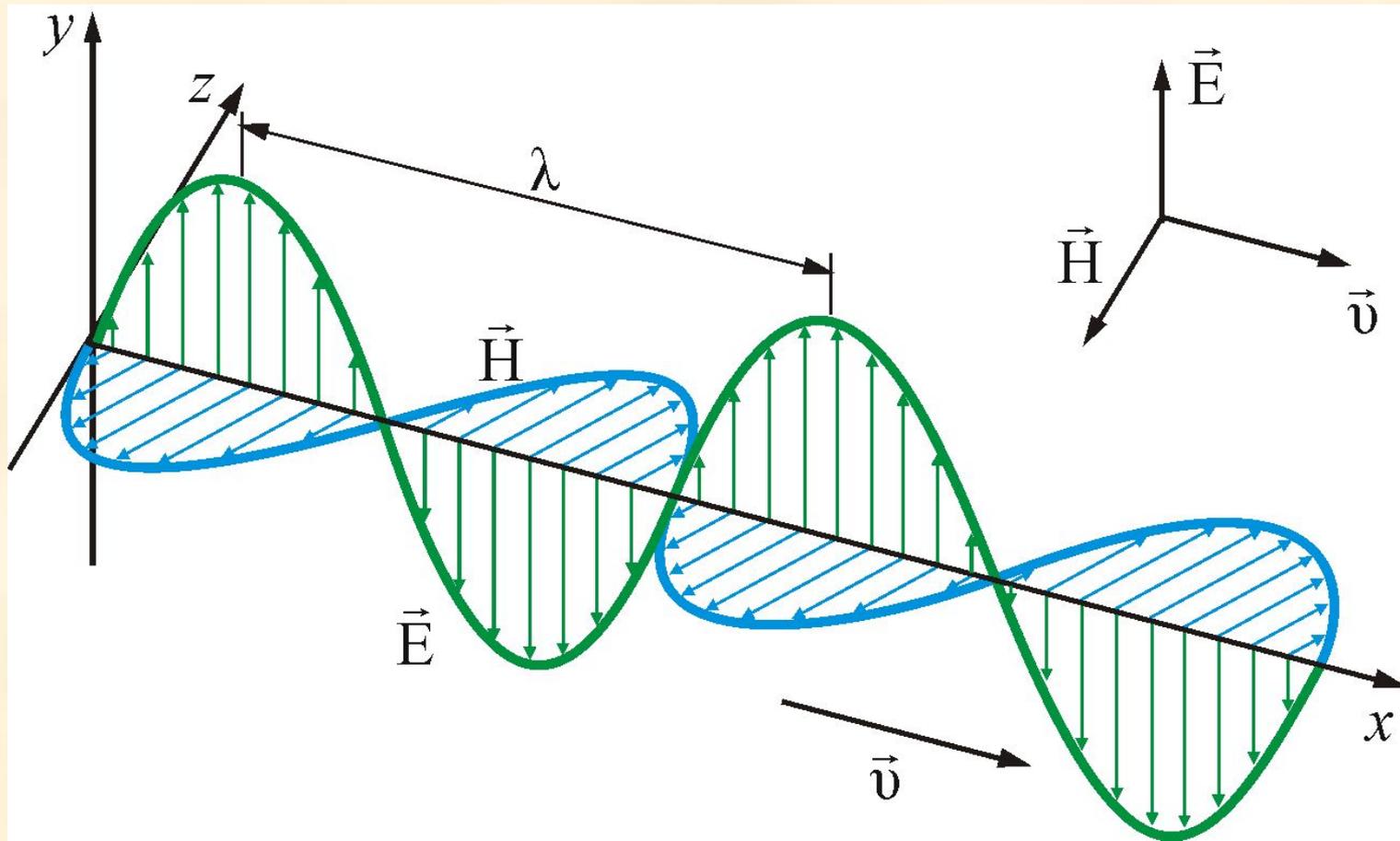


ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА

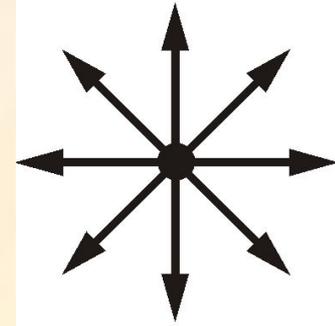
1. Естественный и поляризованный свет
2. Поляризация при отражении и преломлении
3. Двойное преломление света
4. Закон Малюса
5. Интерференция поляризованного света
6. Искусственная анизотропия

1. Естественный и поляризованный свет

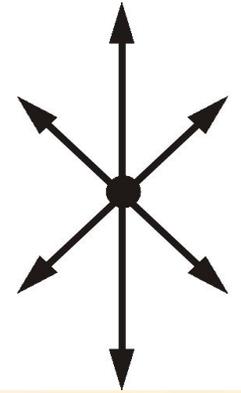
Основным свойством электромагнитных волн является **поперечность** колебаний векторов напряжённости электрического и магнитного полей



Естественный свет – неполяризованный:

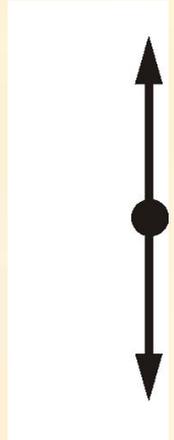


Свет с преимущественным направлением колебаний вектора E называют **частично поляризованным светом**

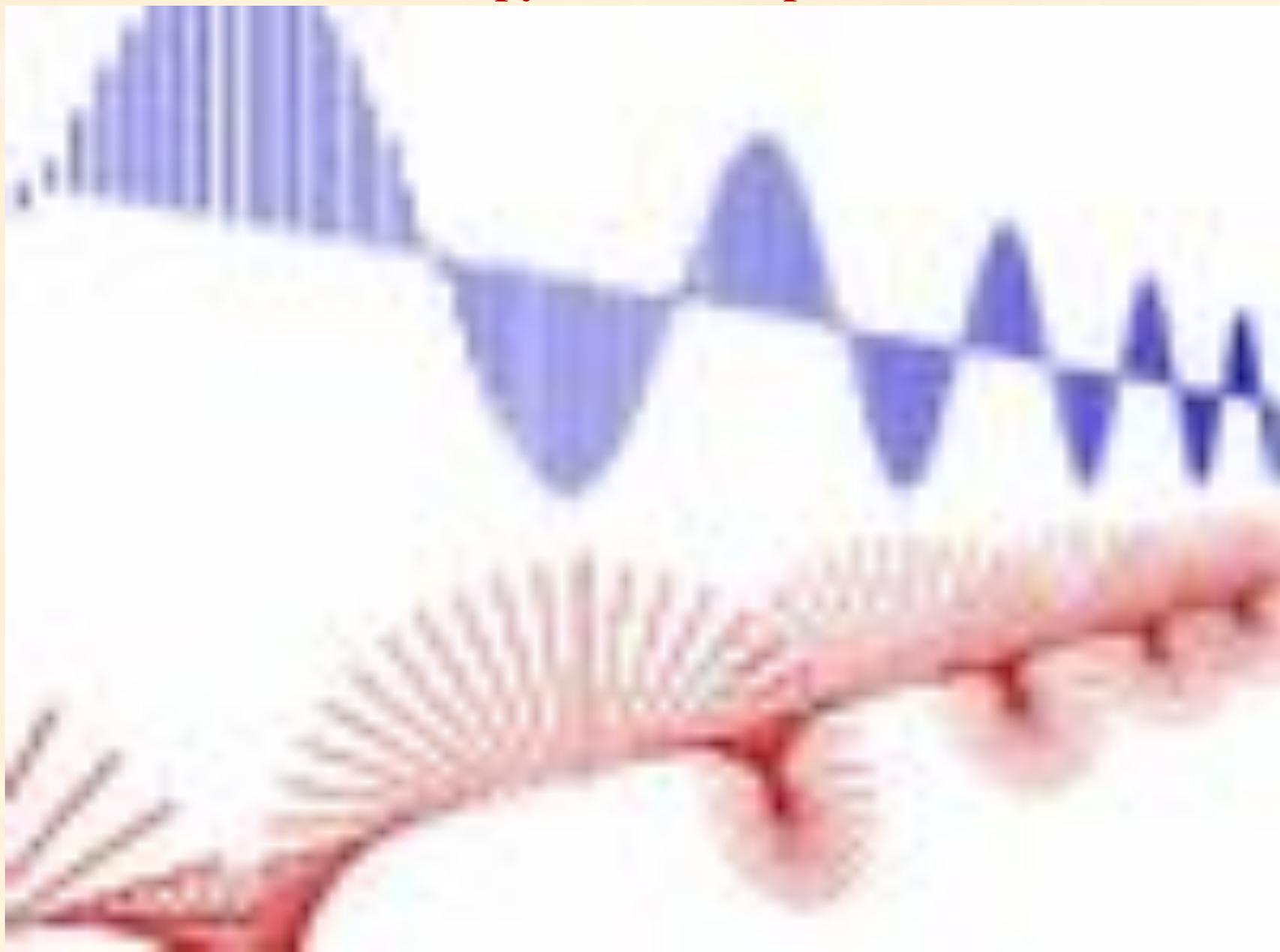


Линейная поляризация

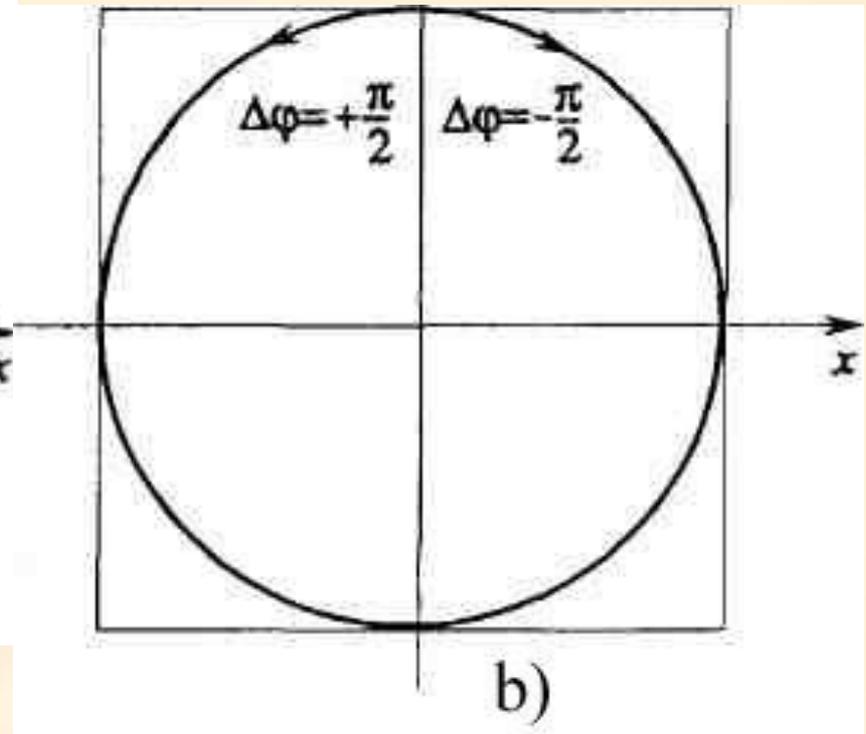
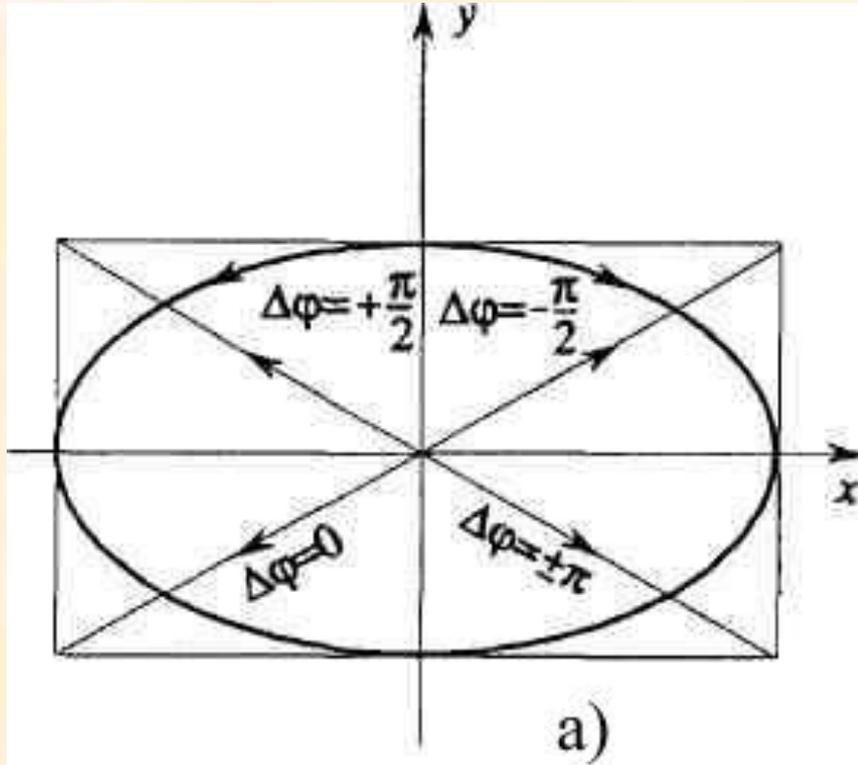
Электромагнитная волна в этом случае называется **полностью поляризованной**.



