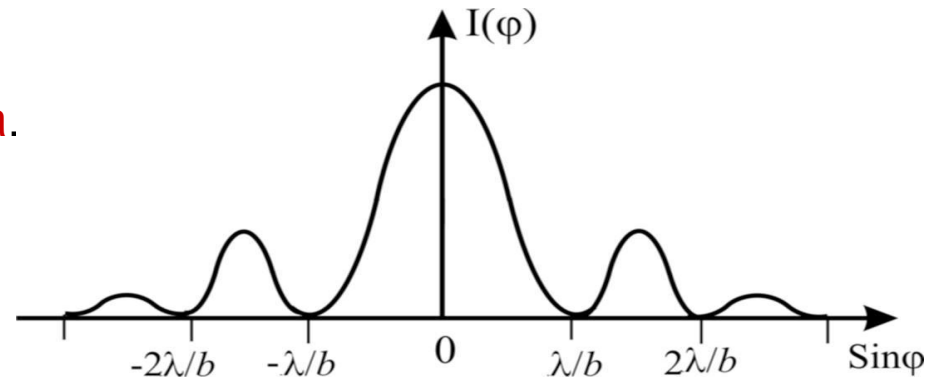
Исключением является случай  $\phi = 0$  ( $k=0$ ), для этого угла  $A(\phi)=A_0$  и  $I(\phi)=I_0$ , так как  $\lim(\sin\phi / \phi) = 1$ .

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

Положение **МАКСИМУМОВ** определяется условием

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

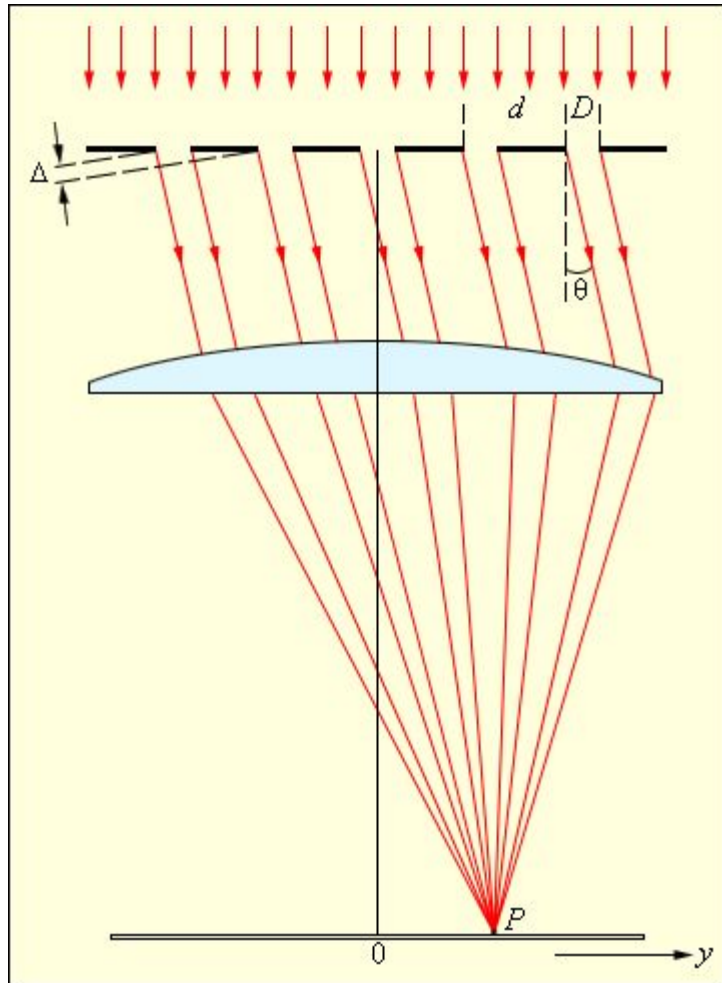
Число  $k$  называют порядком максимума.



