

Оптика.

1. Электромагнитные волны.
2. Интерференция.
3. Дифракция.
4. Поляризация.

Колеблющиеся тело, помещенное в упругую среду, является **источником колебаний**, распространяющихся от него во все стороны.



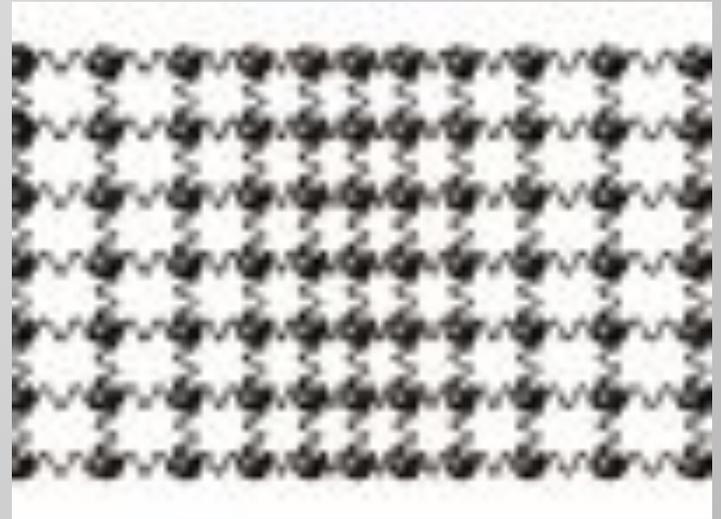
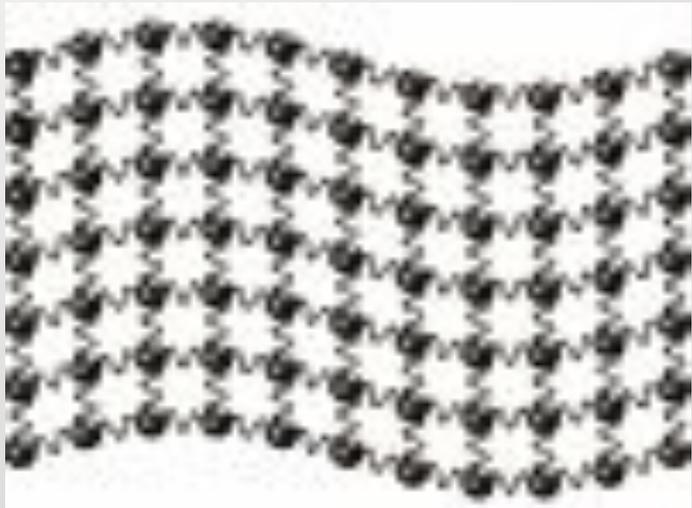
Процесс распространения колебаний в пространстве называется волной .

При распространении волны, частицы среды не движутся вместе с волной, а колеблются около своих положений равновесия.

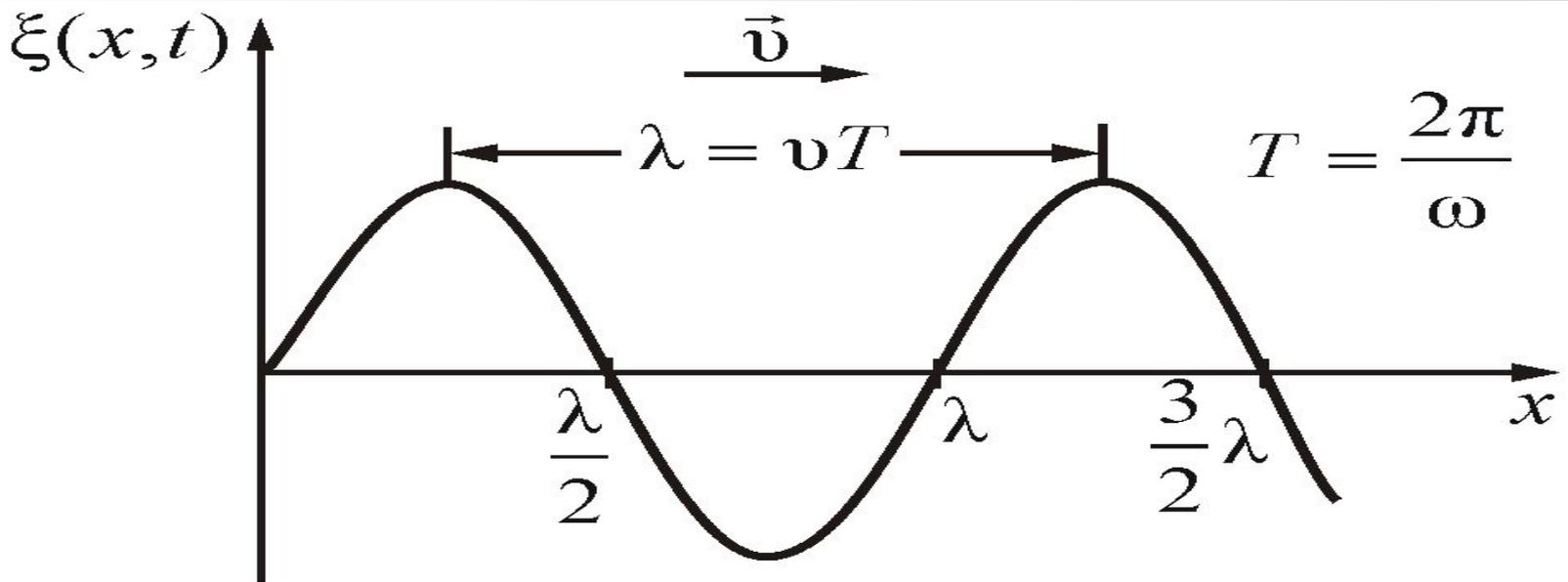
Вместе с волной от частицы к частице, передается лишь состояние колебательного движения и его энергия.

Основным свойством всех волн независимо от их природы является **перенос энергии без переноса вещества.**

Волны бывают поперечными (колебания происходят в плоскости, перпендикулярной направлению распространения), и **продольными** (сгущение и разряжение частиц среды происходят в направлении распространения).



- **в жидкой и газообразной** средах возможно возникновение только **продольных** волн;
- **в твердой** среде возможно возникновение **как продольных, так и поперечных** волн.



Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется

длиной волны λ : $\lambda = vT$ $T = \frac{1}{\nu}$ – период

ν – частота

$v = \lambda \nu$ – скорость распространения волны :

Фронт волны – геометрическое место точек, до которых доходит возмущение в момент времени t .

В однородной среде направление распространения перпендикулярно фронту волны .

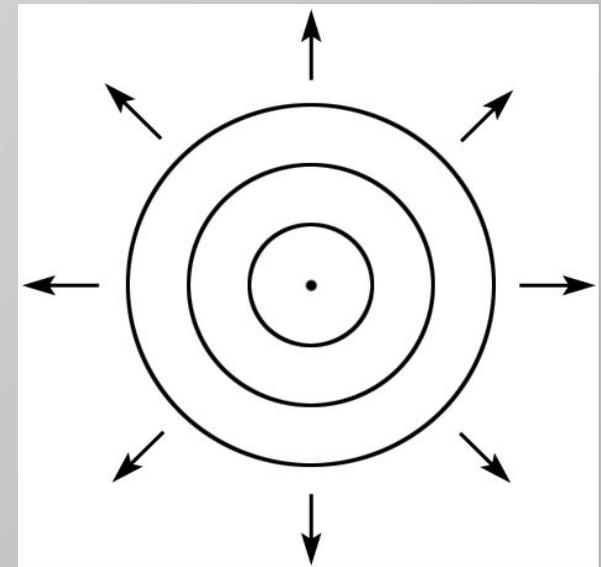
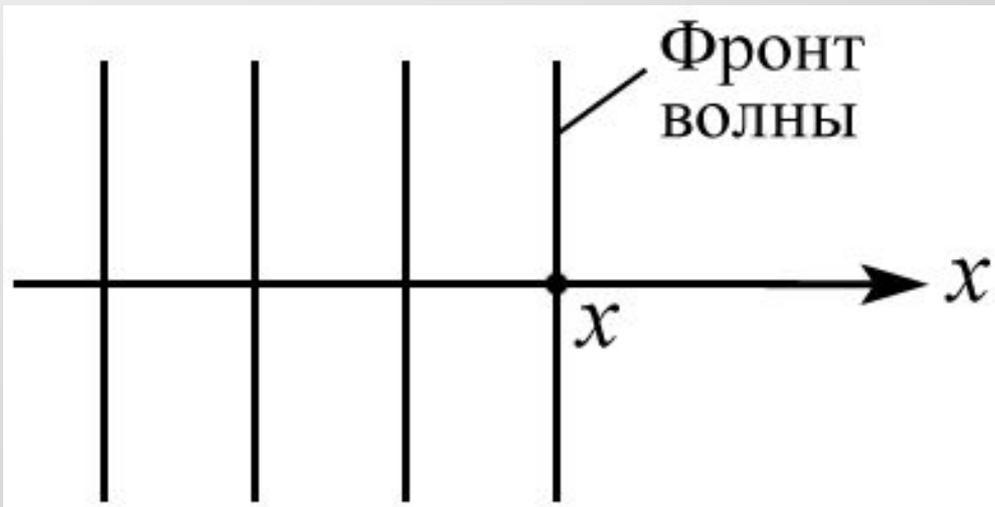
Волновая поверхность – геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе.

Число волновых поверхностей – бесконечно. Фронт волны – один.

Волновые поверхности неподвижны. Фронт волны все время перемещается .

В зависимости от формы волновой поверхности различают

- **плоские волны**: волновые поверхности – параллельные плоскости:
- **сферические волны**: волновые поверхности – концентрические сферы.



Уравнение волны. Волновое уравнение.

Уравнением волны – называется выражение, которое дает *смещение колеблющейся точки* как функцию ее координат (x , y , z) и времени t .

$$\xi = f(x, y, z, t) = \xi(x, y, z, t)$$

Распространение волн в однородной среде в общем случае описывается **волновым уравнением** – дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \qquad \nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

оператор Лапласа: $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$

Распространение волн в однородной среде в общем случае описывается **волновым уравнением** – дифференциальным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 \xi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

Решением волнового уравнения является уравнение волны, например

$$\xi = A \cos(\omega t - kx)$$

Для плоской волны, распространяющейся вдоль оси X, волновое уравнение упрощается:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad \xi = A \cos(\omega t - kx)$$

Фазовая скорость – это скорость распространения фазы волны. (скорость распространения волны)

Для синусоидальной волны скорость переноса энергии равна фазовой скорости.

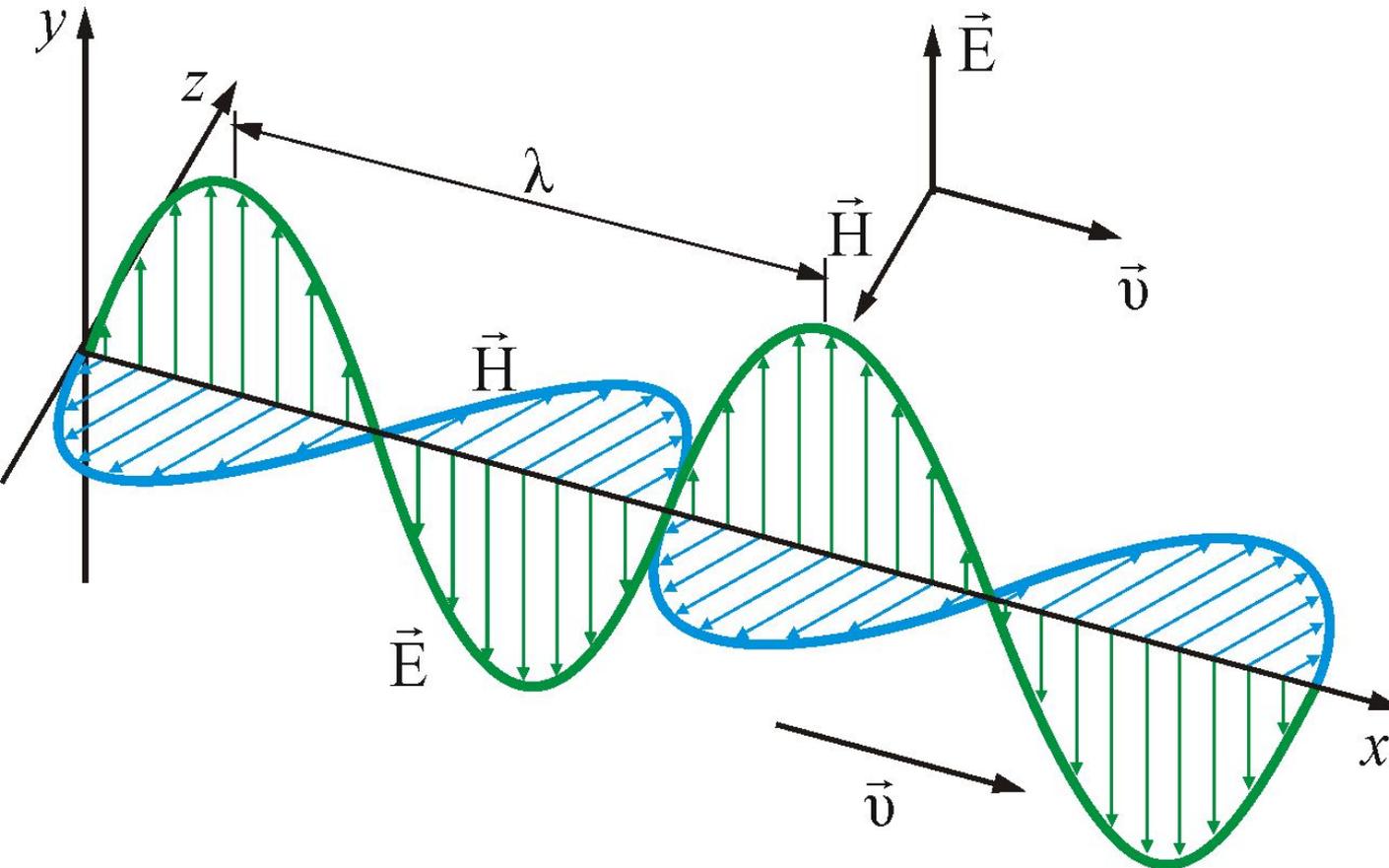
Возможность существования
электромагнитных волн предсказывал
еще Майкл Фарадей в 1832 г.