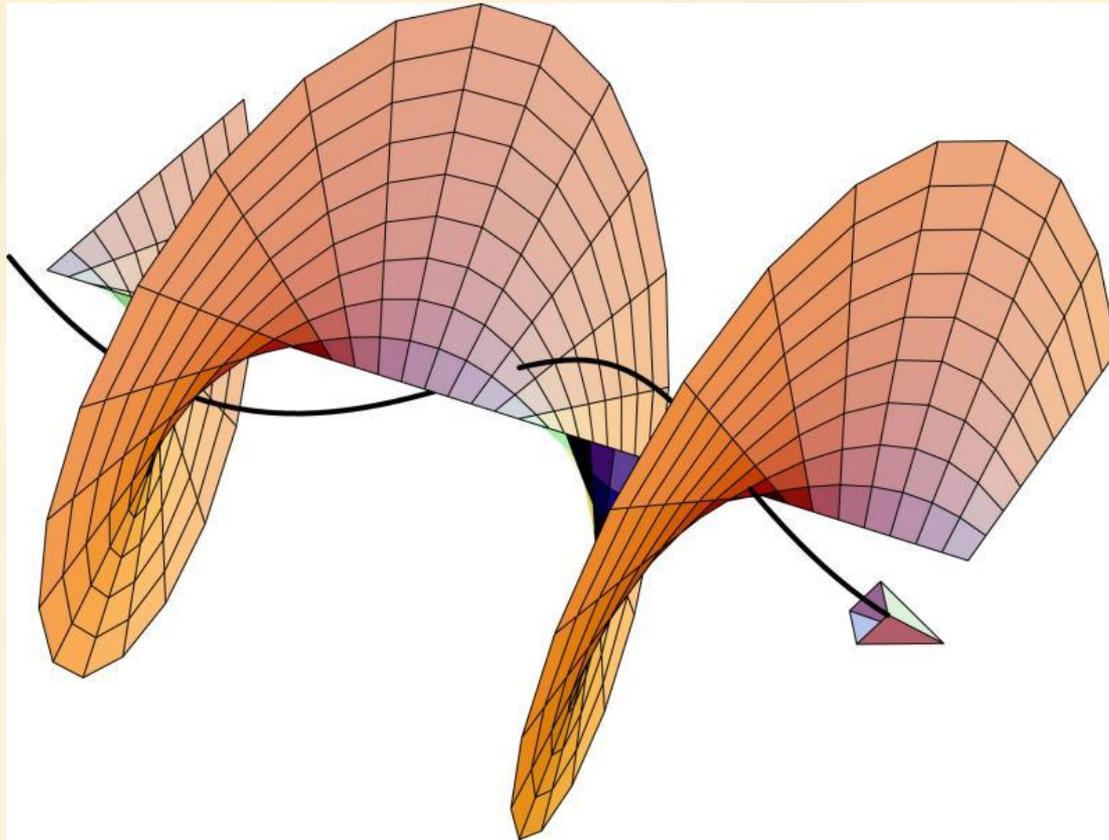
**Линейно поляризованная электромагнитная волна и
волна круговой поляризации.**



Эллиптическая и круговая поляризация электромагнитной волны



Пространственная структура эллиптически - поляризованных волн:



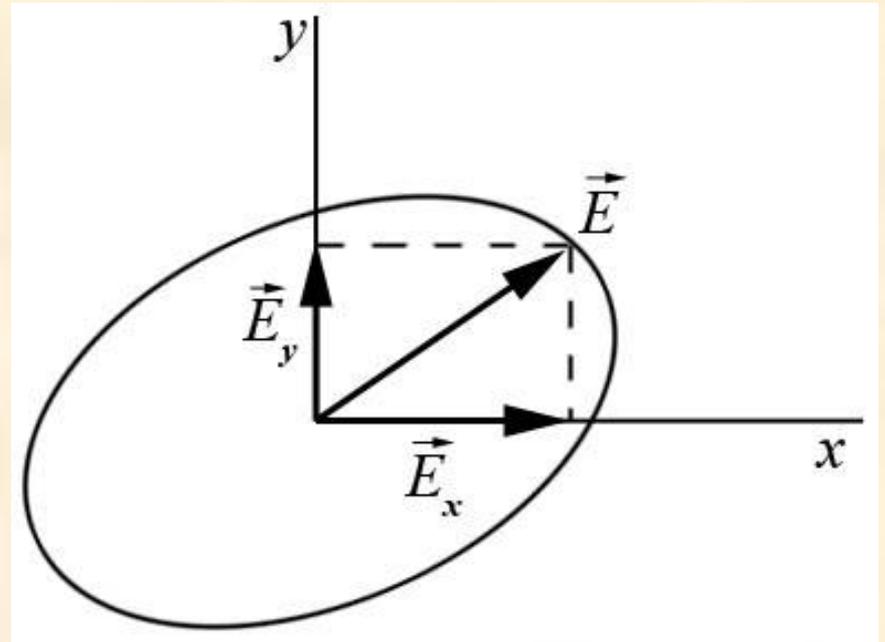
Винтовая линия, геометрическое место концов вектора \vec{E}
Шаг винта равен длине волны λ .

Винтовая линия, не деформируясь, перемещается **со скоростью света** в направлении распространения волны

Образование поляризованного света

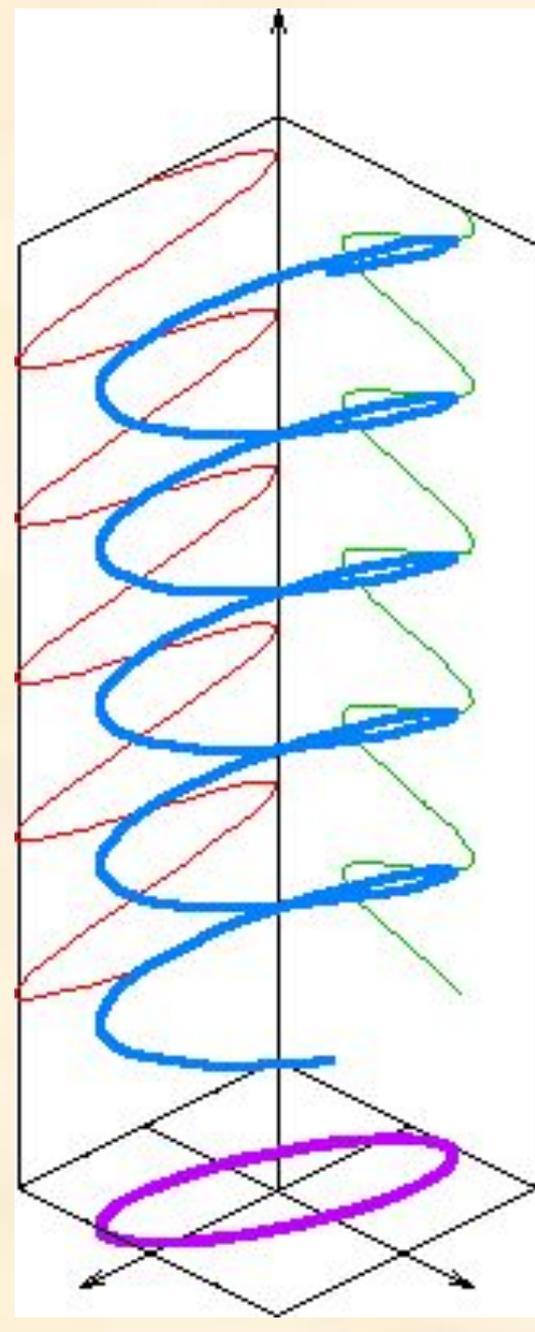
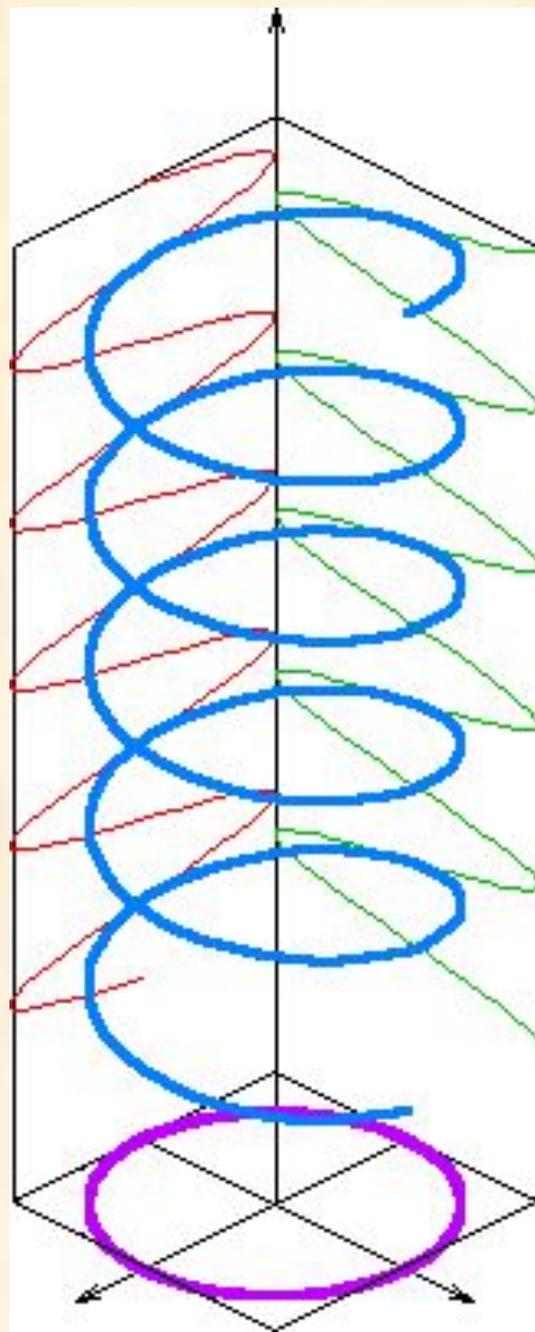
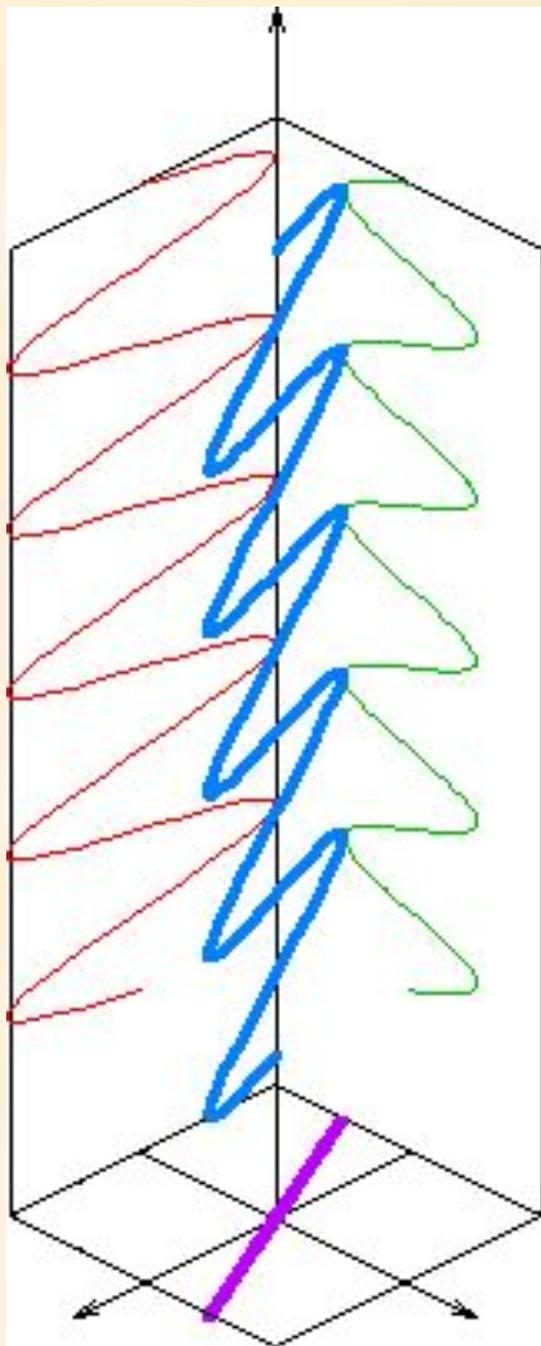
Рассмотрим 2 взаимно перпендикулярных колебания, отличающихся по фазе на α :