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

# Дифракция

## Дифракция на дифракционной решетке



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

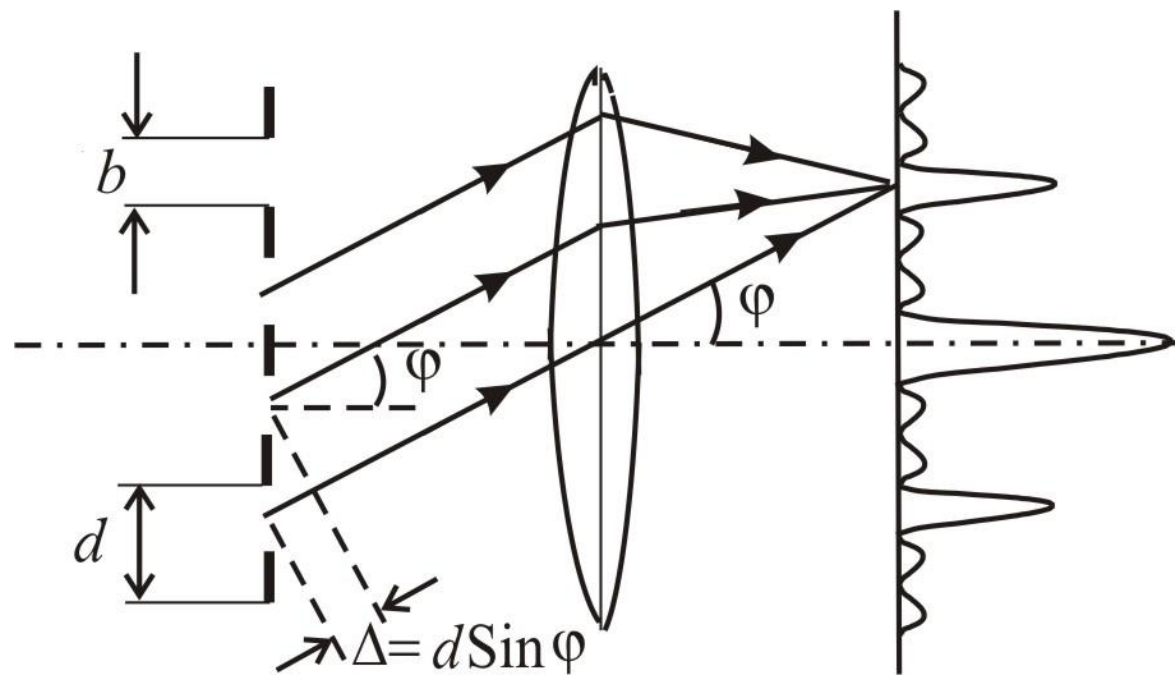
Расстояние между соответствующими точками соседних щелей называется **периодом решетки  $d$** .

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  $A_\phi$  и сдвинутых друг относительно друга по фазе на одну и ту же величину  $\delta$ .

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

Разность хода  $\Delta$  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

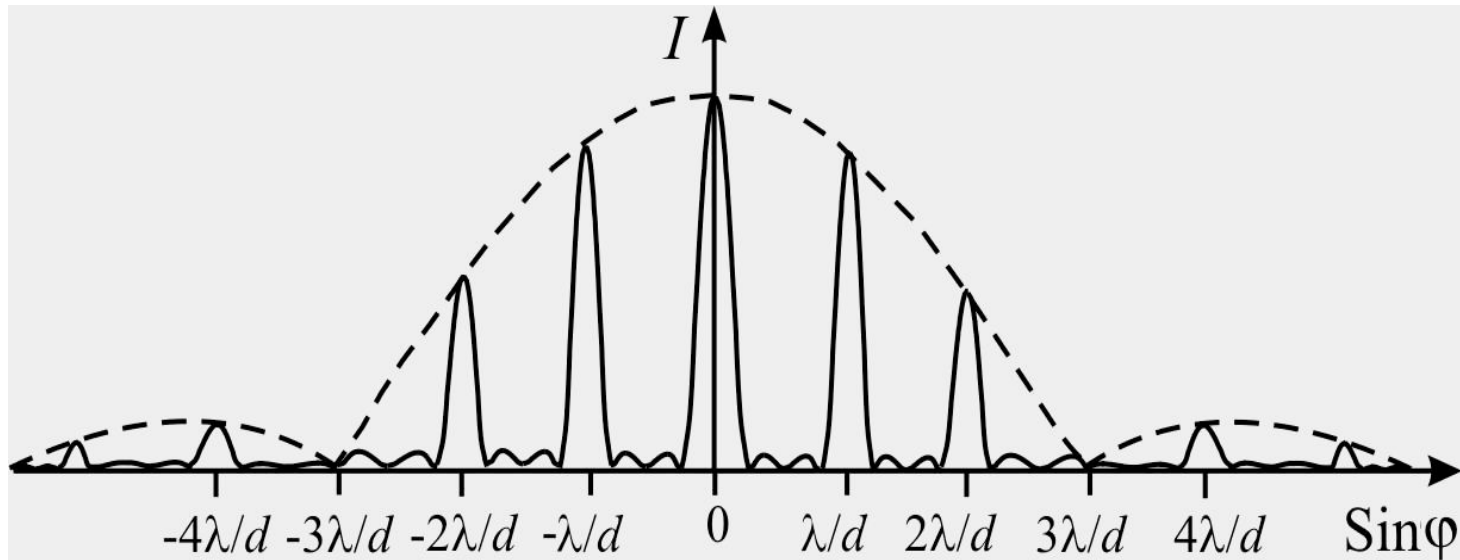
Между каждой смежной парой главных максимумов образуется  $(N - 1)$  вторичных минимумов, возникающих в тех направлениях, для которых колебания от отдельных щелей взаимно погашают друг друга.