Теоретически обосновал это
предположение Дж. Максвелл.



Герц Генрих Рудольф (1857 – 1894) –
немецкий физик.

В 1888 г. экспериментально *доказал существование электромагнитных волн*, распространяющихся в свободном пространстве, предсказанных теорией Максвелла. Экспериментируя с электромагнитными волнами, наблюдал их отражение, преломление, интерференцию, поляризацию. Установил, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света. В 1887 наблюдал внешний фотоэффект.

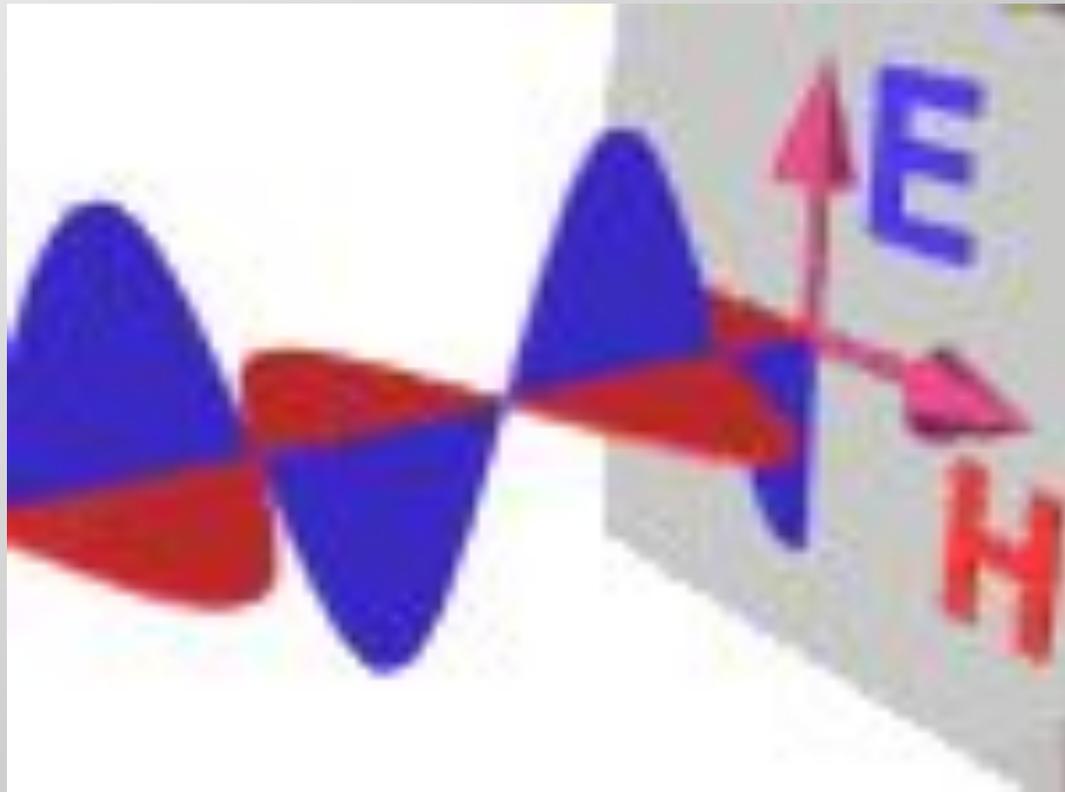


1. В любой точке векторы напряженности электрического и магнитного полей взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения волны, т.е. образуют правовинтовую систему.
2. Поля изменяют свое направление в пространстве.
3. Электрическое и магнитное поля находятся в фазе.

Движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.

ЭМВ представляют собой поперечные волны и аналогичны другим типам волн.

В ЭМВ происходят колебания полей, а не вещества, как в случае волн на воде или в натянутом шнуре.



7. Дифференциальное уравнение ЭМВ

Векторы напряженности \mathbf{E} и \mathbf{H} электромагнитного поля удовлетворяют волновым уравнениям типа:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \mathbf{E}}{dt^2}$$

Решение

уравнений:

$$\mathbf{E} = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{v^2} \frac{d^2 \mathbf{H}}{dt^2}$$

$$\mathbf{H} = H_0 \cos(\omega t - kx + \phi)$$

ϕ – начальная фаза колебаний;

ω – круговая частота

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

– волновое
число;

Оператор Лапласа -

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$

Фазовая скорость ЭМВ:

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

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ – скорость света в вакууме

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

В веществе скорость распространения электромагнитных волн меньше в n раз. $n = \sqrt{\epsilon \mu}$

Скорость распространения электромагнитных волн в среде **зависит от ее электрической и магнитной проницаемостей.**

$n = \sqrt{\epsilon\mu}$ - абсолютный показатель преломления.

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

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

Электромагнитные излучения

радиоволны

Инфракрасное
излучение

Видимый
свет

Ультрафиолетовое
излучение

Рентгеновское
излучение

Гамма -
излучение

Для характеристики переносимой волной энергии русским ученым **Н.А Умовым** были введены понятия о скорости и направлении движения энергии, о потоке энергии. Спустя десять лет после этого, в 1884 г. английский ученый **Джон Пойнтинг** **описал** процесс переноса энергии с помощью вектора плотности потока энергии.

Объемная плотность энергии w в электромагнитной волне

$$w = w_y + w_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon \dot{A}^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu \dot{I}^2}{2}$$

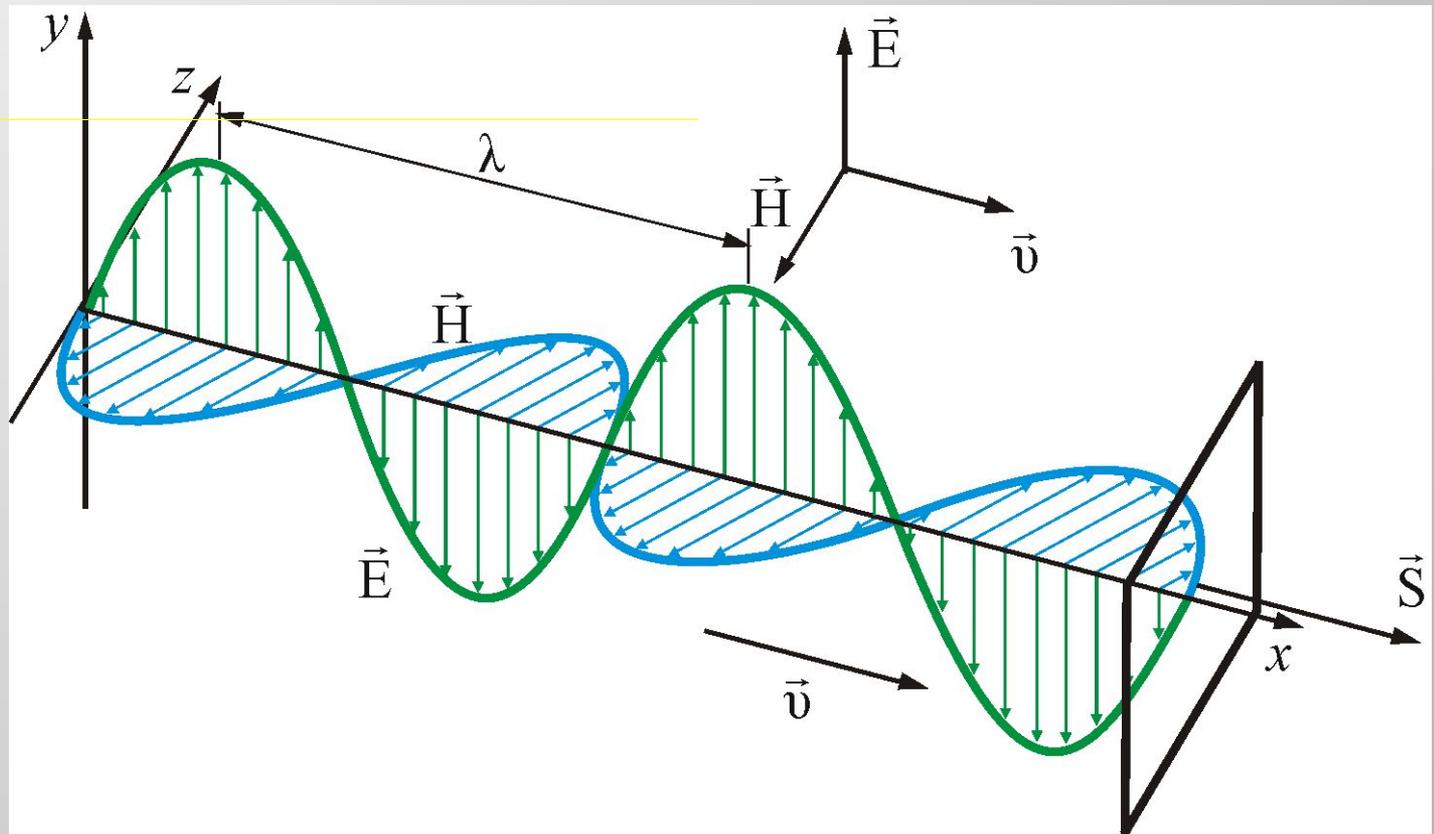
Поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени:

$$S = wv = EH$$

Вектор плотности потока электромагнитной энергии называется вектором Умова - Пойнтинга:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$$

Вектор \vec{S} направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.



Виды излучений	Длина волны	Получение	Регистрация	Характеристика, свойства	Применение
Радиоволны	10 км ($3 \times 10^4 - 3 \times 10^{12}$ Гц)	Транзисторные цепи	Резонатор Герца, Когерер, антенна	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Связь и навигация
Инфракрасное излучение	0,1 м – 770 нм ($3 \times 10^{12} - 4 \times 10^{14}$ Гц)	Электрический камин	Болометр, Фотоэлемент термостолбик	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Приготовл. пищи Нагревание, сушка, фотокопирование
Видимый свет	770 – 380 нм ($4 \times 10^{14} - 8 \times 10^{14}$ Гц)	Лампа накаливания Молнии, Пламя	Спектрограф, Болометр	Отражение, Преломление Дифракция Поляризация	Наблюдение за видимым миром, путем отражения
Ультрафиолетовое излучение	380 – 5 нм ($8 \times 10^{14} - 6 \times 10^{16}$ Гц)	Разрядная трубка, углеродная Дуга	Фотоэлемент Люминесценция, болометр	Фотохимические реакции	Лечение заболеваний кожи, уничтожение бактерий, сторож. устройства
Рентгеновское излучение	5 нм – 10^{-2} нм ($6 \times 10^{16} - 3 \times 10^{19}$ Гц)	Рентгеновская трубка	Фотопластинка	Проникающая способность Дифракция	Рентгенография, радиология, обнаружение подделок
γ - излучение	$5 \times 10^{-11} - 10^{-15}$ м	Циклотрон Кобальт - 60	Трубка Гейгера	Порождаются космическими объектами	Стерилизация, Медицина, лечение рака

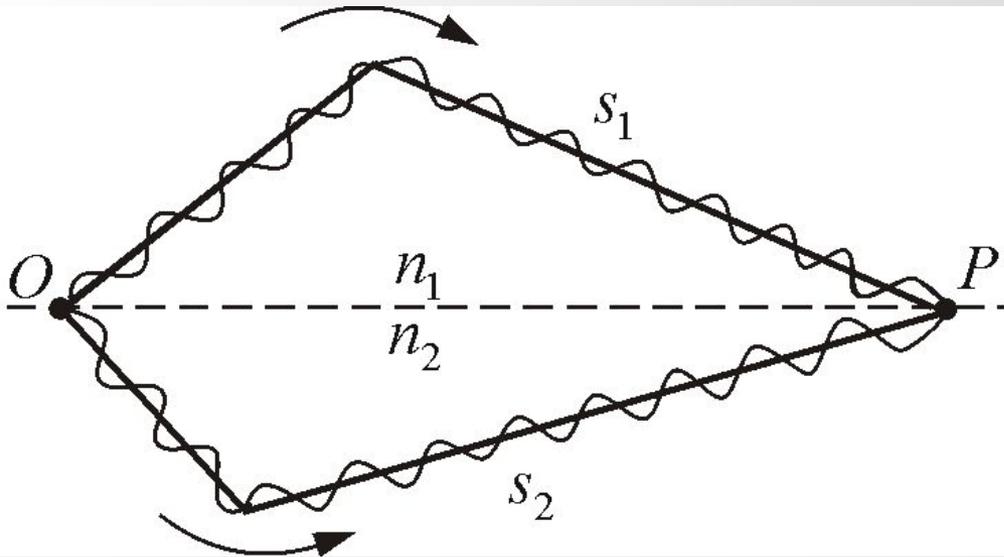
Распространение электромагнитных волн связано с переносом энергии (подобно тому, как распространение упругих волн в веществе связано с переносом механической энергии). Сама возможность обнаружения ЭМВ указывает на то, что они переносят энергию.

Интерференция света -пространственное перераспределение энергии света при наложении двух или нескольких световых волн.

Интерференция волн – одно из основных свойств волн любой природы.

Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Т.Юнгом и О.Френелем.

Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн:



$$x_1 = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{x_1}{v_1} \right)$$

$$x_2 = A_2 \cos \omega \left(t - \frac{x_2}{v_2} \right)$$

Разность фаз двух когерентных волн -

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

разность хода - $\Delta = x_2 - x_1$

x – геометрическая длина пути; n – показатель преломления среды.