$$\begin{cases} E_x = A_1 \cos \omega t \\ E_y = A_2 \cos(\omega t + \alpha) \end{cases}$$



Результат сложения:

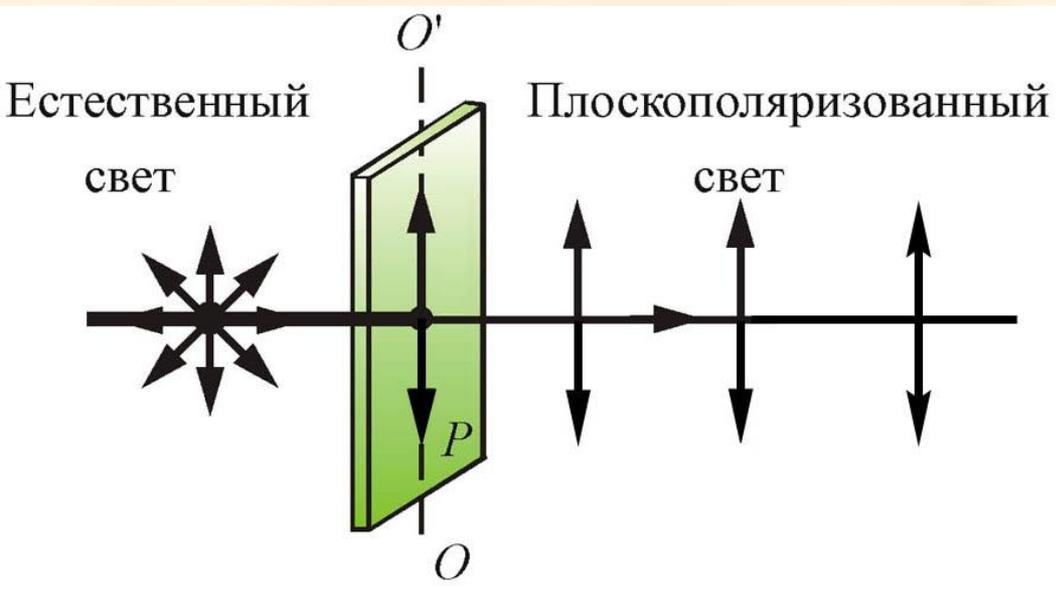
- 1) $\alpha = 0$ или π – плоскополяризованный свет;
- 2) $A_1 = A_2$ и $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$ – свет, поляризованный по кругу;
- 3) произвольные A и α – эллиптически поляризованный свет.



Линейно поляризованный свет:

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

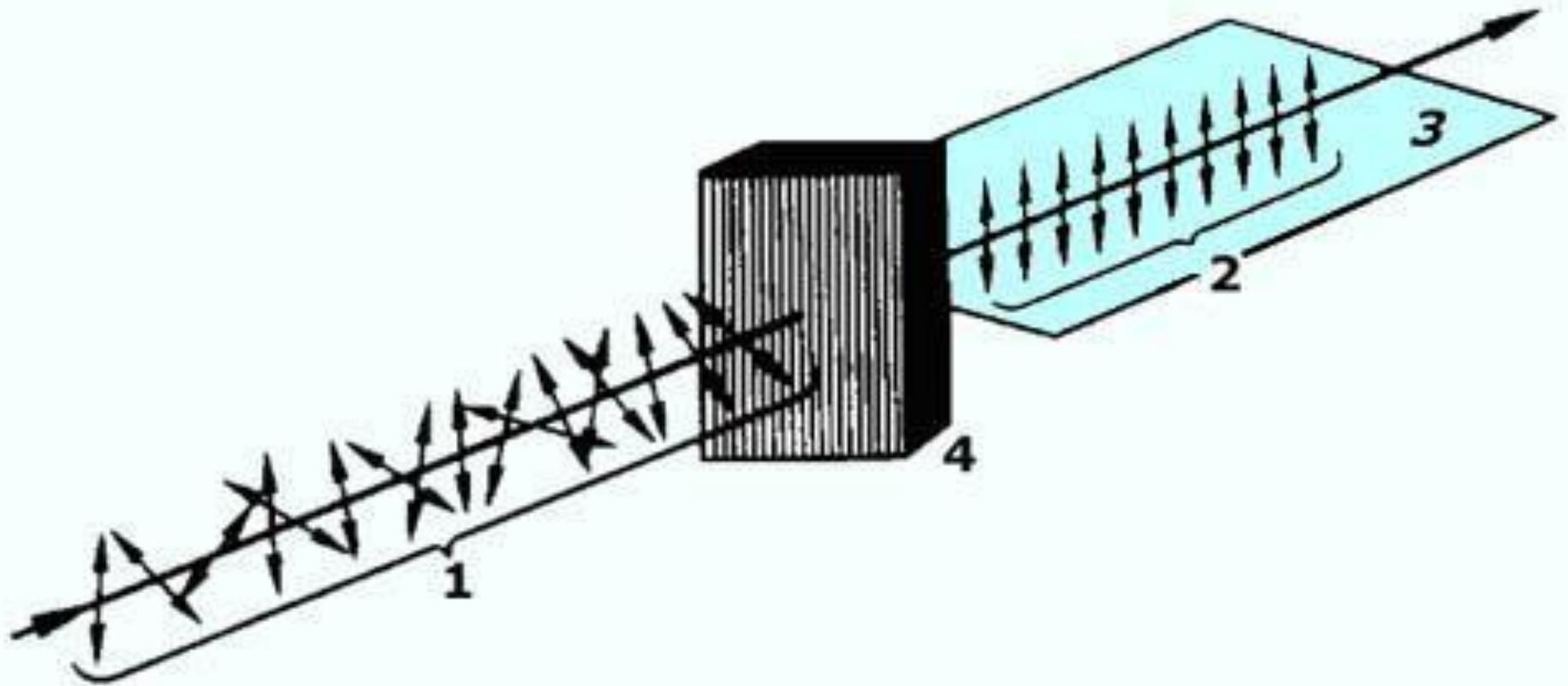
- свободно пропускают колебания, параллельные плоскости поляризатора,
- полностью или частично задерживают колебания перпендикулярные к его плоскости.



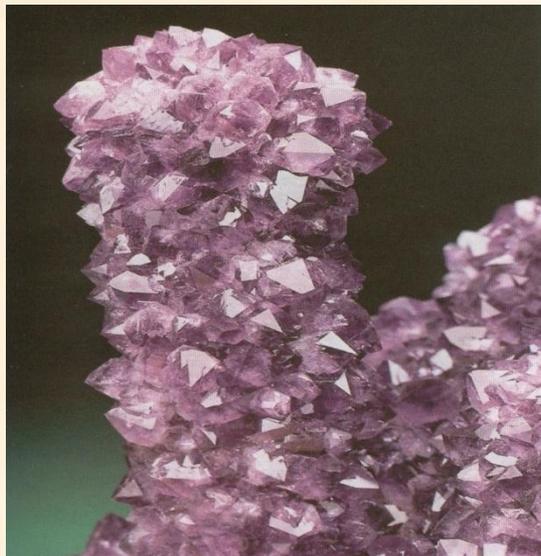
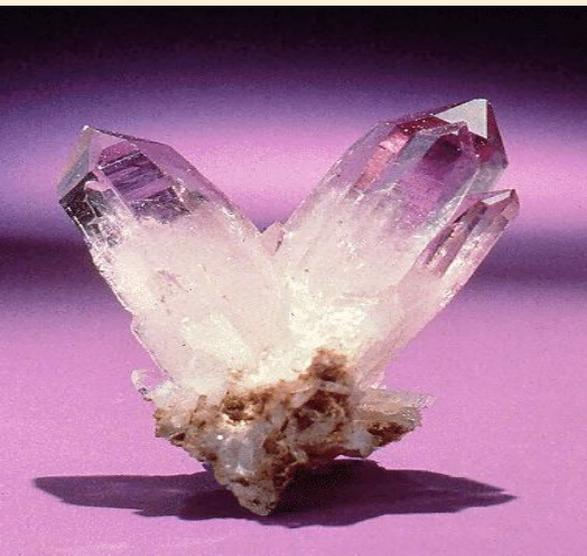
После прохождения поляризатора свет будет линейно поляризован в направлении OO' .

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



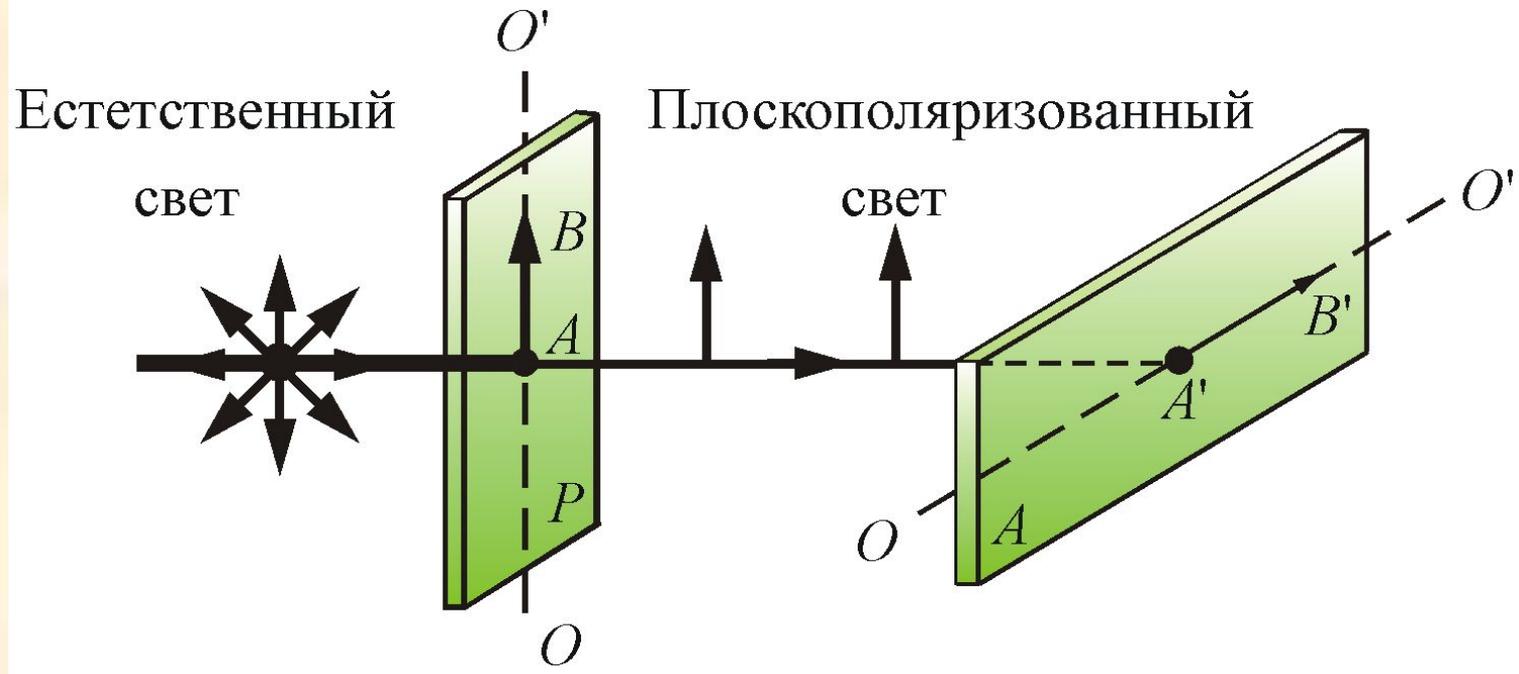
Способы поляризации

- 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**.



