

**Волновые  
уравнения  
Максвелла**

В 1860 г. знаменитый английский физик Джеймс Клерк Максвелл создал единую теорию электрических и магнитных явлений, в которой он использовал понятие *ток смещения*, дал *определение электромагнитного поля (ЭМП)* и предсказал существование в свободном пространстве *электромагнитного излучения*, которое распространяется со скоростью света.



Теорию ЭМП Максвелл сформулировал в виде системы нескольких уравнений. В учении об электромагнетизме эти уравнения Максвелла играют такую же роль, как уравнения (или законы) Ньютона в механике или I и II начала в термодинамике.

### *Джеймс Клерк Максвелл*

***(1831-1879) английский физик, создатель классической электродинамики, один из основоположников статистической физики.***

Основные положения теории электромагнитных явлений записываются в виде системы уравнений – уравнения Максвелла. В электромагнетизме эти уравнения играют такую же роль, как законы Ньютона в механике или I и II начала в термодинамике.

## уравнения Максвелла в дифференциальной форме

**Первая пара** уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \operatorname{div} B = 0 \end{cases}$$

Первое из этих уравнений является выражением закона электромагнитной индукции.

Второе уравнение отражает свойство замкнутости линий вектора (или уход их в бесконечность) или отсутствие источников магнитного поля, т.е. магнитных зарядов.

**Вторая пара** уравнений:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \operatorname{div} D = \rho \end{cases}$$

уравнение устанавливает связь между полным током и порождаемым им магнитным полем.

уравнение показывает, что источниками вектора  $D$  служат сторонние заряды.

# Уравнение электромагнитной волны

Электромагнитное поле не стоит на месте, а распространяется в пространстве. Этот процесс является периодическим и носит волновой характер.

На основе уравнений Максвелла можно получить волновое уравнение э/м волны:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial x} &= \mu\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t} & (1) \\ \frac{\partial H}{\partial x} &= \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} & (2) \end{aligned} \right\}$$

уравнения Максвелла для плоской гармонической электромагнитной волны, когда токи и заряды отсутствуют

**Решение этих уравнений и составляют искомое уравнение волны**

Дифференцируя (1) по  $x$  и (2) по  $t$ , получаем:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_a \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t}$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x \partial t} = \varepsilon_a \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_a \varepsilon_a \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

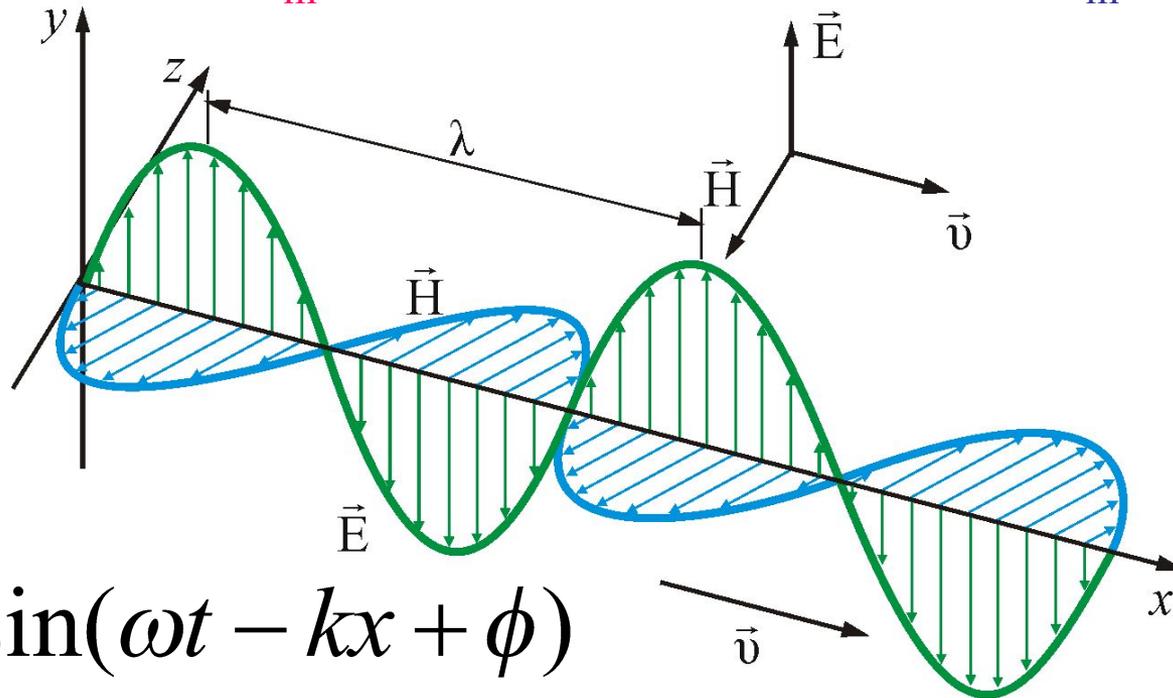
$$\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$$

$$\mu_a = \mu\mu_0$$

Решением дифференциальных уравнений является гармоническая функция:

$$E = E_m \cdot \sin\omega(t-x/v) = E_m \cdot \sin(\omega t - kx)$$

$$H = H_m \cdot \sin\omega(t-x/v)$$



$$E = E_0 \sin(\omega t - kx + \phi)$$

$k = \frac{\omega}{v}$  – волновое число,  $\omega$  – круговая частота,

$\phi$  – начальная фаза колебаний в точках с координатой  $x = 0$ ,  $v$  – фазовая скорость.

## УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

### Свойства уравнений Максвелла.

1. *Уравнения Максвелла линейны.* Свойство линейности уравнений Максвелла непосредственно связано с принципом суперпозиции: если два каких-нибудь поля удовлетворяют уравнениям Максвелла, то это относится и к сумме этих полей.
2. *Уравнения Максвелла содержат уравнение непрерывности,* выражающее закон сохранения электрического заряда.
3. *Уравнения Максвелла выполняются во всех инерциальных системах отсчета.* Уравнения релятивистски инвариантны. Их вид не меняется при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой, хотя величины в них преобразуются по определенным правилам. Отдельное рассмотрение электрического и магнитного полей имеет относительный смысл.

## УРАВНЕНИЯ МАКСВЕЛЛА

### Свойства уравнений Максвелла.

4. Уравнения Максвелла не симметричны относительно электрического и магнитного полей. Это обусловлено тем, что в природе существуют электрические заряды, но не обнаружены магнитные.

5. Из уравнений Максвелла следует, что электромагнитное поле способно существовать самостоятельно – без электрических зарядов и токов. Изменение состояния этого поля имеет волновой характер. Поля такого рода называют электромагнитными волнами. В вакууме они всегда распространяются со скоростью, равной скорости света. Этот вывод и теоретическое исследование электромагнитных волн привели Максвелла к созданию электромагнитной теории света, в соответствии с которой свет также представляет собой электромагнитные волны.

Скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от ее электрической и магнитной проницаемостей. Величину  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  называют ***абсолютным показателем преломления***. С учетом последнего имеем:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{n} \quad \text{и} \quad n = \frac{c}{v}$$

Следовательно, ***показатель преломления*** среды есть ***физическая величина, равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме к их скорости в данной среде***.

Длина волны связана с периодом  $T$  (или частотой  $\nu=1/T$ ) колебаний:

$$\lambda = V \cdot T = \frac{V}{\nu}$$

в вакууме

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$$

В соответствии с условиями возбуждения и свойствами излучения ЭМ волны делятся по частоте (или длине волны) на несколько диапазонов, составляющих шкалу ЭМ волн: радиоволны, оптическое излучение, рентгеновское излучение,  $\gamma$ -излучение.

Частоты видимых световых волн лежат в пределах:  $\lambda = 760 - 380$  нм. Действуя на глаз, видимое излучение вызывает ощущение света.

Излучение может быть



**Монохроматическим** (простым) называют излучение какой-либо одной длины волны.



**Сложным** - излучение, состоящее из волн различной длины, называется

Любой цвет можно разложить на сумму основных (или базовых) 3 цветов : **красный**, **зеленый**, **синий** соответствующей яркости

Свет, содержащий все волны видимого диапазона в определенном соотношении по интенсивности – **белый свет**.

# Шкала ЭМВ

В оптике условно рассматривается три области:

Длина волны ( $\lambda$ )  $<$  размеров приборов;

**геометрическая оптика.**

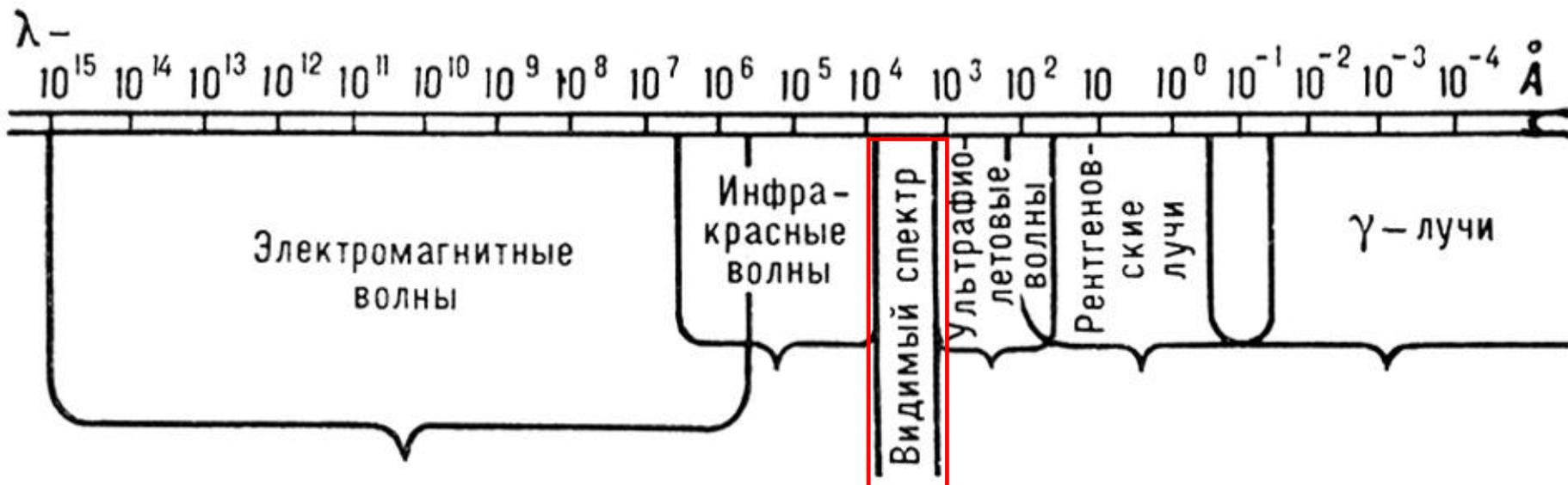
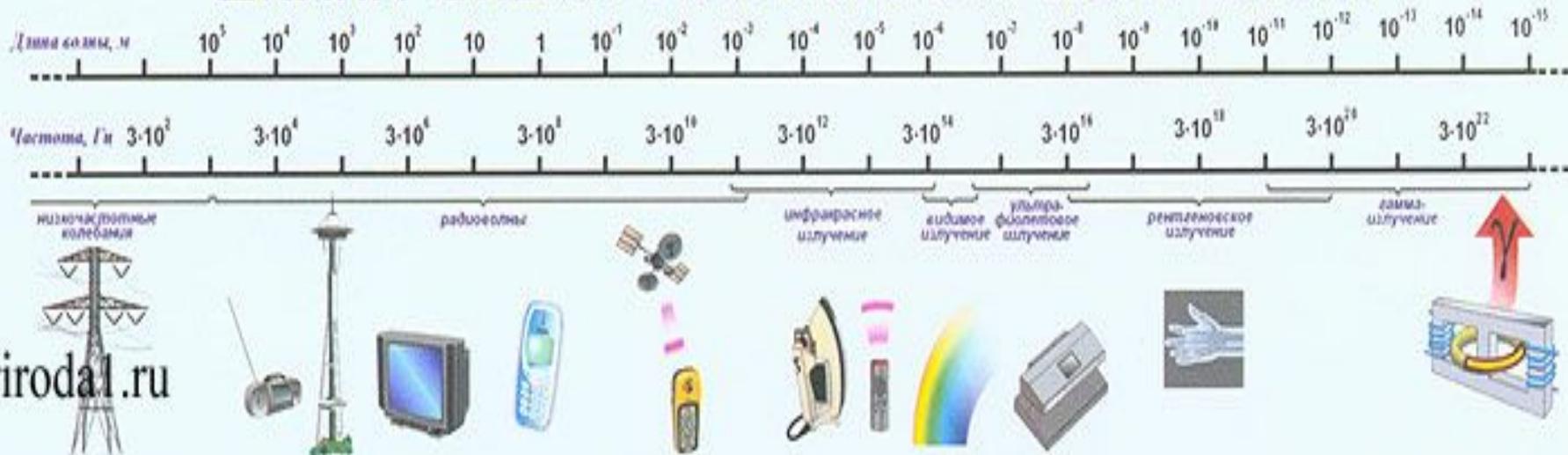
$\lambda$  сравнима с размеров приборов;

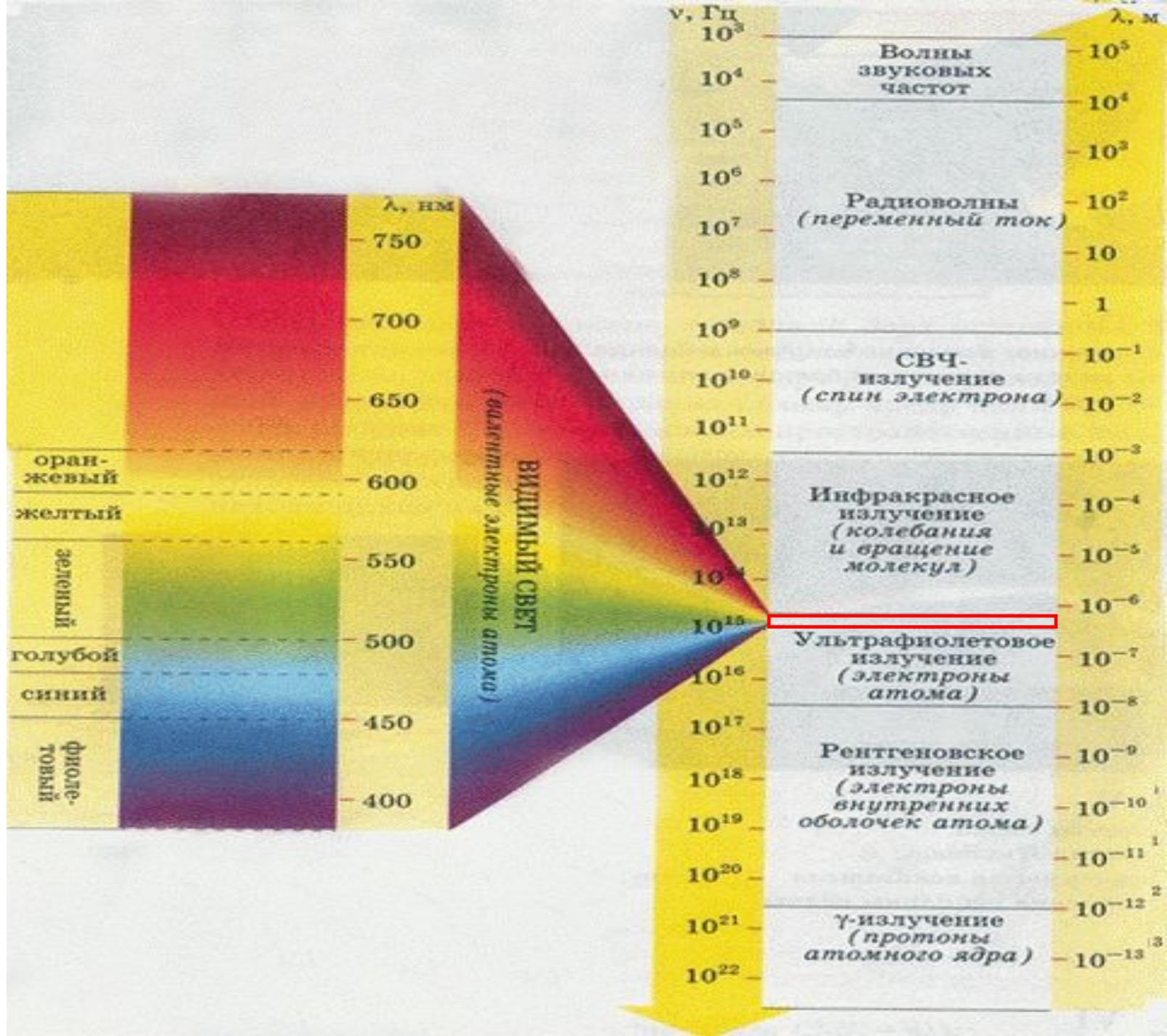
**волновая оптика.**

$\lambda <$  размеров приборов;

**квантовая оптика.**

# ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ





Большую часть информации человек получает с помощью зрения. Именно поэтому изучению вопросов фотометрии уделяется особое внимание. Важную роль в науке, технике и практической деятельности играют **фотометрические характеристики**, описывающие видимое излучение, т. е. ту часть спектра электромагнитных волн, которая воспринимается нашим глазом

**Фотометрия** – раздел оптики, занимающийся измерением световых потоков и величин, связанных с этими потоками.

При изучении физики мы уже использовали ряд идеализированных моделей (материальная точка, идеальный газ и др.), которые помогали нам при рассмотрении физических явлений и законов. В фотометрии удобно использовать еще одну идеализацию — точечный источник света.

**Точечный источник света** – источник, размерами которого можно пренебречь по сравнению с расстоянием от места наблюдения до источника. Считается, что такой источник равномерно излучает свет во все стороны. Типичный пример точечных источников света — звезды.

Оптическое излучение характеризуется рядом энергетических и фотометрических характеристик. Рассмотрим некоторые из них.

1. Для характеристики точечных источников света используется **сила света  $I$** , которая определяется как поток излучения источника, приходящийся на единицу телесного угла  $d\Omega$ .

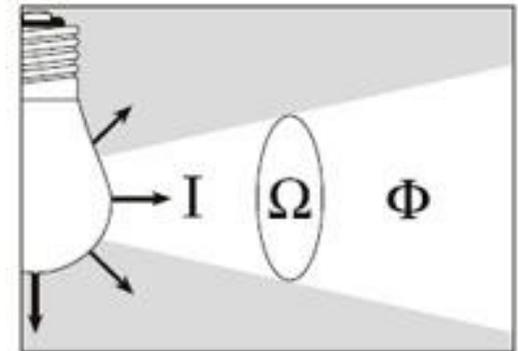
$$I = d\Phi/d\Omega$$

Для изотропного источника, у которого сила света не зависит от направления  $\Omega = 4\pi$ , тогда

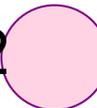
$$I = \frac{d\Phi}{4\pi}$$

Единица силы света в системе СИ – **кандела** (свеча) **Кд**

**1Кд** – сила света, испускаемого с площади  $1/600000\text{м}^2$  сечения полного излучателя (абсолютно черного тела) в перпендикулярном этому излучателю направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания  $P_t$ , при давлении  $101325\text{ Па}$ .