Условие **минимума**

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



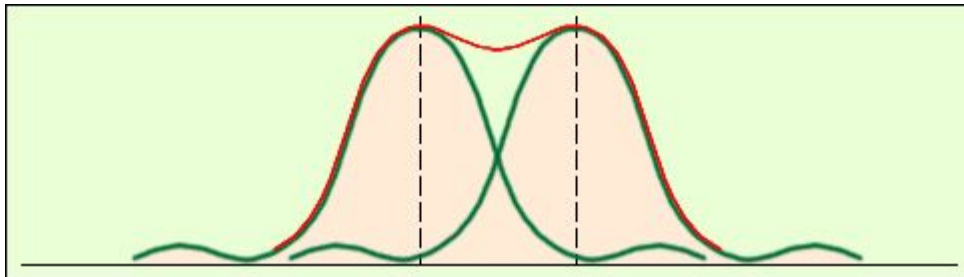
Между вторичными минимумами располагаются вторичные максимумы, число которых равно  $N - 2$ . Интенсивность вторичных максимумов не превышает  $1/23$  (4%) от интенсивности ближайшего главного максимума



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

Положение главных максимумов определяется **постоянной решетки  $d$**  и **длиной волны  $\lambda$** .

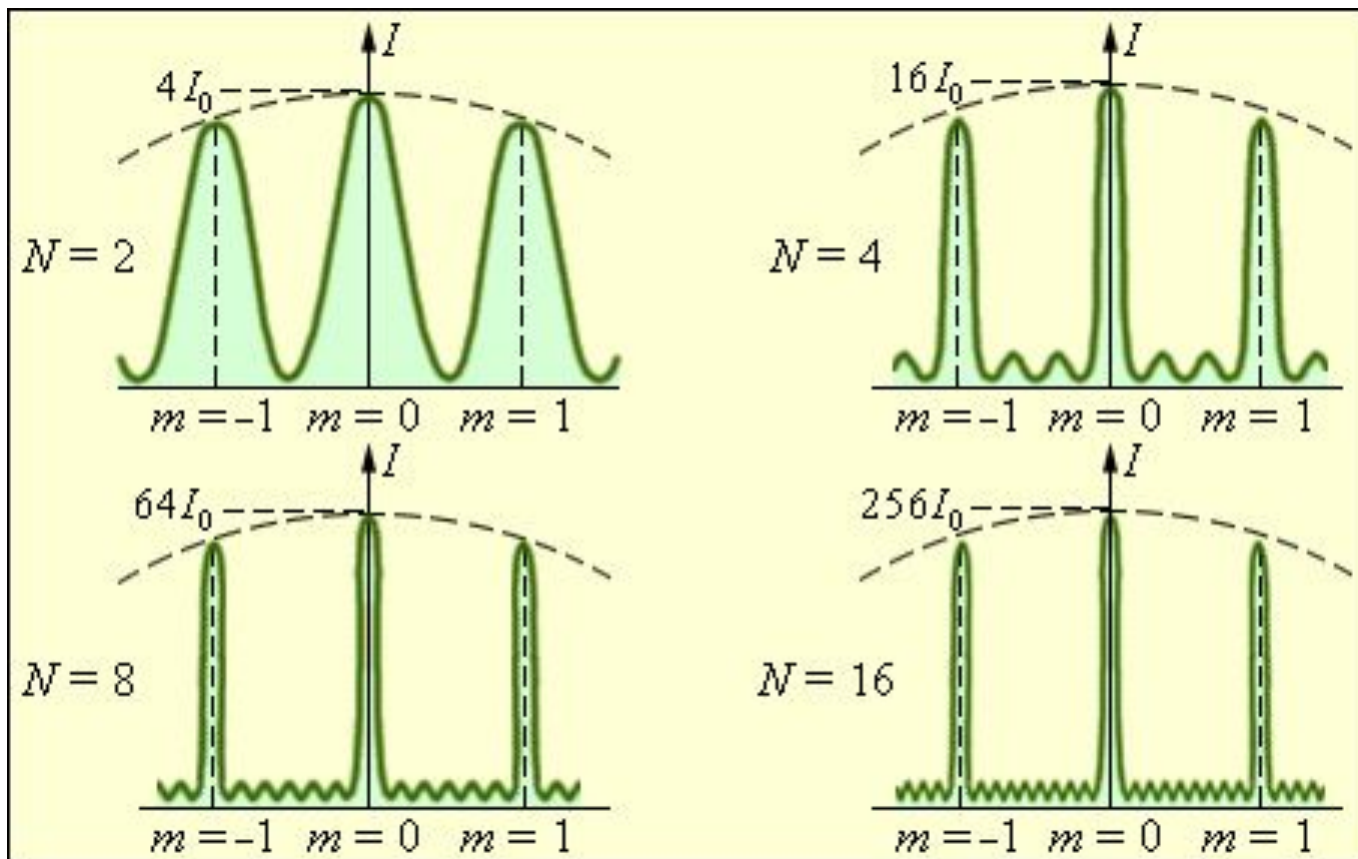
**Разрешающая способность** спектрального прибора характеризует его возможность разделить излучения с близкими длинами волн. Мерой разрешающей способности принято считать отношение длины волны  $\lambda$ , около которой выполняется измерение к интервалу  $\Delta\lambda$  между двумя ближайшими в спектре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