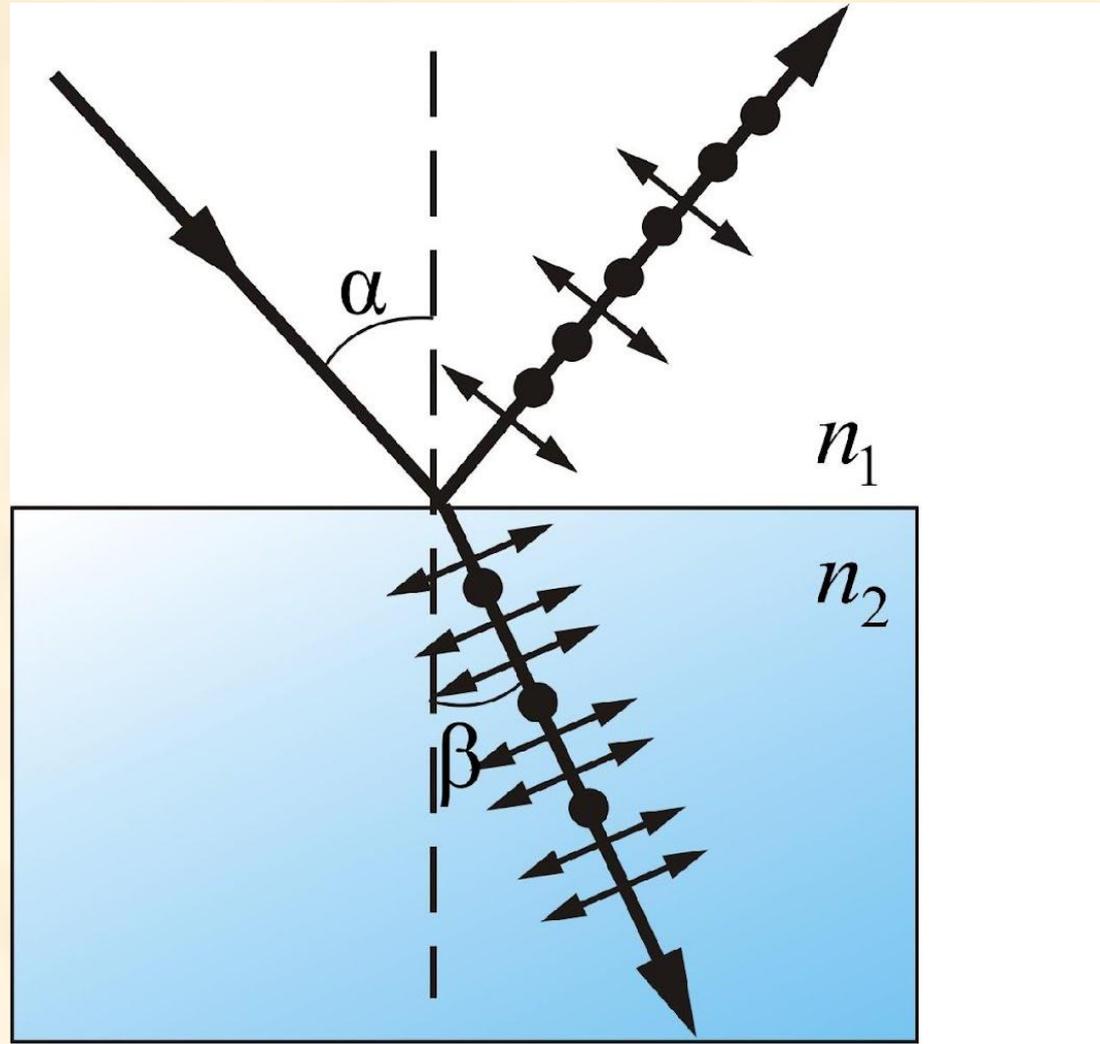
После прохождения поляризатора свет будет линейно поляризован в направлении OO . Интенсивность света, при этом, **уменьшится на половину**. Если на пути луча поставить второй кристалл – анализатор A , то интенсивность света будет изменяться в зависимости от того, как ориентированы друг относительно друга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

2. Поляризация при отражении и преломлении

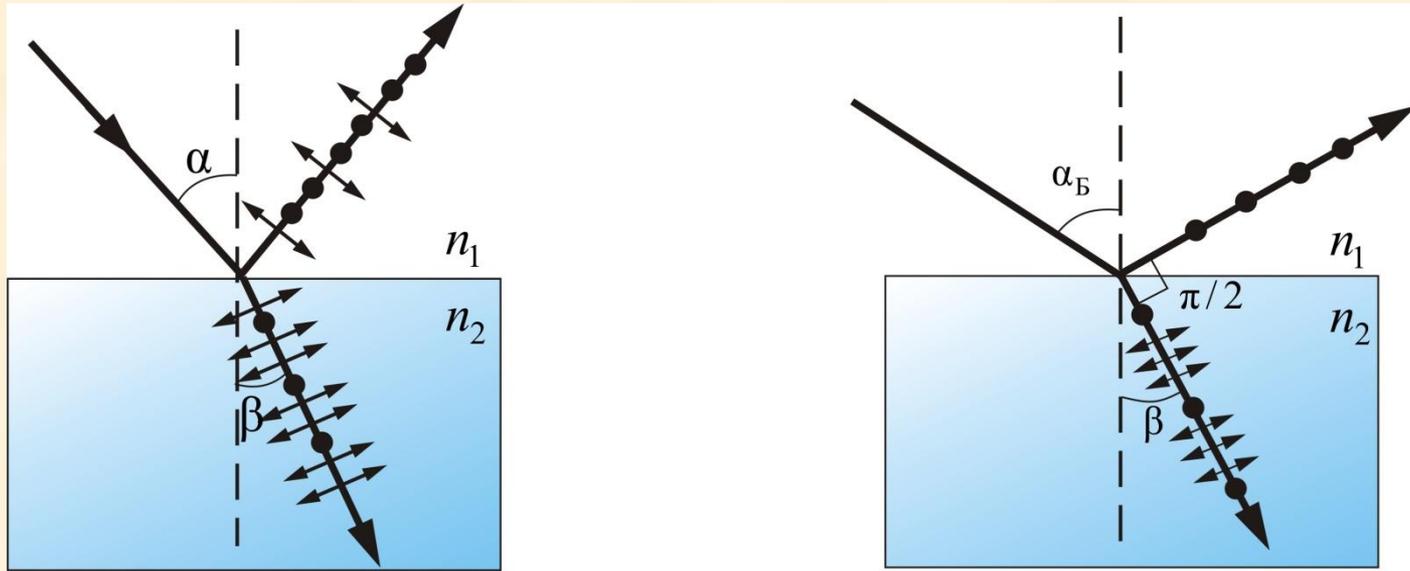
Свет поляризуется при **отражении** от границы двух сред и при прохождении границы – при **преломлении**.

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**.

Формулы Френеля

При падении естественного света на границу раздела двух диэлектриков:

для отраженного луча:

$$\begin{cases} I_{r\perp} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \\ I_{r\parallel} = \frac{1}{2} I_0 \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} \end{cases}$$

для преломленного луча:

$$\begin{cases} I_{p\perp} = \frac{1}{2} I_0 \left[1 - \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \right] \\ I_{p\parallel} = \frac{1}{2} I_0 \left[1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)} \right] \end{cases}$$

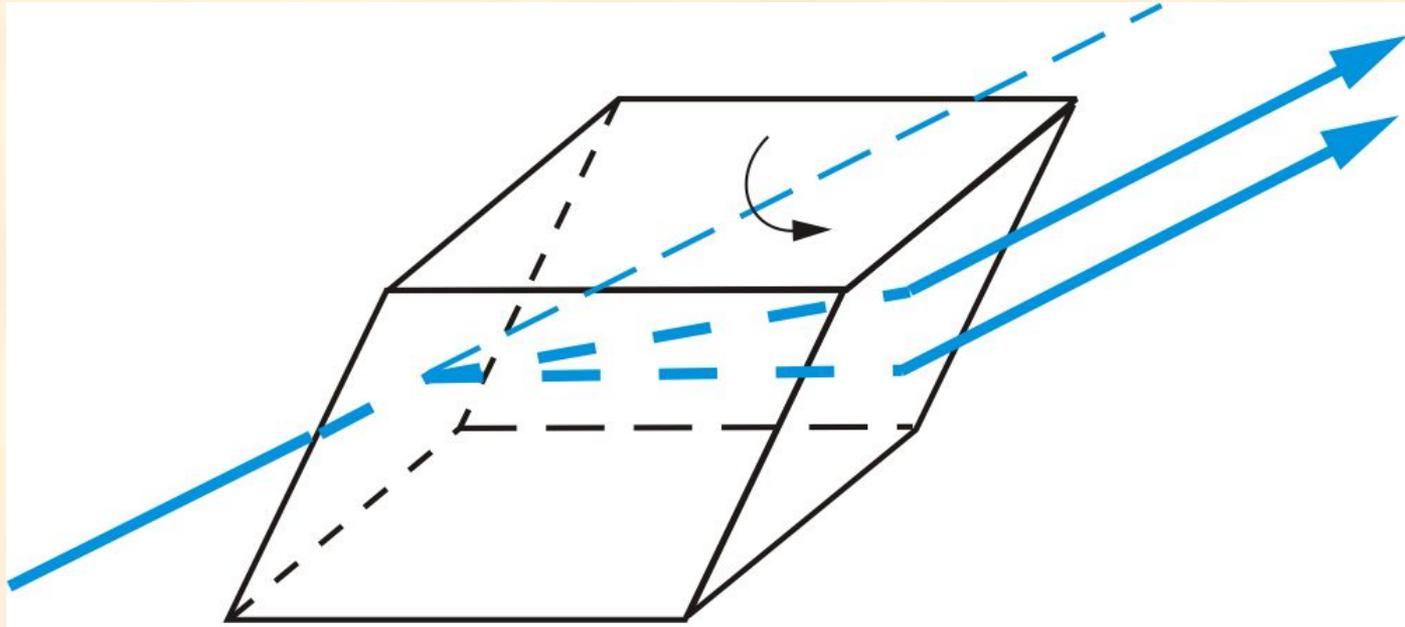
Степень поляризации можно записать как

$$P = \frac{|I_{\perp} - I_{\parallel}|}{I_{\perp} + I_{\parallel}}$$

3. 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** :



Объяснение этого явления дал современник Бартолина — голландский ученый Христиан Гюйгенс.