Сила света  $I$  характеризует мощность светового потока лампы  $\Phi$  в телесном углу  $\Omega$ .

2  **Световой поток** – физическая величина, характеризующая «количество» световой энергии в соответствующем потоке излучения.

Это мощность видимого излучения, оцениваемого по световому ощущению, которое оно производит на средний человеческий глаз.

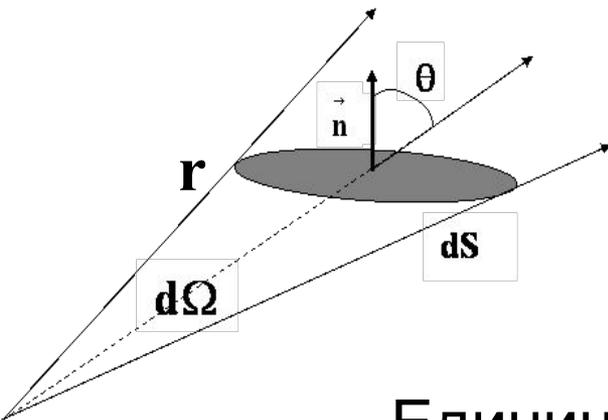
Его единица измерения – **люмен** (лм). Он равен световому потоку, излучаемому изотропным источником с силой света 1 Кд в пределах телесного угла 1стерадиан.

$$(1\text{лм} = 1\text{Кд}\cdot 1\text{ср})$$

Световому потоку 1лм (при  $\lambda=555\text{ нм}$ ) соответствует поток энергии 0,0016 Вт – **механический эквивалент света**.

**3 Освещенность** – световой поток, падающий на элемент поверхности, характеризуется величиной :

$$E = \frac{d\Phi_{nad}}{dS}$$



Освещенность  $E$  связывает световой поток с площадью той поверхности, на которую этот поток падает.

Единица освещенности **1 люкс**  
(1лк) = 1лм/1м<sup>2</sup>.

Освещенность можно выразить через силу света:

$$d\Phi_{nad} = I \cdot d\Omega \quad \leftarrow \quad d\Omega = \frac{dS \cdot \cos \Theta}{r^2}$$

$$E = \frac{I \cdot \cos \Theta}{r^2}$$



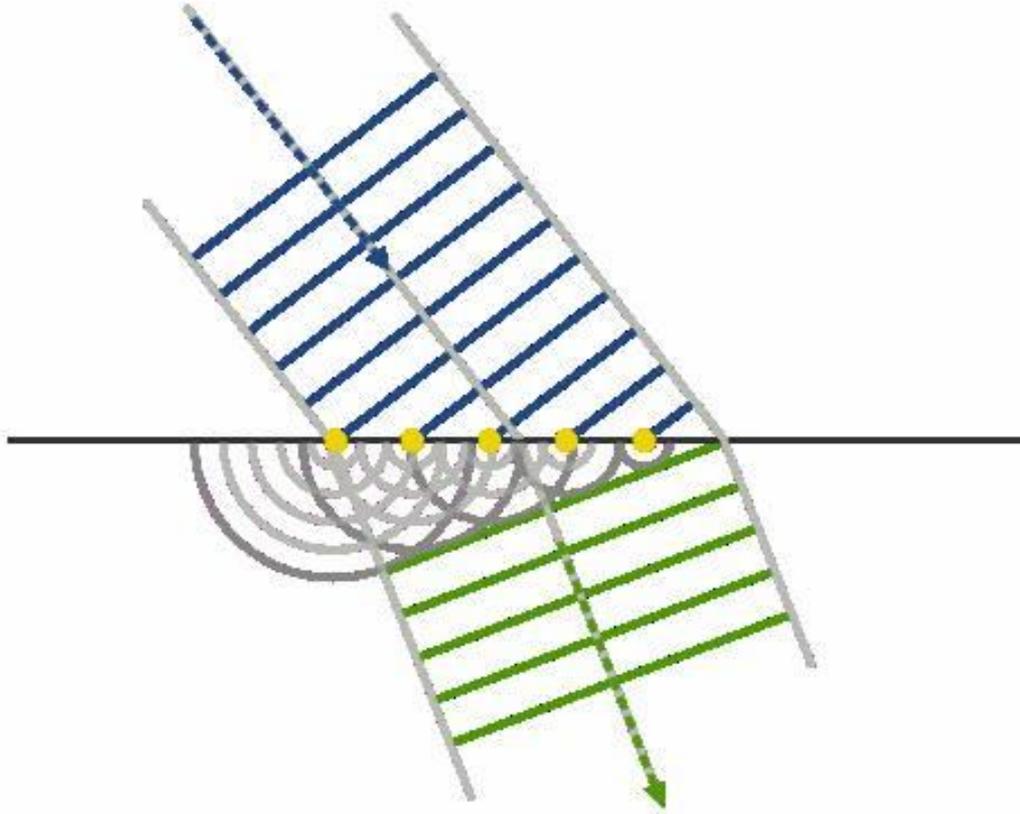
Освещенность  $E$ .

# Распространение света

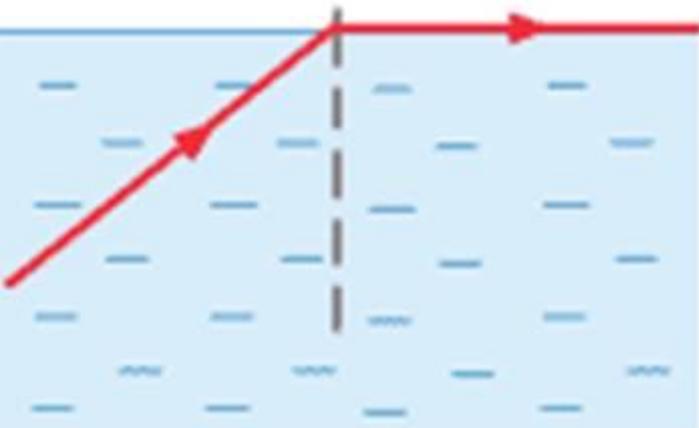
# Принцип Гюйгенса

- Волновая теория света основана на **принципе Гюйгенса**: *каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн даёт положение волнового фронта в последующий момент времени*
- На основе волновой теории удалось правильно объяснить законы отражения и преломления света

## Объяснение преломления света с помощью принципа Гюйгенса



# Полное отражение

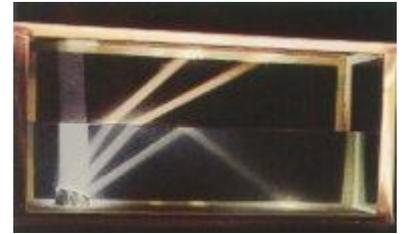


- Интересное явление можно наблюдать, если постепенно **увеличивать угол падения при переходе света в оптически менее плотную среду**. Угол преломления в этом случае, как известно, больше угла падения, и, с увеличением угла падения, угол преломления также будет увеличиваться. **При некотором значении угла падения угол преломления станет равен  $90^\circ$ .**



## Явление полного внутреннего отражения.

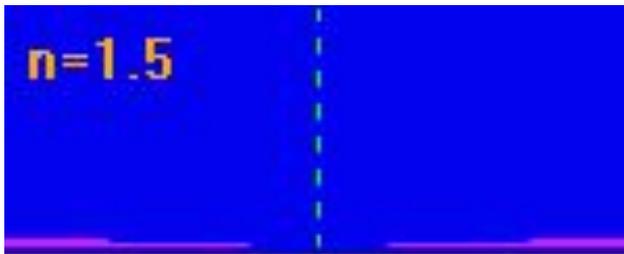
При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду ( $n_1 > n_2$ ) угол преломления  $\gamma$  будет больше угла падения  $\alpha$ .



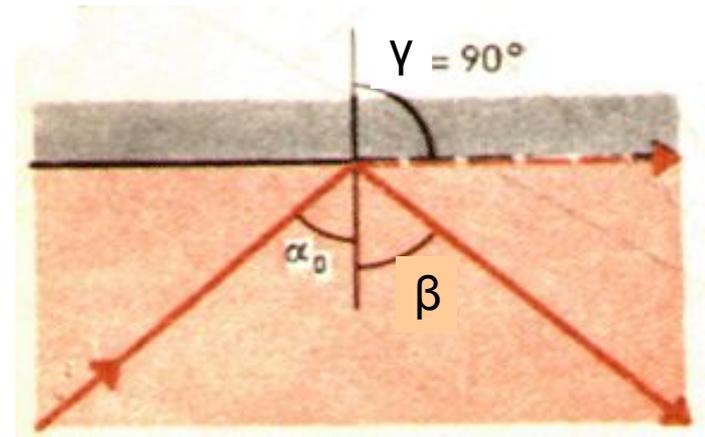
С увеличением угла  $\alpha$ , при некотором  $\alpha = \alpha_0$  можно получить  $\gamma = \pi/2$ , т.е. преломленный луч будет скользить по поверхности раздела сред. Угол **падения**, удовлетворяющий условию  $\sin \alpha_0 = n_2/n_1$ , при котором  $\gamma = \pi/2$ , а  $\sin \gamma = 1$ , называется **предельным углом падения**.

При  $\alpha > \alpha_0$  луч не преломляется, а полностью отражается обратно в первую среду. Это называется **полным внутренним отражением**.

При  $n_1 < n_2$ , то  $\gamma < \alpha$  и даже при  $\alpha = \pi/2$ ,  $\gamma < \pi/2$ )

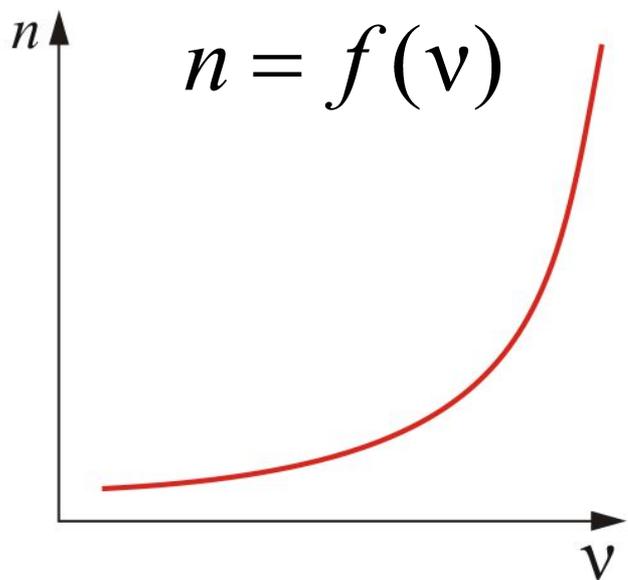


$n=1$

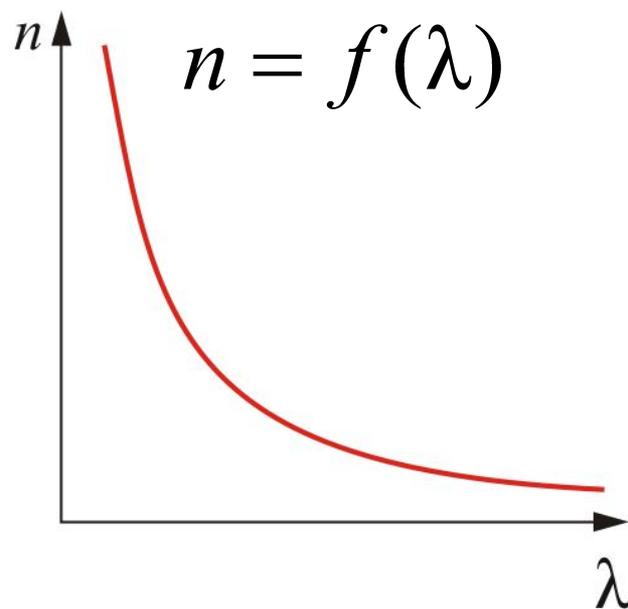


# Дисперсия света

*Дисперсией света* называется зависимость показателя преломления  $n$  вещества от частоты  $\nu$  (длины волн  $\lambda$ ) света или зависимость фазовой скорости  $v$  световых волн от их частоты.



ИЛИ



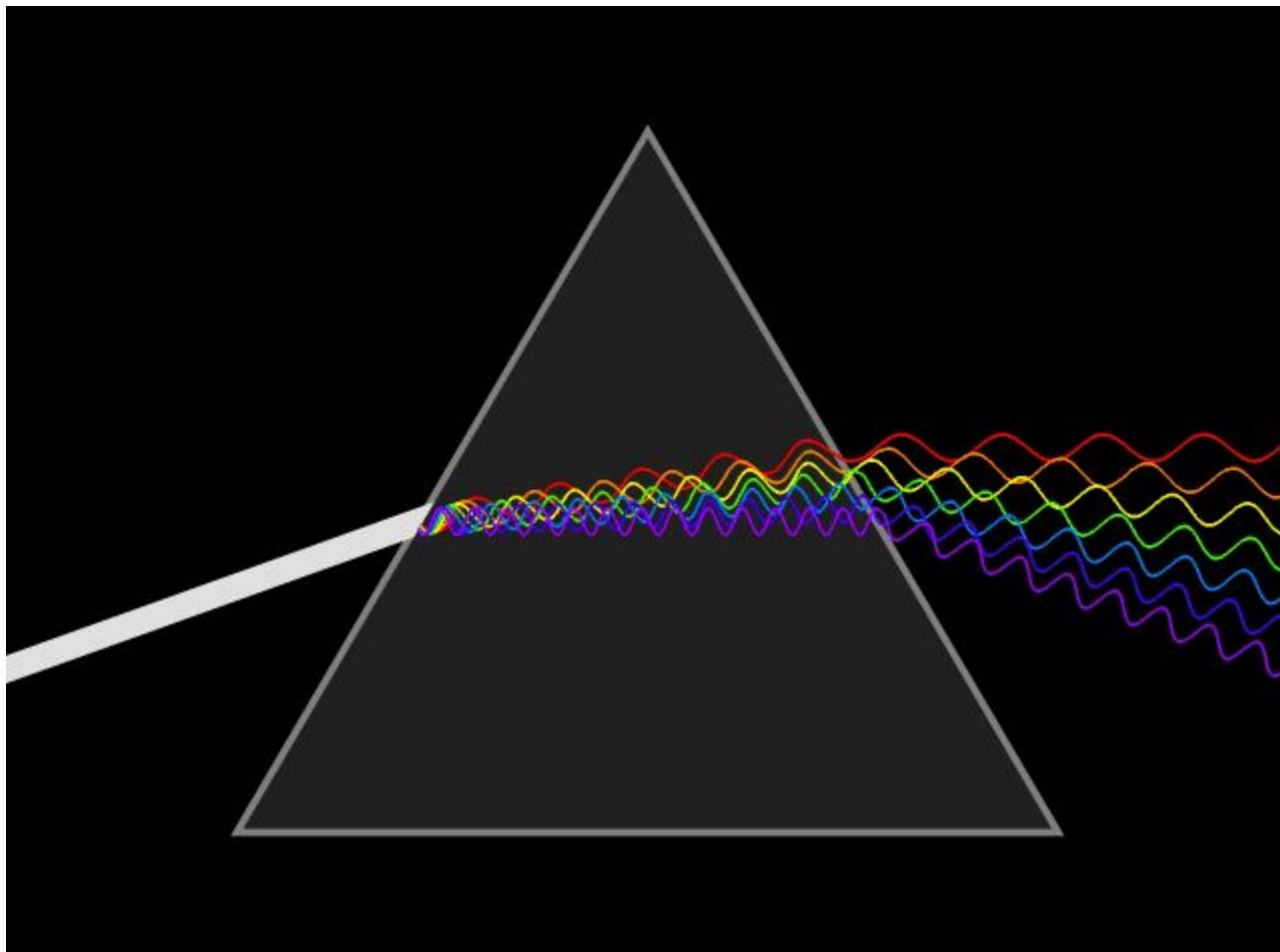


**Радуга** - явление, наблюдаемое обычно в поле повышенной влажности и возникающее из-за преломления солнечного света в капельках воды дождя или тумана, парящих в атмосфере. Капли по-разному отклоняют свет разных цветов (показатель преломления воды для более длинноволнового света меньше, чем для коротковолнового, поэтому красный свет меньше отклоняется при преломлении, в результате чего белый свет разлагается в спектр.



Благодаря дисперсии света, можно наблюдать цветную «игру света» на гранях бриллианта и других прозрачных гранёных предметах или материала

# Дисперсия света на трехгранной призме (опыт Ньютона)



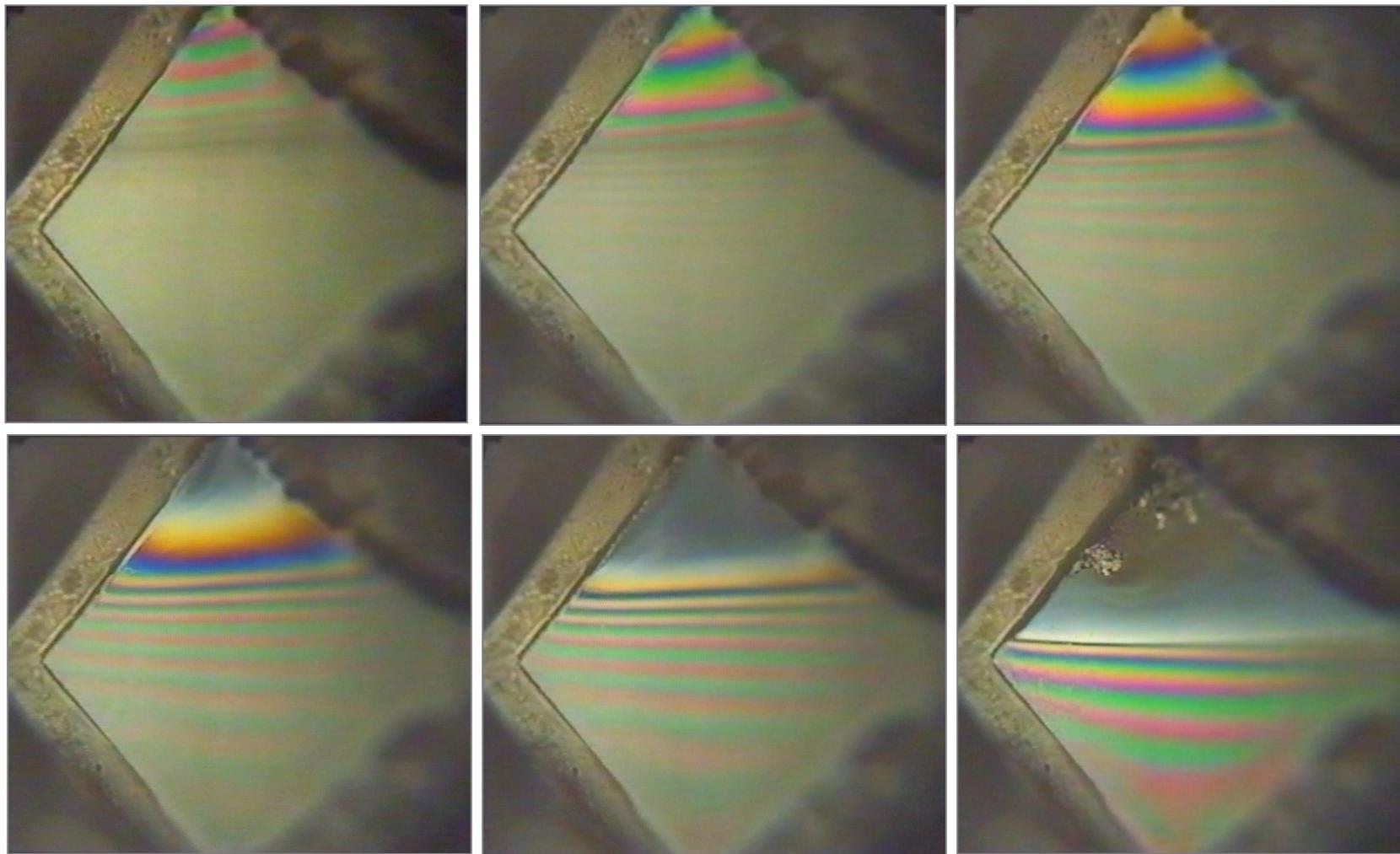
Величина

$$D = \frac{dn}{d\lambda}$$

$$D = \frac{dn}{dv}$$

называемая *дисперсией вещества*, показывает, как быстро меняется показатель преломления с длиной волны.