Условие максимума и минимума интерференции:

- Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн

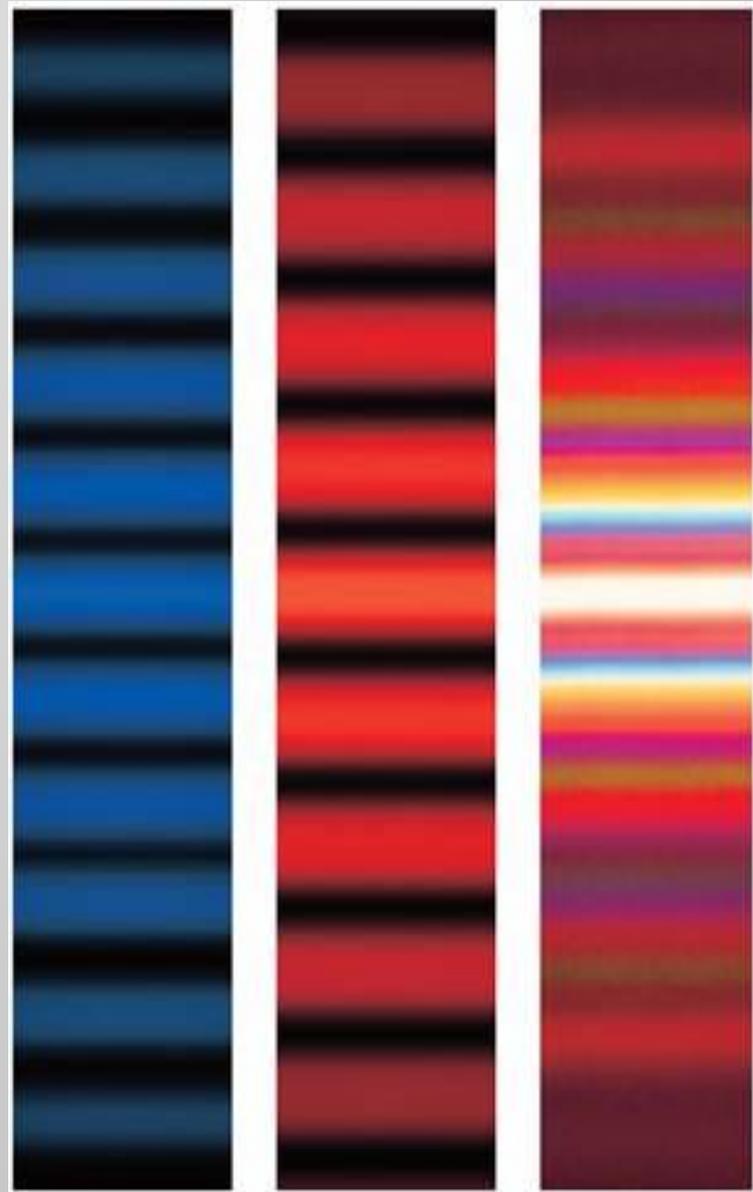
$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

-условие интерференционного **максимума**.

- Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн

$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

- условие интерференционного **минимума**.



Интерференционные **полосы равного наклона**

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2}$$

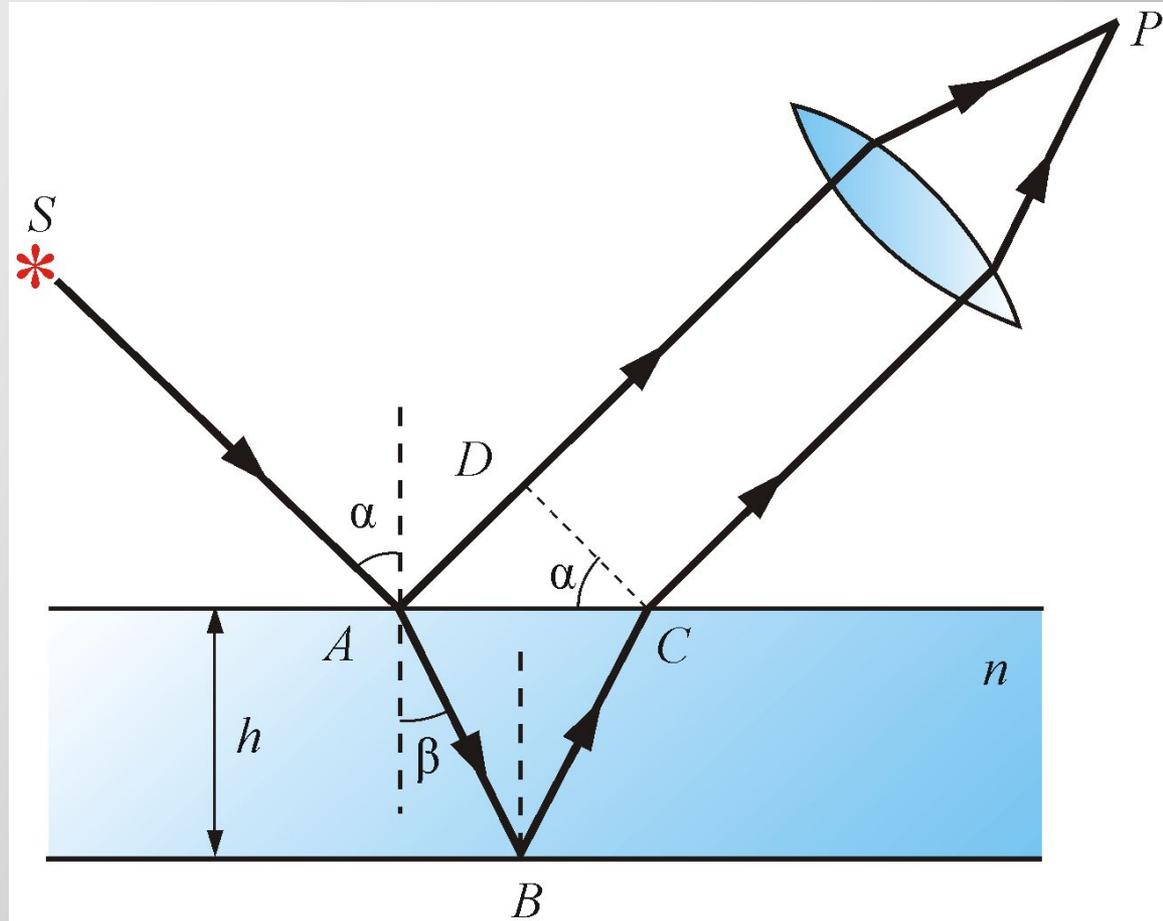
- max

интерференции

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}$$

- min

интерференции

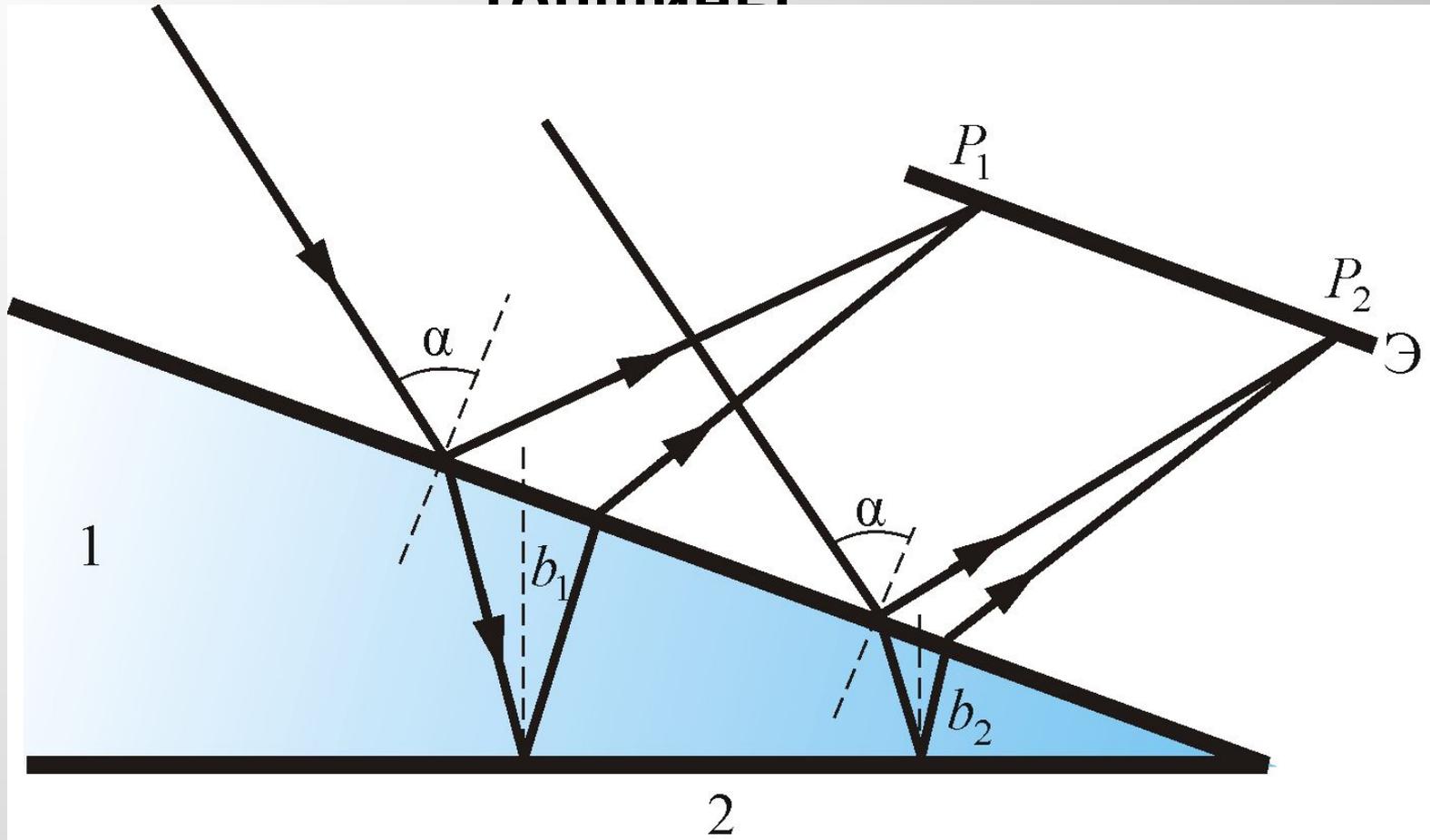


Оптическая разность хода с учетом потери полуволны:

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

Полосы равной

ТОЛЩИНЫ



Оптическая разность хода с учетом потери полуволны:

$$\Delta = 2b\sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

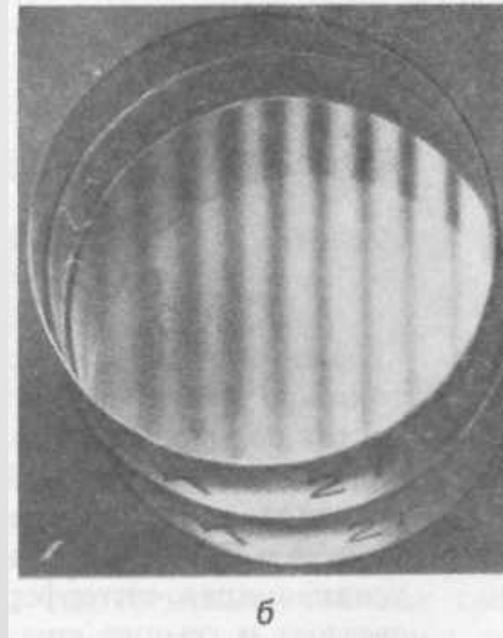
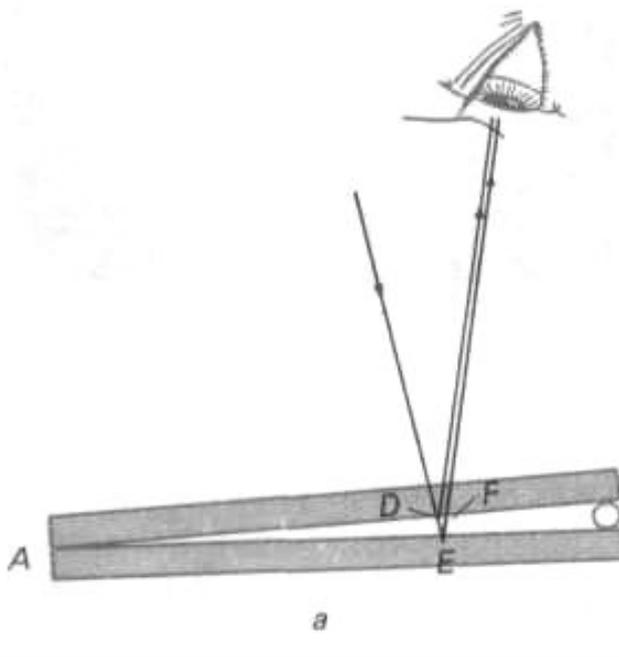
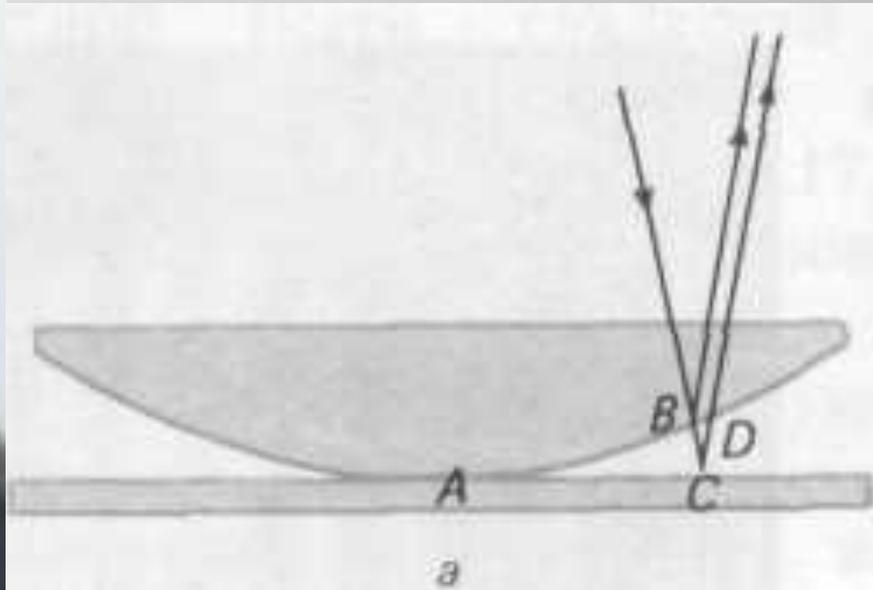


Рис. а - световые лучи, отражаясь от верхней и нижней поверхностей тонкого воздушного клина, интерферируют и образуют светлые и темные полосы:
б - интерференционная картина, наблюдаемая в случае оптически плоских стеклянных пластин;
в - интерференционная картина, наблюдаемая в случае неплоских пластин.