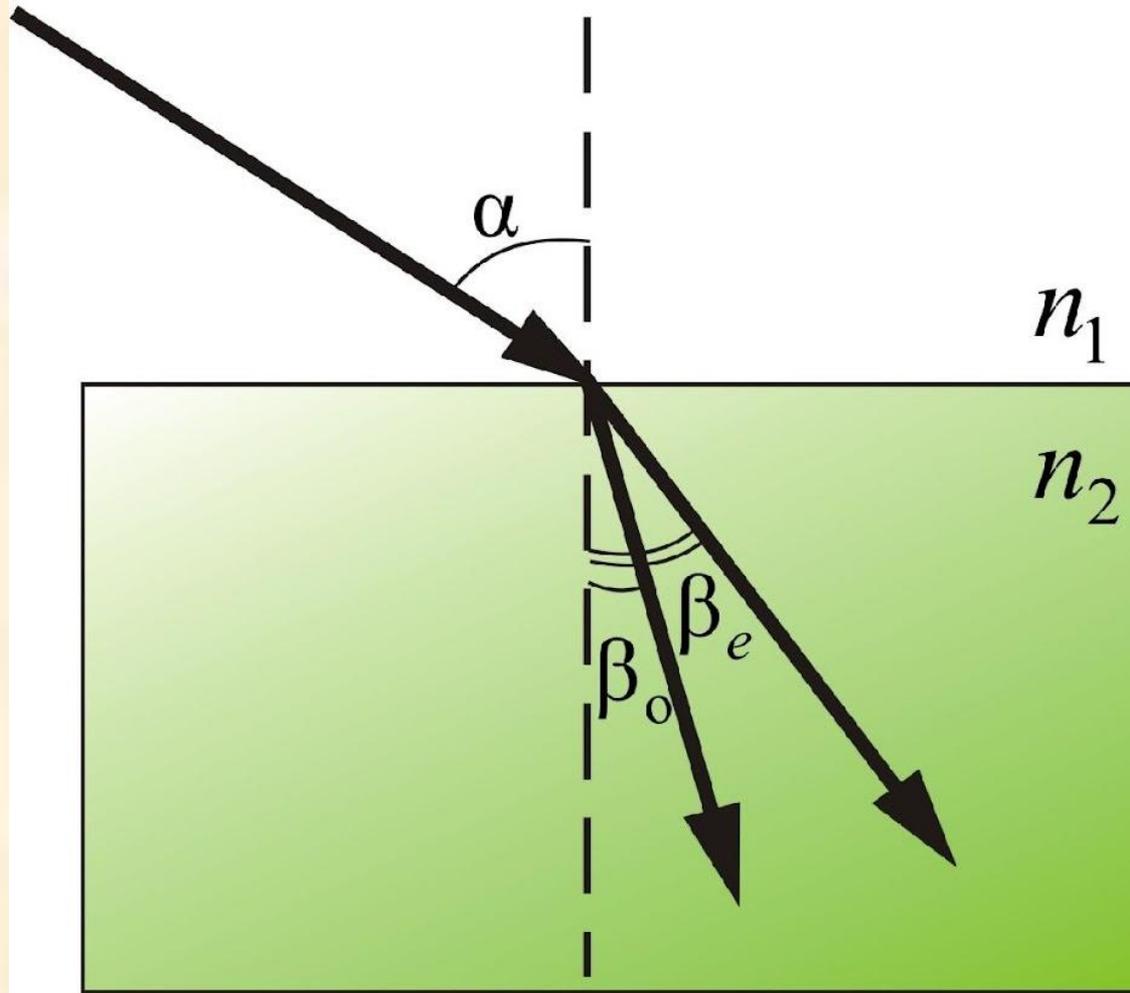
Расщепление луча света, проходящего через исландский шпат, связано с **анизотропией кристалла**.

У анизотропных кристаллов имеется оптическая ось.

Плоскость, проходящая через **оптическую ось**, называется **главным сечением кристалла**

Одноосные кристаллы (исландский шпат, турмалин)

Кристаллы двухосные (гипс, слюда).

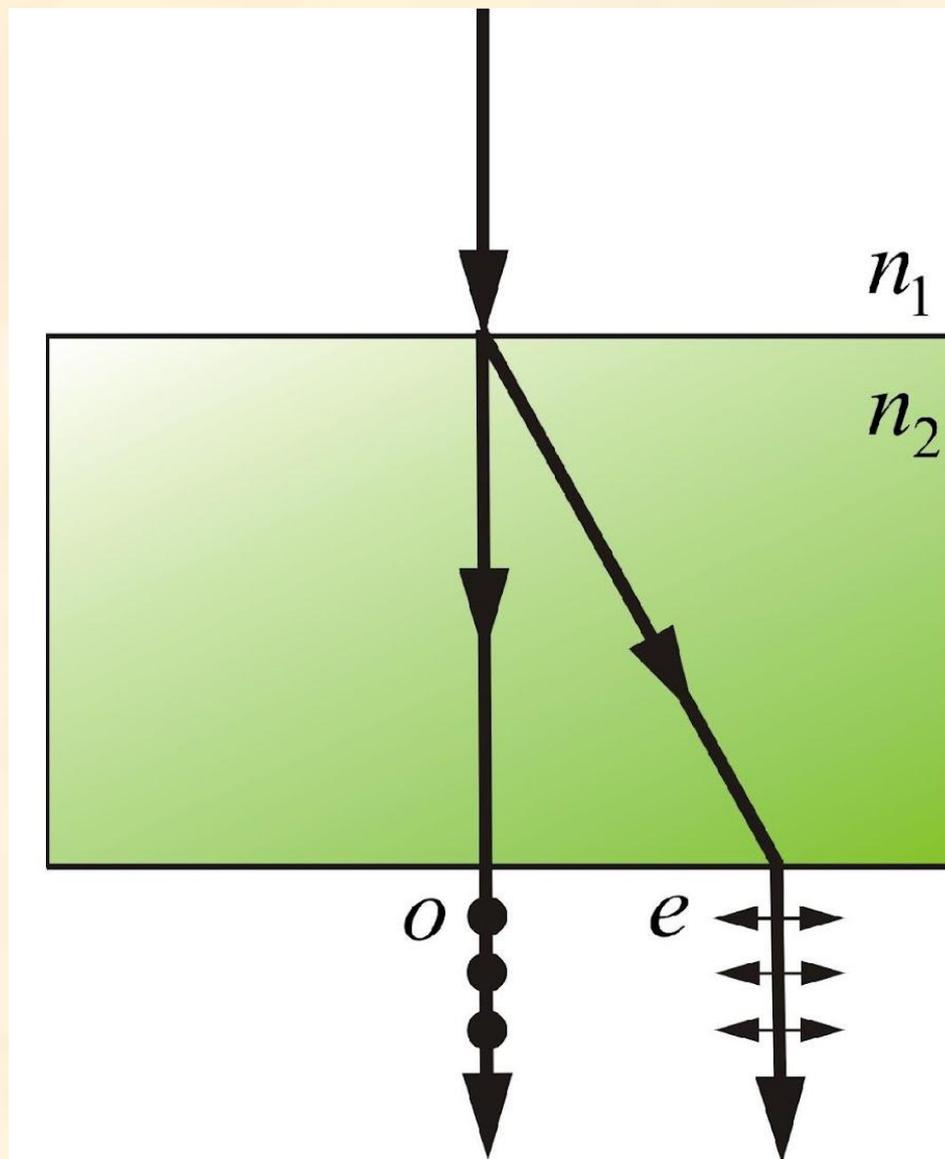


Закон преломления Снеллиуса: $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}$

Подчиняется луч **обыкновенный o**

Не подчиняется – **необыкновенный луч e.**

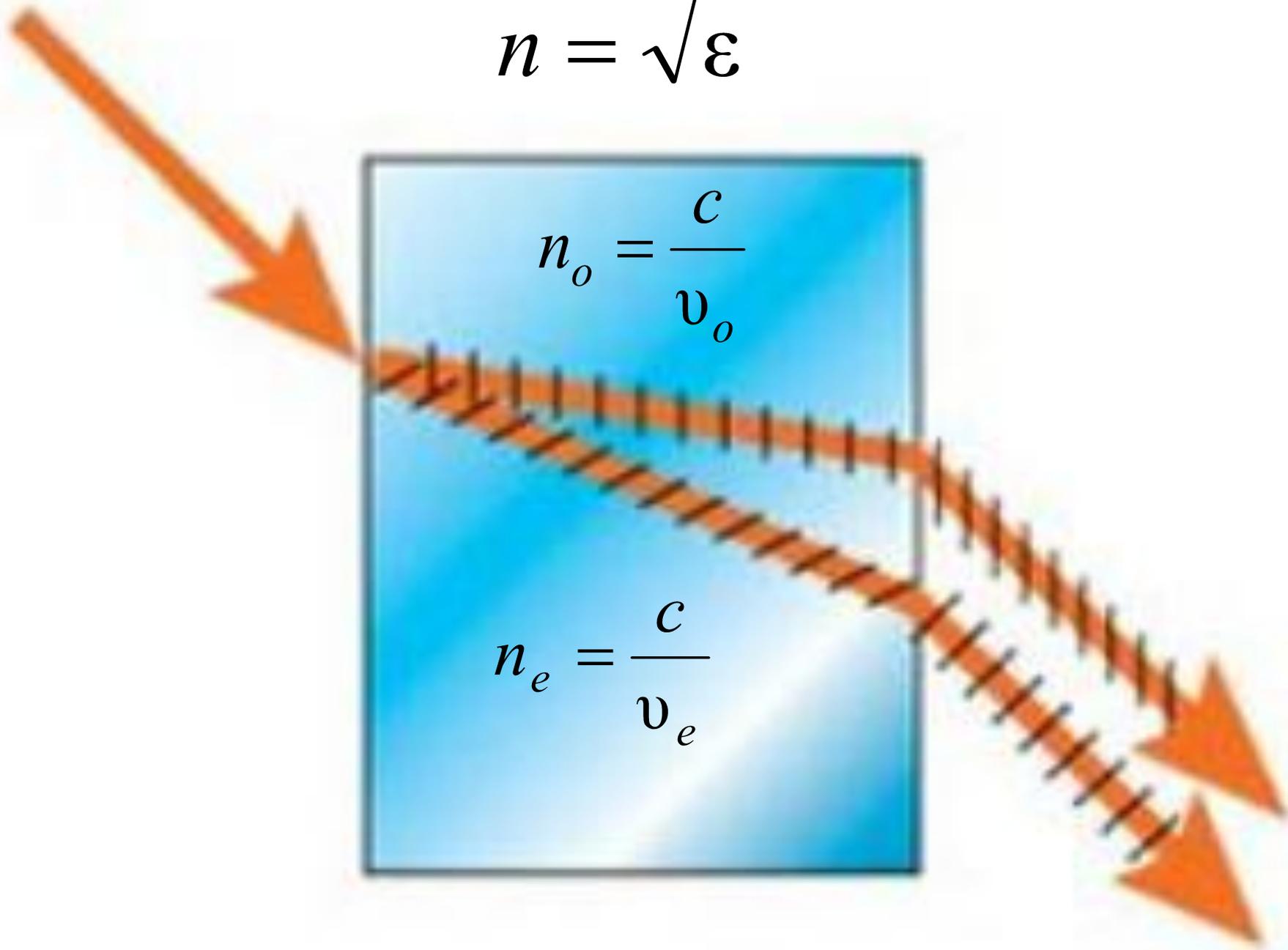
Явление двойного лучепреломления используется для получения поляризованного света:



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

$$n_o = \frac{c}{v_o}$$

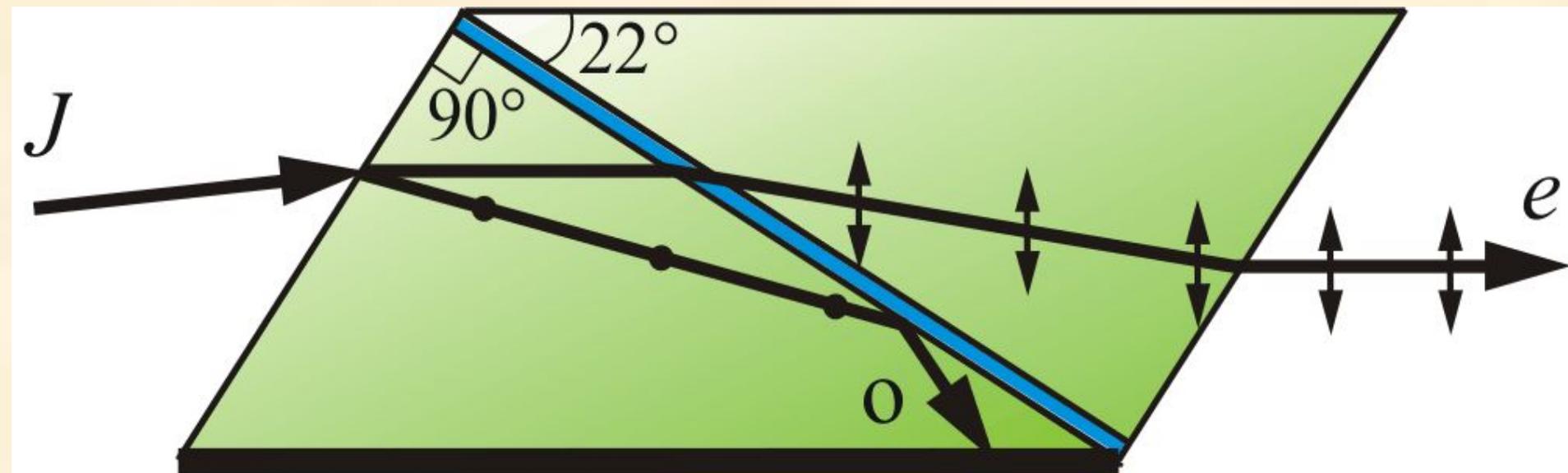
$$n_e = \frac{c}{v_e}$$



Дихроизм – один из лучей поглощается сильнее другого. В кристалле турмалина, обыкновенный луч практически полностью поглощается на длине 1 мм, а необыкновенный луч выходит из кристалла. В кристалле сульфата йодистого хинина один из лучей поглощается на длине 0,1 мм.

Это явление используется для создания поляроидов. На выходе поляроида получается один поляризованный луч.

В качестве поляроида используется **призма Николя (николь)**. Это призма из **исландского шпата**, разрезанная по диагонали и склеенная **канадским бальзамом**



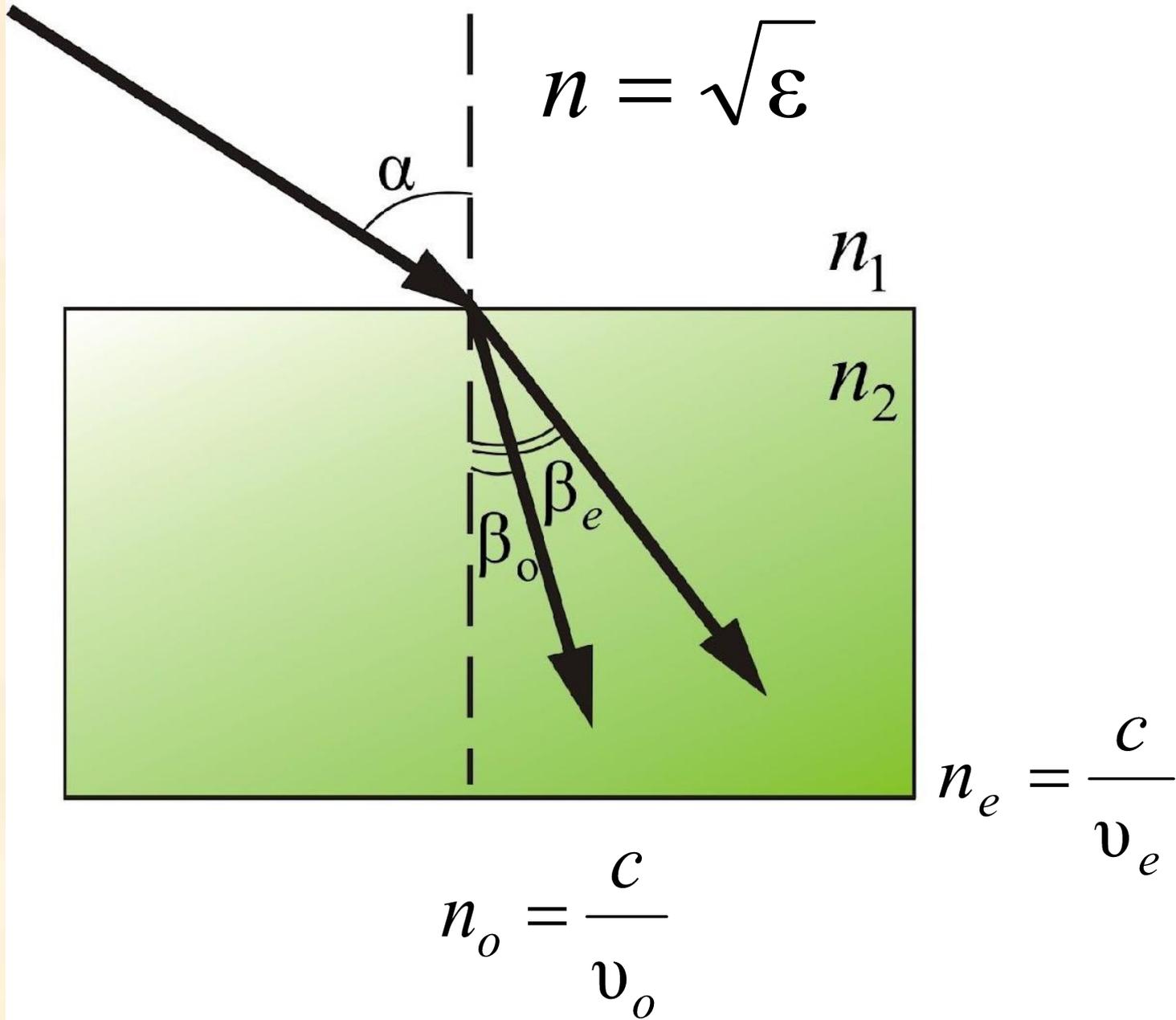
Показатель преломления канадского бальзама

$$n_o > n > n_e$$

Двойное лучепреломление объясняется **анизотропией кристалла.**

Диэлектрическая проницаемость ϵ — зависит от направления.

В одноосных кристаллах диэлектрическая проницаемость в направлении оптической оси ϵ_x и в направлениях перпендикулярных к ней ϵ_y имеет разные значения.



Поскольку $n = \sqrt{\epsilon\mu}$, а в диэлектриках $\mu = 1$, то

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

Скорость распространения обыкновенного луча

$$v_o = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_y}}, \text{ а необыкновенного } v_e = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_x}}$$