# Интерференция света



Изменение картины интерференции по мере уменьшения толщины мыльной пленки

**Интерференция света** (от лат. *inter* – взаимно, между собой и *ferio* – ударяю, поражаю) – **пространственное перераспределение энергии света при наложении двух или нескольких световых волн.**

Интерференция волн – одно из основных свойств волн любой природы (упругих, электромагнитных, в т.ч. световых и др.). Такие характерные волновые явления, как излучение, распространение и дифракция, тоже связаны с интерференцией.

Интерференцией света объясняются окраска тонких масляных пленок на поверхности воды, металлический отлив в окраске крыльев насекомых и птиц, появление цветов побежалости на поверхности металлов, голубоватый цвет просветленных линз оптических приборов и пр.

Некоторые явления интерференции света исследовались еще И. Ньютоном в XVII в., но не могли быть им объяснены с точки зрения его корпускулярной теории. Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Т. Юнгом и О. Френелем.

# Использование интерференции

- Явление интерференции нашло широкое практическое применение
  - Создание просветлённых покрытий
  - Измерение малых расстояний и перемещений
  - Контроль поверхности
  - Измерение показателя преломления
  - Голография

# Когерентность и монохроматичность

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

Этому условию удовлетворяют *монохроматические волны* – *волны одной определенной и строго постоянной частоты*.

Волну можно приближенно считать *монохроматической* только в течение времени

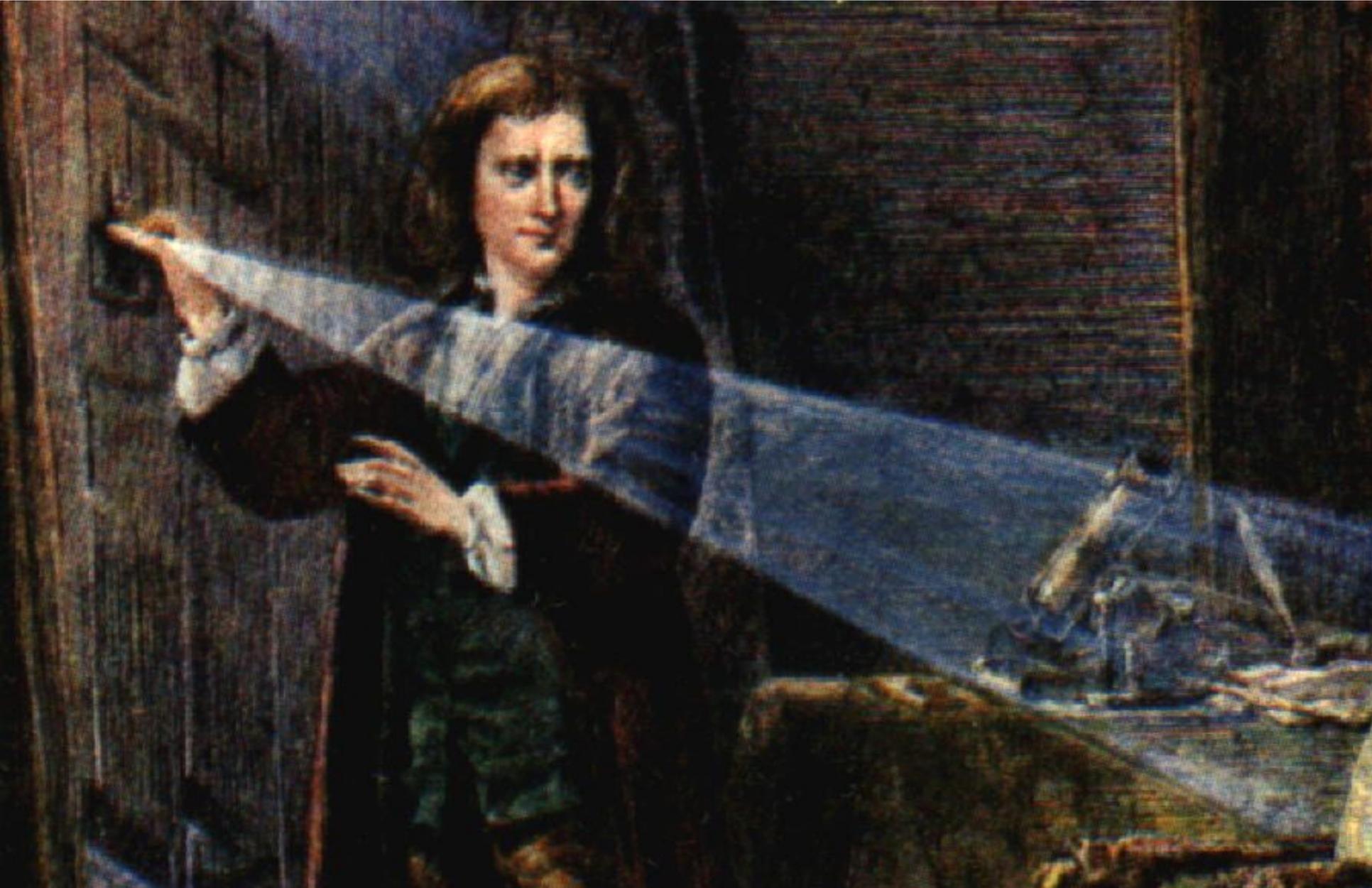
$$\Delta t \ll \tau_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} \quad (7.4.1)$$

где  $\tau_{\text{ког}}$  – *время когерентности*

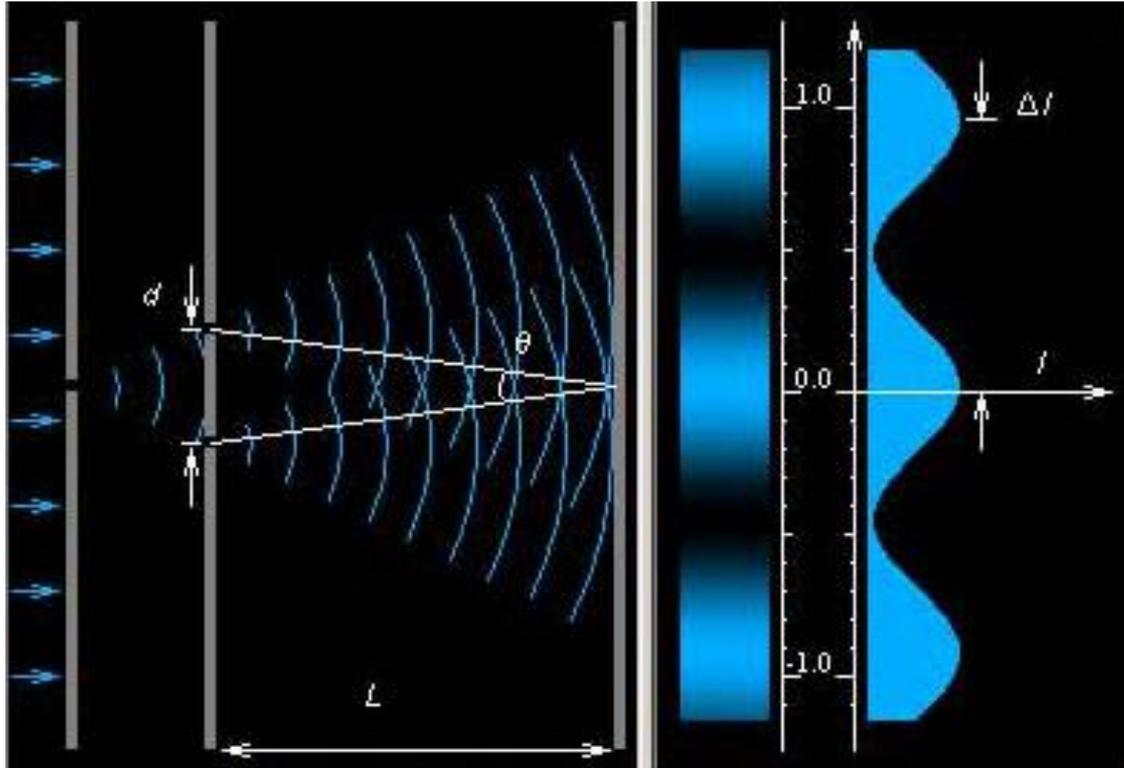
За промежуток времени  $\tau_{\text{ког}}$  разность фаз колебаний изменится на  $\pi$ .

*Время когерентности – время, по истечению которого разность фаз волны в некоторой, но одной и той же точке пространства, изменяется на  $\pi$ .*

# Опыт Юнга



# Классический интерференционный опыт Юнга



Параллельный пучок света падает на экран с небольшим отверстием. Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана, в котором проделаны две щели. Когерентные пучки, излучаемые каждой из щелей, интерferируют на третьем экране.

# Опыт Юнга

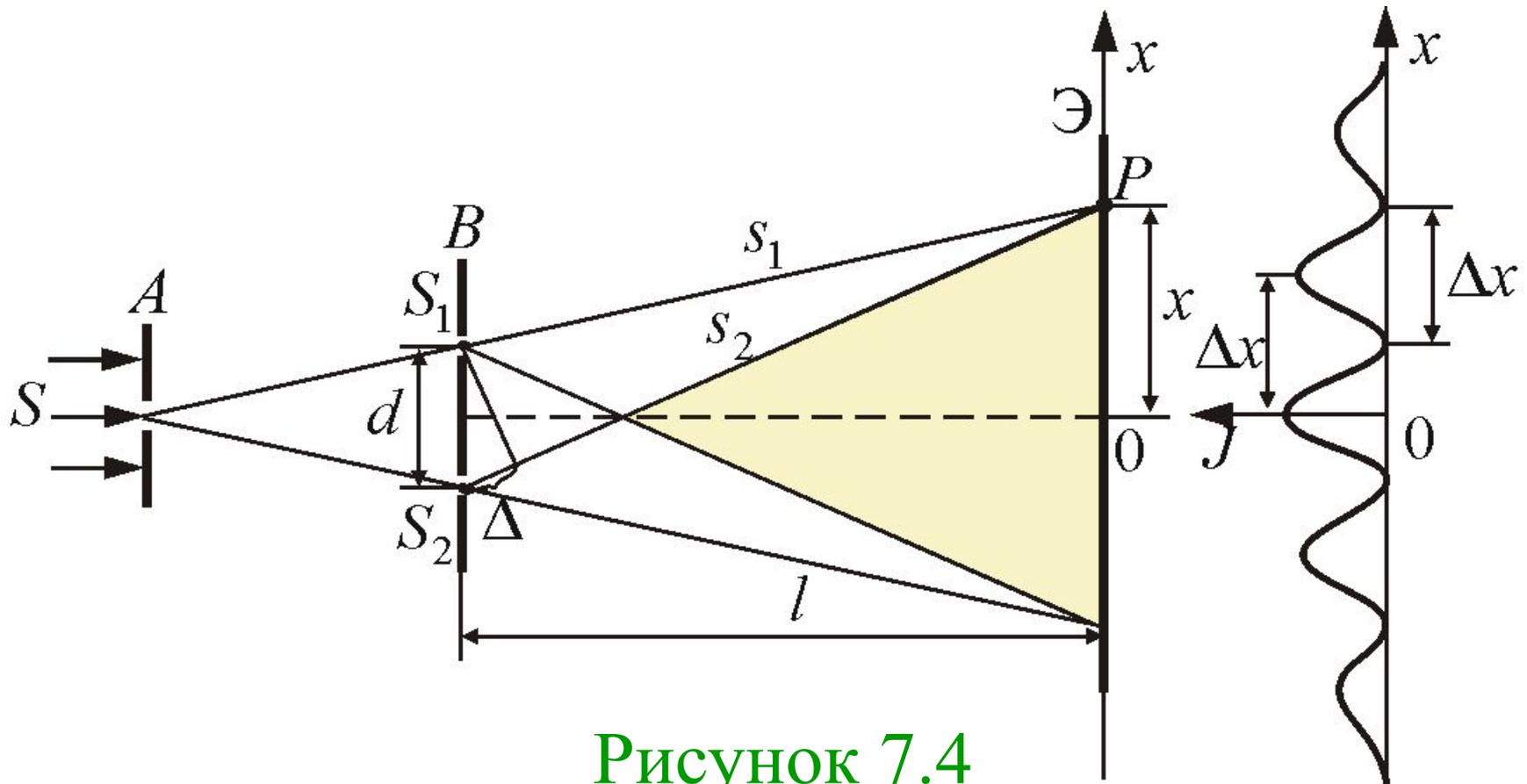
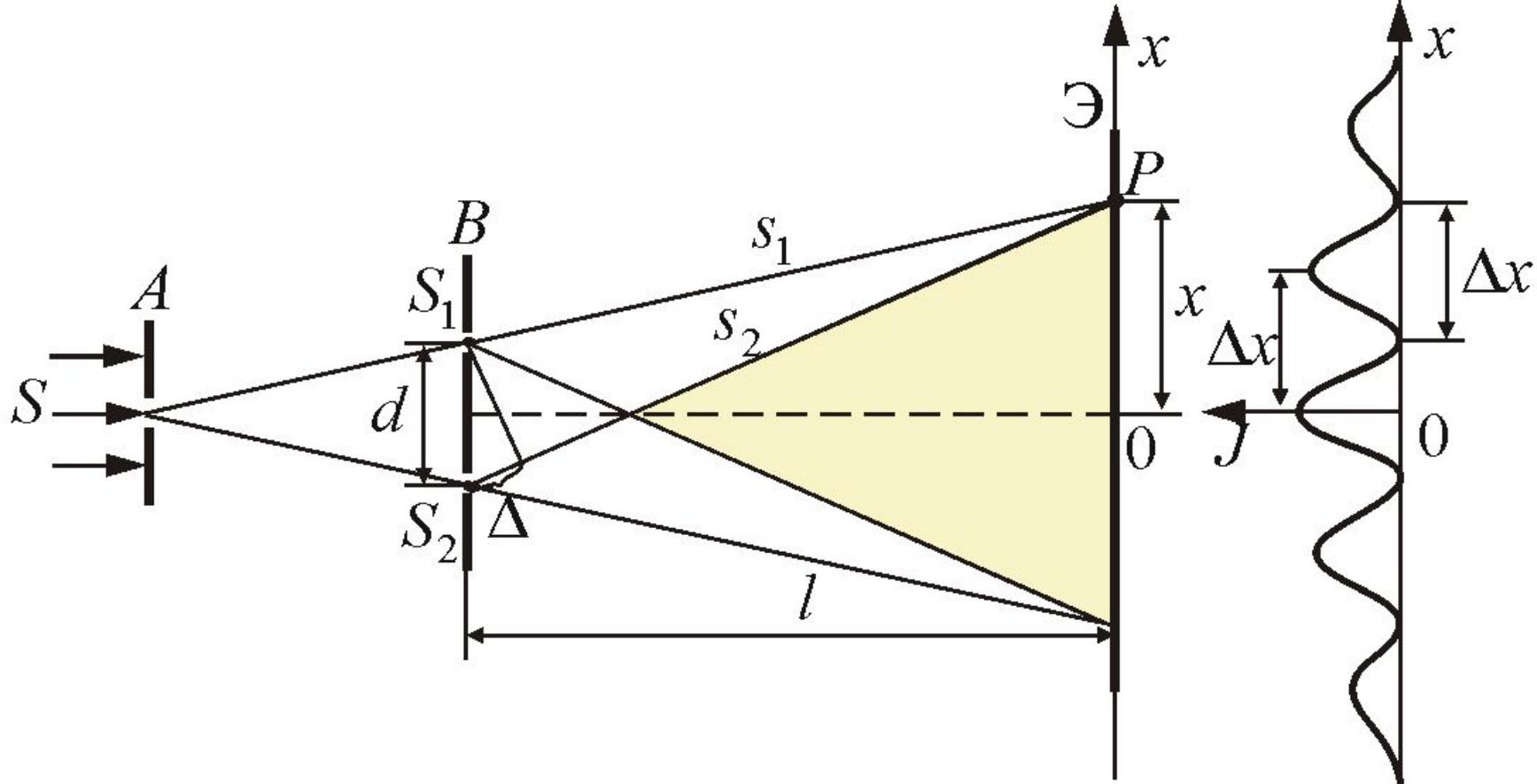


Рисунок 7.4

Расстояние  $l$  от щелей, причем  $l \gg d$

Показатель преломления среды –  $n$ .



