

**Министерство здравоохранения Республики Беларусь**  
**УО «Гомельский государственный медицинский университет»**  
*(кафедра медицинской и биологической физики)*

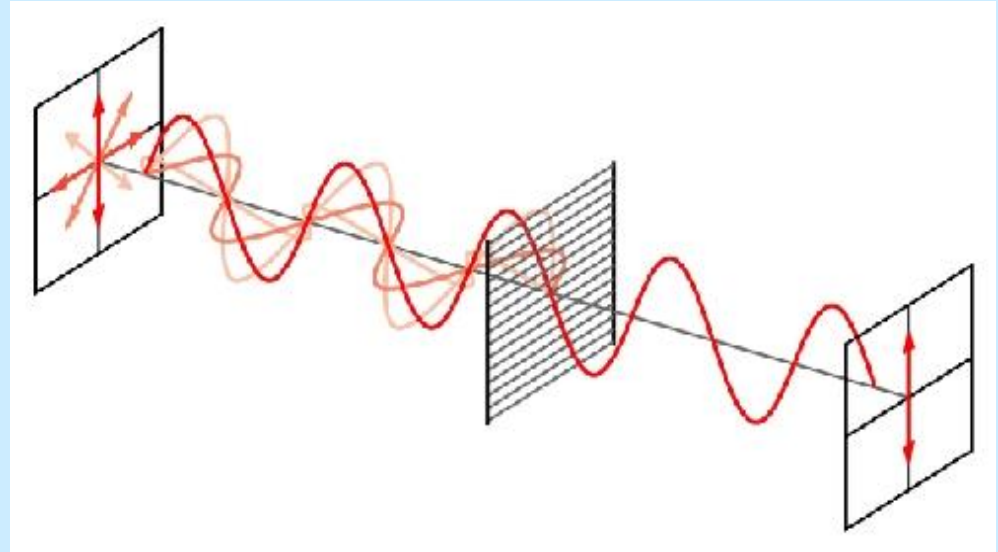
**Оптические методы исследования и  
воздействия излучением оптического  
диапазона на биологические  
объекты. Оптическая активность**

**Петрова Е.С., к.ф-м.н, доцент**  
**кафедра медицинской и биологической физики**

**Petrova E.S., PhD**  
**Department of Medical and Biological Physics**

1. Электромагнитные волны.  
Световая волна.  
Поперечность электромагнитных волн.
2. Законы геометрической оптики.  
Полное внутреннее отражение.
3. Диапазоны электромагнитных волн. Интерференция.  
Дифракция.
4. Поляризация света.
5. Получение и анализ плоскополяризованного света,  
Закон Малюса.
6. Поляризация света при отражении от диэлектрика.  
Закон Брюстера.
7. Поляризаторы. поляризационная призма  
(призма Николя)
8. Поляризационные методы исследования биологических объектов, поляриметрия

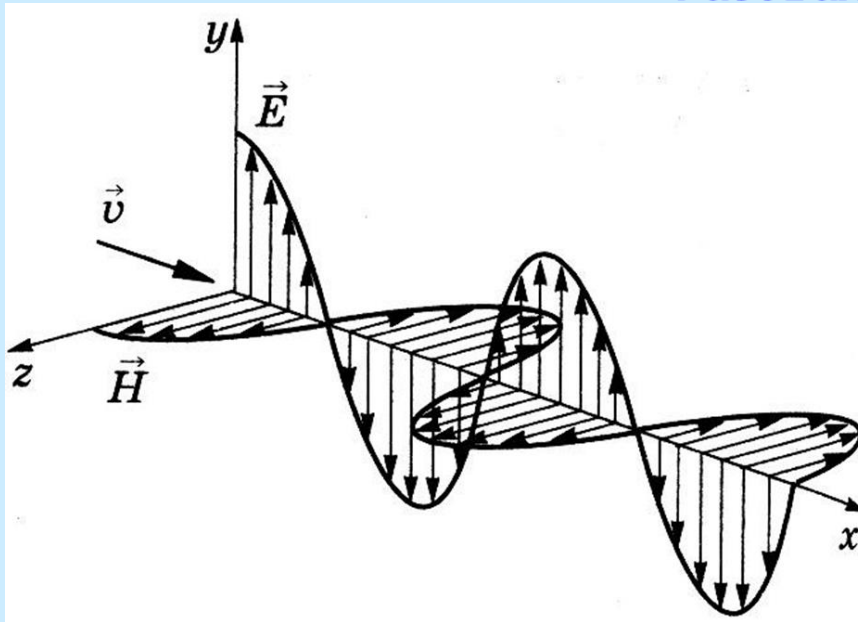
# Поляризация света



# 1. Электромагнитные волны. Световая волна

- **Электромагнитная волна** – это переменное электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью.

## Фазовая скорость электромагнитных волн



$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Ф/м} \quad \mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{Гн/м}$$

**В вакууме**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 299\,792\,458 \approx \text{м/с} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

**В электромагнитной волне колебания векторов напряженности переменного электрического поля  $\vec{E}$  и напряженности переменного магнитного поля  $\vec{H}$  взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору скорости распространения волны.**

**Электромагнитная волна**, распространяющаяся со скоростью  $v$  вдоль направления ОХ характеризуется вектором напряженности электрического поля  $E$  и вектором индукции магнитного поля  $B$

$$E = E_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right) \text{ и } B = B_0 \sin \omega \left( t - \frac{x}{v} \right)$$

$E_0$ ,  $B_0$  амплитудные значения вектора напряженности электрического поля и вектора индукции магнитного поля

$\omega = 2\pi\nu$  (rad/s) -циклическая (круговая) частота

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

**длина волны**-расстояние между двумя ближайшими точками среды, колеблющимися в одинаковой фазе (расстояние, на которое распространяются колебания за время равное одному периоду)

Поскольку практически все действия света связаны с вектором  $\vec{E}$ , его принято называть световым вектором.

В любых других средах *скорость электромагнитной волны меньше, чем в вакууме*

$$v = \frac{c}{n}$$

Величина  $n$  называется **абсолютным показателем преломления** среды и показывает, во сколько раз скорость света в данной среде меньше, чем в вакууме.

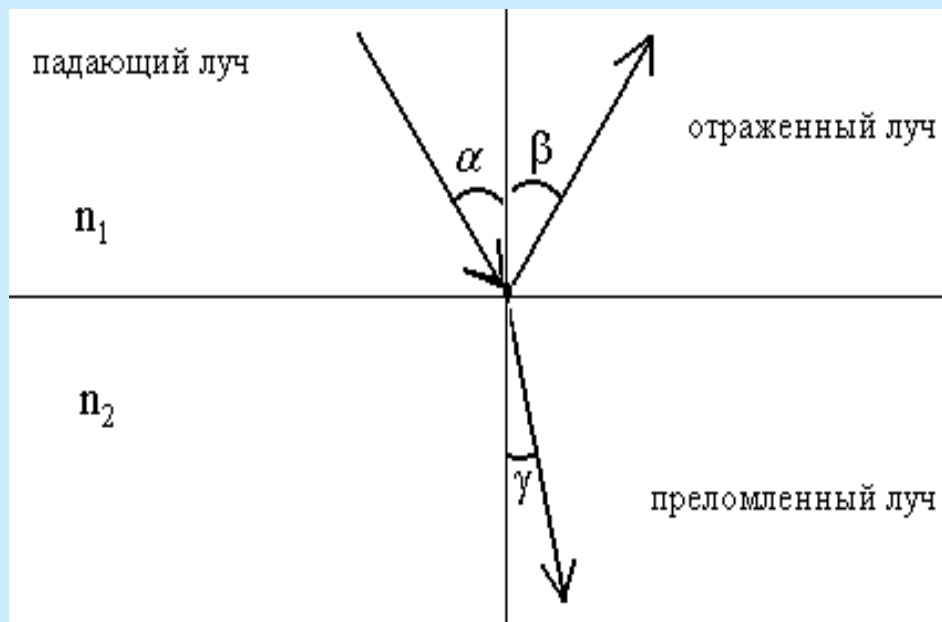
$$n = \sqrt{\epsilon\mu} = \frac{c}{v}$$

Метод измерения показателя преломления – **рефрактометрия**

применяется в лабораторной практике для **определения концентрации вещества в растворе**, установления его подлинности и чистоты.