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**.

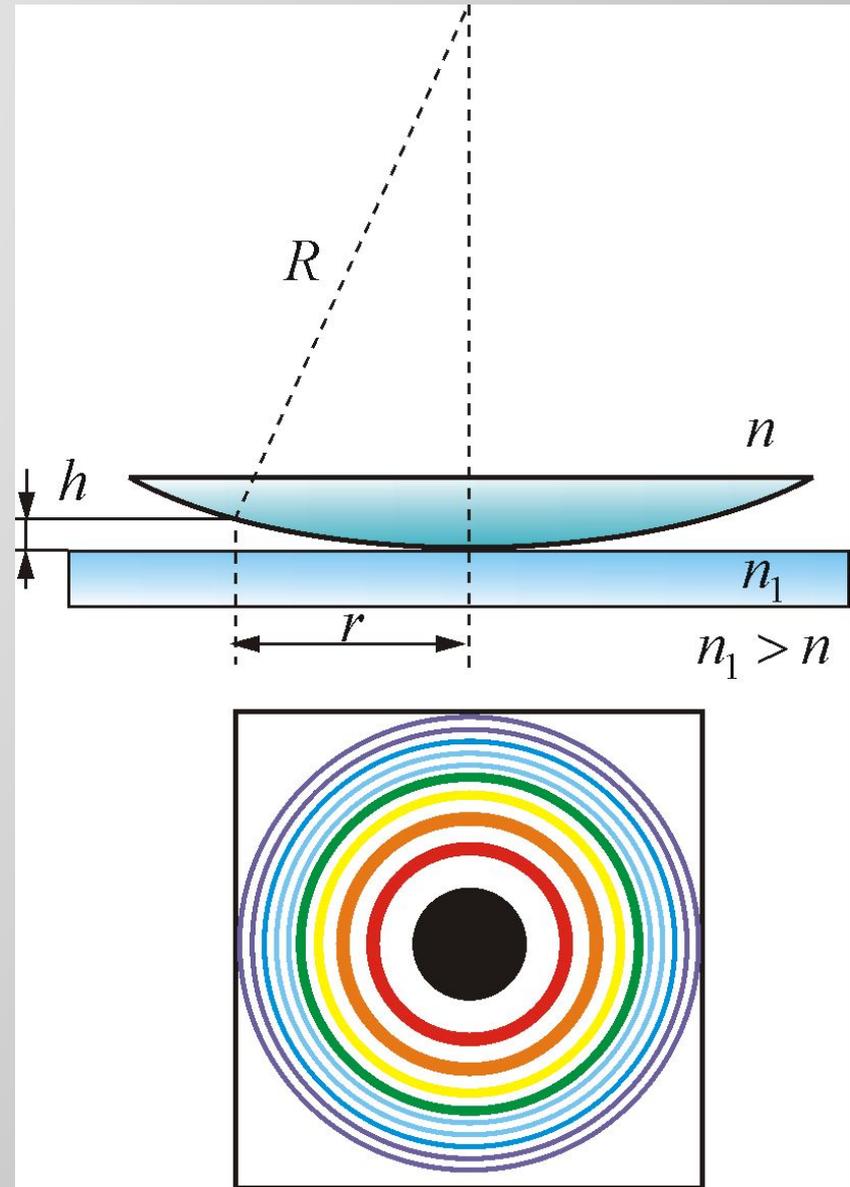
Кольца Ньютона

$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R}$$

$$h = \frac{m\lambda}{2}$$

$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R}$$

- Радиус m -го светлого кольца



$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0}$$

- Радиус m -го темного кольца

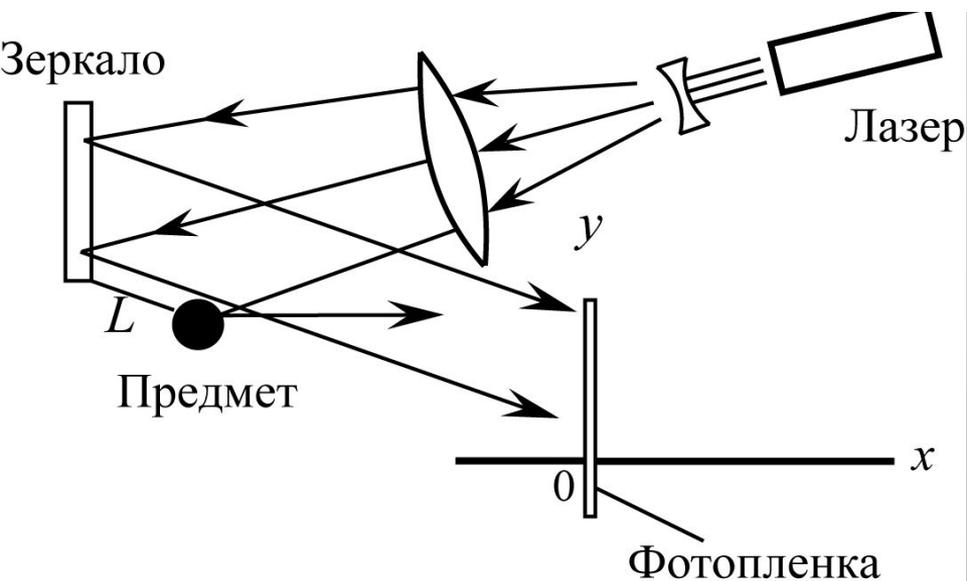
Применение интерференции света

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

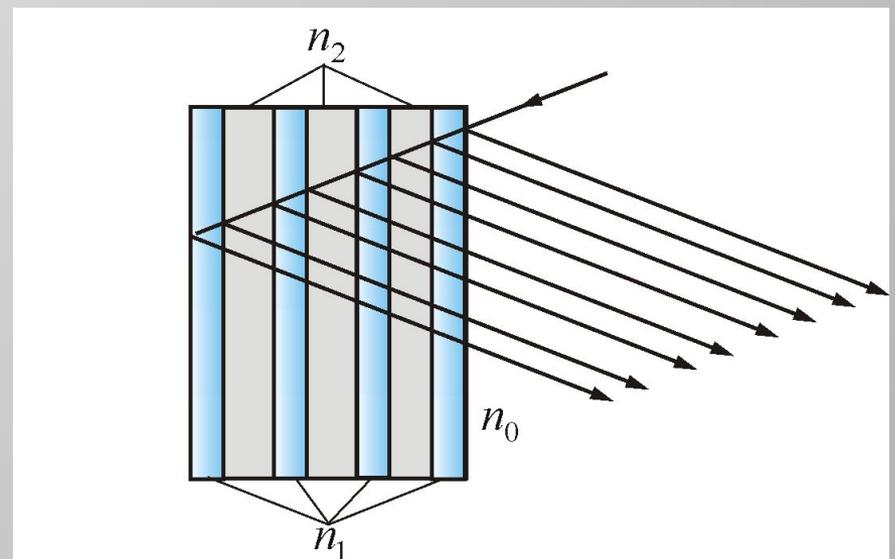
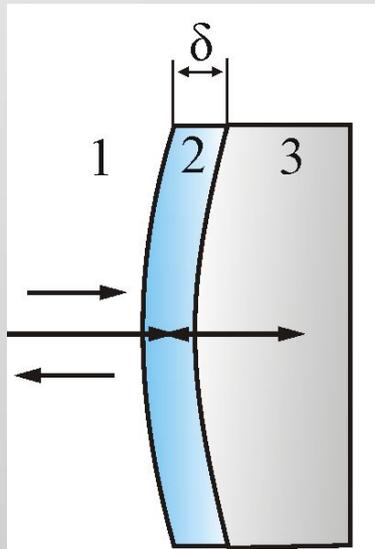
2. По интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды, в которой распространяются волны, или **отклонения формы поверхности от заданной**.

3. **Явление интерференции волн**, рассеянных от некоторого объекта (или прошедших через него), с **«опорной» волной** лежит в основе голографии (в т.ч. оптической, акустической или СВЧ-голографии). Голографический негатив, освещенный монохроматическим светом, дает полное трехмерное изображение, парящее в пространстве.

На фотопленку попадают как отраженный от предмета лазерный свет, так и опорный пучок от зеркала



4. Интерференционные волны от отдельных «элементарных» излучателей **используется при создании сложных излучающих систем** (антенн) для электромагнитных и акустических волн.
5. **Просветление оптики** и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.
6. Получение **высокоотражающих** электрических зеркал.

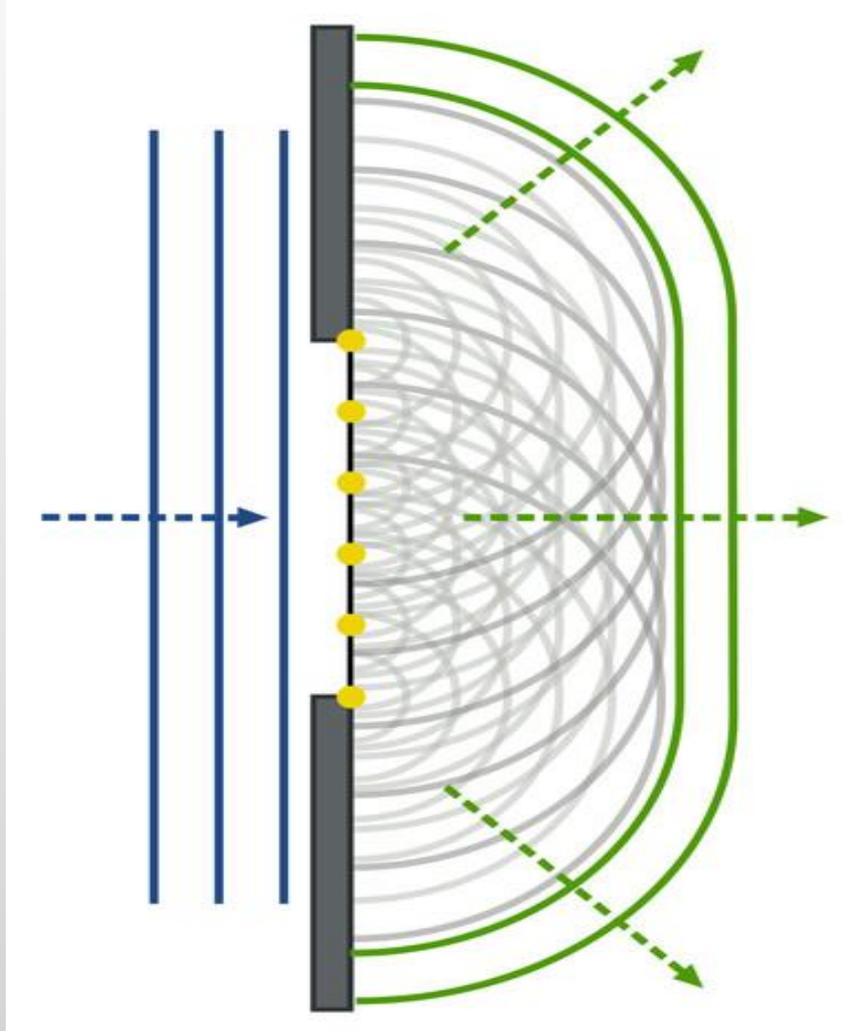


ДИФРАКЦИЯ .

Дифракция света – огибание лучами света границы непрозрачных тел (экранов); проникновение света в область геометрической тени.

Дифракцией называется совокупность явлений, наблюдаемых при распространении света в среде с резкими неоднородностями, *размеры которых сравнимы с длиной волны*, и связанных с отклонениями от законов геометрической оптики.

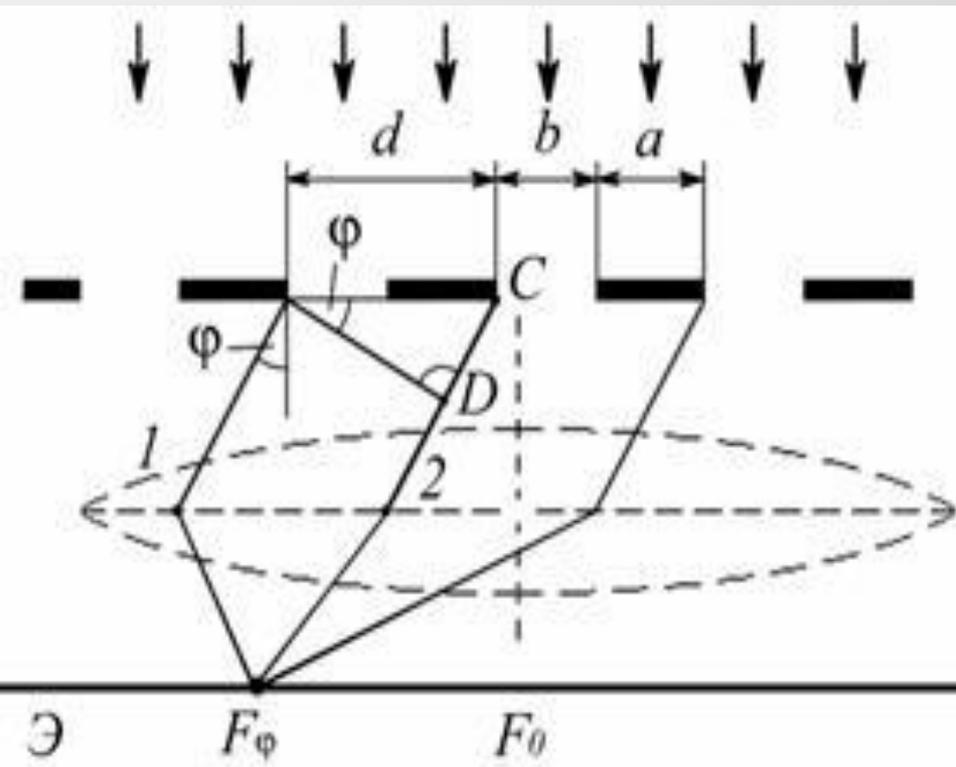
Явление дифракции объясняется с помощью принципа Гюйгенса



- ▣ Каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн задает положение волнового фронта в следующий момент времени.