*Главный максимум, соответствующий  $m = 0$  проходит через точку  $O$ . Вверх и вниз от него располагаются максимумы (минимумы) первого ( $m = 1$ ), второго ( $m = 2$ ) порядков, и т. д.*

**Максимумы интенсивности** будут

наблюдаться **в координатах:**

$$x_{\max} = \pm \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

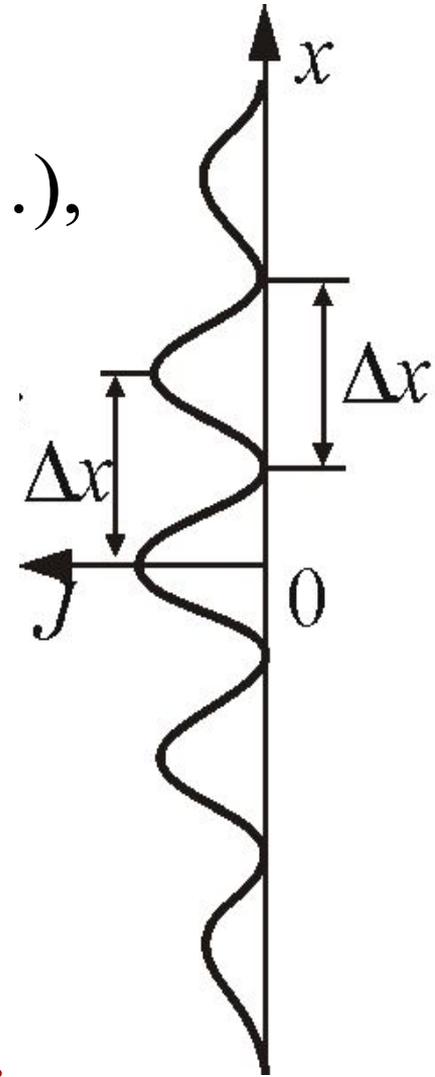
а **минимумы – в координатах:**

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

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

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

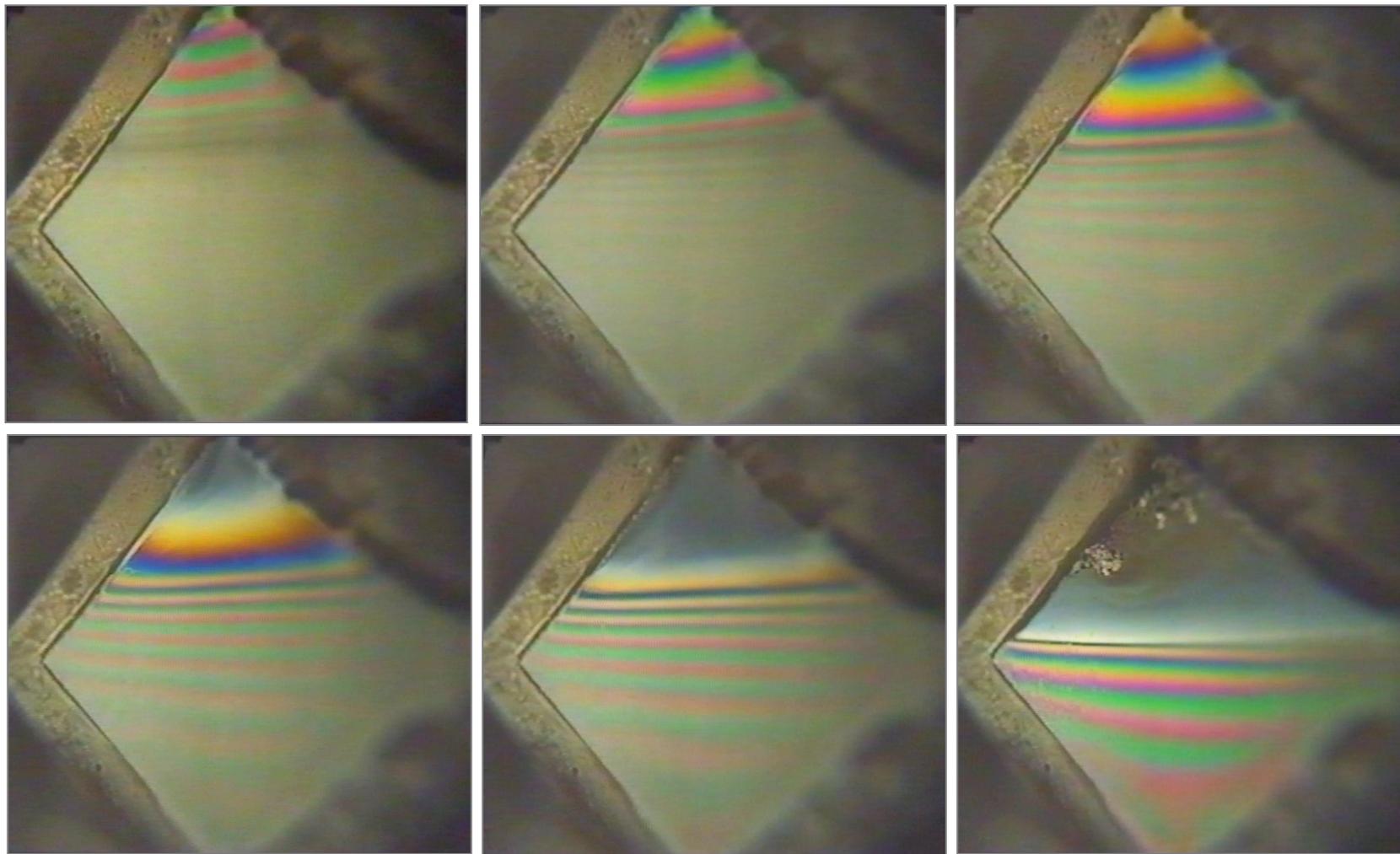
**- ширина интерференционной полосы.**



Измерив  $\Delta x$ , зная  $l$  и  $d$ , можно вычислить длину волны  $\lambda$ . Именно так вычисляют длины волн разных цветов в спектроскопии.

# Интерференция в тонких пленках

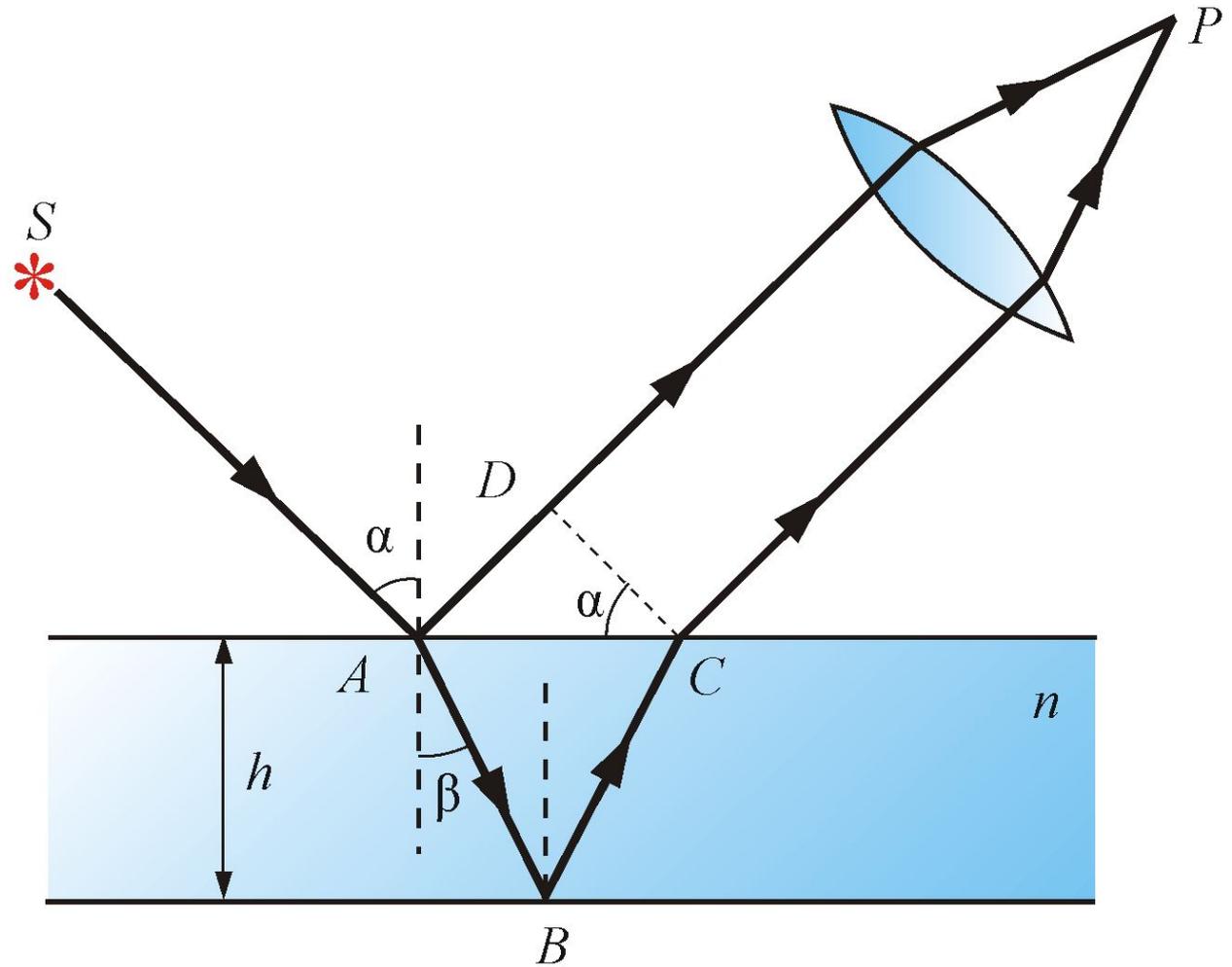
Интерференцию света по *методу деления амплитуды* во многих отношениях наблюдать проще, чем в опытах с *делением волнового фронта*.



Изменение картины интерференции по мере уменьшения толщины мыльной пленки

# Интерференция в тонких пленках

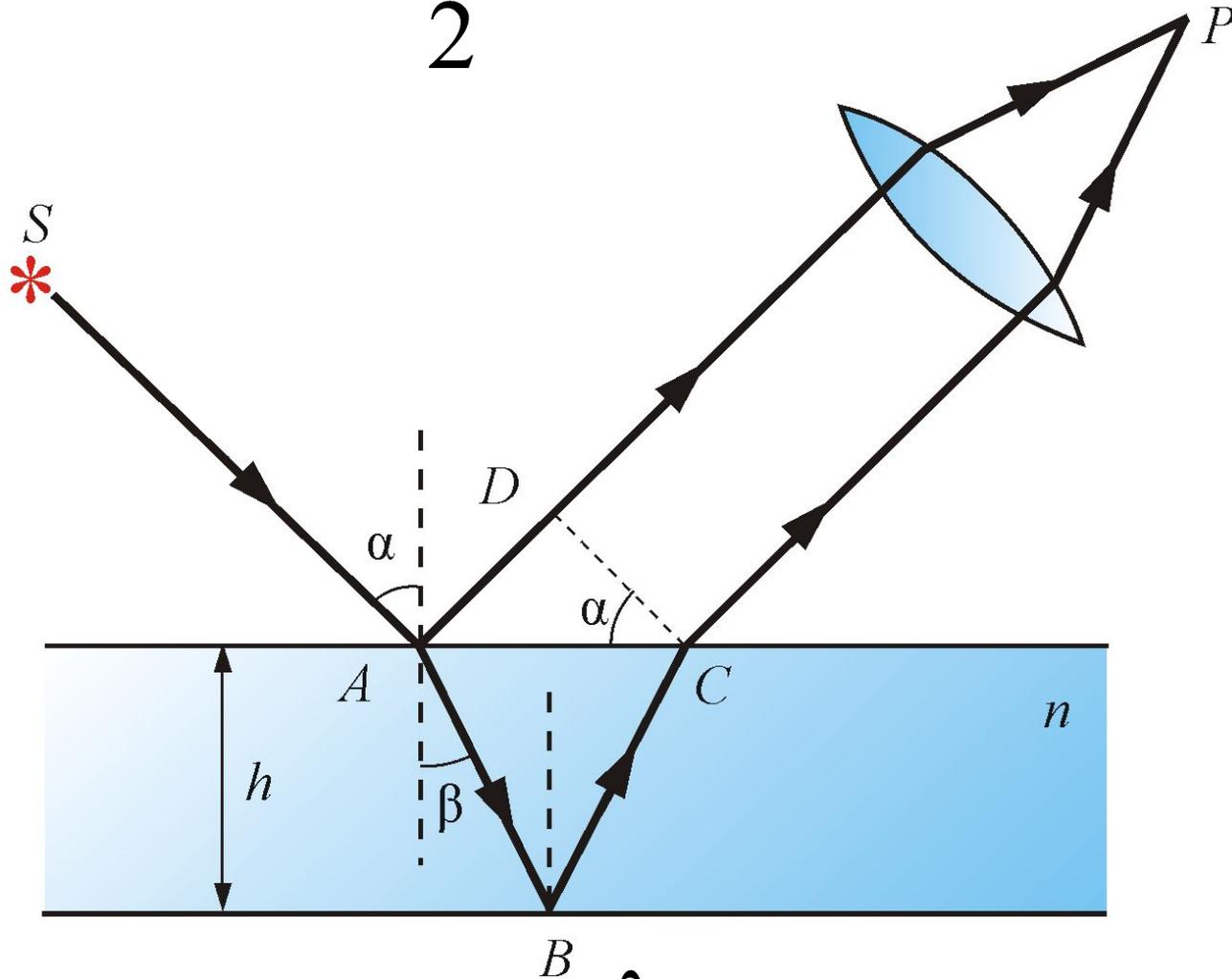
## Интерференционные *полосы равного наклона*



**Оптическая  
разность хода**  
с учетом потери  
полуволны:

$$\Delta = 2nh \cos \beta \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} \text{ - max интерференции}$$



$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \text{ - min интерференции}$$



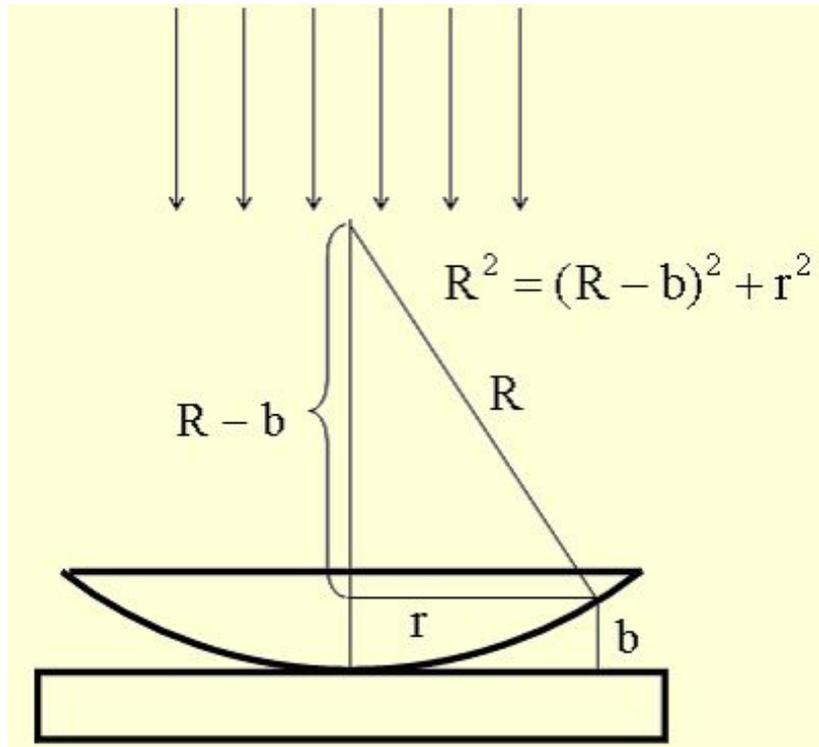
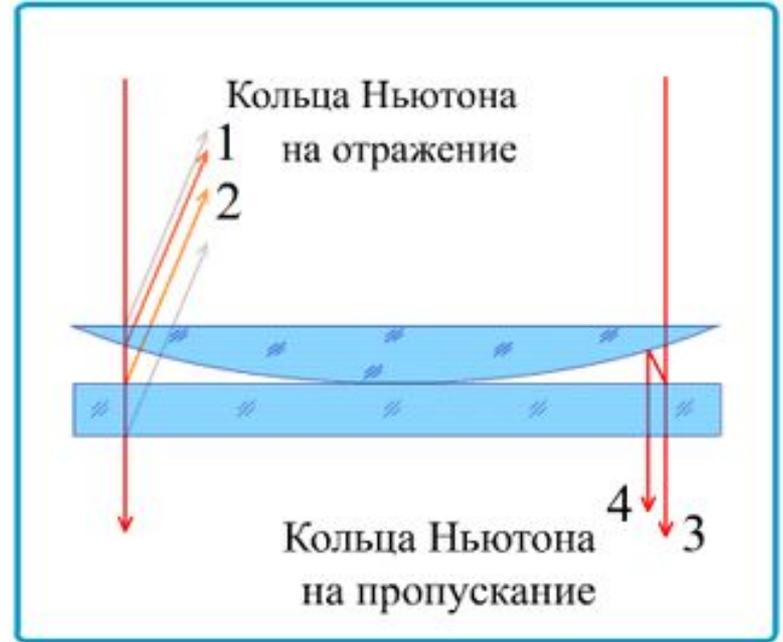
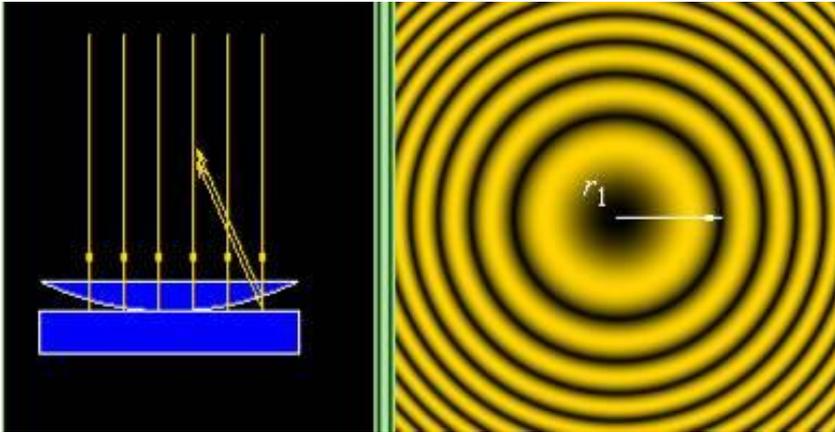
## *Кольца Ньютона*

*Кольцевые **полосы** **равной** **толщины**, наблюдаемые в воздушном зазоре*

*между **соприкасающимися** **выпуклой** **сферической** **поверхностью** **линзы** **малой** **кривизны** и **плоской** **поверхностью** **стекла**, называют **кольцами Ньютона**.*

Ньютон объяснил это явление на основе корпускулярной теории света.

# Кольца Ньютона



$$b = \frac{r^2}{2R}, \text{ т.к. } b^2 \rightarrow 0$$

$$\Delta = 2bn + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

Условие максимума (светлые кольца)  $\Delta = m \lambda$ , где  $m$  – целое число.

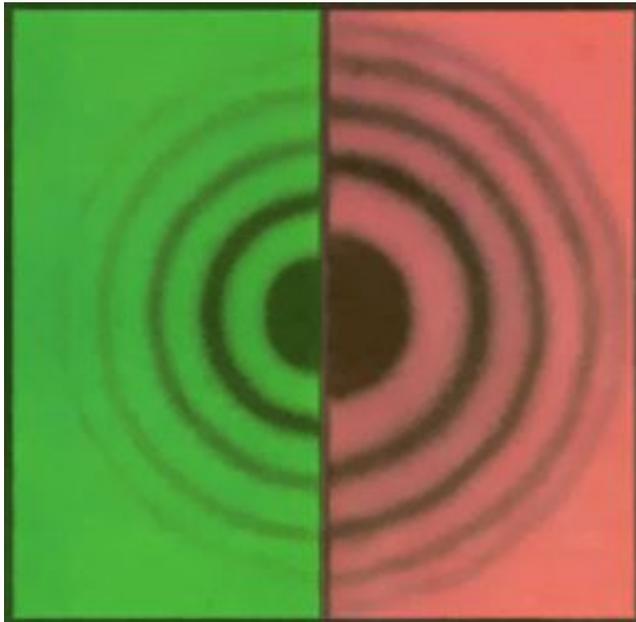
$$r_m = \sqrt{(m - 1/2)\lambda R}$$

- радиус  $m$ -го *светлого* кольца в *отраженном* свете  
(и *темного* – в *прошедшем*)

Условие минимума (темные кольца)  $\Delta = (m + 1/2) \lambda$ .