Для всех сред, кроме вакуума и воздуха  $n > 1$ ,  $v < c$

## 2. Геометрическая оптика: законы отражения и преломления, полное внутреннее отражение



### 1. Закон прямолинейного распространения света

Свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно

### 2. Закон отражения

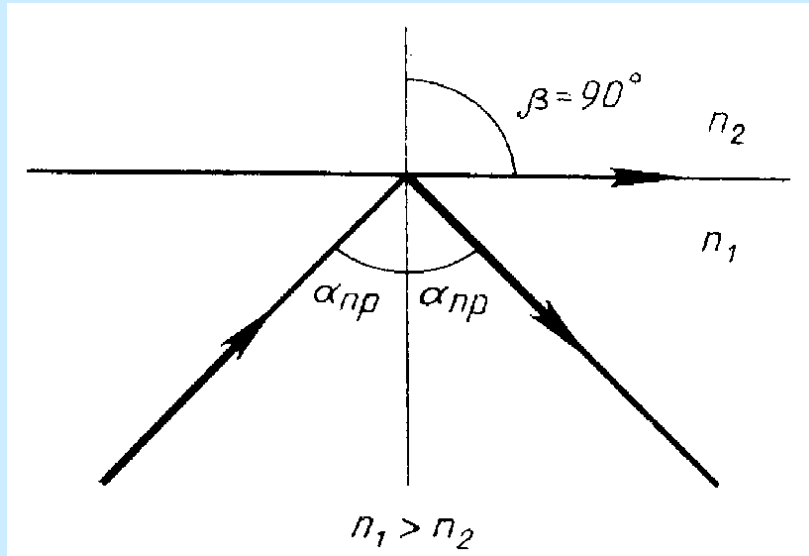
Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, проведенным к границе раздела двух сред в точке падения, **угол отражения равен углу падения**

### 3. Закон преломления

Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела двух сред в точке падения, лежат в одной плоскости, **отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

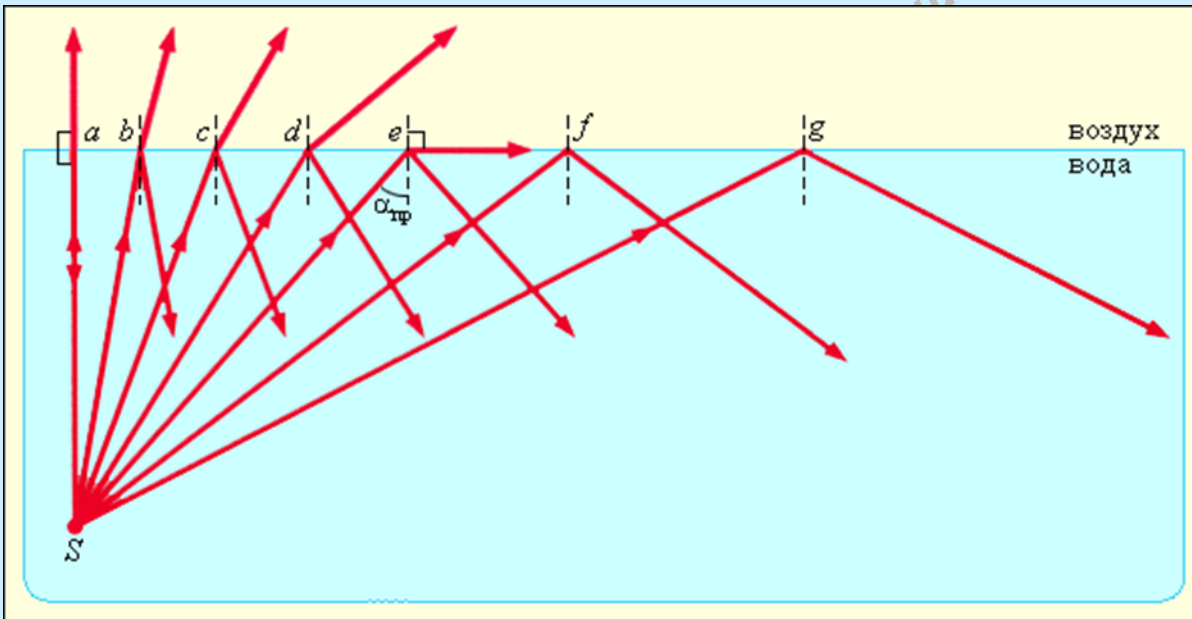
# Полное внутреннее отражение



❖ при переходе луча из **оптически более плотной среды** в **оптически менее плотную среду**  $n_1 > n_2$

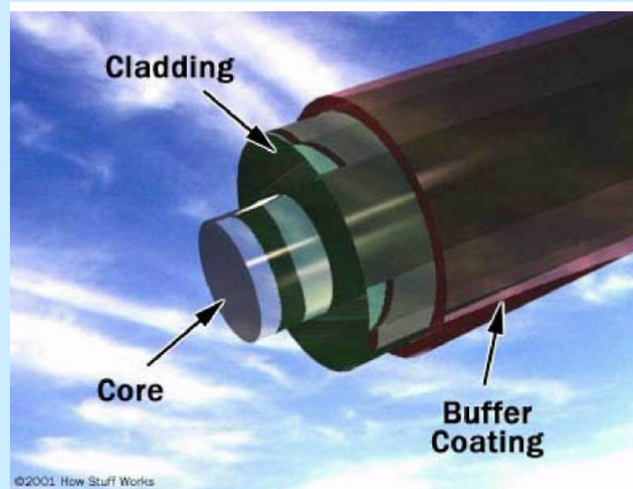
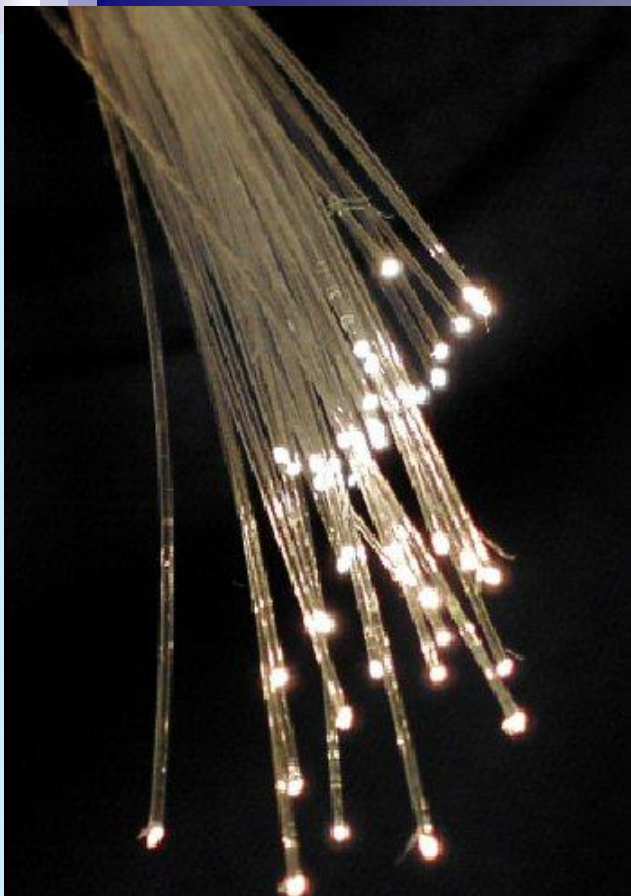
❖ При углах падения  $\alpha \geq \alpha_{кр}$

угол преломления света становится равным  $90^\circ$ , луч света не преломляется, а полностью отражается в первую среду



$$\sin \alpha_{кр} = \frac{n_2}{n_1}$$

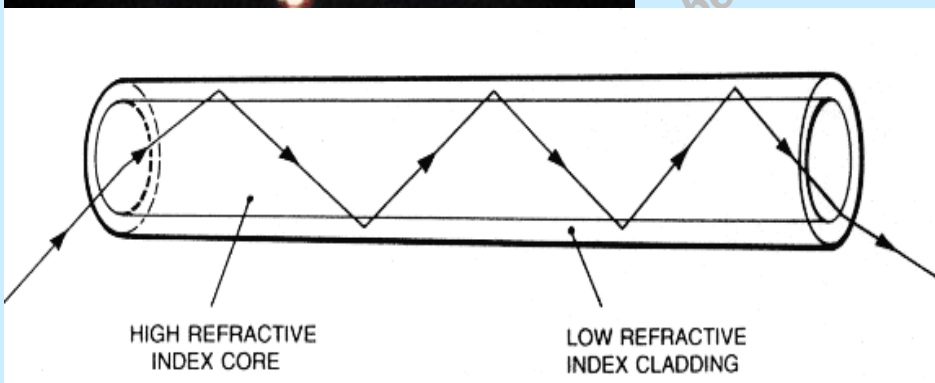
# Оптические волноводы



**Core**- сердцевина из кварцевого стекла,  
**Cladding** – оболочка из полимерного материала,  
**Buffer Coating** – защитное покрытие из полимерного материала

**Световод (волновод)** – оптический элемент, предназначенный для пространственного ограничения светового излучения, распространяющегося в заданном направлении.