Показатель преломления обыкновенного луча

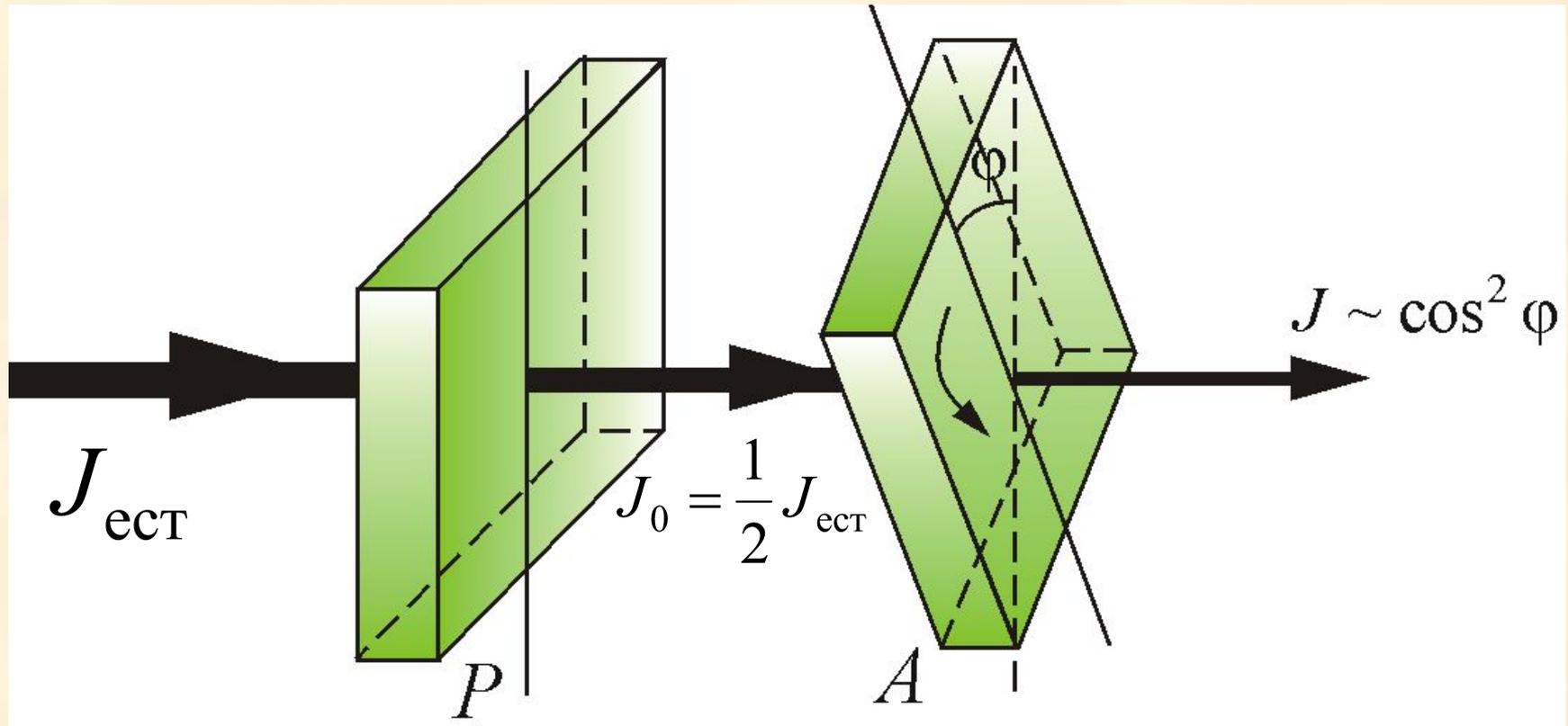
$$n_o = \frac{c}{v_o}$$

Показатель преломления необыкновенного луча

$$n_e = \frac{c}{v_e}$$

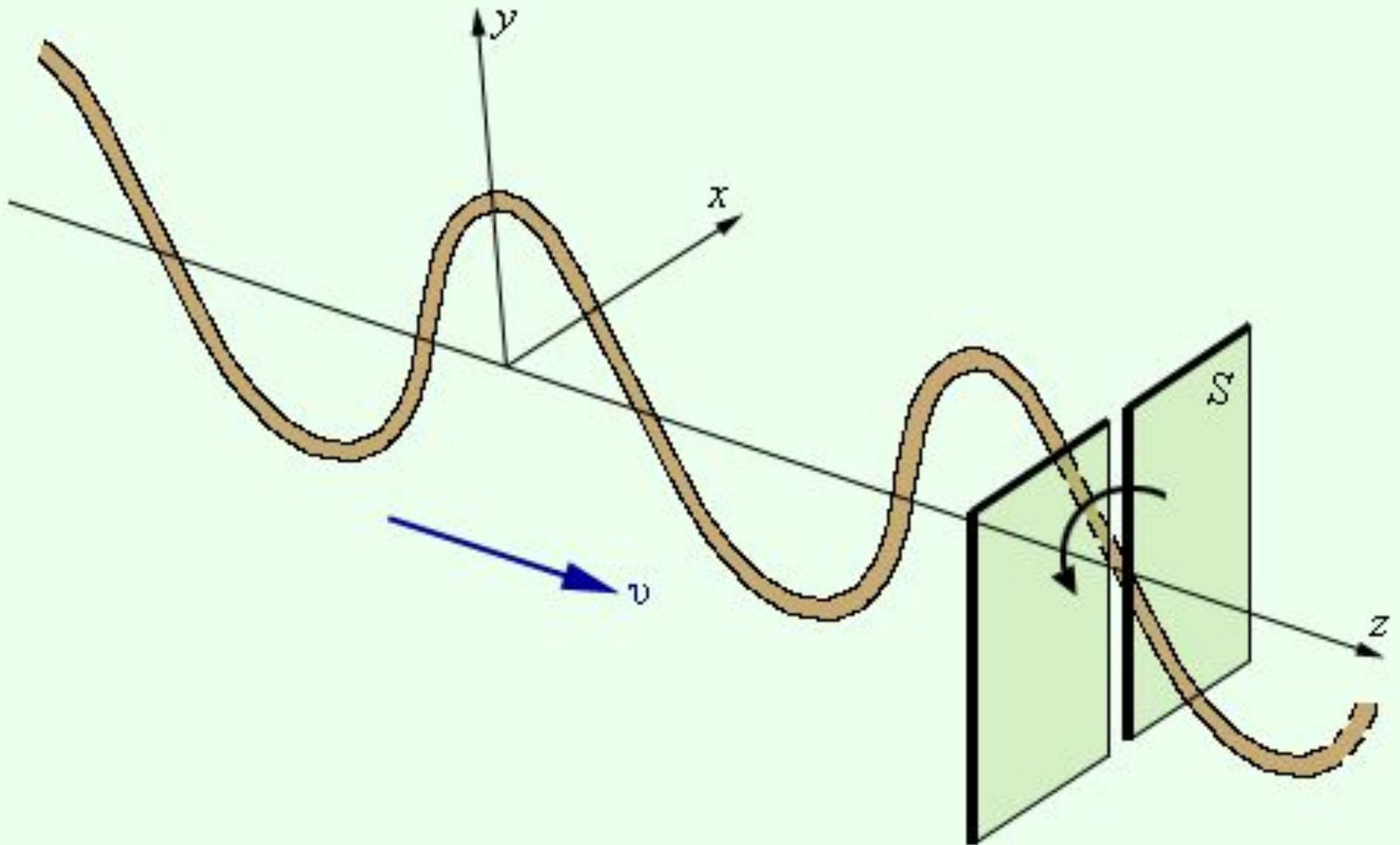
4. Закон Малюса

В 1809 г. французский инженер Э. Малюс

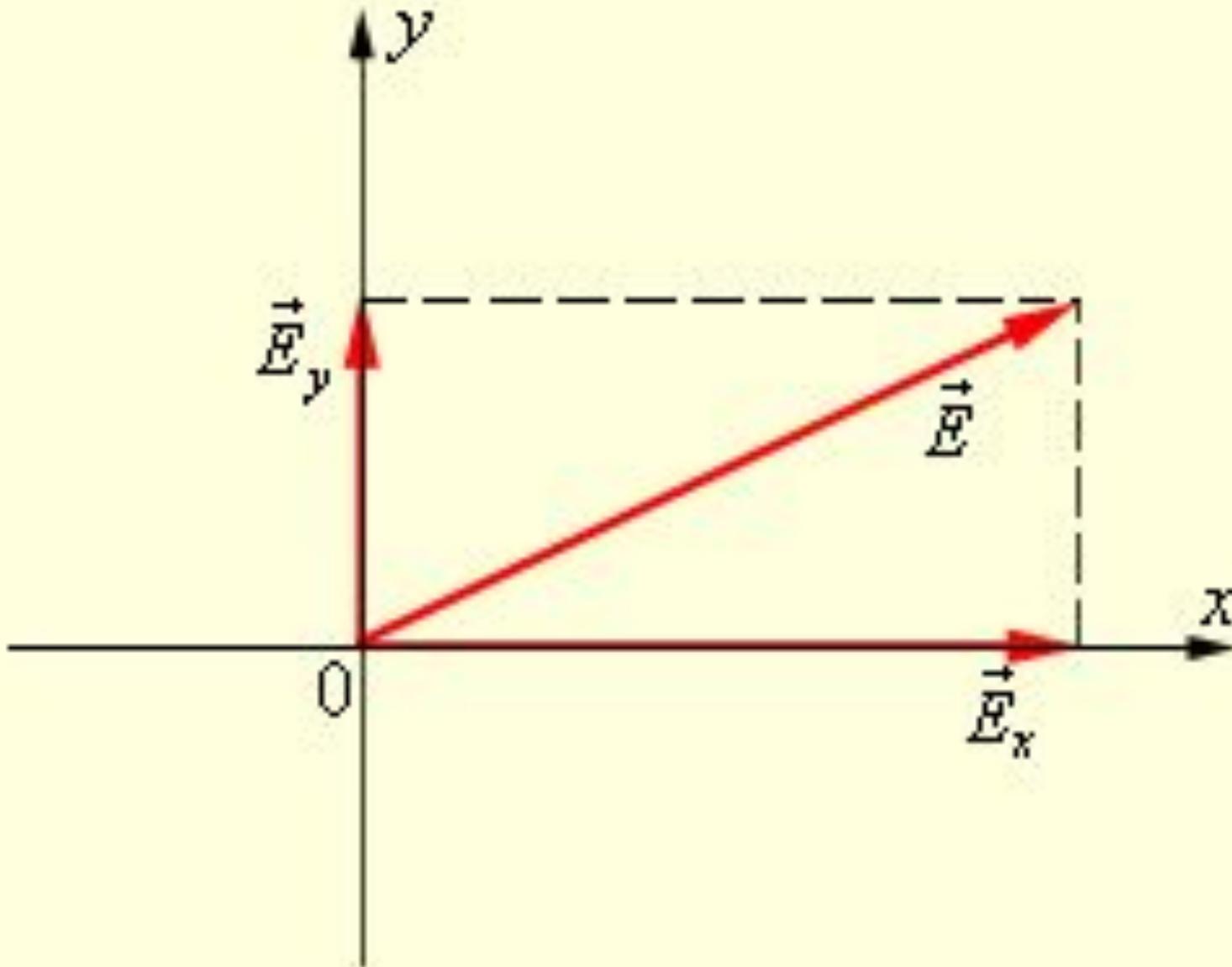


$$J = J_0 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} J_{\text{ест}} \cos^2 \varphi$$

В поперечной волне направление колебаний и перпендикулярное ему направление не равноправны: поворот щели S вызовет затухание волны



С помощью разложения вектора \vec{E} на составляющие по осям можно объяснить закон Малюса



Световую волну с амплитудой E_0 разложим на две составляющие.

$$E_x = E_0 \cos \varphi \quad E_y = E_0 \sin \varphi$$

E_x – пройдет через поляризатор, а E_y – не пройдет.

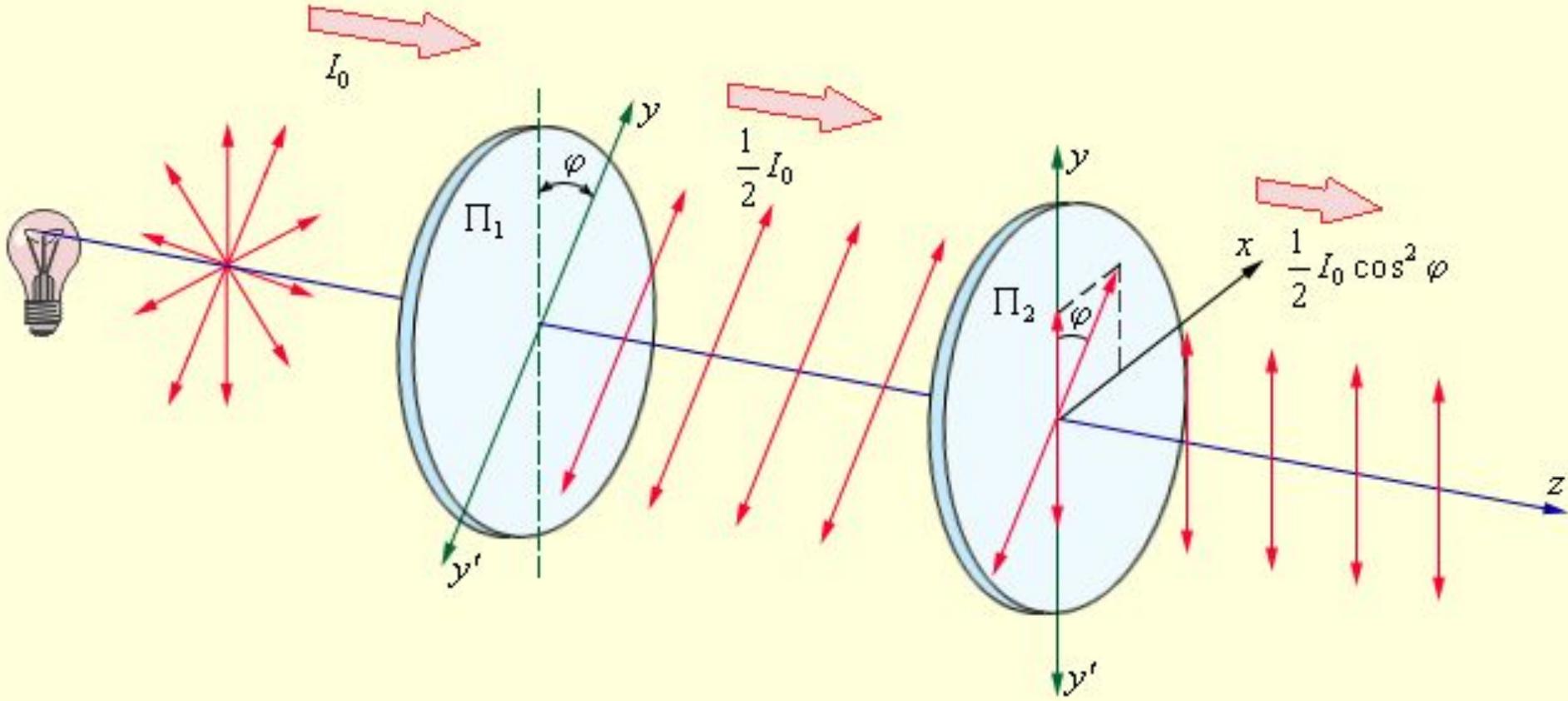
Т.к $J \sim E^2$, то $J \sim E_0^2 \cos^2 \varphi$ и $J_0 \sim E_0^2$