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

- радиус  $m$ -го *темного* кольца в *отраженном* свете  
(и *светлого* – в *прошедшем*)



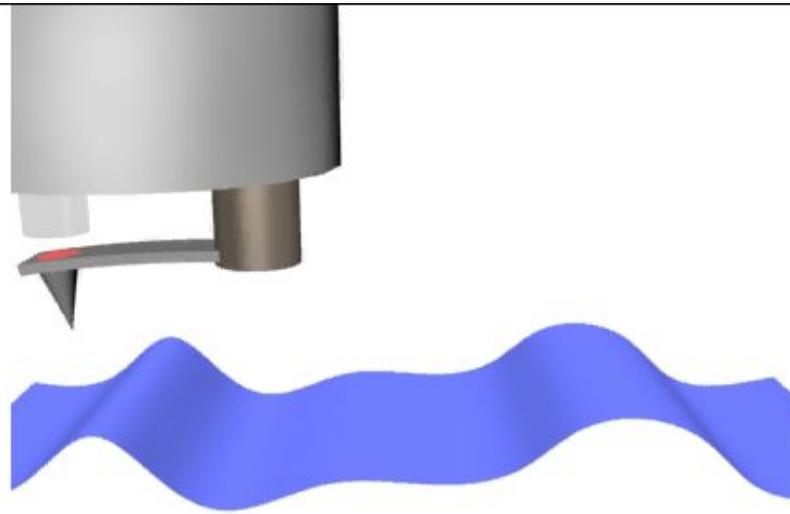
*Кольца Ньютона в зеленом и красном свете*

**Пример применения** – проверка качества шлифовки линз.

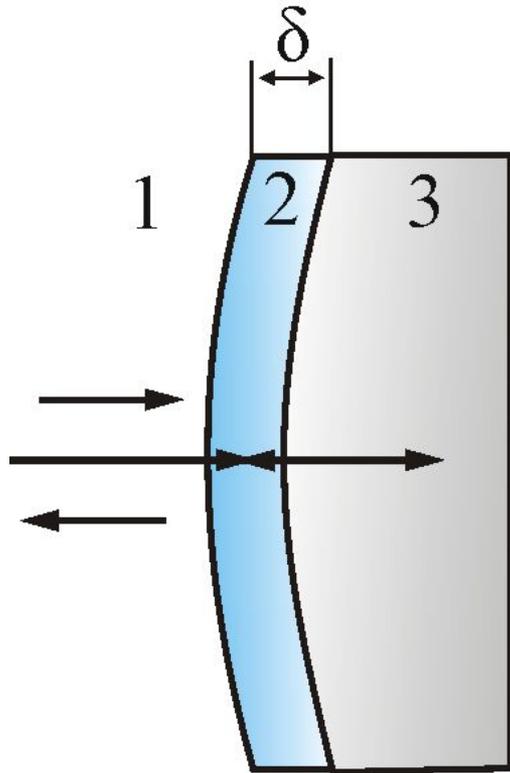
# Применение интерференции света

1. Тот факт, что расположение интерференционных полос зависит от длины волны и разности хода лучей, позволяет по виду интерференционной картины (или их смещению) *проводить точные измерения расстояний при известной длине волны* или, наоборот, *определять спектр интерферирующих волн (интерференционная спектроскопия).*

**2. По интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды (в т.ч. фазовые), в которой распространяются волны, или отклонения формы поверхности от заданной.**



***Просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.***



# ***Дифракция света***

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

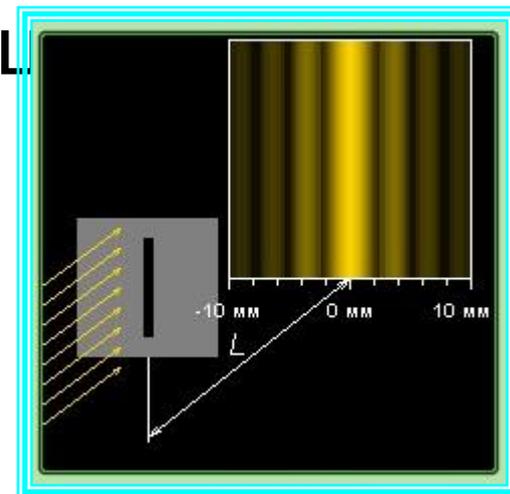
**Дифракция света сопровождается интерференцией.**

**Интерферируют волны, обогнувшие препятствие (опыт Юнга).**



- ***Дифракционная картина*** – система чередующихся светлых и темных колец, если препятствие круг или отверстие.

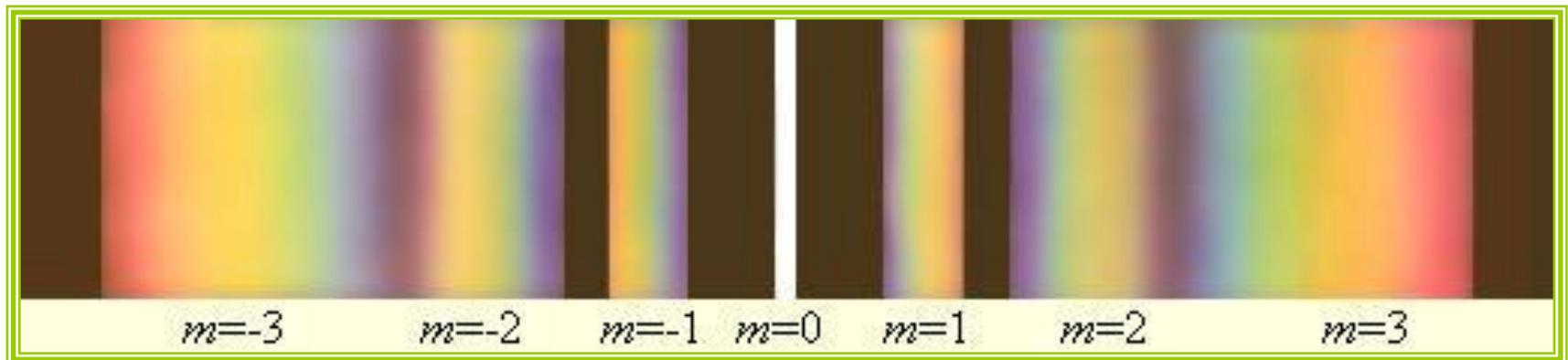
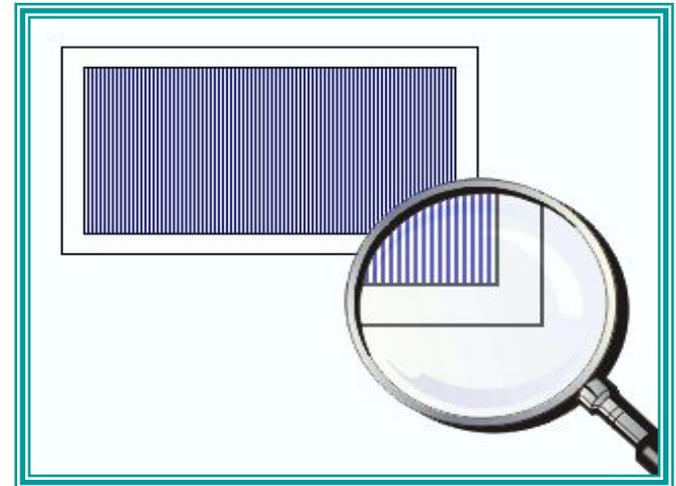
Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.



# Применение дифракции

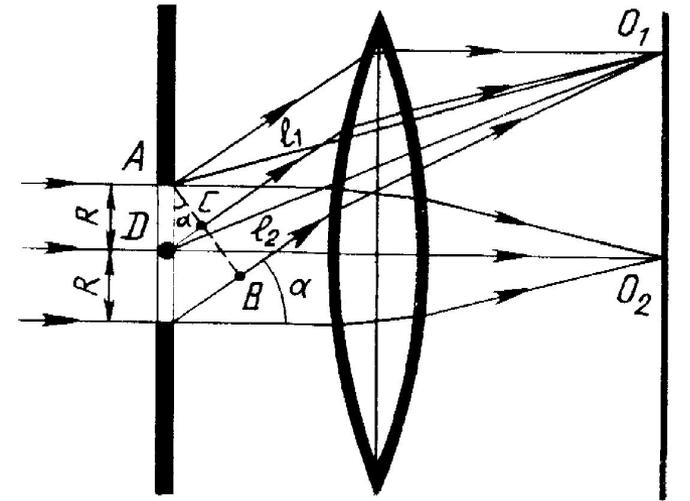
## Дифракционная решетка

- оптический прибор, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесенных на некоторую поверхность (от 0,25 до 6000 штрихов на 1 мм).



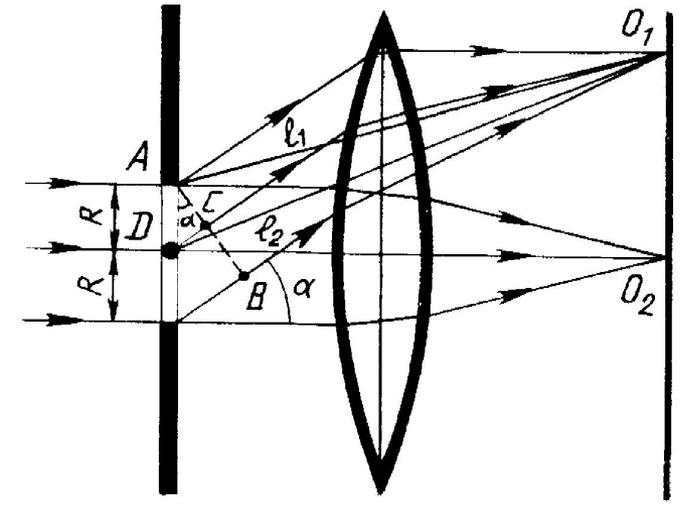
# Дифракционная решетка

- Величина  $d = a + b$  называется *постоянной* (периодом) *дифракционной решетки*, где  $a$  — ширина щели;  $b$  — ширина непрозрачной части



# Дифракционная решетка

- Угол  $\phi$  - угол отклонения световых волн вследствие дифракции.
- Наша задача - определить, что будет наблюдаться в произвольном направлении  $\phi$  - максимум или минимум

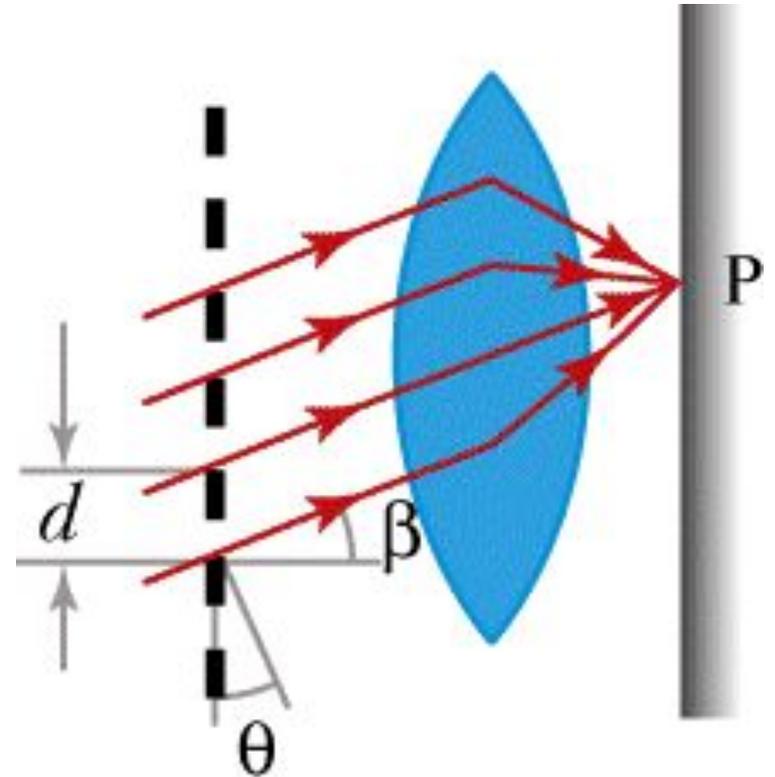


# Дифракционная решетка

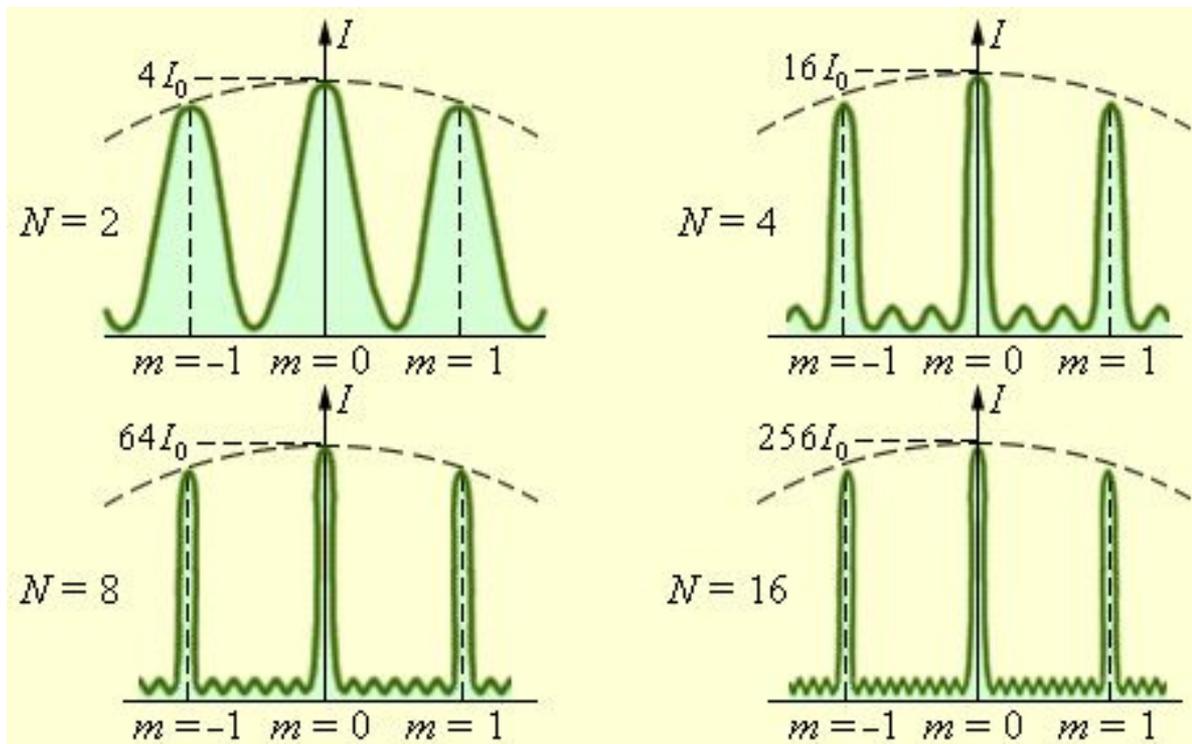
$$d \sin \varphi = k \lambda$$

- формула  
дифракционной  
решетки.

Величина  $k$  — порядок  
дифракционного  
максимума  
( равен  $0, \pm 1, \pm 2$  и т.д.)



при дифракции света на решетке главные максимумы чрезвычайно узки. Изменение остроты главных максимумов при увеличении числа щелей решетки.



*Распределение интенсивности при дифракции монохроматического света на решетках с различным числом щелей.  $I_0$  – интенсивность колебаний при дифракции света на одной щели*

# Поляризация света

В поперечной волне колебания могут происходить в любых направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Если направления колебаний при этом беспорядочно меняются, но амплитуды их во всех направлениях одинаковы, то такая волна называется **естественной**.

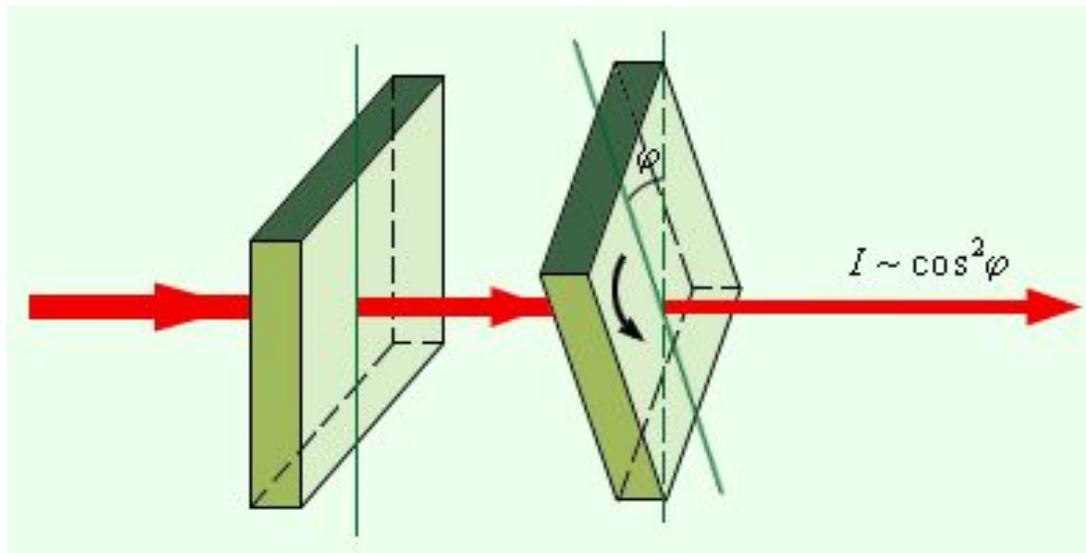
Если колебания происходят только в одном постоянном направлении, то такая волна называется **поляризованной**. Если колебания происходят в различных направлениях, но в определенных направлениях амплитуды колебаний больше, чем в других – **частично поляризованная** волна.

Искусственную поляризацию можно осуществить, пропуская волну через **поляризатор**.