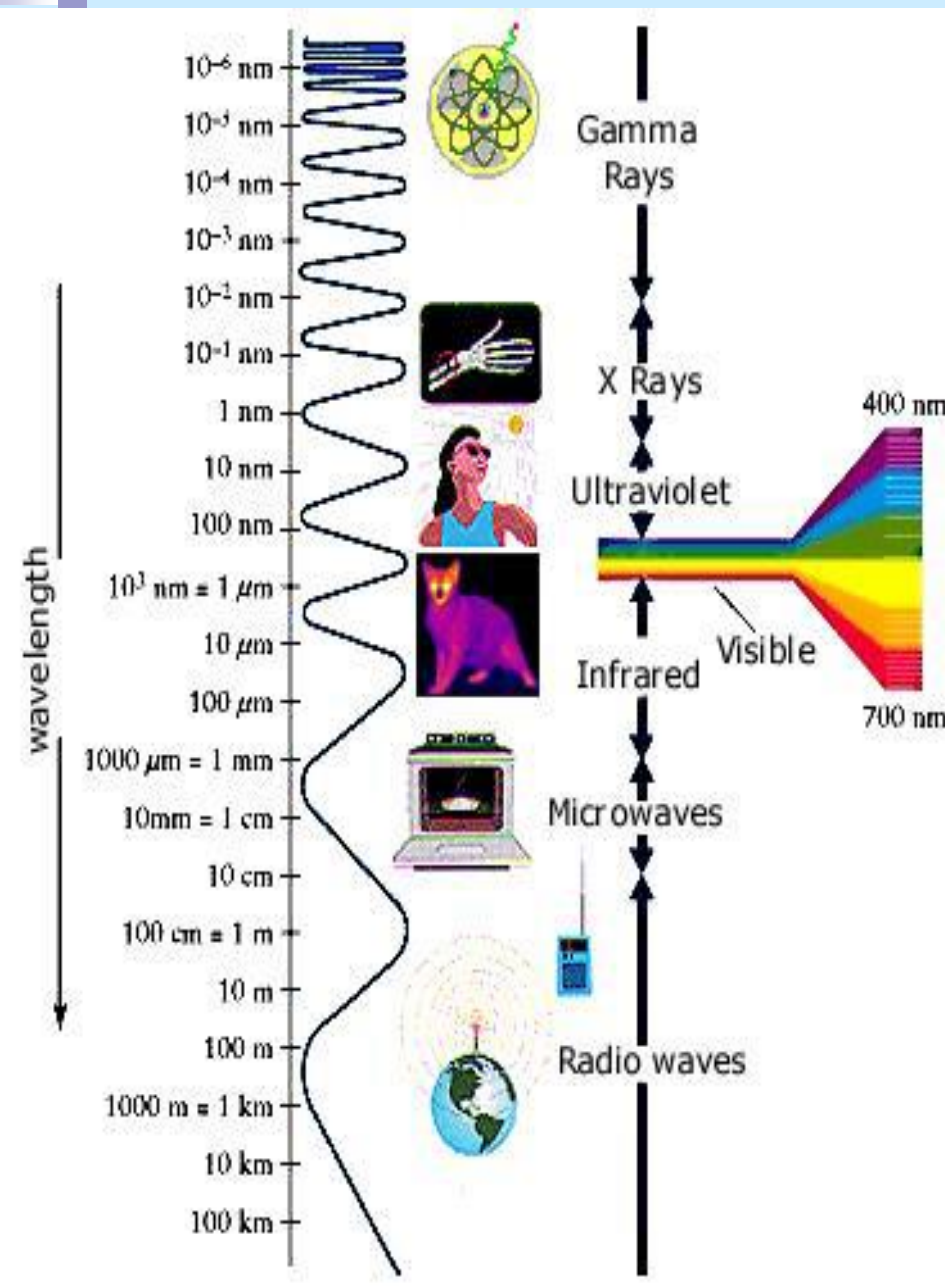
- 1) Малые потери энергии
- 2) Распространение излучения в световоде **основано на явлении полного внутреннего отражения** на границе сердцевины и оболочки
- 3) **Применение в медицине:**  
bronchoscopes (бронхоскопия),  
endoscopes (эндоскопия),  
laparoscopes (лапароскопия)





### 3. Шкала электромагнитных волн

Вид излучения	Длина волны, м	Некоторые возможные источники излучения
Радиоволны	$\lambda > 1\text{мм}$	Колебательный контур Вибратор Герца Массовый излучатель Ламповый генератор
Световые волны: инфракрасное излучение видимый свет ультрафиолетовое излучение	$780\text{ нм} < \lambda < 1\text{мм}$ $400\text{ нм} < \lambda < 780\text{нм}$ (фиол.)      (красн.) $80\text{ нм} < \lambda < 400\text{нм}$	Лампы, лазеры
Рентгеновское излучение	$10^{-5}\text{нм} < \lambda < 80\text{нм}$	Трубки Рентгена возникает при внутриатомных процессах,
Гамма-излучение	$\lambda < 10^{-5}\text{нм}$	Радиоактивный распад Ядерные процессы , $\gamma$ - излучение имеет ядерное происхождение.



❖ В **видимом диапазоне** благодаря зрению человек получает более **90 % информации об окружающем его мире**

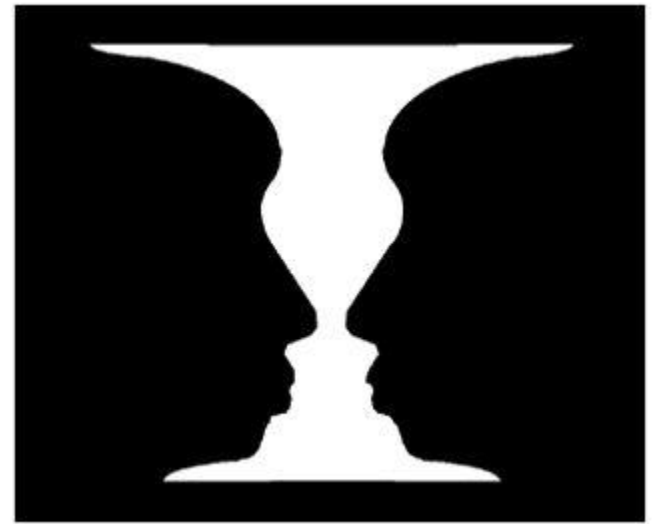
❖ Электромагнитные волны **инфракрасного и радиодиапазонов** при интенсивностях, существующих в естественной природной среде, **не опасны для человека**. У излучений этого диапазона больше выражены волновые свойства, чем корпускулярные.

❖ **Вредное воздействие** на биосистемы начинается уже с **ультрафиолетового излучения**,

❖ наиболее опасными для живых организмов являются **рентгеновское и гамма-излучения**, поскольку энергия электромагнитных квантов этих волн превышает энергию валентных связей молекул и поэтому способна разрывать эти связи, преобразуя молекулы в ионы и ион-радикалы. **Излучение этих диапазонов является ионизирующим и его корпускулярные свойства выражены сильнее, чем волновые.**

# Корпускулярно волновой дуализм света

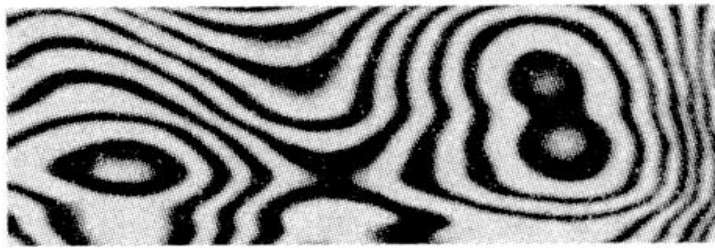
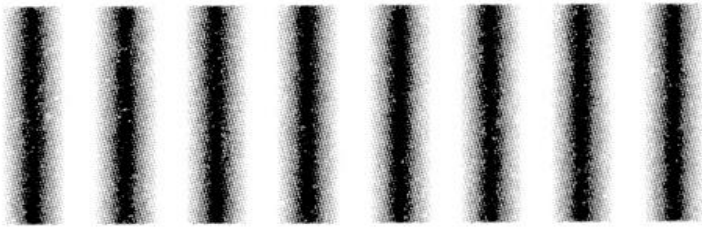
электромагнитные волны обладают как волновыми, так и корпускулярными свойствами.