Дифракция света на дифракционной решетке

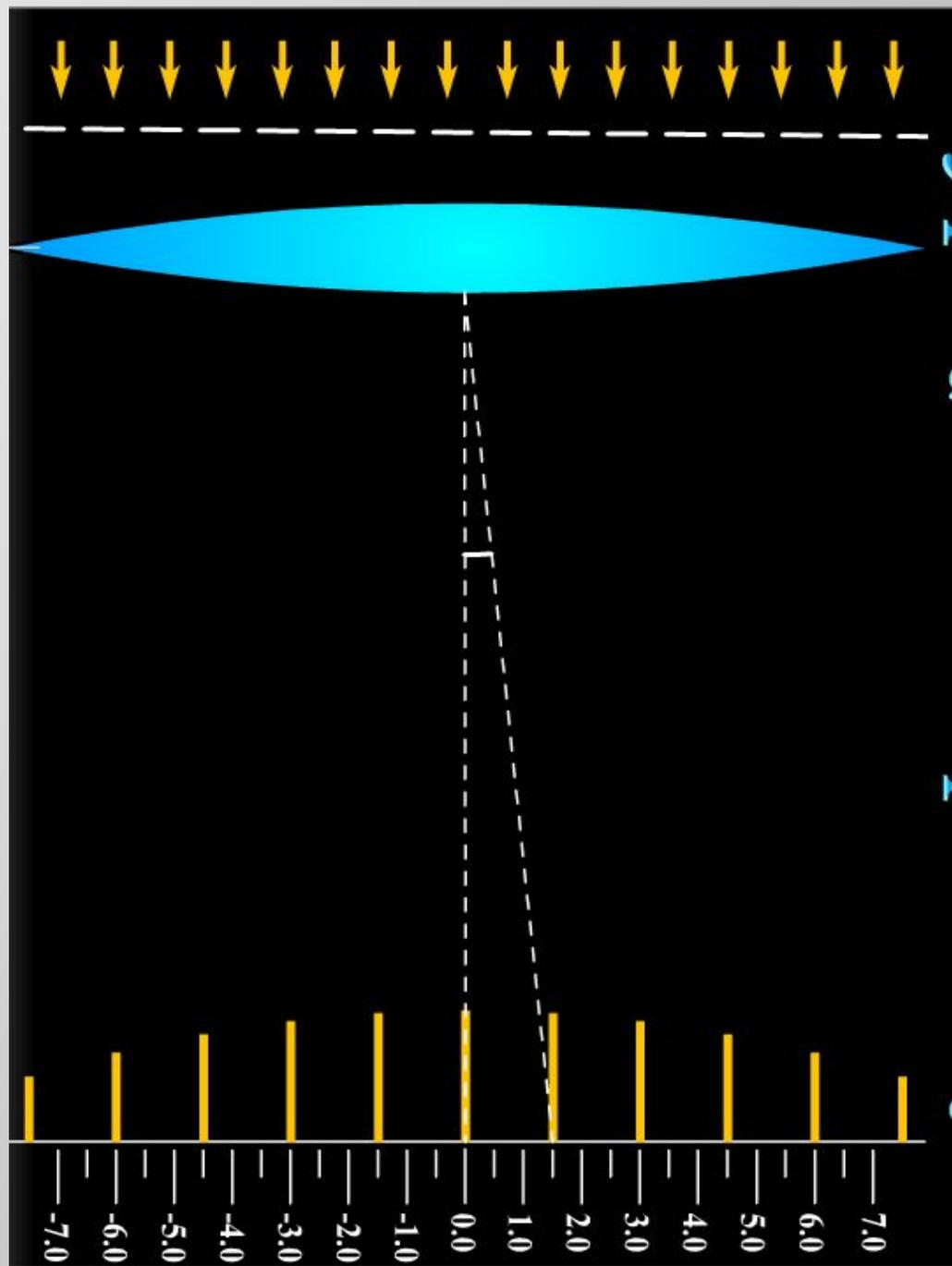
Одномерная дифракционная решетка представляет собой систему из большого числа N одинаковых по ширине и параллельных друг другу щелей в экране, разделенных также одинаковыми по ширине непрозрачными промежутками.



b - ширина щели решетки; a - расстояние между щелями; $d = a + b$ - постоянная дифракционной решетки, ϕ - угол дифракции.

Линза собирает все лучи, падающие на нее под одним углом.

Дифракционная картина на решетке определяется как результат взаимной интерференции волн, идущих от всех щелей, т.е. в **дифракционной решетке** осуществляется **многолучевая интерференция** когерентных дифрагированных пучков света, идущих от всех щелей.



Условие **максимума** для дифракционной решетки будет иметь вид:

$$d \sin \varphi = m\lambda \quad \text{где } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

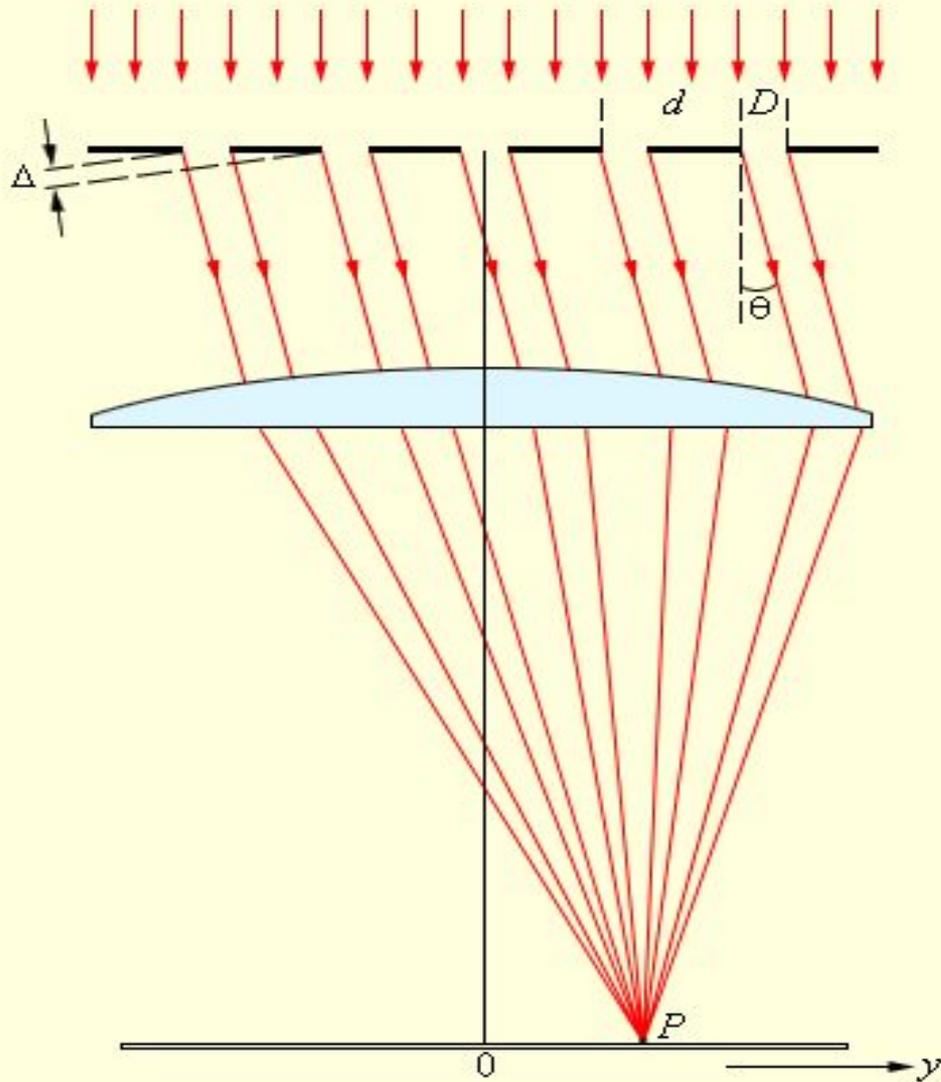
Максимумы, соответствующие этому условию, называются **главными максимумами**.

Значение величины **m**, соответствующее тому или иному максимуму называется **порядком дифракционного максимума**.

В точке F_0 всегда будет наблюдаться **нулевой** или **центральный дифракционный максимум**.

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

Угол дифракции пропорционален длине волны λ . Значит, дифракционная решетка разлагает белый свет на составляющие, причем отклоняет свет с большей длиной волны (красный) на больший угол (в отличие от призмы, где все происходит наоборот).



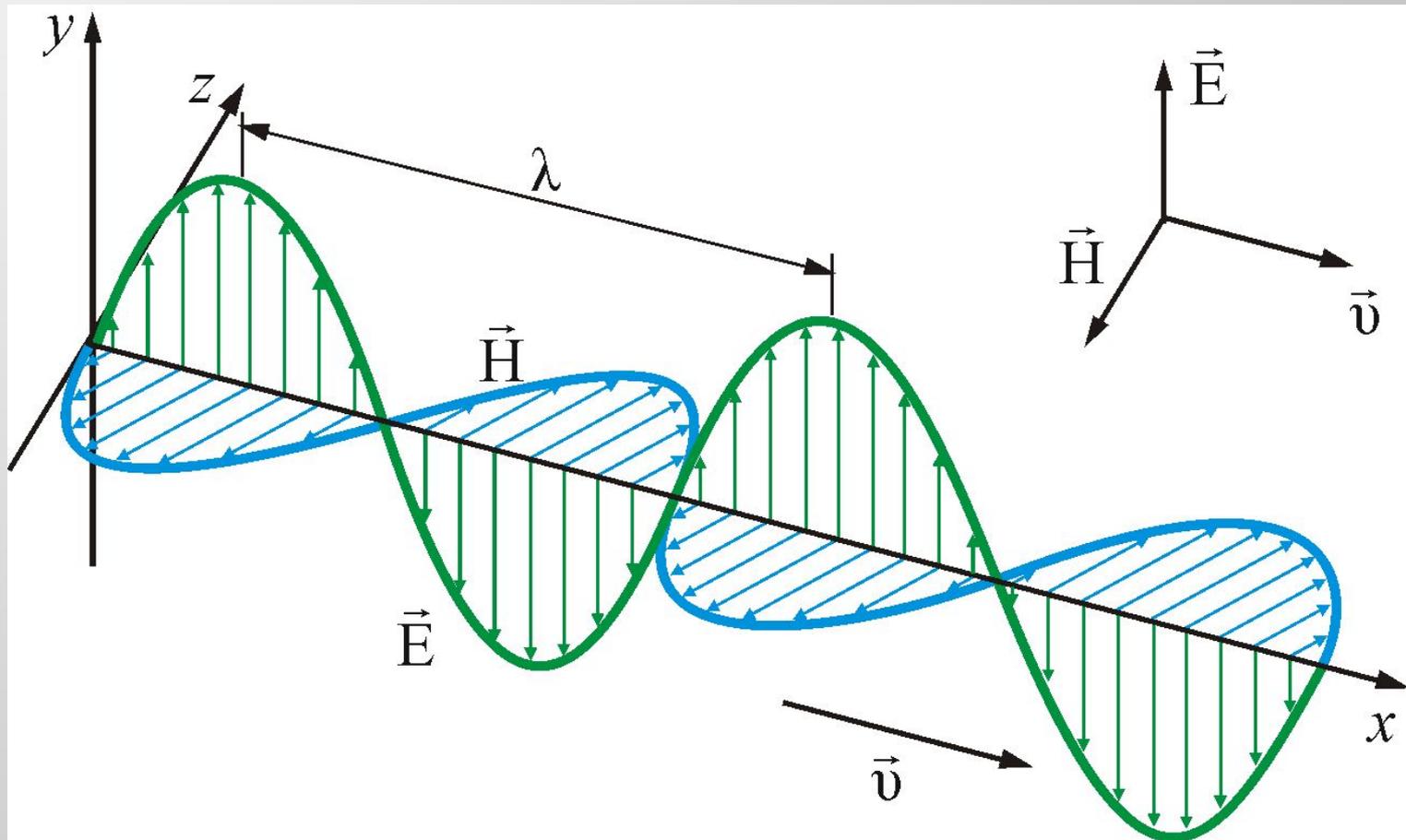
$m=-3$ $m=-2$ $m=-1$ $m=0$ $m=1$ $m=2$ $m=3$

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

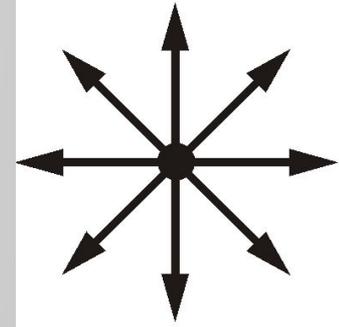
1. Естественный и поляризованный свет.
2. Поляризация при отражении и преломлении.
3. Двойное преломление света.
4. Закон Малюса.
5. Интерференция поляризованного света.
6. Искусственная анизотропия.