В 1809 году французский инженер [Э. Малюс](#) открыл закон, названный его именем. В опытах Малюса свет последовательно пропусклся через две одинаковые пластинки из турмалина (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски). Пластинки можно было поворачивать друг относительно друга на угол  $\varphi$

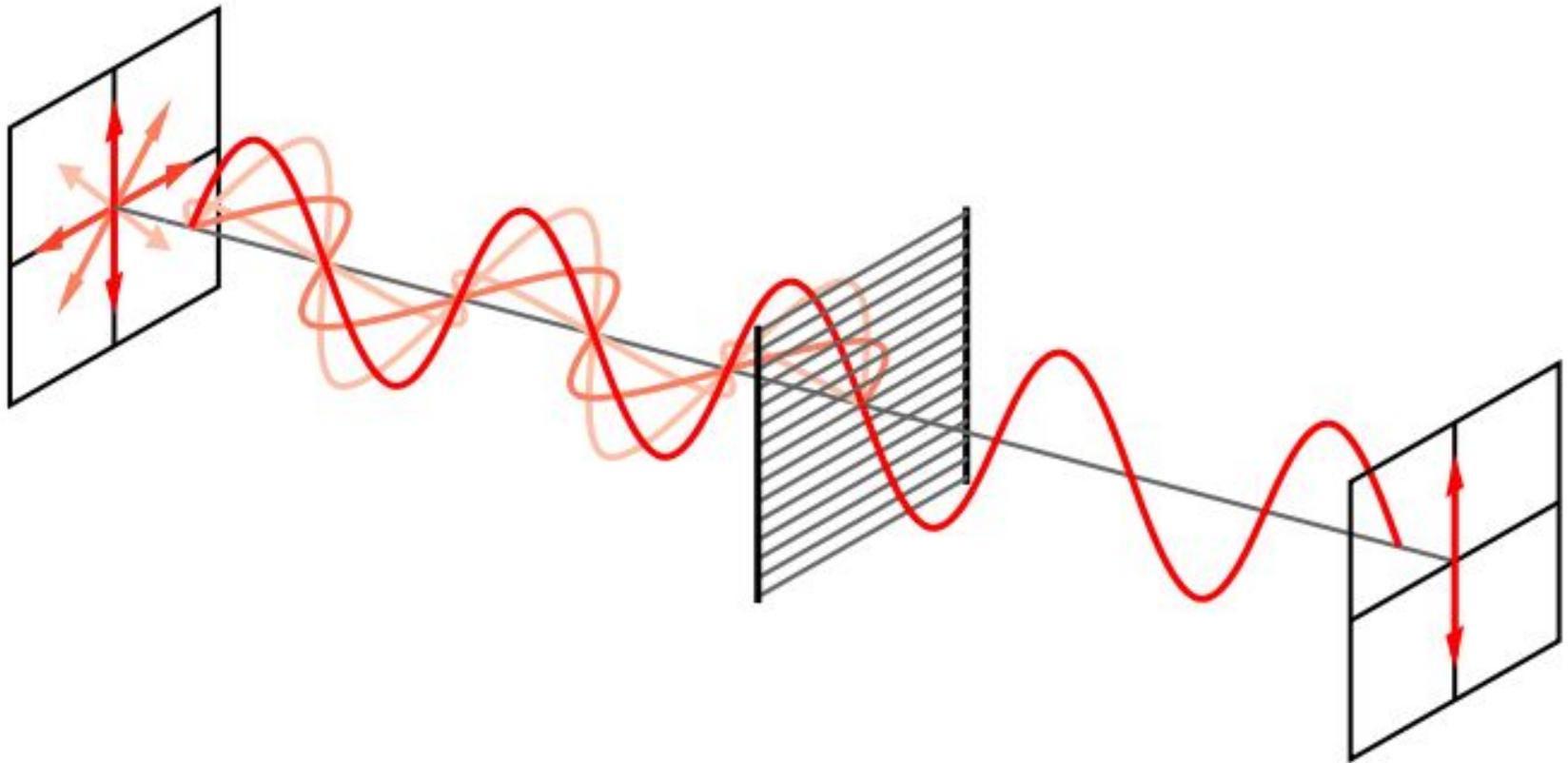
Интенсивность прошедшего света оказалась прямо пропорциональной  $\cos^2 \varphi$ :

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$



# Поляризатор

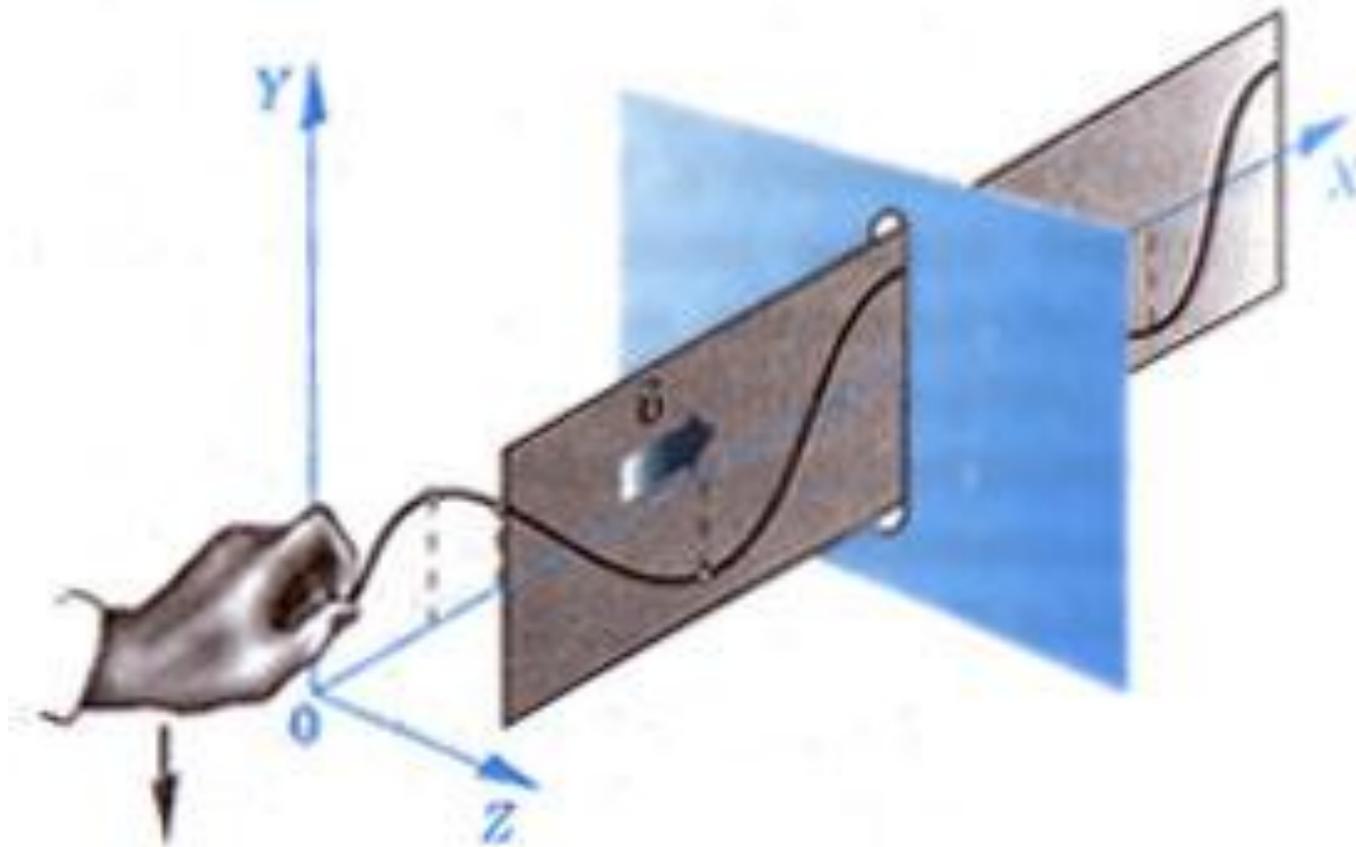
Поляризатор, устройство для получения полностью или частично поляризованного оптического излучения из излучения с произвольными поляризационными характеристиками .



(Поляризатор -пластина по середине)

# Как действует поляризатор

Этот прибор свободно пропускает те волны которые параллельны плоскости поляризации.

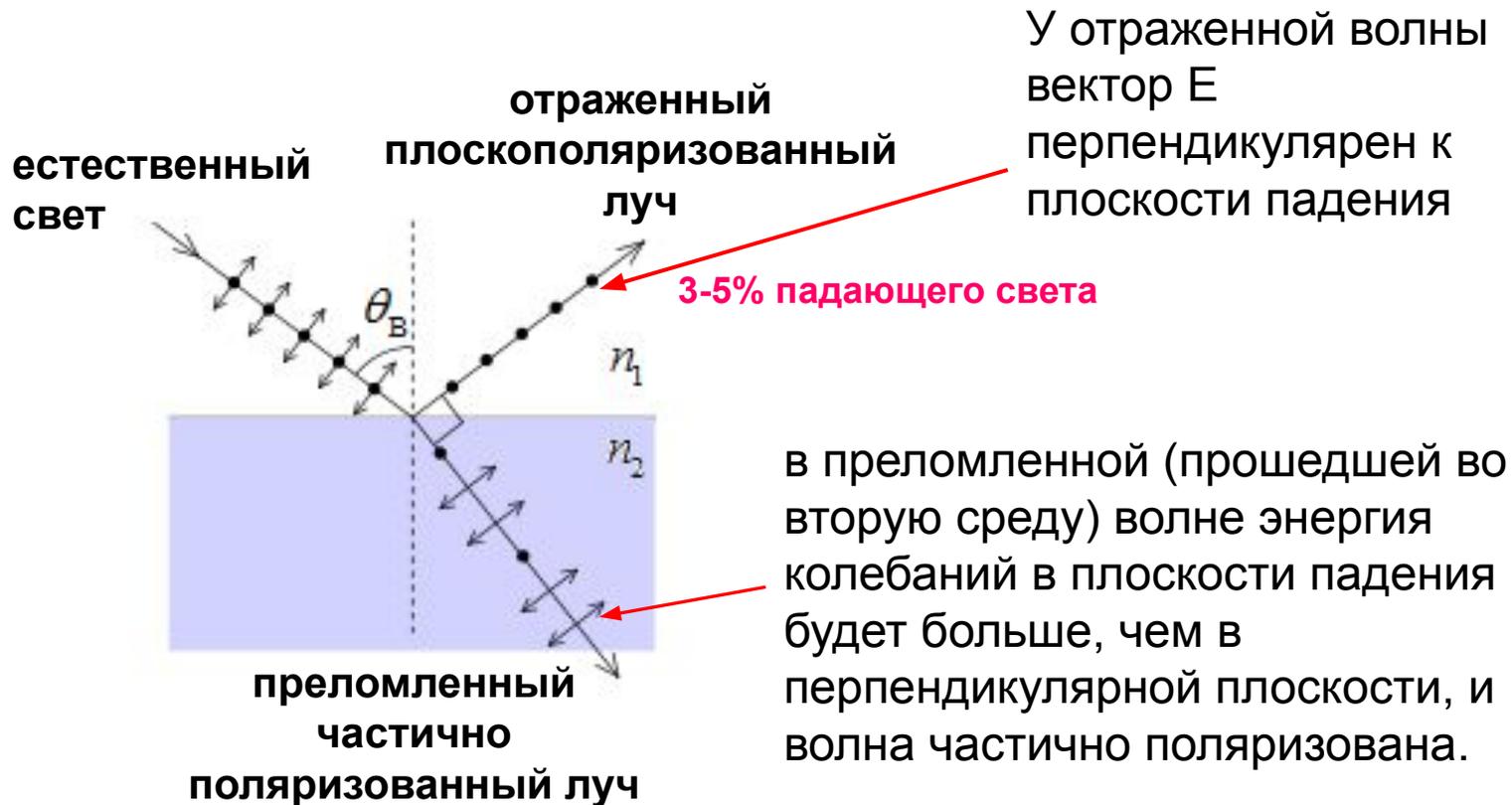


## Поляризация при отражении и преломлении.

Если естественный свет падает на отражающую поверхность диэлектрика (стекла, слюды и т. п.) под углом  $\alpha$ , удовлетворяющим условию Брюстера:

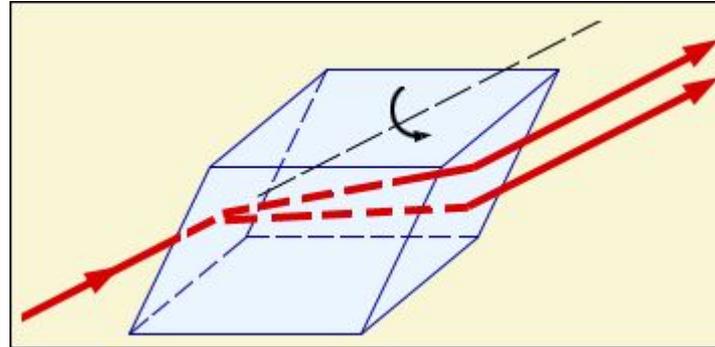
$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{n_2}{n_1}$$

то отраженная волна оказывается плоскополяризованной



## Поляризация при двойном лучепреломлении в кристаллах

Обыкновенный и необыкновенный лучи имеют в кристалле различные скорости распространения, следовательно, различные показатели преломления  $n_o$  и  $n_e$ ; этим объясняется двойное лучепреломление в точке падения волны на грань призмы



Это явление наблюдается в **оптически анизотропной среде**, если ее оптические свойства (скорость распространения света или показатели преломления) различны в различных направлениях.

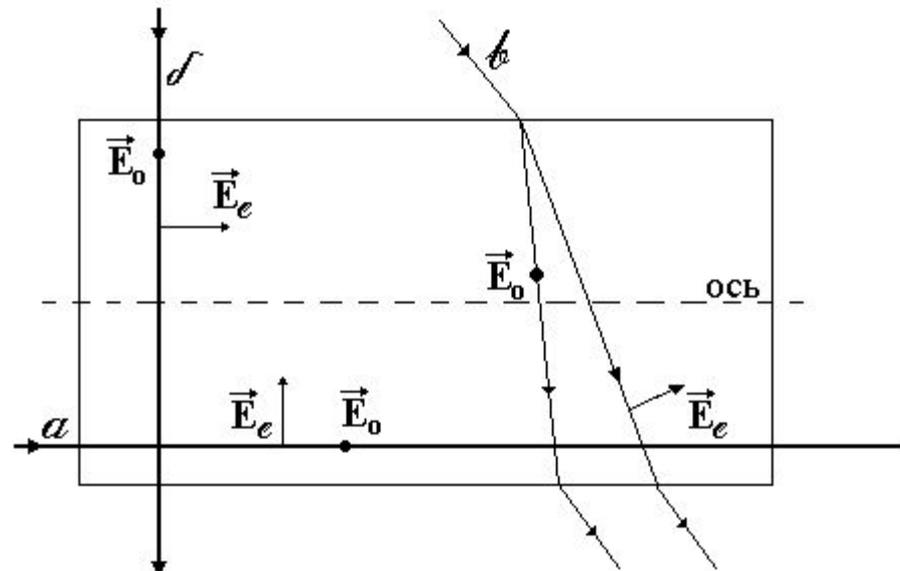
в кристаллах существует одно или несколько направлений, вдоль которых скорость света не зависит от ориентировки вектора  $E$ . Эти направления называются **оптическими осями** кристалла.

Так как вектор  $E$  перпендикулярен к своему лучу, то при распространении света вдоль оптической оси вектор  $E$  при всех его различных ориентировках в пространстве всегда перпендикулярен также и к оптической оси.

Плоскость, проходящая через данный луч и оптическую ось кристалла - **главная плоскость**. В кристаллах различают:

- 1) обыкновенные лучи, у которых вектор  $\vec{E}$  ориентирован перпендикулярно к главной плоскости (следовательно, перпендикулярен и к оптической оси);
- 2) необыкновенные лучи, у которых вектор  $\vec{E}$  лежит в главной плоскости (следовательно, образует с оптической осью некоторые углы).

Обыкновенные лучи распространяются по всем направлениям в кристалле с одной и той же скоростью  $c_0$ . Необыкновенные лучи распространяются в кристалле с различными скоростями в зависимости от угла между вектором  $\vec{E}$  и оптической осью  $c_e$ .



**Тепловое излучение**

**Люминесценция**

Испускаемый источником свет уносит с собой энергию. В тех случаях, когда необходимая энергия сообщается нагреванием, т. е. подводом тепла, излучение называется **тепловым** или **температурным**.

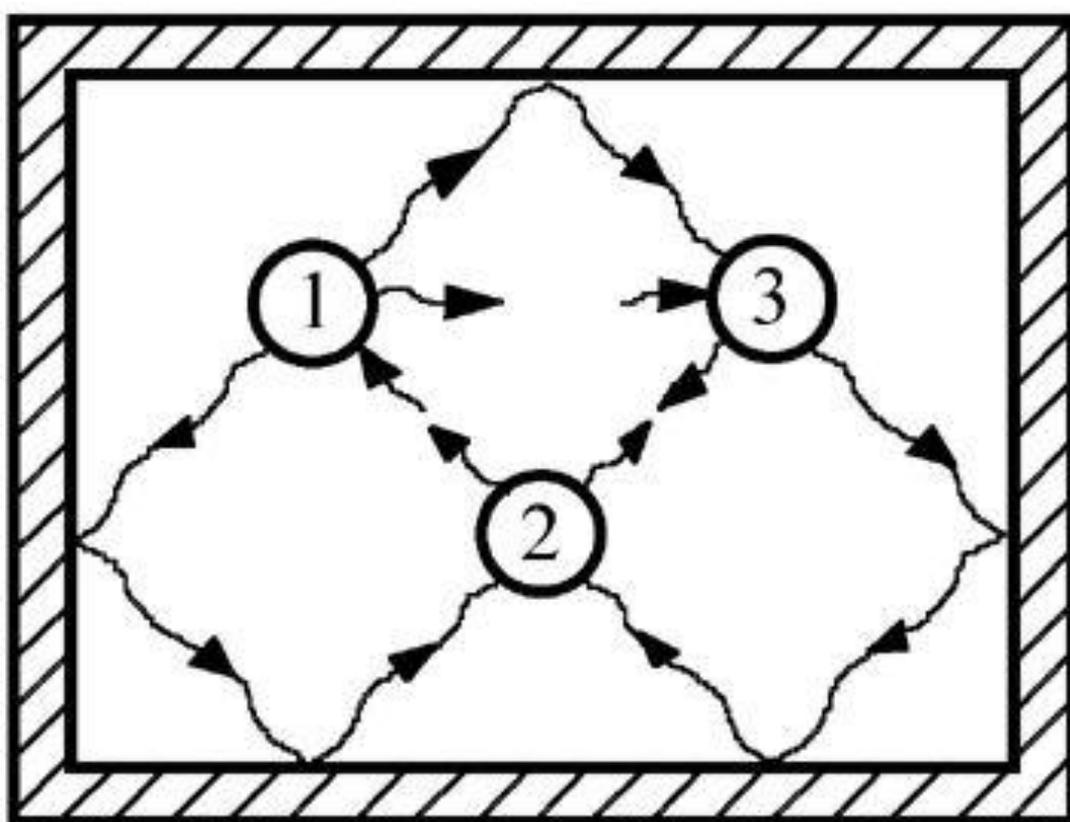
**Тепловое излучение** — это электромагнитное излучение, возбуждаемое за счет внутренней энергии тела. Если излучающее тело не получает теплоты извне, то оно охлаждается и его внутренняя энергия уменьшается.

Тепловое излучение свойственно всем телам при температурах выше абсолютного нуля.



Все виды свечения, возбуждаемые за счет любого вида энергии, кроме внутренней (тепловой), объединяются под общим названием **люминесценция**.

Если в замкнутую полость с зеркально отражающими стенками поместить несколько тел, нагретых до различной температуры, то, как показывает опыт, такая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. Тела обмениваются энергией только путем испускания и поглощения лучистой энергии. В состоянии равновесия процессы испускания и поглощения энергии каждым телом в среднем компенсируют друг друга, и в пространстве между телами плотность энергии излучения достигает определенного значения, зависящего только от установившейся температуры тел.