<u>Волновые свойства</u>	<u>Корпускулярные свойства</u>
Явления интерференции Дифракции Поляризации света	Явления фотоэффекта Тепловое излучение Эффект Комптона
длина волны $\lambda$ и частота $\nu$	энергия кванта $E$ и его импульс $p$

# Интерференция. Дифракция света.

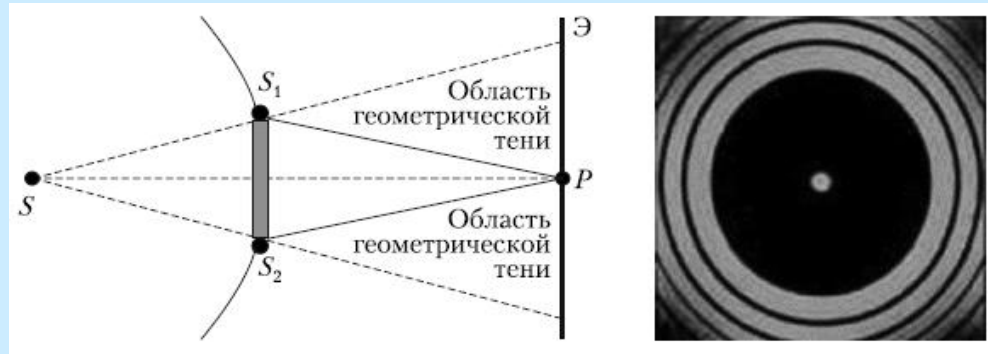
## Примеры наблюдения интерференционных полос



Интерференционные полосы, получающиеся при отражении света от двух стеклянных плоских поверхностей, ограничивающих тонкий воздушный клин (*верхний рисунок*); интерференционная картина, полученная в свете, отраженном от двух поверхностей неоднородной по толщине пластины стекла (*нижний рисунок*).

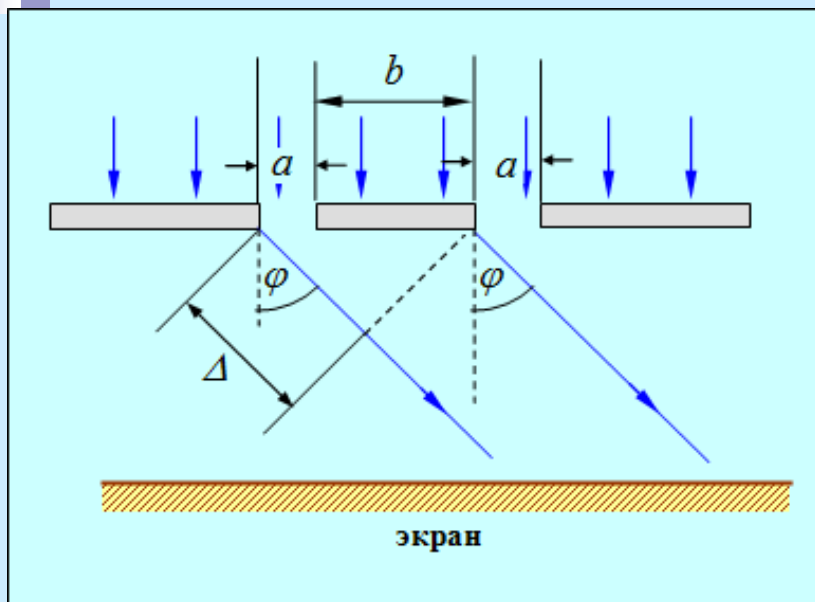
под **дифракцией света** понимают любое отклонение от прямолинейного распространения колебаний в среде с резкими неоднородностями (края экранов, отверстия и др.), что связано с отклонениями от законов геометрической оптики. Это приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

## ■ Дифракция на круглом диске



# Дифракционная решетка

система параллельных щелей (штрихов) равной толщины, лежащих в одной плоскости и разделенных равными по ширине непрозрачными промежутками.

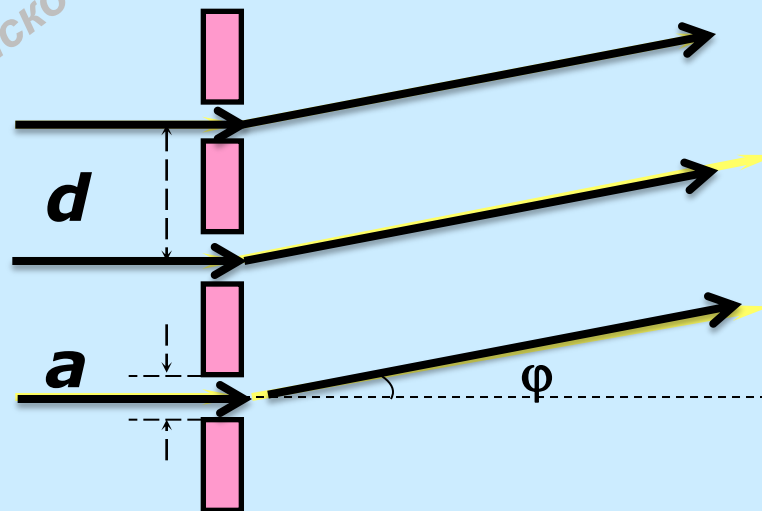


**Постоянной (или периодом) дифракционной решетки** называется расстояние равное сумме ширины щели и непрозрачного промежутка между щелями

$$d = a + b$$

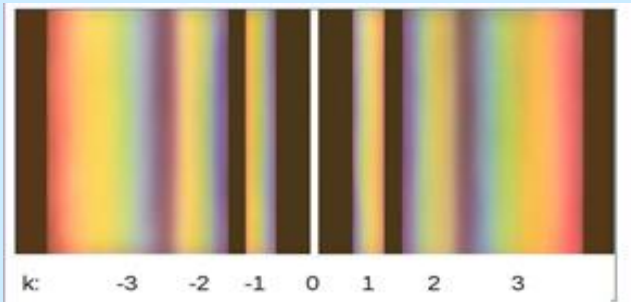
Условие главных максимумов :

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



$\varphi$  - угол дифракции,  $m$  - порядок дифракции

# Дифракционная решетка

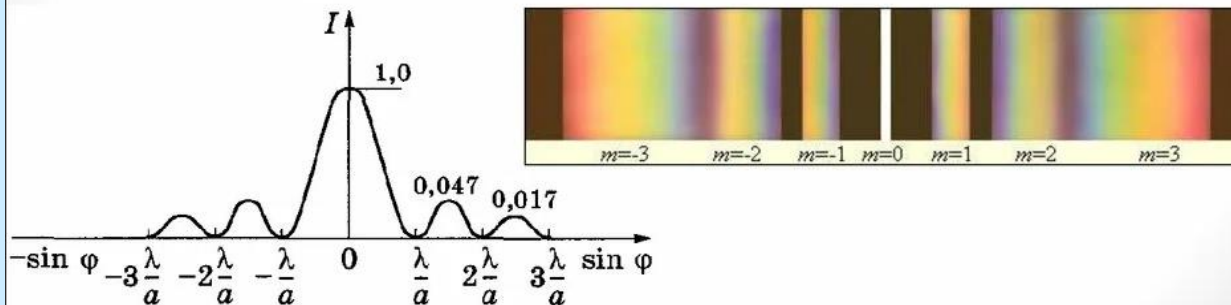


Дифракционная решетка разлагает электромагнитное излучение в **спектр** благодаря дифракции света (зависимости угла дифракции света от длины волны)

Зависимость распределения интенсивности на экране от угла дифракции. Основная часть световой энергии сосредоточена в центральном максимуме. С увеличением угла дифракции интенсивность побочных максимумов резко уменьшается (относительная интенсивность максимумов

$I_0 : I_1 : I_2 : \dots = 1 : 0,047 : 0,017 : \dots$ ).

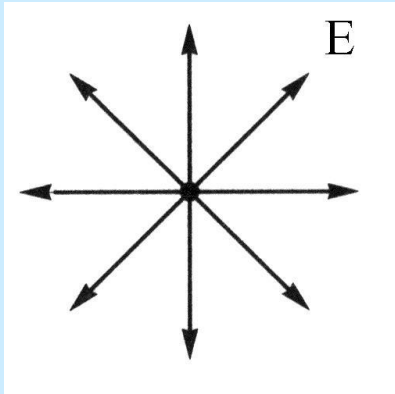
При освещении белым светом центральный максимум имеет вид белой полоски (он общий для всех длин волн), боковые максимумы радужно окрашены.



## 4. Поляризация света

- **Поляризация света** – это совокупность явлений волновой оптики, в которых проявляется *поперечность* электромагнитных световых волн.
- Поляризация возможна только у поперечных волн.
- Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется *поляризованным светом*.