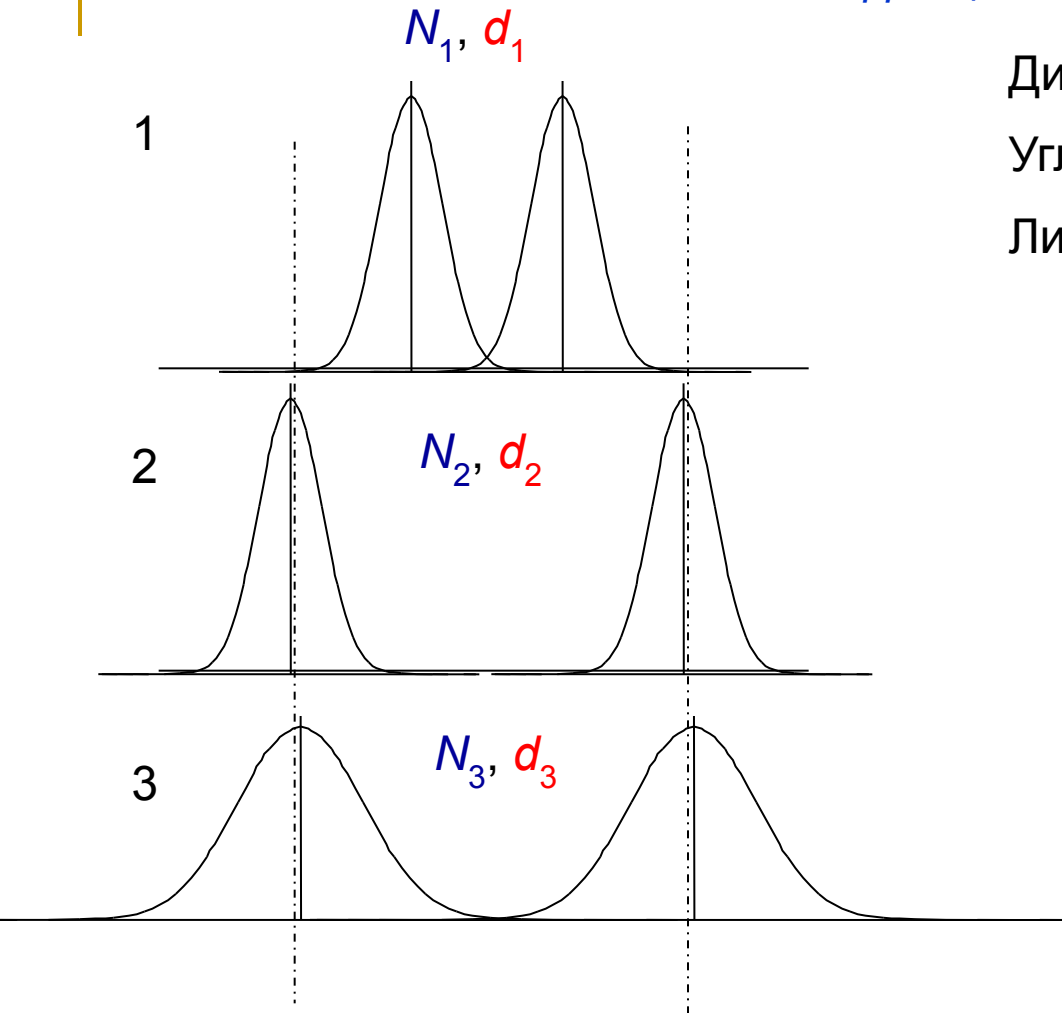
Дисперсия оптического прибора

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  $N$**



$$N_1 = N_2$$

$$d_1 = 2d_2$$

$$d_2 = d_3$$

$$N_2 = 2N_3$$