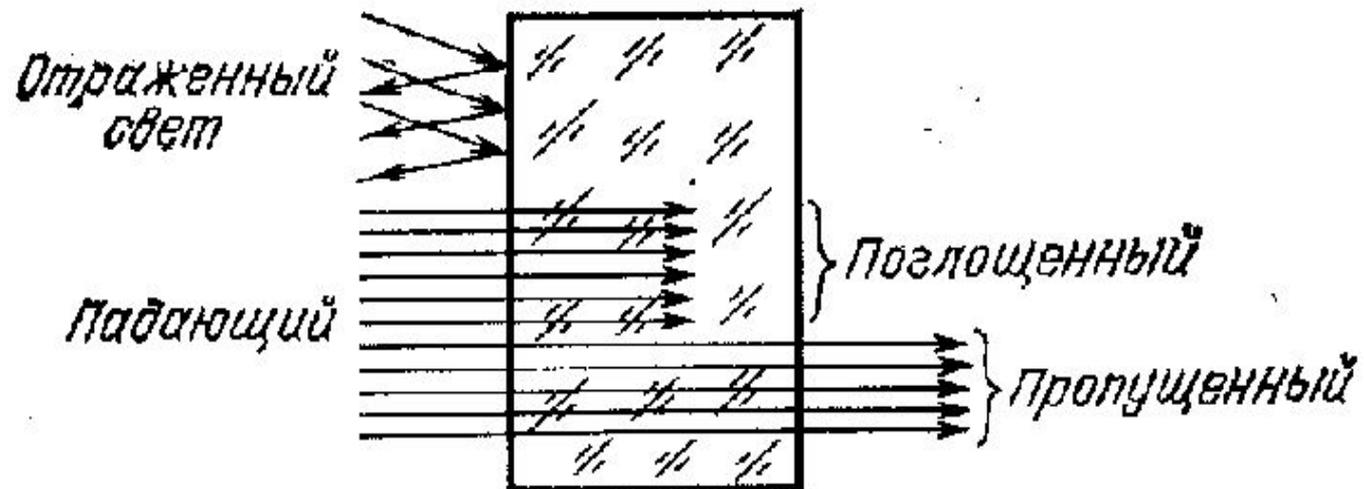
Это излучение, находящееся в термодинамическом равновесии с телами, имеющими определенную температуру, называется **равновесным излучением.**

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

1) часть потока **отражается** обратно в окружающее пространство. При этом происходит или зеркальное отражение, или поверхностное рассеяние потока в зависимости от структуры поверхности тела

Величина  $\rho$ , равная отношению лучистого потока  $P_\rho$ , отраженного телом, к лучистому потоку  $P$ , падающему на поверхность тела, называется **коэффициентом отражения**

$$\rho = \frac{P_\rho}{P}$$

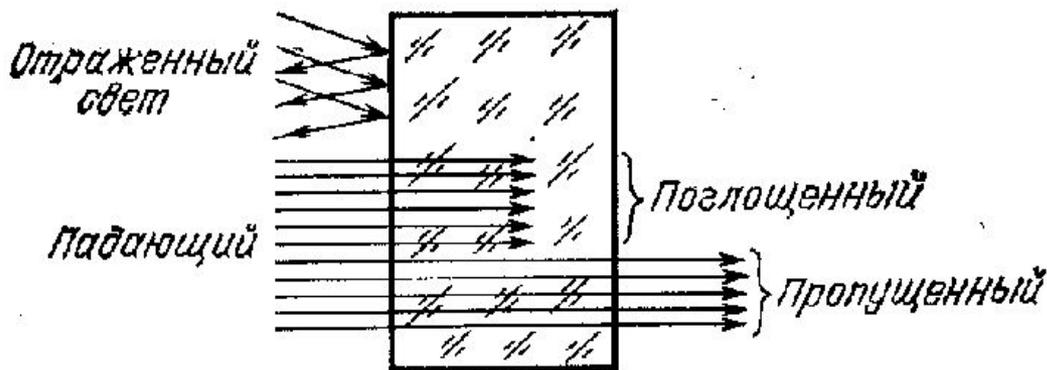


При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

2) часть потока пройдет через тело

Величина  $\tau$ , равная отношению лучистого потока  $P_\tau$ , прошедшего через данное тело (среду), к лучистому потоку  $P$ , падающему на данное тело (среду), называется *коэффициентом пропускания*:

$$\tau = \frac{P_\tau}{P}$$



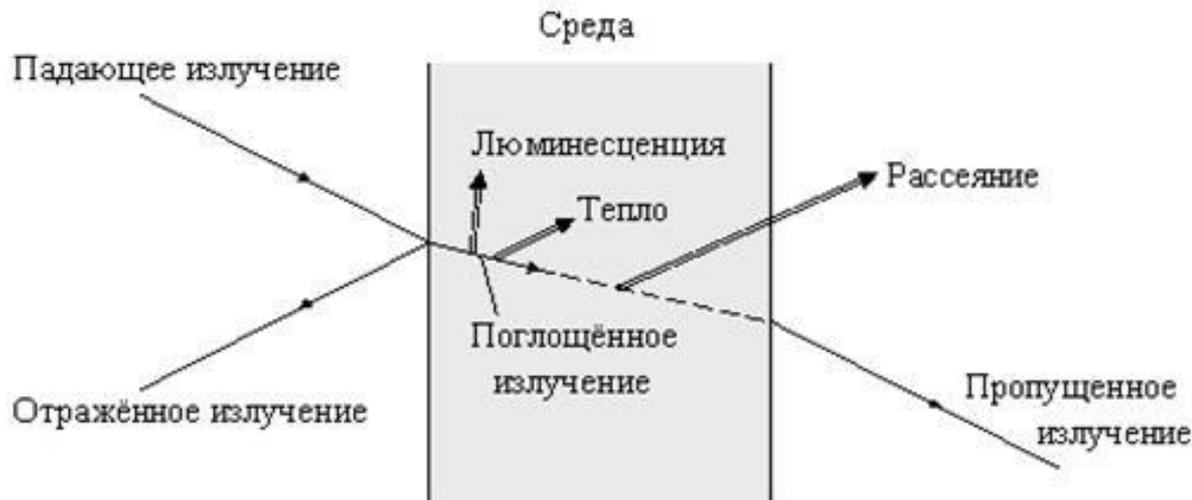
Коэффициент пропускания характеризует прозрачность тела (среды) по отношению к падающему излучению.

При падении на поверхность какого-либо тела лучистого потока наблюдаются следующие явления:

3) оставшаяся часть потока будет поглощена телом, и его энергия превратится в другие виды энергии.

Величина  $\alpha$ , равная отношению лучистого потока  $P_\alpha$ , поглощенного телом, к лучистому потоку, падающему на тело, называется **коэффициентом поглощения** тела:

$$\alpha = \frac{P_\alpha}{P}$$



Из закона сохранения энергии следует, что

$$P_{\rho} + P_{\tau} + P_{\alpha} = P \quad \text{тогда}$$

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

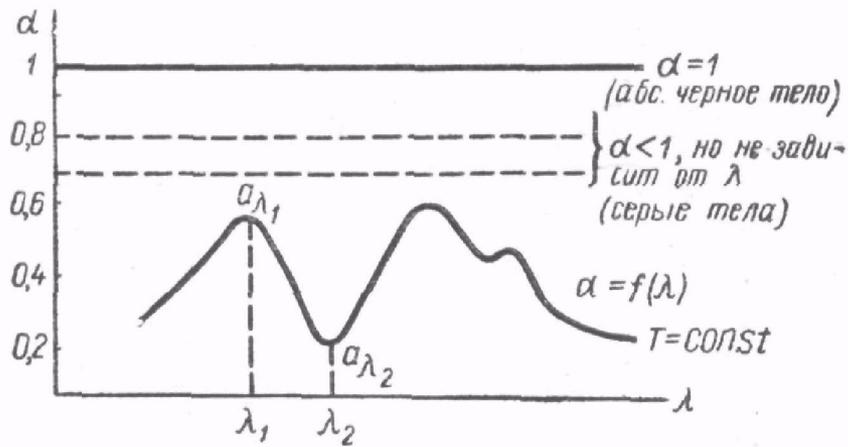
Измерения показывают, что коэффициенты поглощения, пропускания и отражения тела зависят от длины волны  $\lambda$  падающего излучения и от *температуры тела*

$$\rho = F(\lambda, T); \quad \tau = \varphi(\lambda, T); \quad \alpha = f(\lambda, T);$$

Для монохроматического излучения они называются:

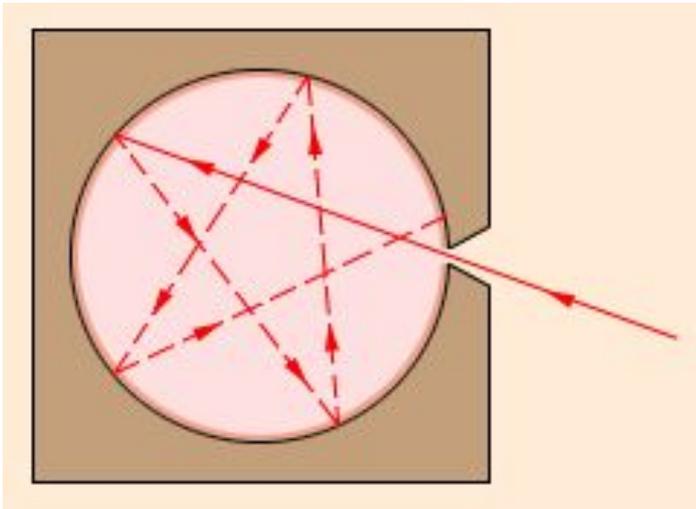
спектральным коэффициентом *поглощения*,  $\alpha_{\lambda}$   
спектральным коэффициентом *пропускания*  $\tau_{\lambda}$   
спектральным коэффициентом *отражения*  $\rho_{\lambda}$

(для данной температуры тела)



Тело, которое поглощает полностью все падающие на него излучения любой длины волны при любой температуре, называют **абсолютно черным** (точнее **абсолютно поглощающим**) **телом**. Его коэффициент поглощения для всех длин волн при любых температурах равен единице.

Тела, для которых коэффициент поглощения меньше единицы, но не зависит от длины волны называются «**серыми**». Для них  $\alpha$  выражается прямой, ордината которой меньше единицы.



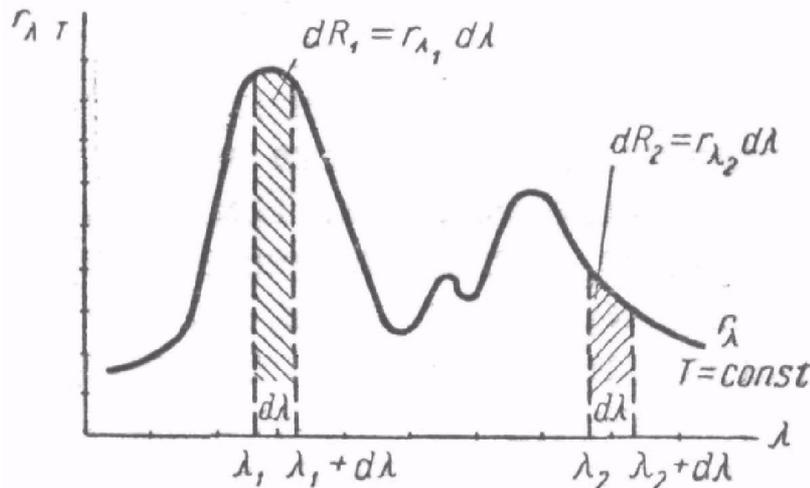
Абсолютно черных тел в природе нет. Моделью абсолютно черного тела является полость с очень малым отверстием.

Нагретые тела излучают энергию в виде электромагнитных волн различных длин (инфракрасные, видимые, ультрафиолетовые лучи и др.).

Количество  $R$  энергии, излучаемой с  $1\text{ м}^2$  поверхности тела в пределах телесного угла  $2\pi$  за одну секунду по всем длинам волн, называется **энергетической светимостью тела** (интегральной плотностью излучения).

Энергия излучения распределяется неравномерно между всеми длинами волн, которые испускаются нагретым телом.

Откладывая по оси ординат величину  $r_{\lambda T} = \Delta R / \Delta \lambda$ , мы получим представление о распределении энергии по длинам волн нагретого тела.



Величина  $r_{\lambda T}$  называется **испускательной способностью** (спектральной плотностью излучения) тела и является функцией распределения энергии по спектру.



Получение света от пламени горящей свечи основано на той же пропорциональности между испускательной и поглощательной способностями тел. В пламени имеются частицы сажи, обладающие большим поглощением; они и дают яркий свет. Если пламя не содержит частиц сажи (например, пламя газовой горелки), оно не будет светиться.



# Законы излучения абсолютно черного тела

Энергетическая светимость абсолютно черного тела является универсальной функцией длины волны и температуры. Это значит, что спектральный состав и энергия излучения абсолютно черного тела не зависят от природы тела.

зная спектральную и интегральную плотность излучения абсолютно черного тела, можно вычислить их для любого нечерного тела, если известен коэффициент поглощения последнего, который определяют экспериментально.

## 1. Закон Стефана — Больцмана:

В 1879 году Йозеф Стефан на основе анализа экспериментальных данных пришел к заключению, что **интегральная светимость  $R(T)$  абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры  $T$ :**

$$R = \sigma T^4$$

Несколько позднее, в 1884 году, Л. Больцман теоретически получил эту зависимость из термодинамических соображений.

Числовое значение постоянной  $\sigma$ , по современным измерениям, составляет

$$\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К}^4\text{)}.$$

## 2. Закон смещения Вина.

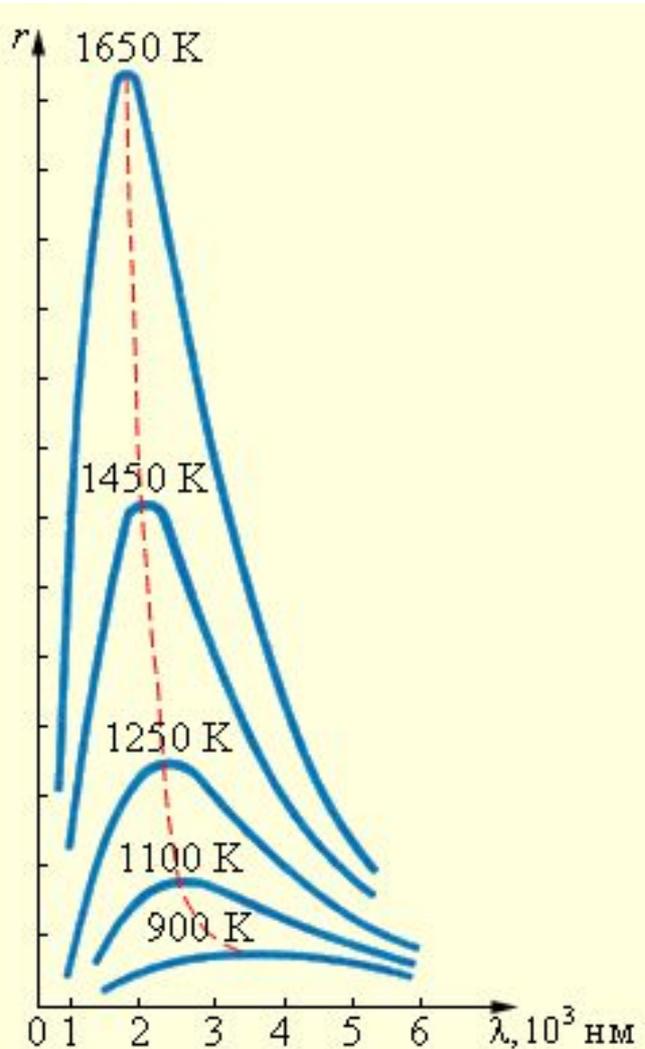
К концу 90-х годов XIX века были выполнены тщательные экспериментальные измерения спектрального распределения излучения абсолютно черного тела, которые показали, что при каждом значении температуры  $T$  зависимость  $r(\lambda, T)$  имеет ярко выраженный максимум

С увеличением температуры максимум смещается в область коротких длин волн, причем произведение температуры  $T$  на длину волны  $\lambda_m$ , соответствующую максимуму, остается постоянным:

$$\lambda_m T = b \quad \text{или} \quad \lambda_m = b / T.$$

Это соотношение ранее было получено Вином из термодинамики. Оно выражает так называемый **закон смещения Вина**: длина волны  $\lambda_m$ , на которую приходится максимум энергии излучения абсолютно черного тела, обратно пропорциональна абсолютной температуре  $T$ . Значение постоянной Вина

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$



### 3. Закон Планка

Закон Стефана - Больцмана и закон смещения Вина не решают основной задачи о том, как велика спектральная плотность излучения, приходящаяся на каждую длину волны в спектре абсолютно черного тела при температуре  $T$ . Для этого надо установить функциональную зависимость  $u$  от  $\lambda$  и  $T$ .

Основываясь на представлении о непрерывном характере испускания электромагнитных волн и на законе равномерного распределения энергии по степеням свободы (принятых в классической физике), были получены две формулы для спектральной плотности излучения абсолютно черного тела:

- 1) формула Вина  $u_{\lambda T} = \alpha \lambda^{-5} e^{-\frac{b}{\lambda T}}$ , где  $a$  и  $b$  — постоянные величины;
- 2) формула Рэлея — Джинса:  $u_{\lambda T} = 8\pi k T \lambda^{-4}$ .

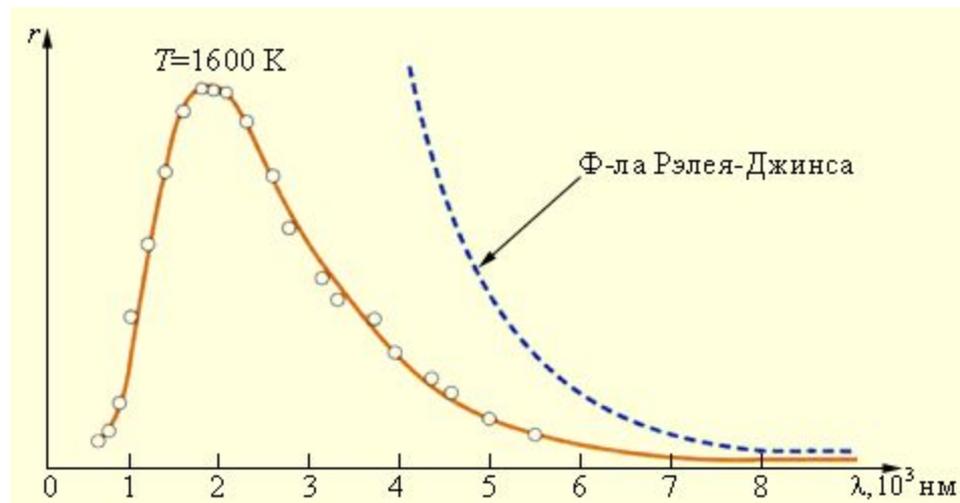
Опытная проверка показала, что для данной температуры формула Вина верна для коротких волн (когда  $\lambda T$  очень мало) и дает резкие расхождения с опытом в области длинных волн.