Свет со всевозможными равновероятными направлениями колебаний вектора  $\vec{E}$  называется естественным светом



В естественном свете колебания вектора  $E$  в любой (фиксированной) точке среды совершаются в разных направлениях, быстро и беспорядочно сменяя друг друга. Равномерное распределение векторов объясняется большим числом атомарных излучателей, а равенство амплитудных значений векторов – одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого из атомов.



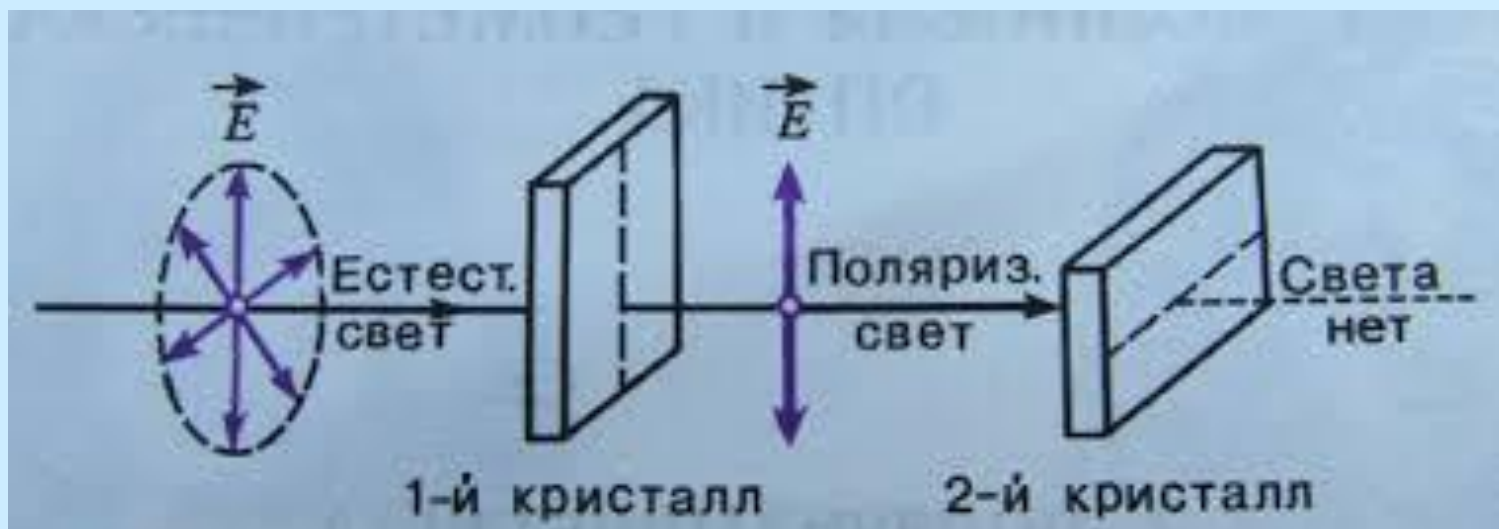
**Частично поляризованный свет** – это свет с преимущественным (но не исключительным!) направлением колебаний вектора  $E$



**Плоскополяризованный (линейно-поляризованный) свет** – это свет, в котором вектор  $E$  колеблется только в одном направлении



## 5. Методы получения поляризованного света

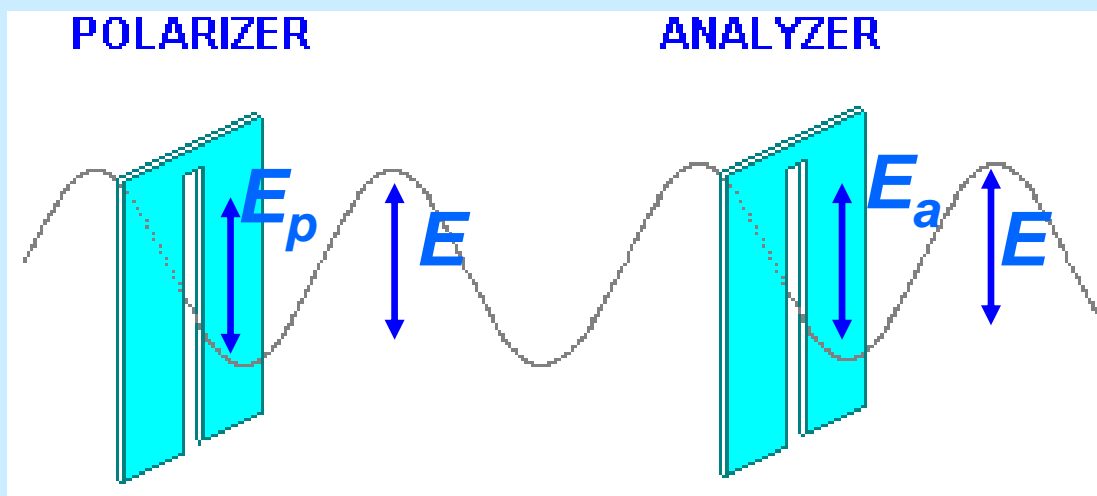


❖ Из естественного света можно получить **плоскополяризованный** с помощью приборов, называемых **поляризаторами  $P$**  (например, кристаллы, в частности турмалин).

❖ Эти приборы **свободно пропускают колебания светового вектора**, параллельные **плоскости пропускания поляризатора** или **главной плоскостью поляризатора**. Колебания же, перпендикулярные к этой плоскости, задерживаются полностью или частично.

❖ Для анализа плоскополяризованного света используют те же поляризаторы; они здесь называются **анализаторами ( $A$ )**.

# 1. Главные плоскости $P$ (поляризатора) и $A$ (анализатора) параллельны друг другу



$$\varphi = 0$$

$$I = I_{max}$$

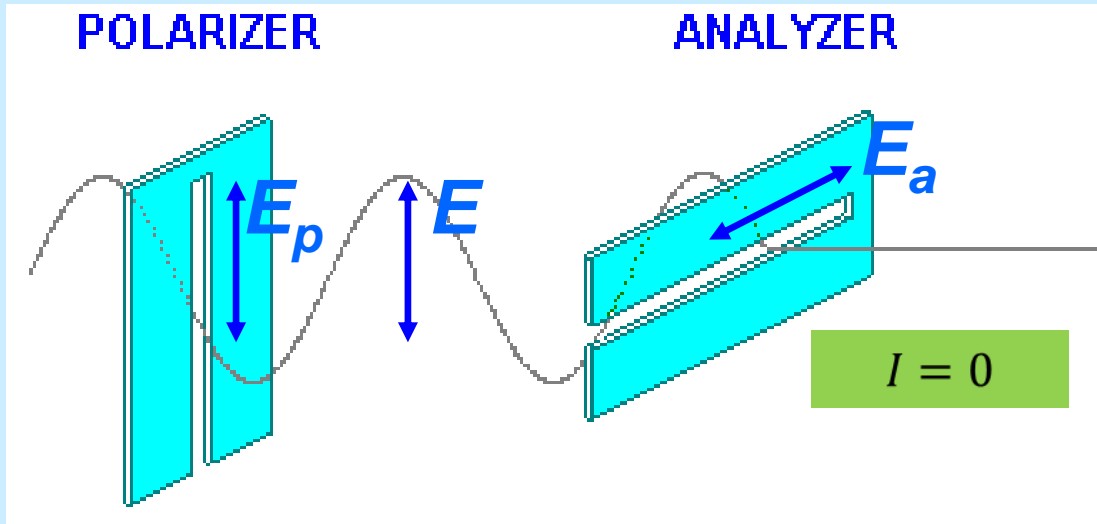
- Если на поляризатор падает естественный свет, то после прохождения поляризатора он становится **линейно поляризованным**. При этом интенсивность волны :

$$I_{out} = \frac{1}{2} I_0$$

Анализатор – прибор, с помощью которого можно обнаружить положение плоскости колебаний плоскополяризованной волны.

Если плоскости поляризатора и анализатора параллельны, то свет проходит через поляризатор полностью и **на выходе интенсивность света максимальна**.

2. Главные плоскости  $P$  и  $A$  перпендикулярны друг другу. Свет через анализатор не проходит.