Естественный и поляризованный свет

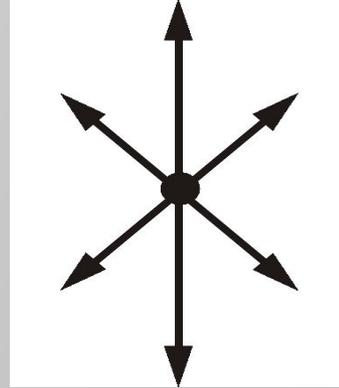
Основным свойством электромагнитных волн является **поперечность** колебаний векторов напряжённости электрического и магнитного полей



Естественный свет – неполяризованный:

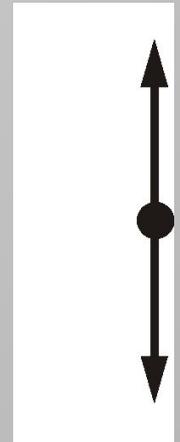


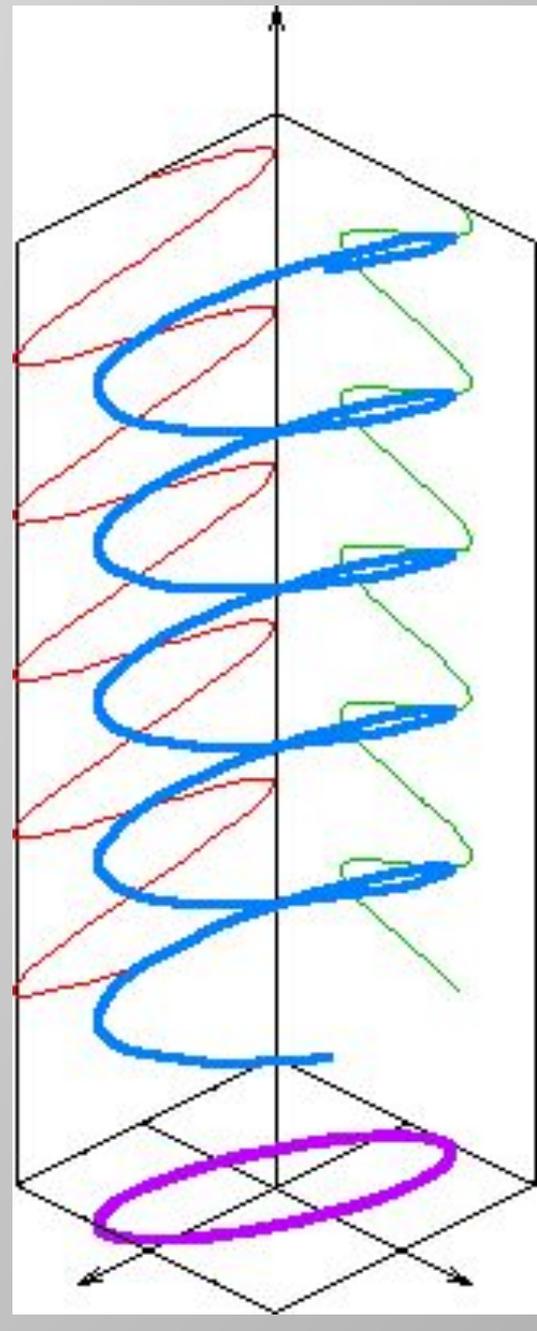
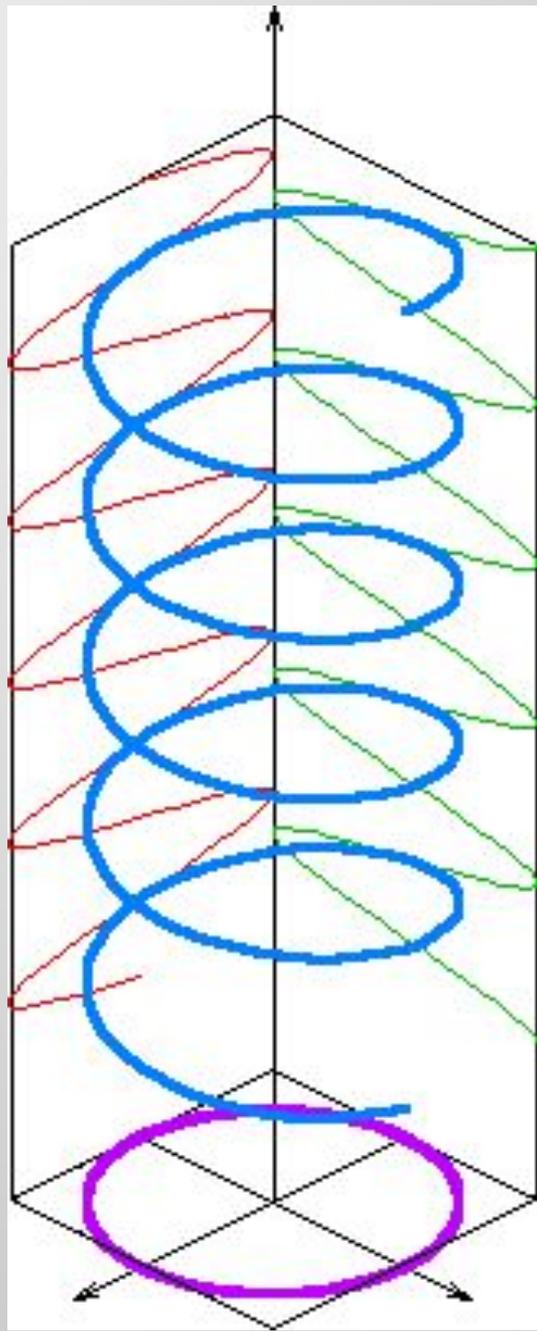
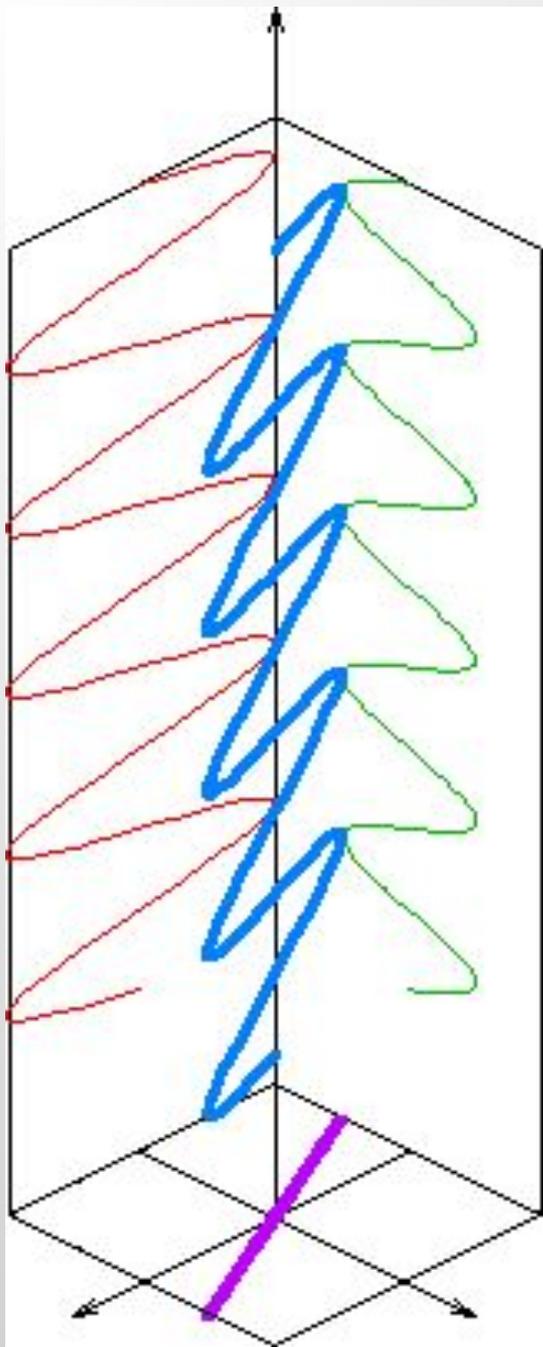
Свет с преимущественным направлением колебаний вектора \vec{E} называют **частично поляризованным светом**



Линейная поляризация

Электромагнитная волна в этом случае называется **полностью поляризованной**.

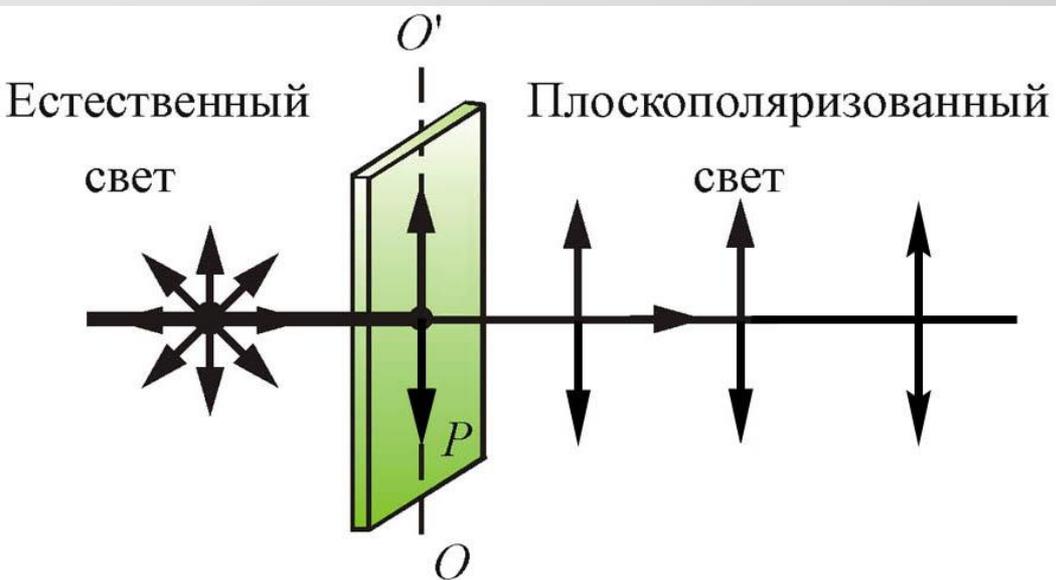




Линейно поляризованный свет:

Устройства, позволяющие получать линейно поляризованный свет из естественного, называют **линейными поляризаторами**:

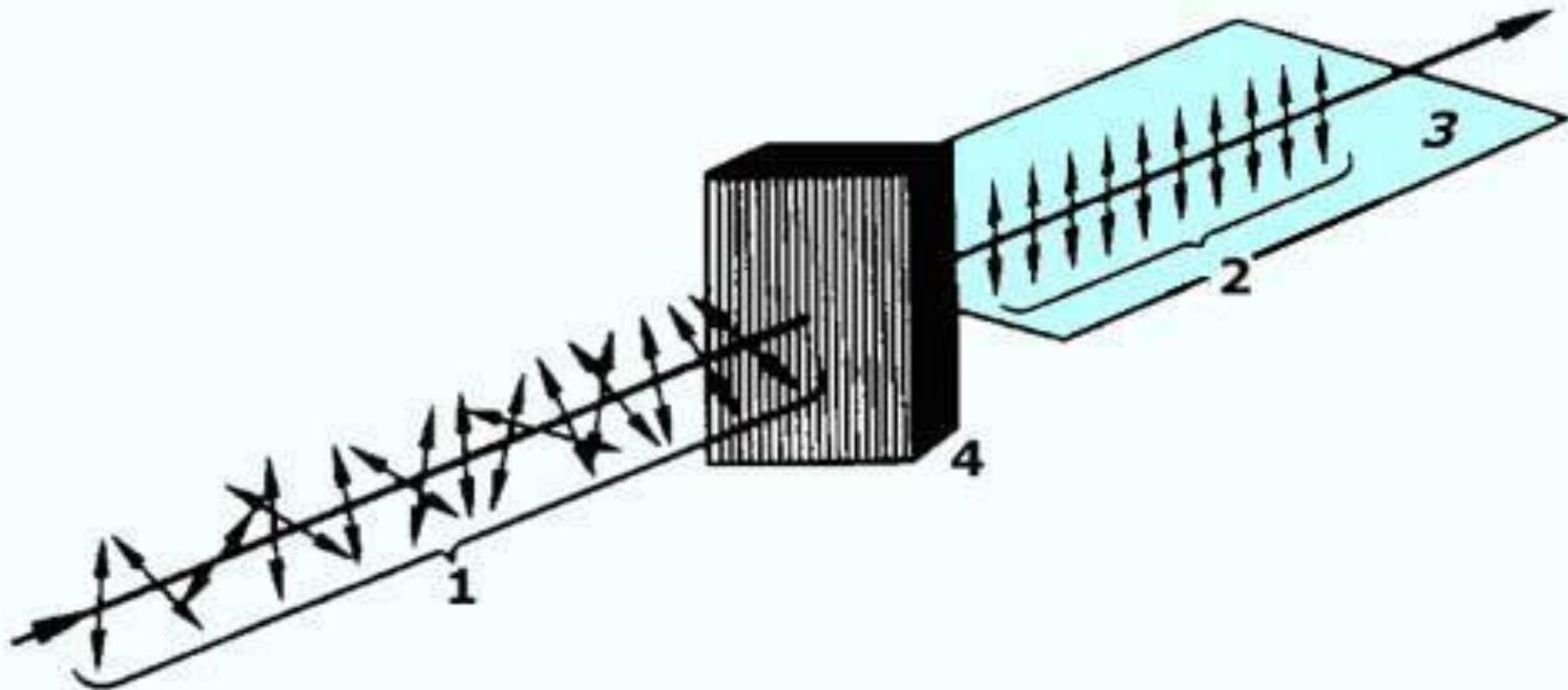
- **свободно** пропускают колебания, параллельные плоскости поляризатора,
- **полностью или частично задерживают** колебания перпендикулярные к его плоскости.