Формула Рэлея - Джинса оказалась верна для длинных волн и совершенно не применима для коротких

Успехи термодинамики, позволившие теоретически вывести законы Стефана–Больцмана и Вина, вселяли надежду, что из термодинамических соображений удастся получить всю кривую спектрального распределения излучения черного тела  $r(\lambda, T)$ . В 1900 году эту проблему пытался решить знаменитый английский физик Д. Релей, который в основу своих рассуждений положил теорему классической статистической механики о **равномерном распределении энергии по степеням свободы в состоянии термодинамического равновесия**. Эта теорема была применена Релеем к равновесному излучению в полости. Несколько позже эту идею подробно развил Джинс. Таким путем удалось получить зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны  $\lambda$  и температуры  $T$ :

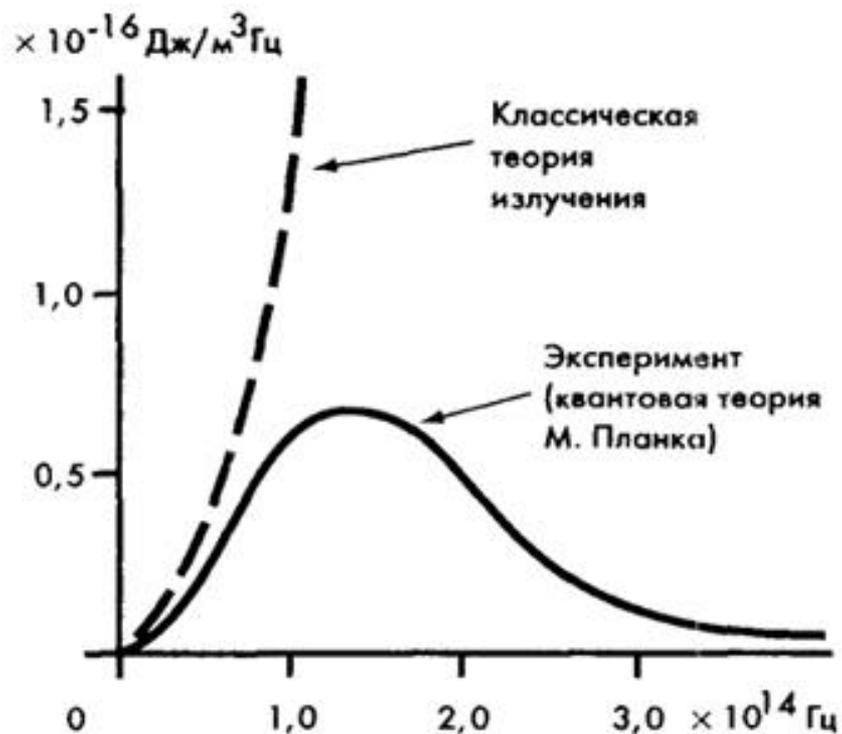
$$r(\lambda, T) = 8\pi k T \lambda^{-4}.$$

Это соотношение называют **формулой Релея–Джинса**. Она согласуется с экспериментальными данными только в области достаточно длинных волн



## «Ультрафиолетовая катастрофа».

Интегрирование формулы Релея-Джинса по  $\lambda$  в пределах от 0 до  $\infty$  дает для равновесной плотности энергии  $u(T)$  бесконечно большое значение. Т.е. из нее следует абсурдный вывод о том, что интегральная светимость  $R(T)$  черного тела должна обращаться в бесконечность, а, следовательно, равновесие между нагретым телом и излучением в замкнутой полости может установиться только при абсолютном нуле температуры.



Этот результат противоречит опыту и получил название «УФ катастрофа» (Эренфест).

Стало ясно, что решить задачу о спектральном распределении излучения абсолютно черного тела в рамках существующих теорий невозможно. Эта задача была успешно решена М. Планком на основе новой идеи, чуждой классической физике.

Планк пришел к выводу, что процессы излучения и поглощения нагретым телом электромагнитной энергии, происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями – **квантами**. Квант – это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом. По теории Планка, энергия кванта  $E$  прямо пропорциональна частоте света:

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

где  $h$  – так называемая **постоянная Планка**, равная  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Постоянная Планка – это универсальная константа, которая в квантовой физике играет ту же роль, что и скорость света в СТО

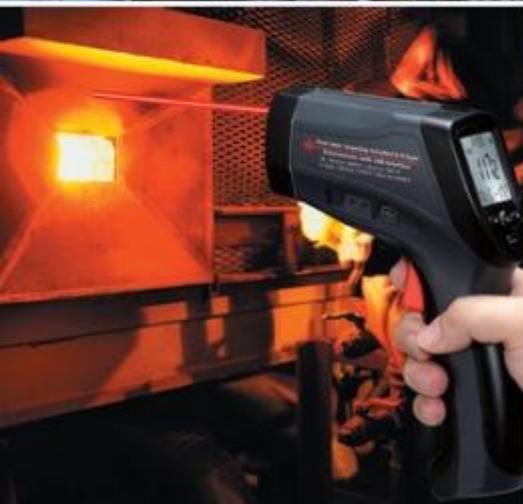
## Пирометры.

Радиационную температуру нагретых тел можно определить с помощью радиационного пирометра (рис. 6).

Рис. 6. Устройство радиационного пирометра

Изображение удаленного нагретого источника  $I$  проецируется с помощью объектива  $L$  на приемник  $\Pi$  так, чтобы изображение излучателя полностью перекрывало приемник.

# Пирометры.



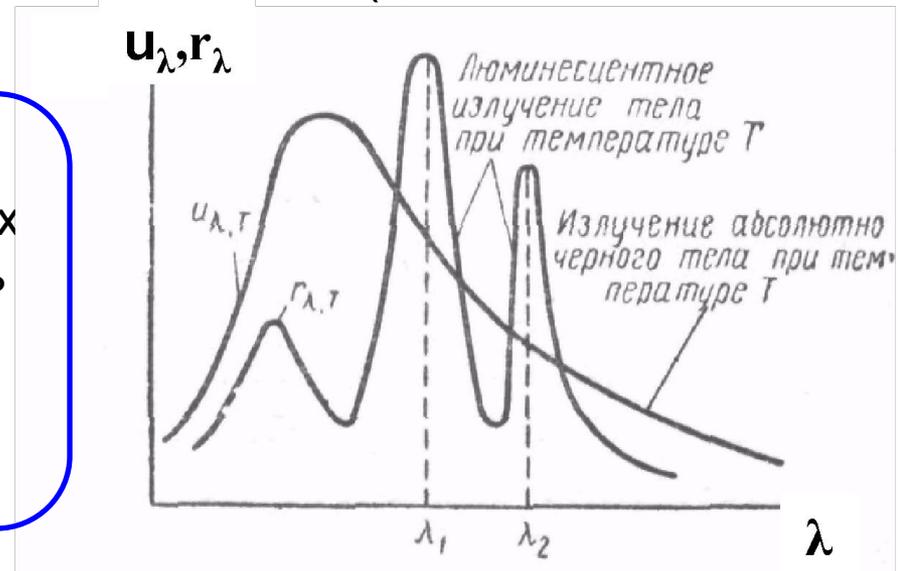
## Люминесцентное излучение

Некоторые вещества при их облучении (видимым, ультрафиолетовым, рентгеновским или гамма-излучением) начинают испускать собственное излучение, спектральный состав которого отличается от спектрального состава падающего излучения и определяется только химическим составом и молекулярной структурой этих веществ.

Этот вид свечения называется **люминесцентным излучением**, или **люминесценцией**. Оно имеет следующие особенности:

**1)** при одной и той же температуре люминесцентное свечение имеет большую интенсивность по сравнению с тепловым (для того же спектрального интервала).

если спектральная плотность излучения какого-либо тела превышает на отдельных участках спектра спектральную плотность излучения абсолютно черного тела, то на этом участке излучение не тепловое, а люминесцентное



2) люминесцентное свечение вещества продолжается некоторое время после прекращения облучения.

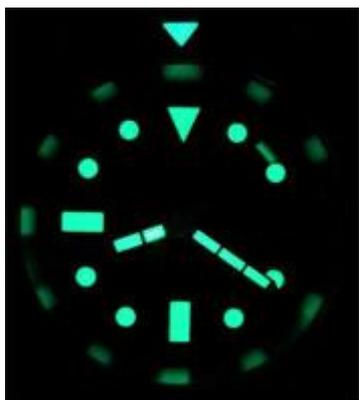
3) люминесценция есть собственное излучение тел; каждое вещество обладает определенным характерным для него спектром люминесценции

Объединяя все эти признаки, С.И. Вавилов дал следующее определение люминесценции:

*люминесценция есть оптическое излучение тела, являющееся избытком над тепловым излучением того же тела в данной спектральной области при той же температуре, имеющее длительность свечения более  $10^{-10}$  с, т.е. не прекращающееся сразу после устранения вызвавшей его причины*

По **способу возбуждения** различают несколько видов люминесценции:

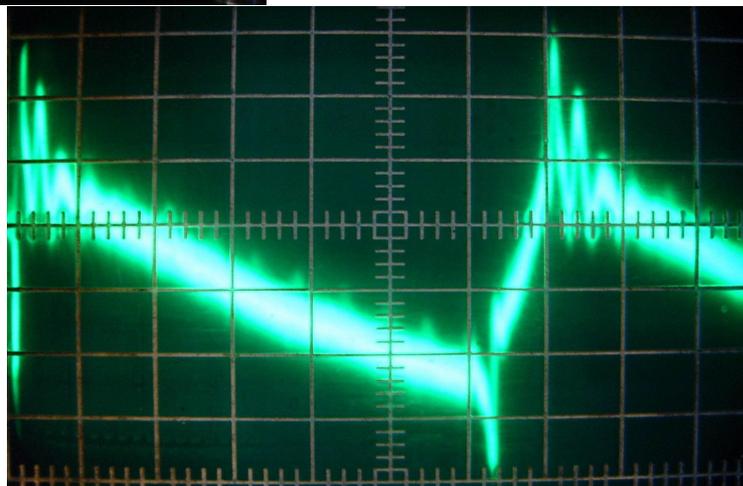
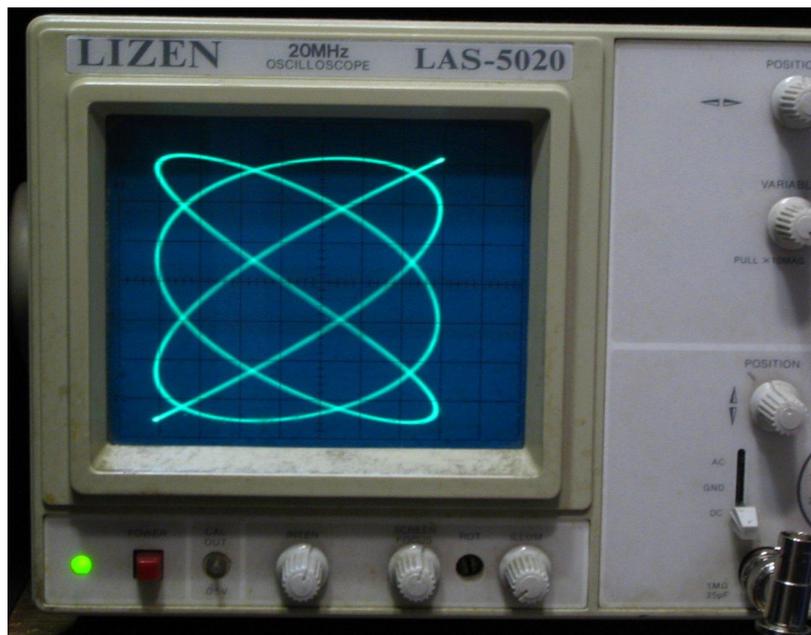
1) свечение, возникающее под действием светового излучения как видимого, так и более коротковолнового (**фотолюминесценция**). Сюда относится свечение специальных красок — фосфоров или люминофоров, при облучении их видимыми или ультрафиолетовыми лучами и т. д.;



2) свечение, возникающее при электрических разрядах (**электрOLUMИнесценция**); например, свечение газов в газосветных трубках, свечение некоторых веществ при помещении их в переменное электрическое поле;



3) свечение, возбуждаемое ударами электронов (**катодолюминесценция**). Таково свечение экрана осциллографа и телевизора, свечение минералов и т. д.;



4) свечение, вызванное химическими превращениями внутри тела, называется **хемилюминесценцией**. Например, свечение фосфора, гниющего дерева, свечение морских животных, светляков, световые явления при некоторых химических реакциях



# фотолюминесценция

Спектры фотолюминесценции отличаются от спектров возбуждающего излучения.

Согласно **правилу Стокса**, спектр люминесценции в целом и его максимум всегда оказываются в области более длинных волн по сравнению со спектром поглощенного излучения, способного вызвать эту люминесценцию.

Энергия падающего фотона  $h\nu_0$  частично расходуется на процессы внутри вещества, не приводящие к излучению; оставшаяся часть расходуется на возбуждение молекулы или атома, после которого происходит излучение фотона с энергией  $h\nu$ .

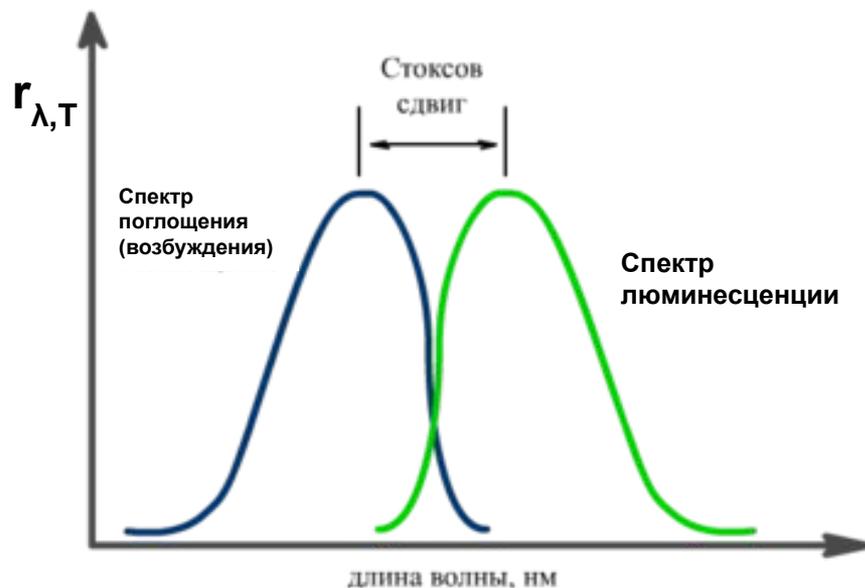
$$h\nu_0 = h\nu_1 + A$$

$A$  - часть энергии падающего фотона, не приводящая к излучению

$$\nu_1 < \nu_0$$

$$\lambda_1 > \lambda_0$$

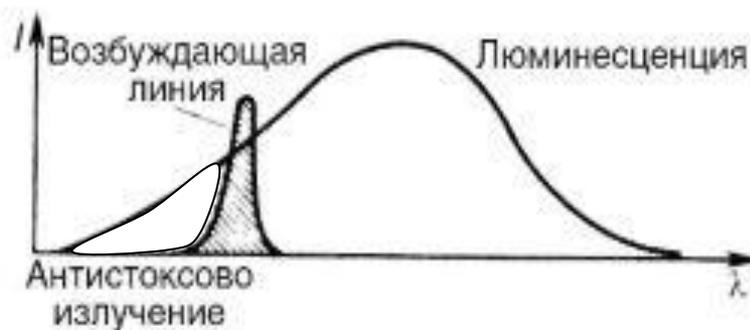
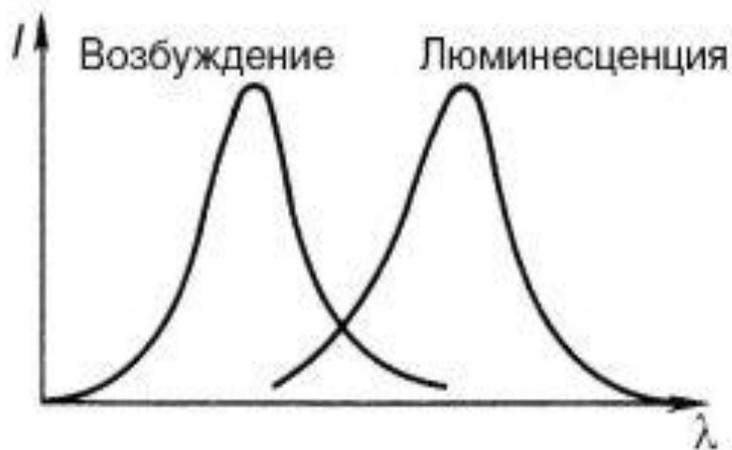
испускаемый при люминесценции свет должен иметь более длинные волны, чем поглощаемый.



При  $A=0$

$$\lambda_1 = \lambda_0$$

В редких случаях, когда фотон поглощается уже возбужденной молекулой, и испускаемый фотон уносит с собой часть энергии молекулы. При этом испускаемый люминесценцией свет будет иметь большую частоту (меньшую длину волны); в этом случае нарушается правило Стокса (**«антистоксова область»**).



Энергия, затраченная на возбуждение вещества, превращается в энергию излучения; при этом часть энергии рассеивается в веществе, не вызывая излучения.

Процессы, приводящие к рассеиванию энергии, называются **тушением люминесценции**

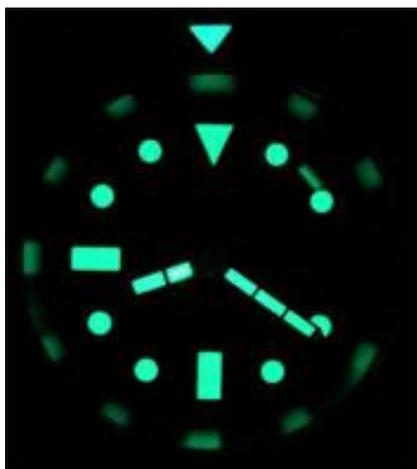
## Практические применения люминесценции

1) Люминесцентная лампа представляет собой стеклянную трубку, наполненную парами ртути и аргоном, стенки лампы покрыты изнутри тонким слоем люминесцирующего состава — люминофором. Изменяя состав люминофоров, можно подобрать спектральный состав излучения люминесцентных ламп в соответствии с требованиями эксплуатации.



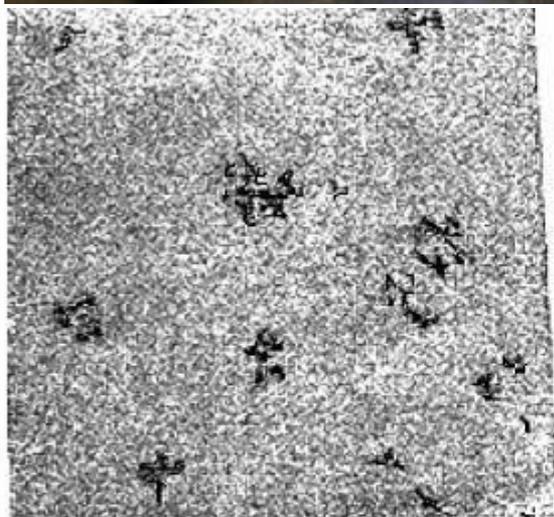
## Практические применения люминесценции

2) Применение люминесценции для создания слабых освещенностей (аварийное и маскировочное освещение).



# Практические применения люминесценции

3. Дефектоскопия. Поверхность детали покрывают люминесцирующей жидкостью, затем жидкость убирают и она остается только в дефектах (поры, трещины и т.д.). При освещении детали УФ или синим светом, дефекты начинают светиться



# Практические применения люминесценции

4) Люминесцентный анализ. Так как люминесцентное излучение имеет спектр, характерный для каждого вещества, то можно обнаружить и исследовать различные объекты с помощью люминесценции