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

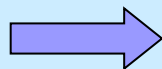
- Если плоскости поляризатора и анализатора перпендикулярны, то свет не проходит через поляризатор и **на выходе интенсивность света равна нулю.**

# Закон Малюса

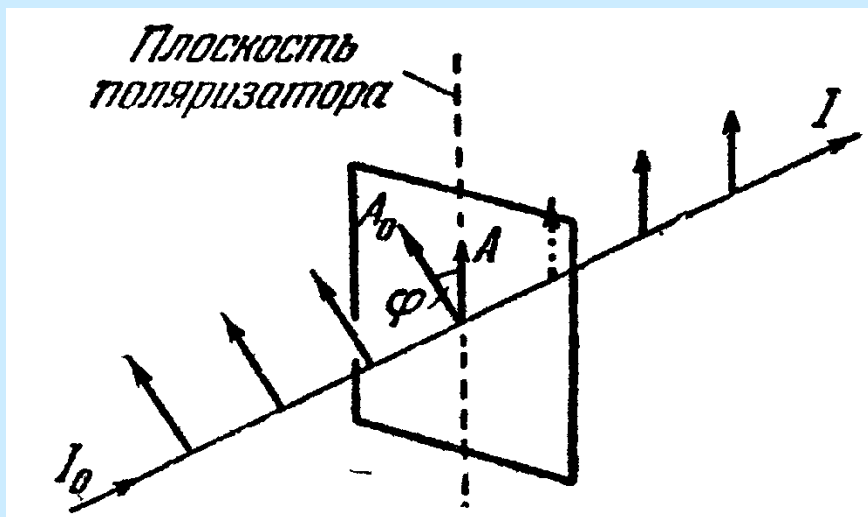
- Пусть на поляризатор падает плоскополяризованный свет амплитуды  $E_0$  и интенсивности  $J_0$

интенсивность прошедшего света

- закон Малюса**



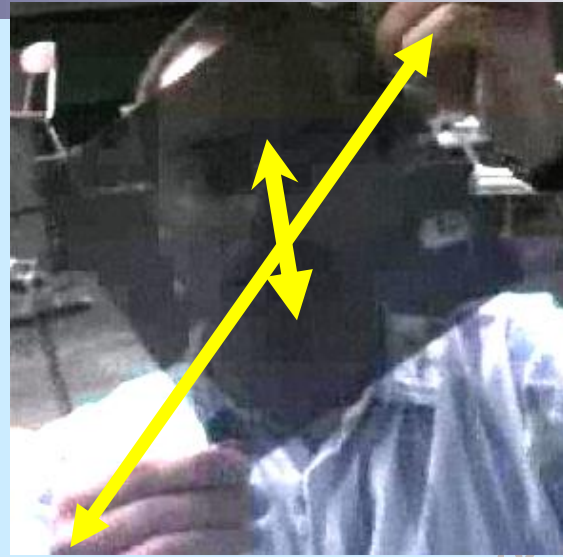
$$J = J_0 \cos^2 \varphi$$



- $I_0$  – интенсивность плоско поляризованного света, падающего на анализатор;
- $I$  – интенсивность света, вышедшего из анализатора,
- $\varphi$  – угол между плоскостью поляризатора и анализатора.



(a)  $\theta = 0^\circ$



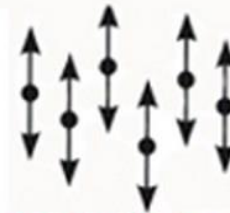
(b)  $0^\circ < \theta < 90^\circ$



(c)  $\theta = 90^\circ$



Эффект  
поляризации  
света



НЕПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ

ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ СВЕТ



Для получения плоскополяризованного света применяются также *поляроиды* — искусственные пленки, обладающие сильным дихроизмом.

*дихроизм* — селективное поглощения света в зависимости от направления колебаний электрического вектора световой волны.

при толщине порядка 0,1 мм такая пленка полностью поглощает обыкновенные лучи видимой области спектра, являясь в тонком слое хорошим поляризатором (анализатором).

## Степень поляризации

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

- Для плоскополяризованного света степень поляризации  $\Rightarrow P = 1$
- для естественного света  $\Rightarrow P = 0$
- Для частично поляризованного света  $\Rightarrow P < 1$

# 6. Закон Брюстера

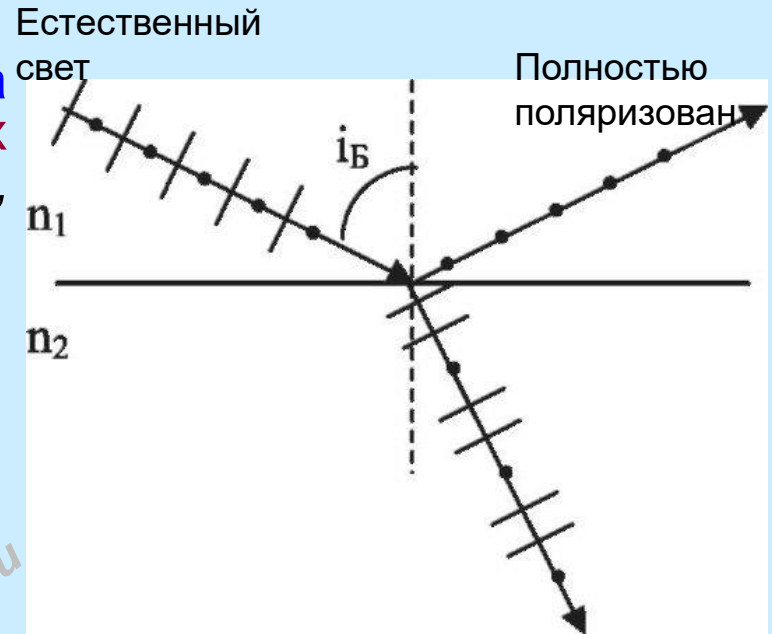
■ При угле падения **естественного света** на границу **прозрачных изотропных диэлектриков**, равном **углу Брюстера**, определяемого соотношением

$$\operatorname{tg} i_{\text{Бр}} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

**отраженный луч полностью поляризован** (содержит только колебания, перпендикулярные плоскости падения), преломленный же луч поляризован **максимально**, но не полностью.

**Данное соотношение называют законом Брюстера, а угол – углом Брюстера или углом полной поляризации.**

*Точками и черточками на отраженном и преломленном лучах этого рисунка показаны направления колебаний вектора  $\vec{E}$*

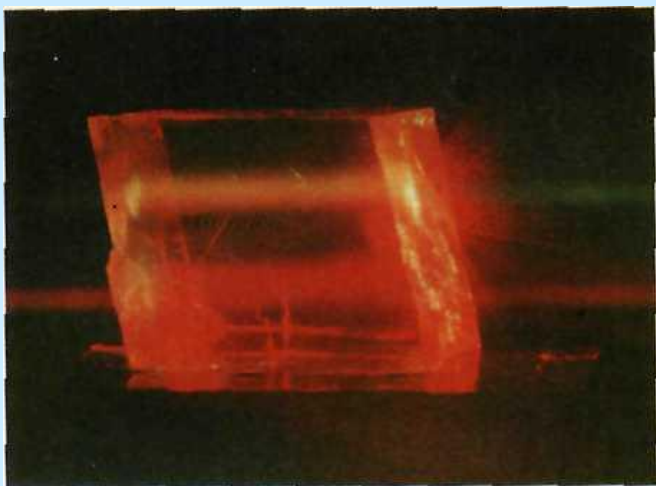
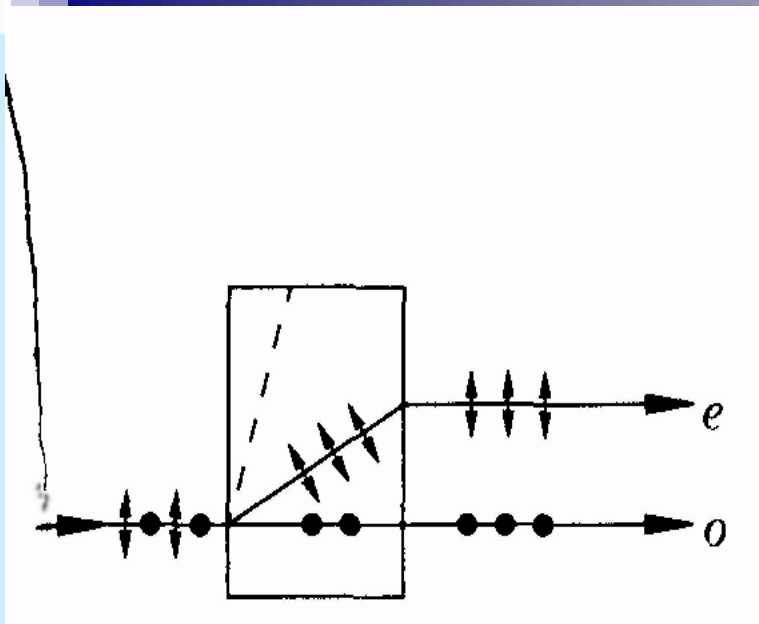


# Двулучепреломление

- **Двойным лучепреломлением** называется способность некоторых веществ расщеплять падающий световой луч на два луча – **обыкновенный (o) и необыкновенный (e)**, которые распространяются в различных направлениях с **разной фазовой скоростью** и поляризованы во взаимно перпендикулярных направлениях.
- В то время как обыкновенный луч подчиняется обычному закону преломления, необыкновенный луч преломляется по иному закону (даже при угле падения равному нулю).