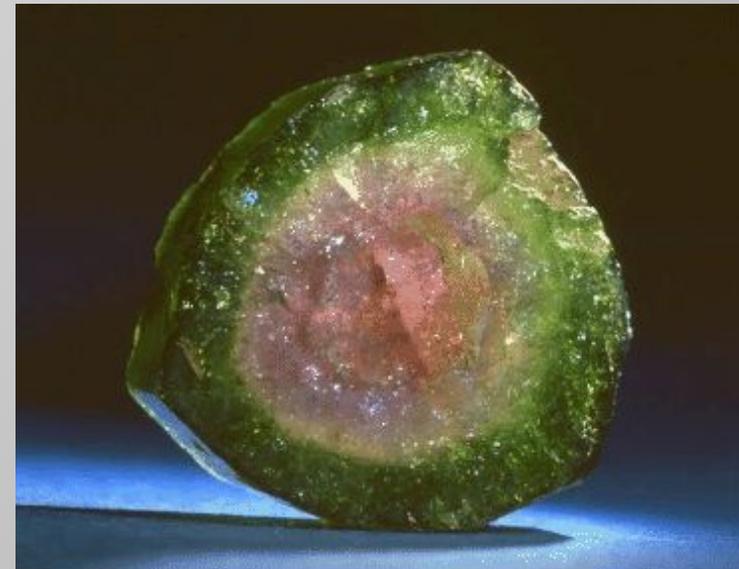
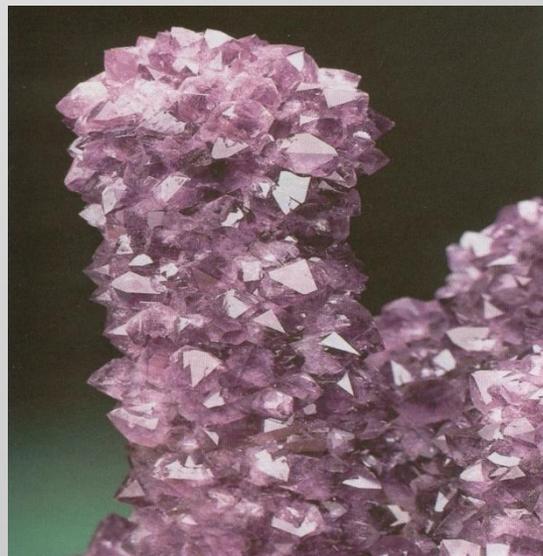
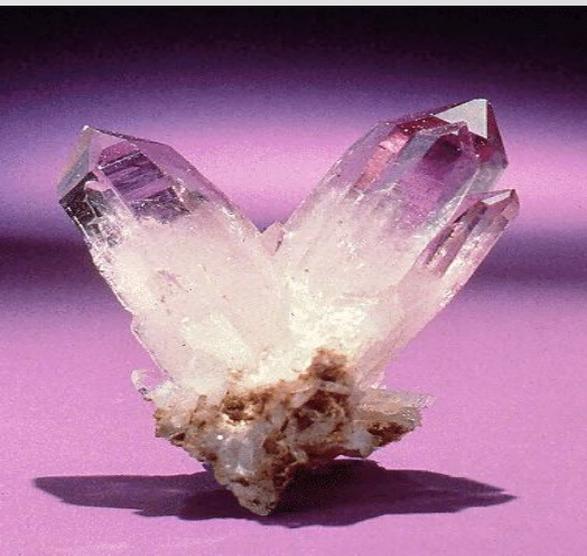
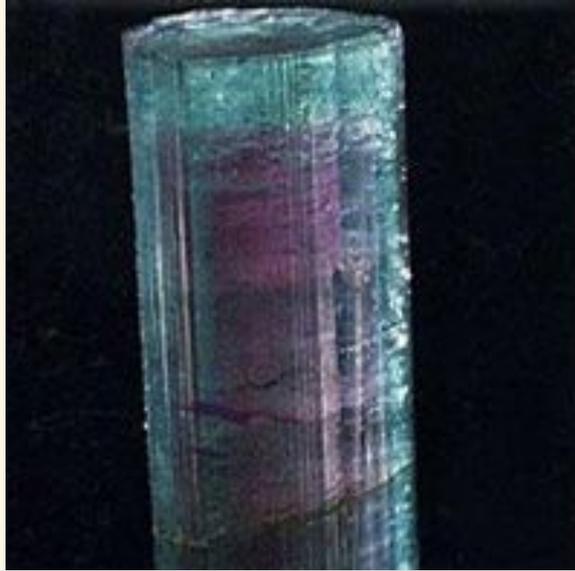
После прохождения поляризатора свет будет линейно поляризован в направлении OO' .

Линейные поляризаторы:

- **оптически анизотропные кристаллы** (турмалин), вырезанные параллельно его оптической оси;
- **поляроиды** – целлулоидные плёнки, в которые введено большое количество одинаково ориентированных с помощью растяжения или сдвиговой деформации кристалликов.
- **оптические стопы изотропных пластинок**, прозрачных в нужной области спектра.



Полихромные
кристаллы
турмалина



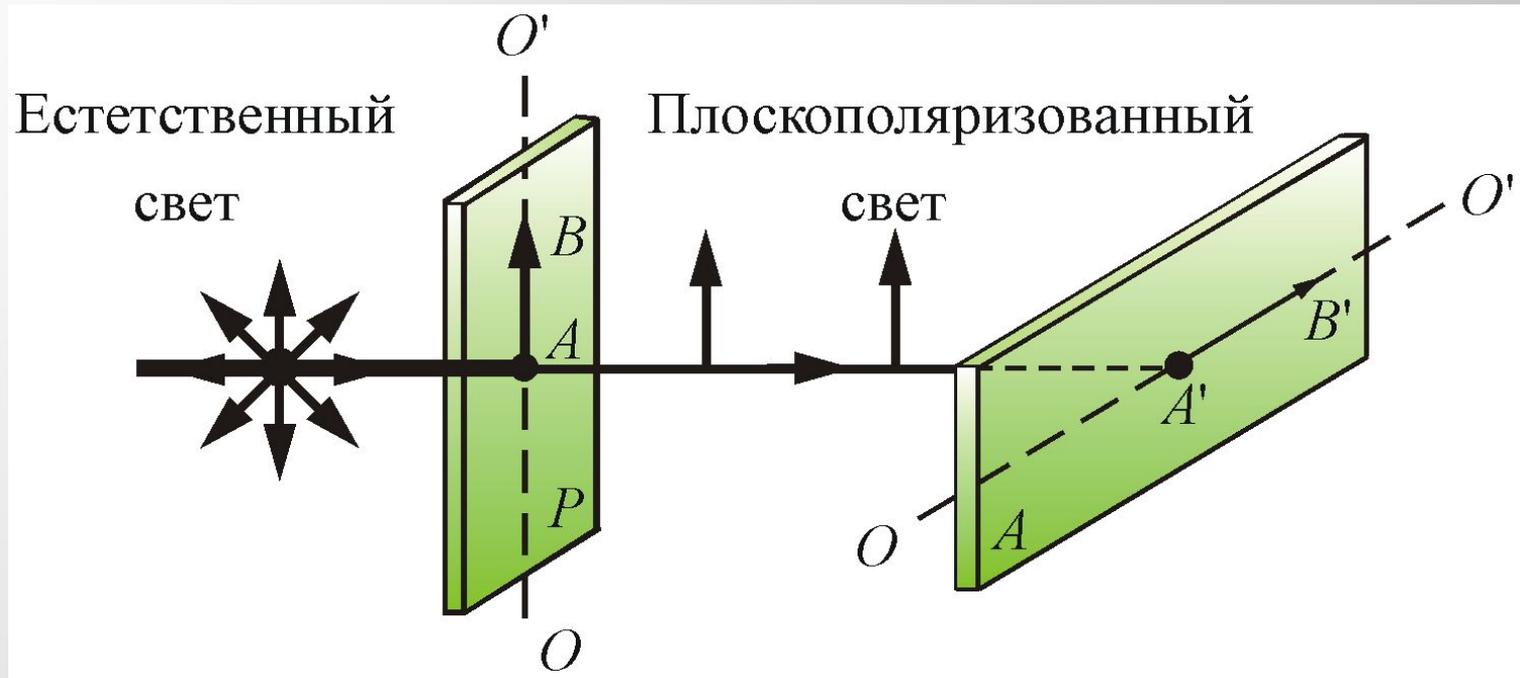
- **Поляризация** электромагнитной волны при отражении и преломлении.

- **Поляризация** при распространении электромагнитных волн в **оптически анизотропных средах**.

Ассиметрию поперечных световых лучей можно изучать, **пропуская свет через анизотропные кристаллы**.

Устройства позволяющие получать линейно поляризованный свет, называют **поляризаторами**.

Для анализа поляризации света, используют **анализаторы**.



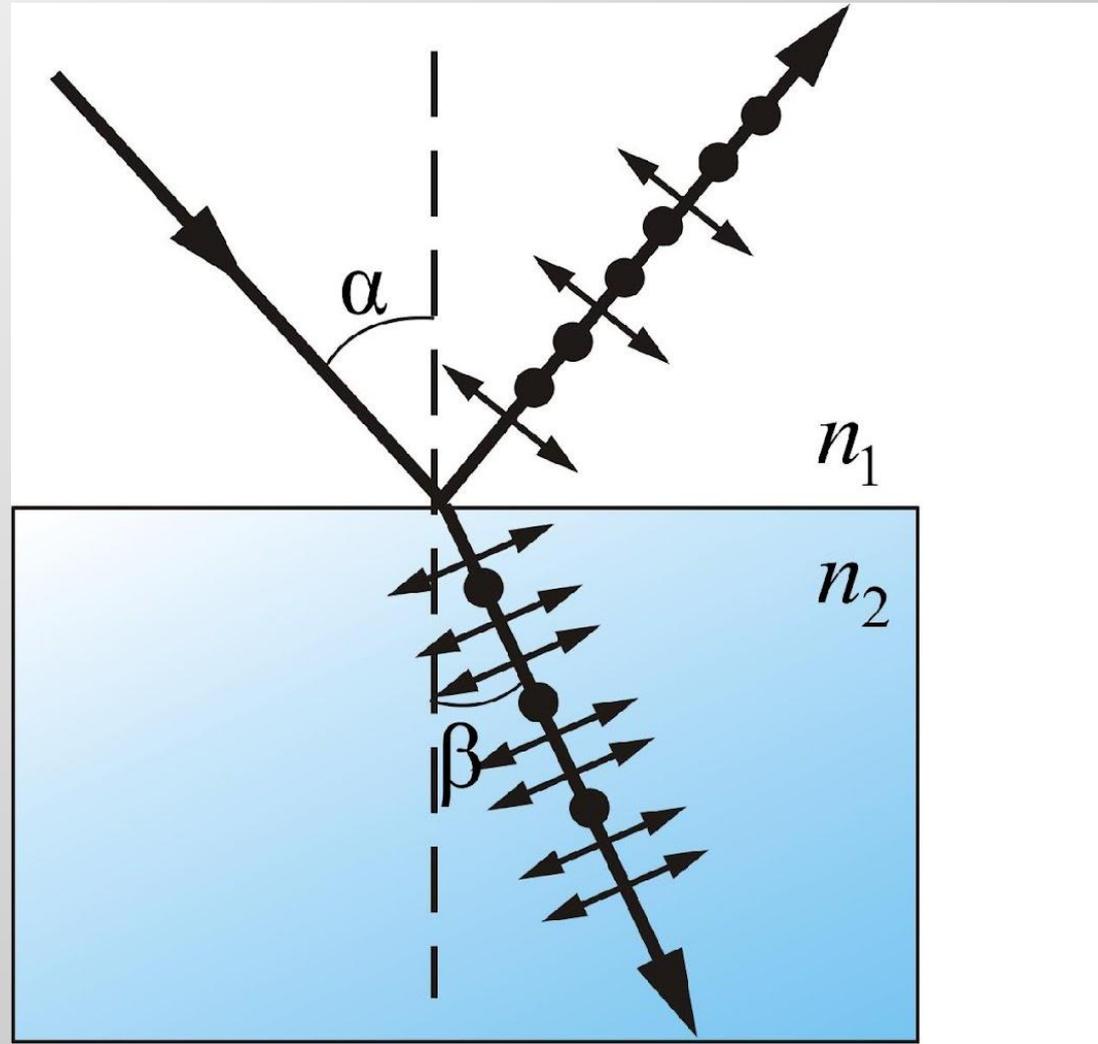
После прохождения поляризатора свет будет линейно поляризован в направлении OO . Интенсивность света, при этом, **уменьшится на половину**. Если на пути луча поставить второй кристалл – анализатор A , то интенсивность света будет изменяться в зависимости от того, как ориентированы друг относительно друга обе пластины.

Поляризация при отражении и преломлении

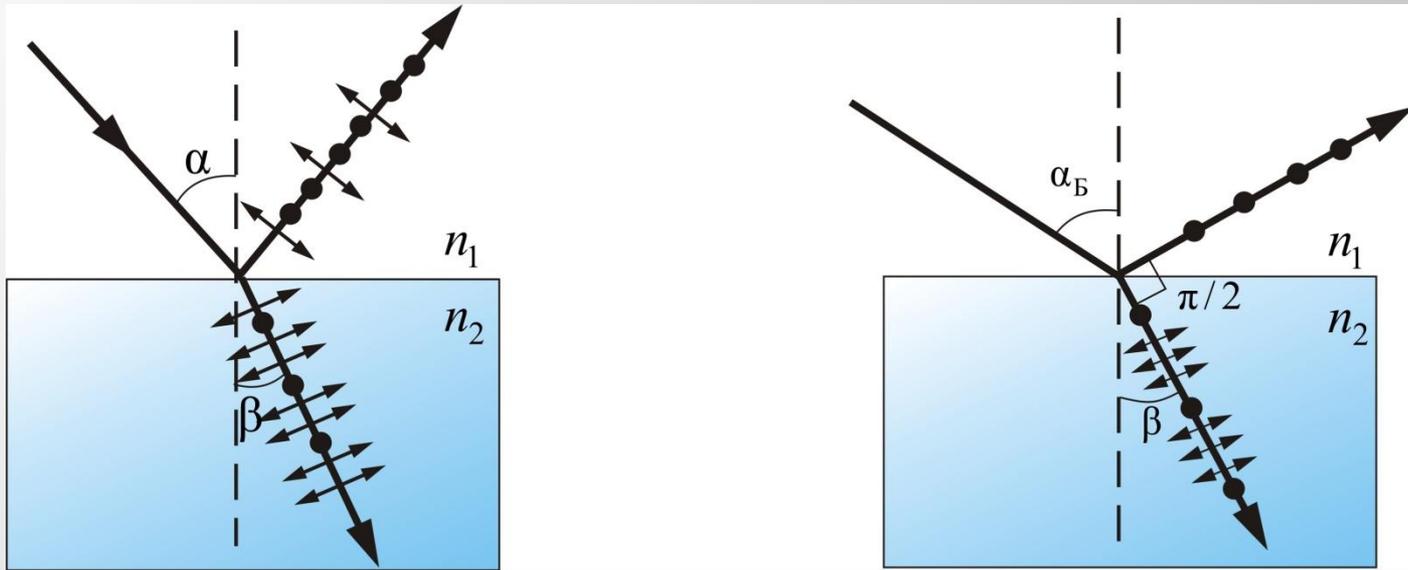
Свет поляризуется при **отражении** от границы двух сред и при прохождении границы – при **преломлении**.

В отраженном луче преобладают колебания, **перпендикулярные** плоскости падения, а в преломленном луче – колебания **параллельные** плоскости падения.

В отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения, а в преломленном луче – колебания параллельные плоскости падения.