Это явление наблюдается в средах, **оптические свойства которых различны в разных направлениях**. Такие среды называются **анизотропными**. К анизотропным материалам, которые существуют в природе, относятся, например, исландский шпат ( $\text{CaCO}_3$ ), кварц.





Двулучепреломление в кристалле кальцита

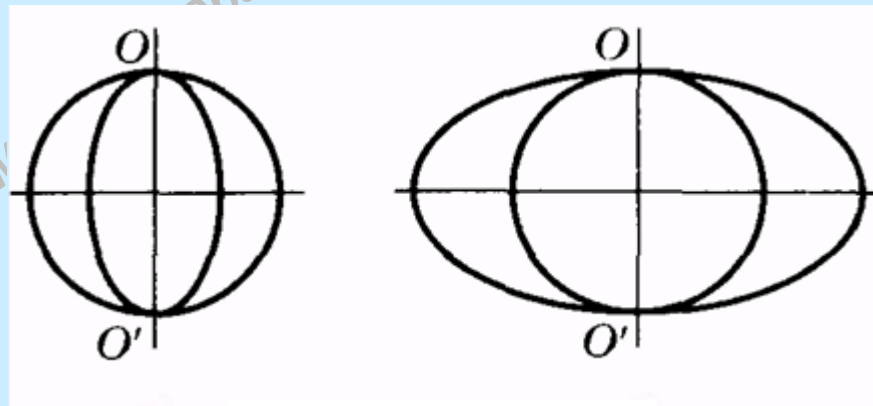
■ Направления, вдоль которых двойного лучепреломления нет и оба луча, **обыкновенный и необыкновенный**, распространяются с **одной скоростью**, называют оптическими осями кристалла (штриховая линия на рис.).

■ Если такое направление одно, то кристаллы называют **одноосными**

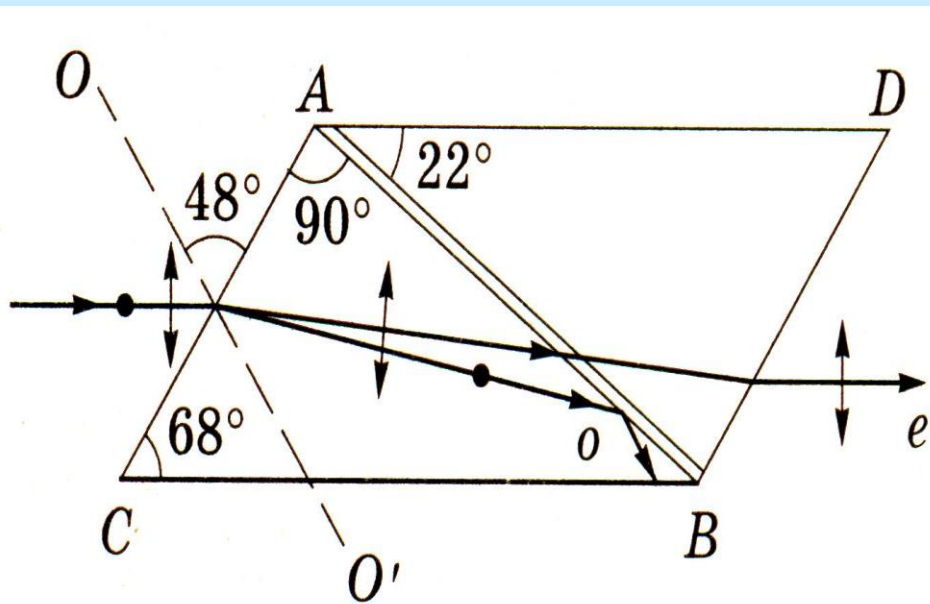
■ К ним принадлежит исландский шпат (разновидность углекислого кальция  $\text{CaCO}_3$  —), кварц, турмалин и др.

# Ход обыкновенных и необыкновенных лучей в кристаллах можно наглядно представить с помощью волновых поверхностей

- **а** — для положительных кристаллов, **б** — для отрицательных).
- Сферы соответствуют обыкновенным волнам, имеющим по всем направлениям одинаковую скорость  $v_o$ ;
- эллипсоиды — необыкновенным волнам, скорость  $v_e$  которых зависит от направления.
- Вдоль оптических осей  $OO'$  скорость обыкновенной и необыкновенной волн одинакова
- Для положительных кристаллов  $v_e \leq v_o$ , для отрицательных  $v_e \geq v_o$ .



# 7. Поляризационные приспособления. Однолучевая поляризационная призма (призма Николя, или николь)

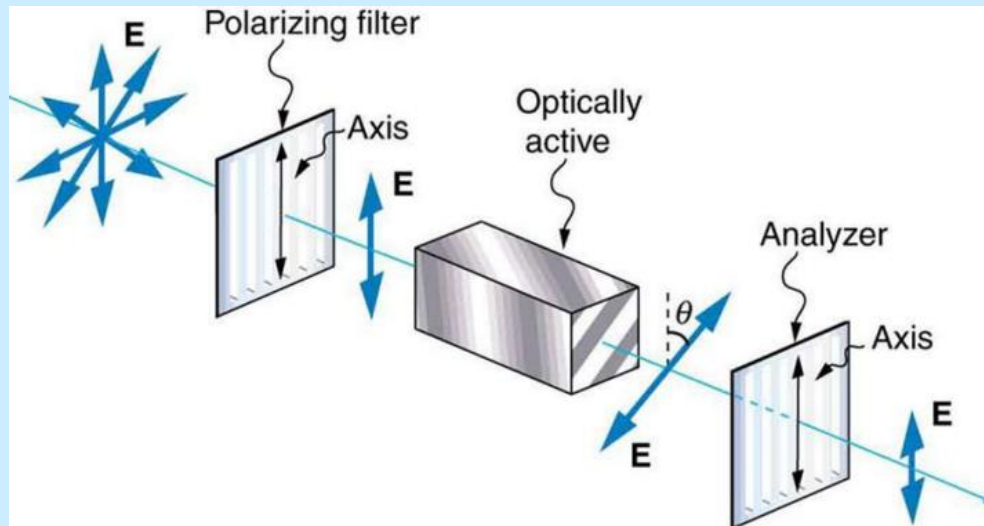


- представляет собой двойную призму из исландского шпата, склеенную вдоль линии **AB канадским бальзамом с  $n=1.55$** . Оптическая ось  $OO'$  призмы составляет с входной гранью угол 48 град.
- На передней грани призмы естественный луч, параллельный ребру  $CB$ , раздваивается на два луча: **обыкновенный (o)  $n_o=1.66$**  и **необыкновенный (e)  $n_e=1.51$**

- При соответствующем подборе угла падения, **равного или больше предельного**, **обыкновенный луч (о-луч)** испытывает **полное отражение** (канадский бальзам для него является средой оптически менее плотной), а **затем поглощается зачерненной поверхностью  $CB$** .
- **Необыкновенный луч (е-луч)** **выходит из кристалла** параллельно падающему лучу, незначительно смещенному относительно него (ввиду преломления на гранях  $AC$  и  $BD$ ).

# Оптическая активность

- Явление вращения плоскости поляризации линейно-поляризованного света при прохождении через оптически активную среду



Среды, способные поворачивать плоскость поляризации света называются **оптически активными**

**Оптически активными** являются многие некристаллические тела: чистые жидкости (например, скипидар), растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (раствор сахара в воде), некоторые газы и пары (пары камфоры).

Для растворов был установлен следующий количественный закон:

$$\alpha = [\alpha_0] C l,$$

где  $C$  — концентрация оптически активного вещества,  $l$  — толщина слоя раствора,  $[\alpha_0]$  — **удельное вращение**, которое зависит от температуры и свойств раствора.

Для определенной длины волны угол  $\alpha$  поворота плоскости поляризации пропорционален расстоянию  $l$ , пройденному светом в оптически активном веществе:

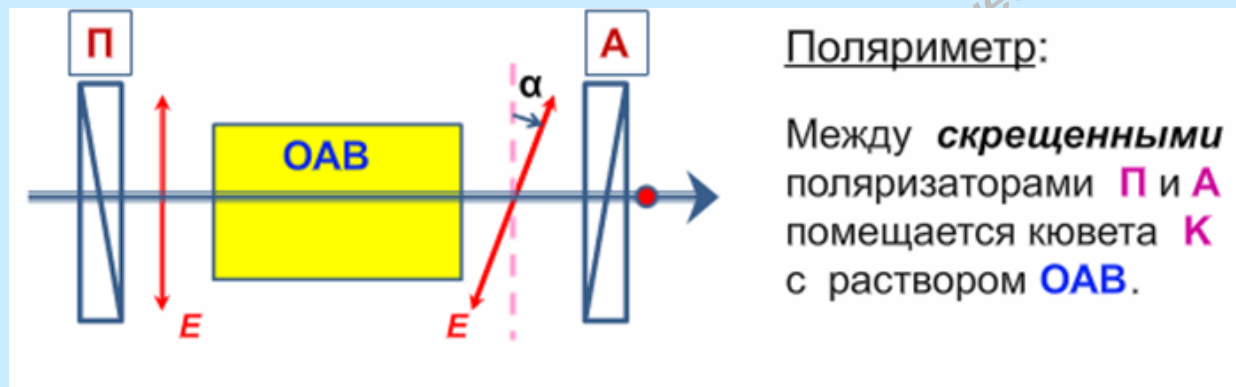
$$\alpha = \alpha_0 l$$

Для твердых веществ

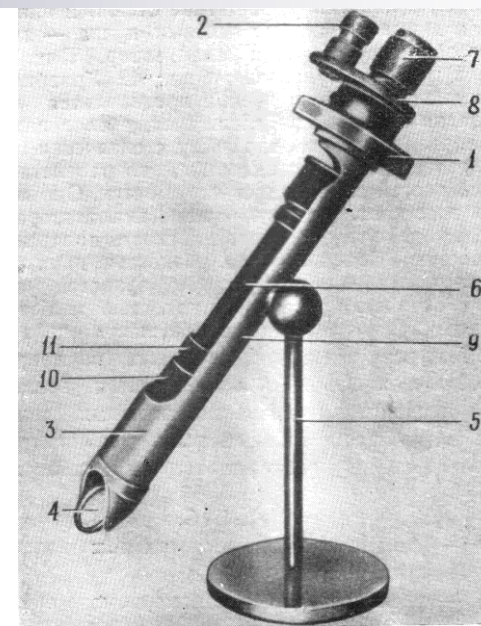
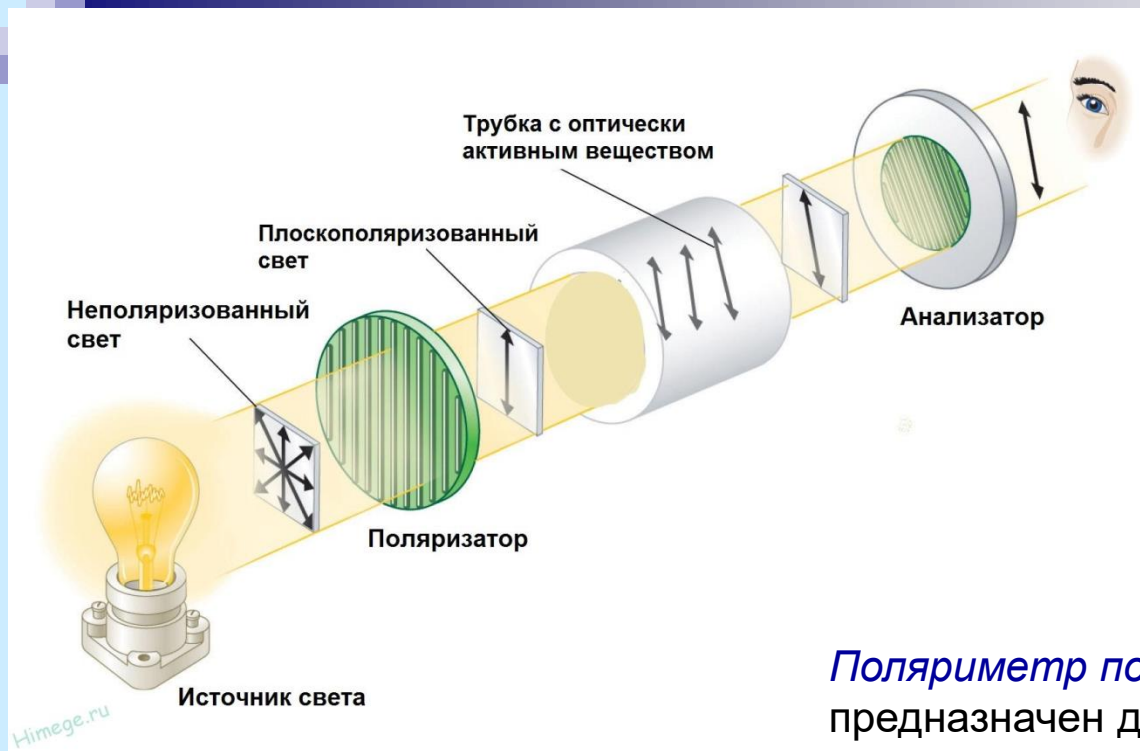
где  $\alpha_0$  — коэффициент пропорциональности, или **постоянная вращения** (вращательная способность), **град/мм**.

# Оптическая поляриметрия

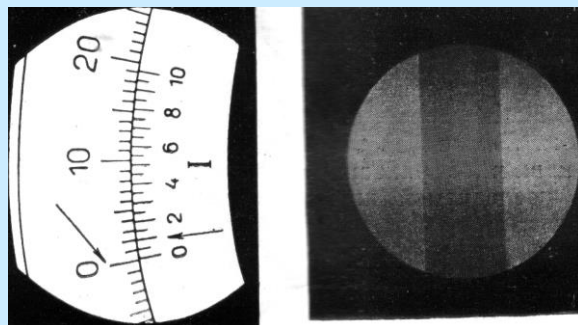
Совокупность оптических методов исследования, основанных на определении угла поворота плоскости поляризации света, прошедшего через **оптически активное вещество** (ОАВ)



Метод (**поляриметрия**, или **сахариметрия**) используют в медицине для определения концентрации сахара в моче, в биофизических исследованиях, а также в пищевой промышленности. Соответствующие измерительные приборы называют **поляриметрами** или **сахариметрами**.



**Поляриметр портативный П-161**  
 предназначен для **измерения угла вращения плоскости поляризации оптически активными прозрачными и однородными растворами и жидкостями.**



- Уравнивание яркостей частей поля зрения производится путем вращения анализатора (8). **Если между анализатором и поляризатором ввести кювету с оптически – активным раствором или жидкостью, то равенство яркостей частей поля зрения нарушится.**
- Оно может быть **восстановлено поворотом анализатора на угол, равный углу поворота плоскости поляризации ОАВ.**



**Поляриметрия** — метод контроля концентрации сахара в сахарной промышленности, поэтому поляриметры часто называют **сахариметрами**.

**Методами поляриметрии определяют наличие и концентрацию углеводов** в растительном сырье, белков и аминокислот в растворах, исследуют активность ферментов, расщепляющих углеводы, используют для анализа эфирных масел, алкалоидов, антибиотиков и других оптически активных соединений.

**Спектрополяриметрия**, основана на определении зависимости удельного вращения от длины волны падающего света (дисперсия оптического вращения).

# Поляризационно-оптический метод исследования механических напряжений (метод фотоупругости)



- ❖ Темные полосы – изохромы – линии равных напряжений.
- ❖ Чем больше темных полос сходится в некотором месте образца, тем выше механическое напряжение в этой точке.
- ❖ В области закругленного перехода механические напряжения значительно меньше (одна, иногда две темных линии), чем в области прямоугольного перехода (три линии).
- ❖ Угол является местом концентрации напряжений.

Интерференционная картина распределения механических напряжений в модели нагруженного зуба с несимметричной полостью

При создании в изотропном образце механических напряжений он становится **анизотропным**.

Явление двойного лучепреломления можно наблюдать и в изотропных веществах, если их подвергнуть деформации. Это явление, получившее название **искусственного двойного лучепреломления**, лежит в основе оптического метода исследования распределения механических напряжений в деформированном твердом теле, который называется **методом фотоупругости**.

Он нашел широкое применение в медицине при ***изучении механических напряжений и деформации в различных костных тканях и ортопедических конструкциях.***



**Спасибо за внимание!**

*УО «ГомГМУ», кафедра медицинской физиологии*