Степень поляризации зависит от угла падения:



Если луч падает на границу двух сред под углом α , удовлетворяющему условию

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

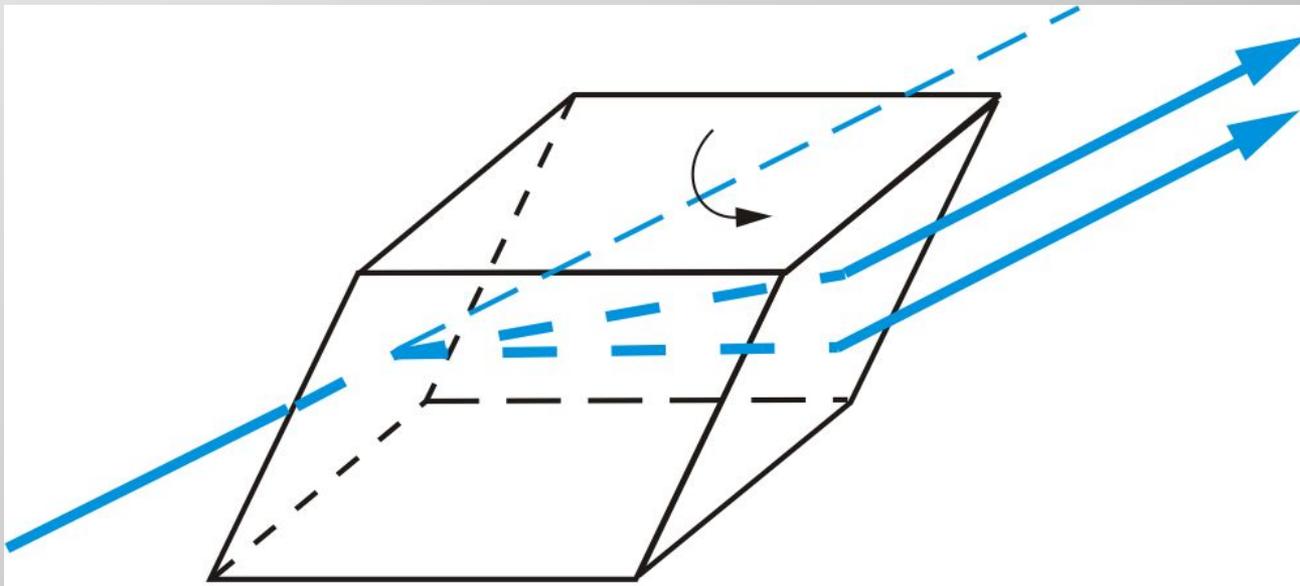
то **отраженный луч** оказывается полностью поляризованным, а **преломленный луч** — поляризован частично.

Угол α — называется углом **Брюстера**.

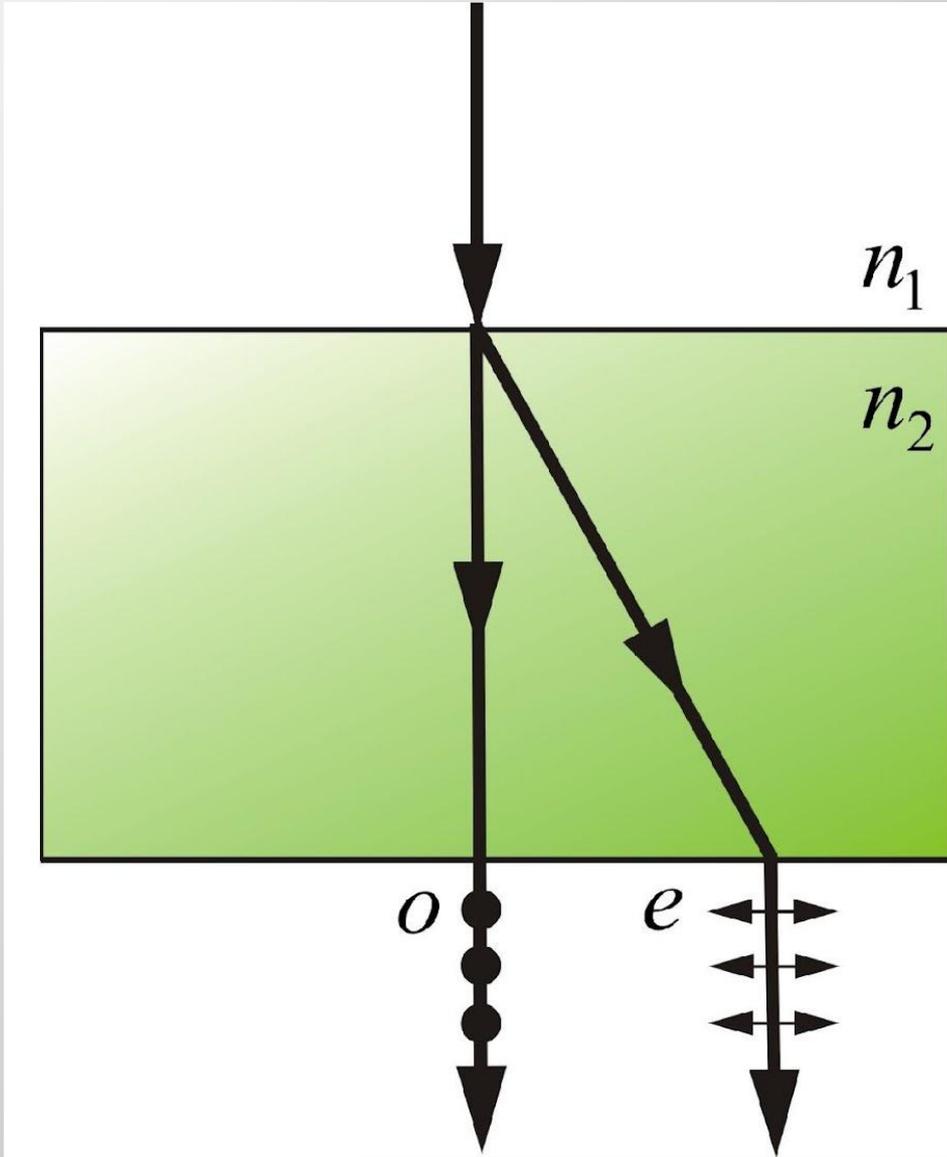
Двойное преломление света

В 1669 г. датский ученый Эразм Бартолин опубликовал работу, в которой сообщил об открытии нового физического явления – двойного преломления света.

В кристалле исландского шпата CaCO_3 Бартолин обнаружил, что луч внутри кристалла расщепляется на два луча :



Явление двойного лучепреломления используется для получения поляризованного света:



Закон Малюса

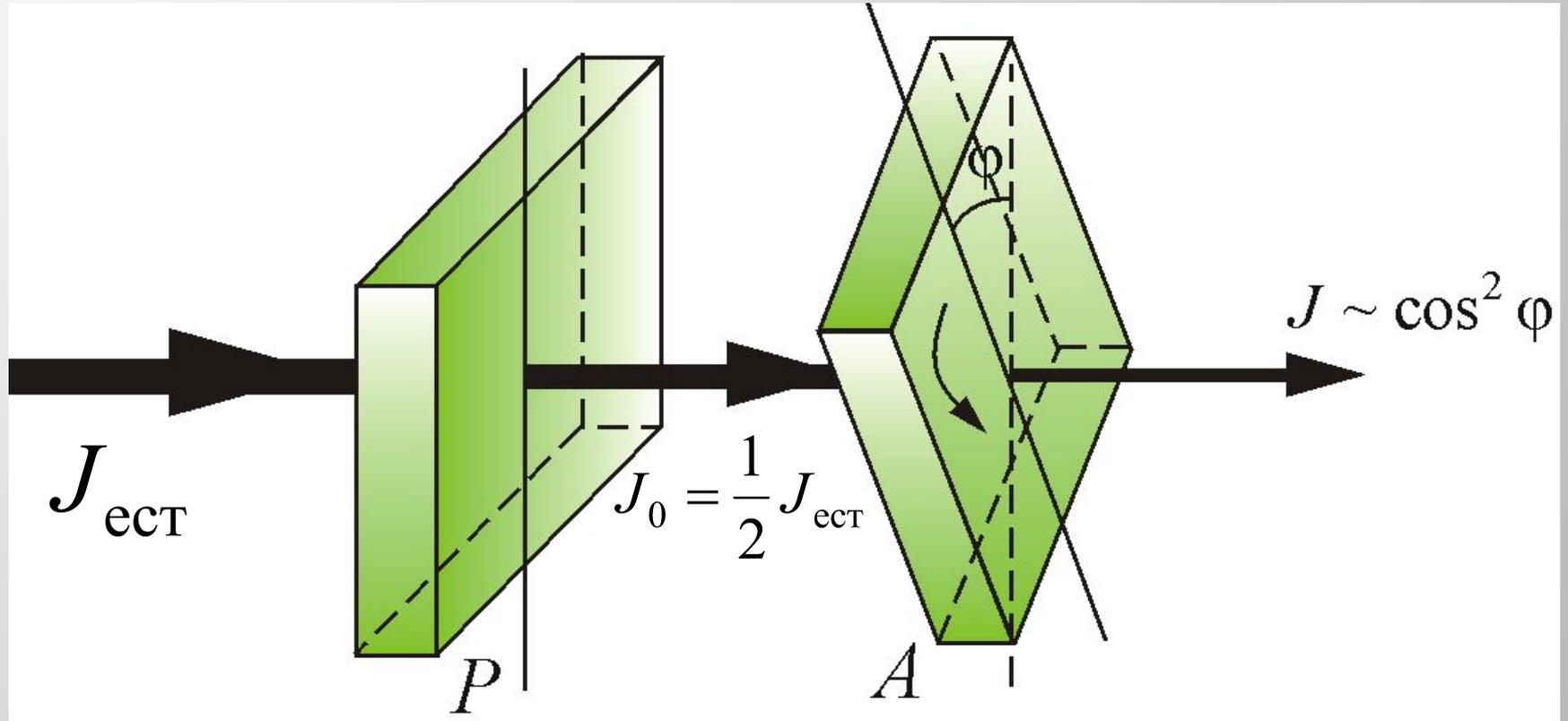
Интенсивность света, прошедшего через поляризатор, прямо пропорциональна произведению интенсивности падающего плоско поляризованного света I_0 и квадрату косинуса угла между плоскостью падающего света и плоскостью поляризатора.

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

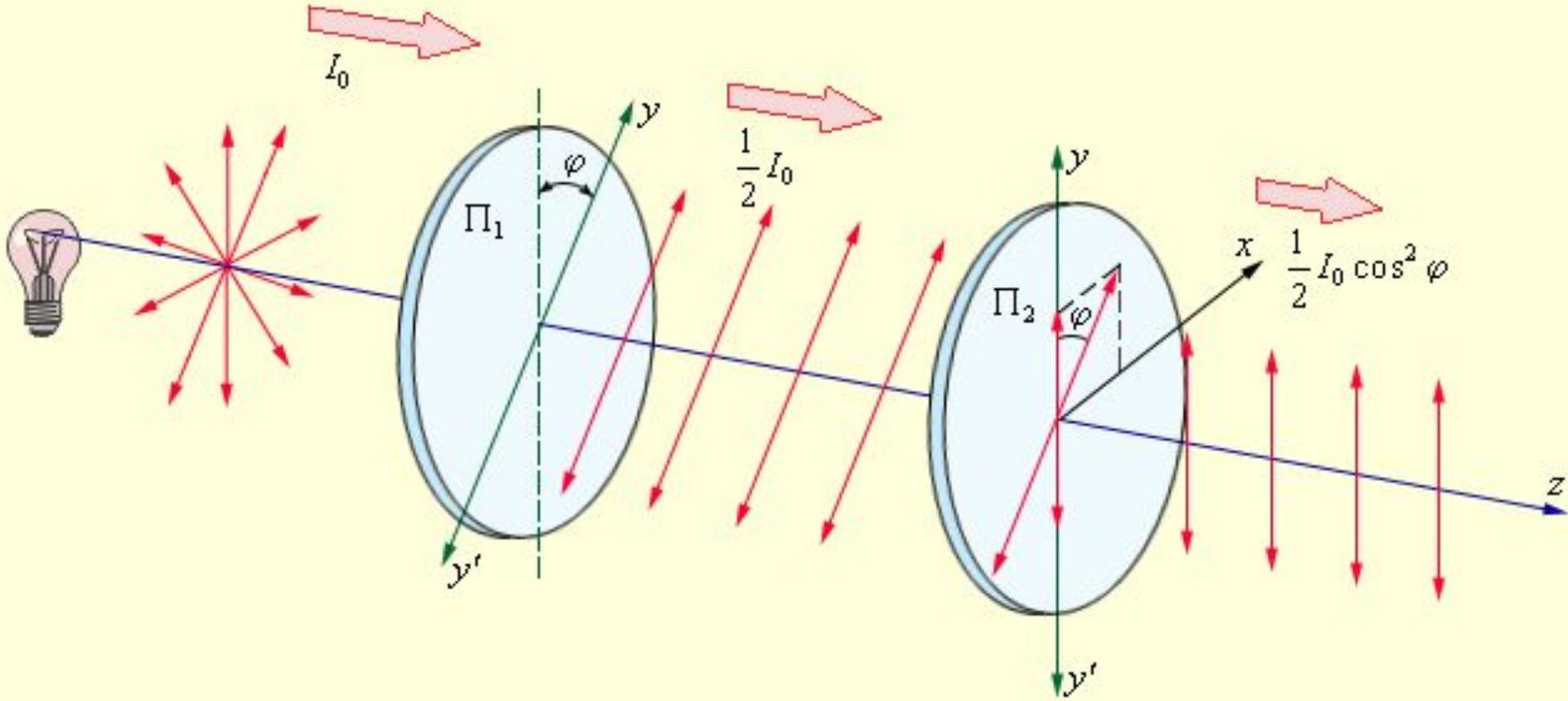
В естественном свете все значения ϕ равновероятны и среднее значение $\langle \cos^2 \phi \rangle = 1/2$

Интенсивность естественного света, **уменьшается в два раза.**

Закон Малюса



$$J = J_0 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} J_{\text{ест}} \cos^2 \varphi$$



Прохождение естественного света через два идеальных поляроида. yy' – разрешенные направления поляроидов