Закон Малюса

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

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

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



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

После первого поляризатора

$$J_0 = \frac{1}{2} J_{\text{ест}}$$

Второй поляризатор пропустит свет

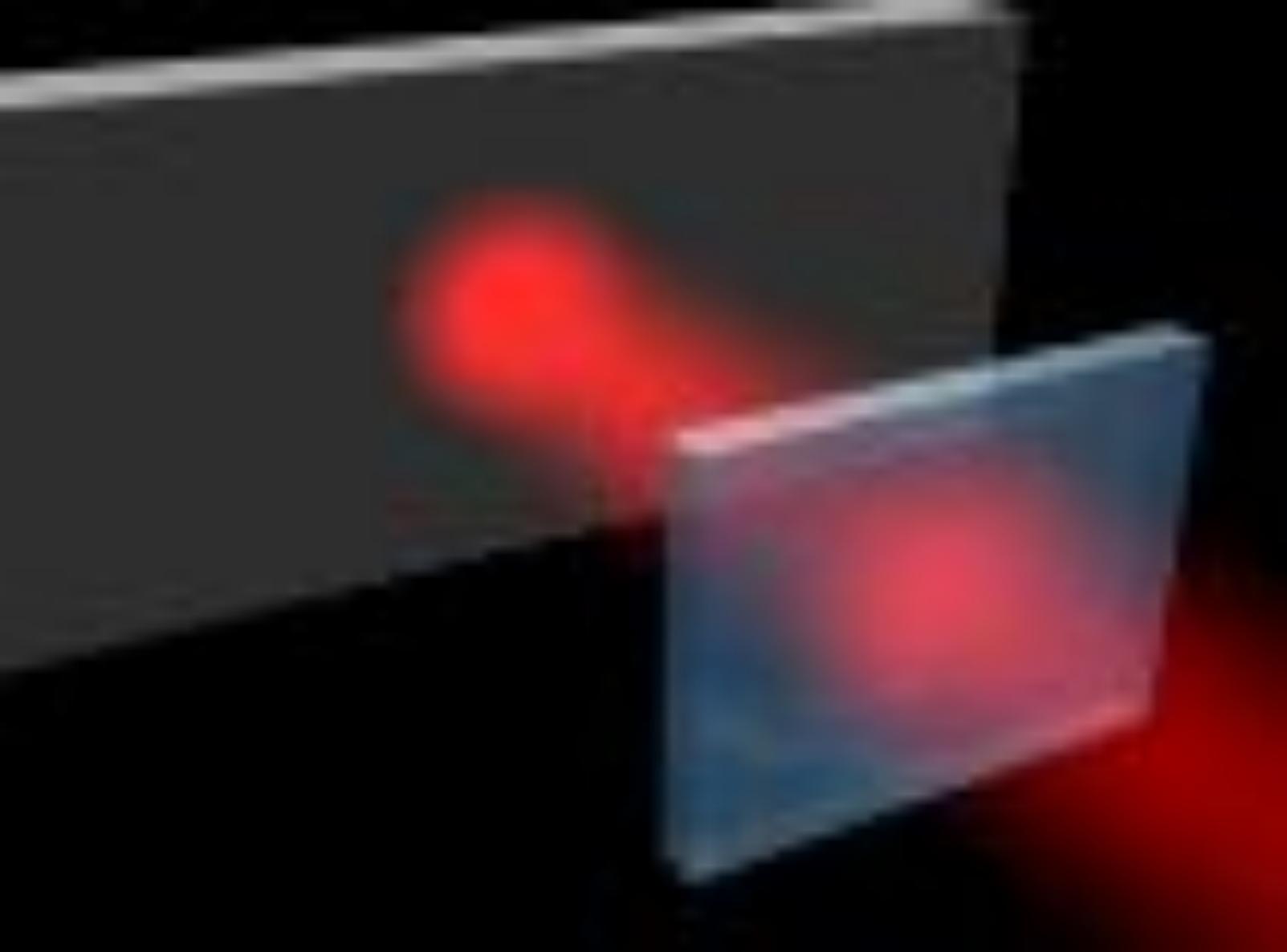
$$J = J_0 \cos^2 \varphi = \frac{1}{2} J_{\text{ест}} \cos^2 \varphi$$

При $\varphi = 0$. $J = J_{\text{max}} = \frac{1}{2} J_{\text{ест}}$

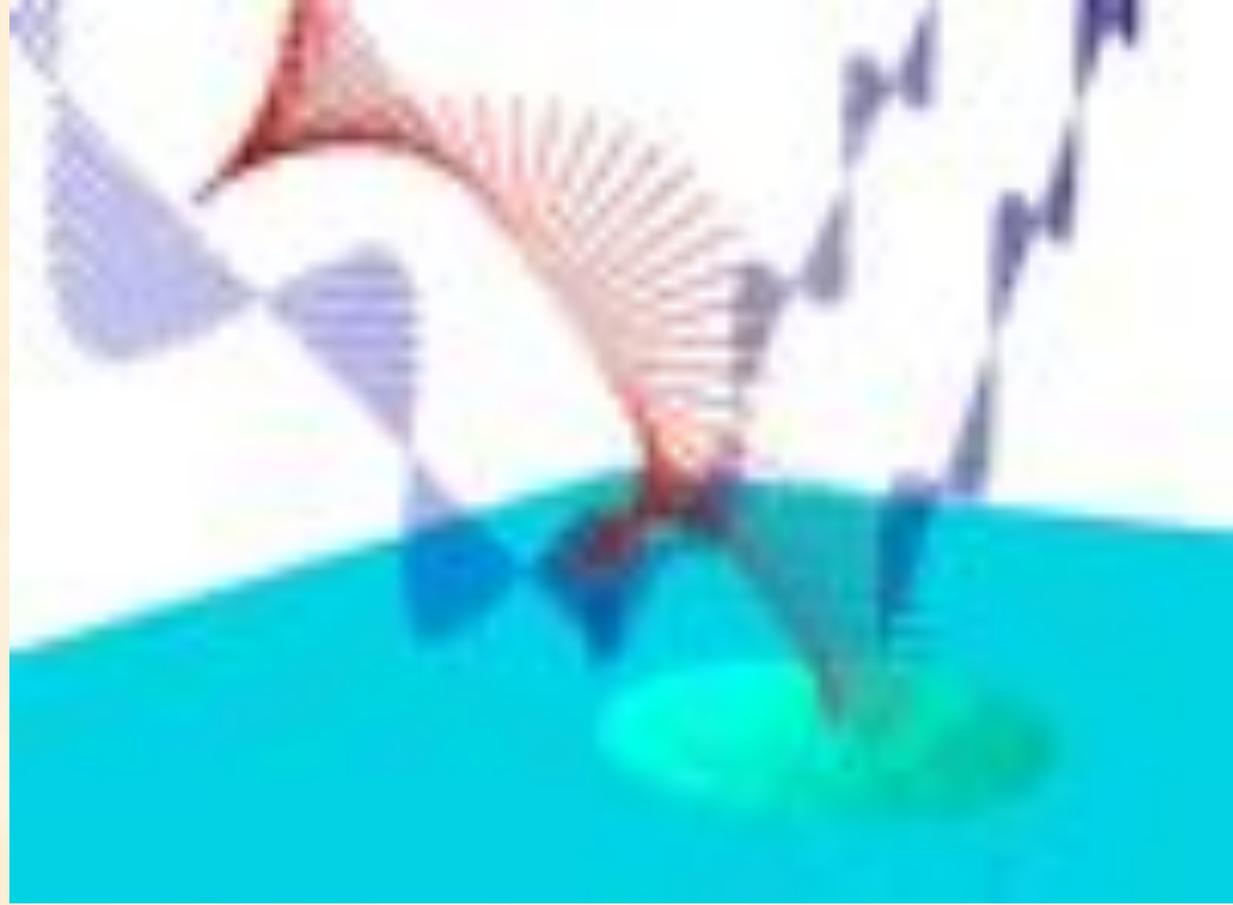
При $\varphi = \pi/2$ $J = 0$

Скрещенные поляризаторы свет не пропускают.

Таким образом, закон Малюса объясняется на основе разложения вектора E на составляющие.



Прохождение линейно поляризованного света He-Ne лазера через вращающийся поляроид:



Применение плоскополяризованных волн

Две плоскополяризованные волны, падающие на подложку с образцом:

- одна волна, отражённая от подложки, остается линейно поляризованной.
- вторая меняет поляризацию на круговую.

Эллипсометрия - изучение поверхностей жидких и твёрдых тел по состоянию поляризации светового пучка, отражённого этой поверхностью и преломлённого на ней:

-бесконтактные исследования поверхности жидкости или твёрдых веществ, процессов адсорбции, коррозии...

-исследования атомного состава неоднородных и анизотропных поверхностей и плёнок

Переход к эллиптической поляризации при отражении и преломлении происходит вследствие наличия тонкого переходного слоя на границе раздела сред.

Источник света – лазер.



Микроскопия с использованием принципов эллипсометрии

Излучение лазера (выделено красным) проходит через поляризатор (отмечено зелёным) и через двулучепреломляющую пластинку (отмечено синим), которая из волны линейной поляризации формирует эллиптически поляризованную волну.

При отражении от образца свет становится линейно поляризованным.

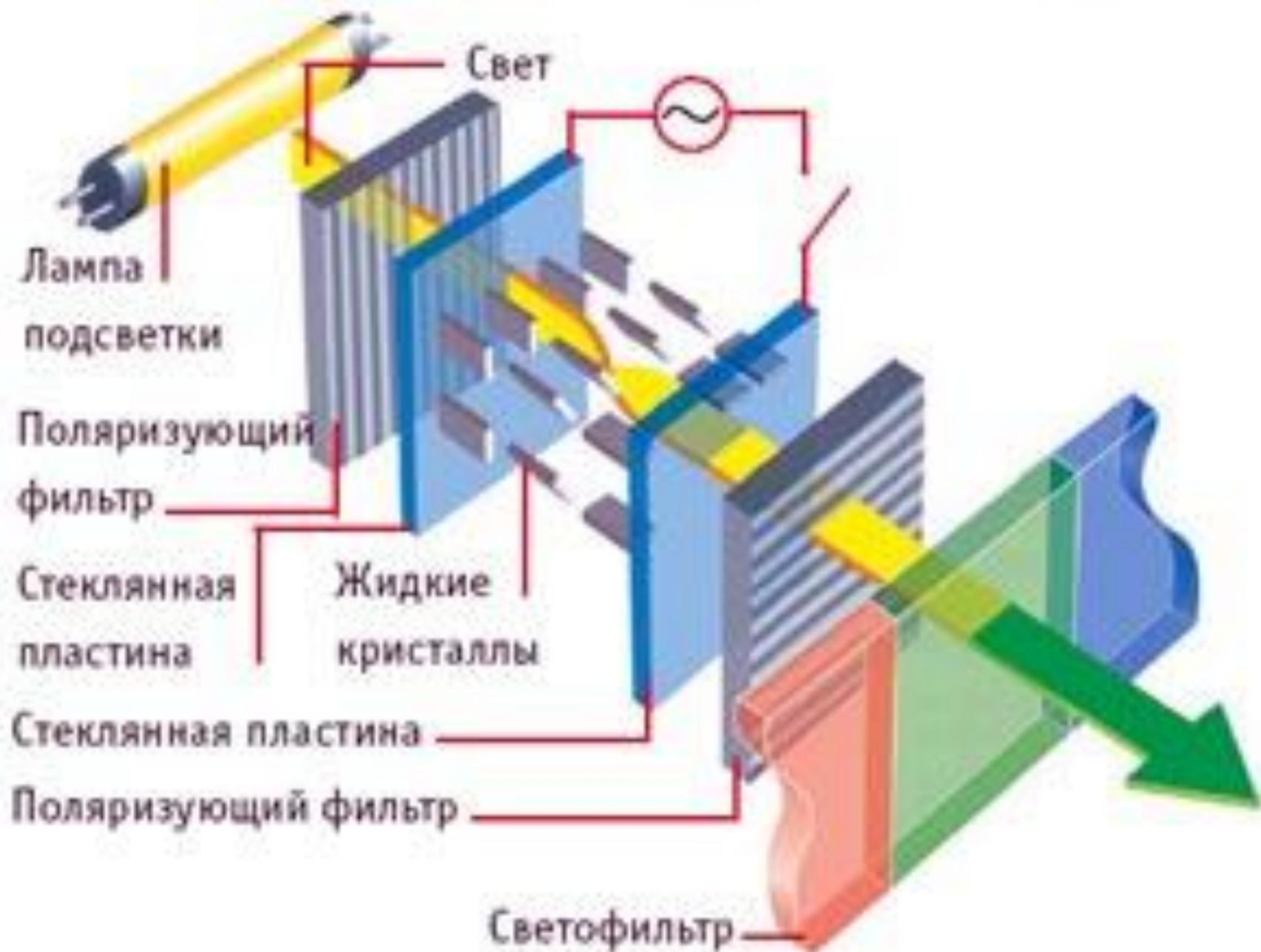
Объектив собирает свет, отражённый от образца и через анализатор (отмечено зелёным) подаёт этот свет на фотоприёмную матрицу.

Анализатор сориентирован так, что задерживает свет линейной поляризации, отражённый от образца, и пропускает значительную часть света эллиптической поляризации, отражённого от подложки.

В результате образец становится видимым на фоне подложки в виде тёмного пятна.

Изменяя взаимную ориентацию поляризатора, анализатора и двулучепреломляющей пластинки, можно получать позитивное и негативное изображение исследуемого объекта.

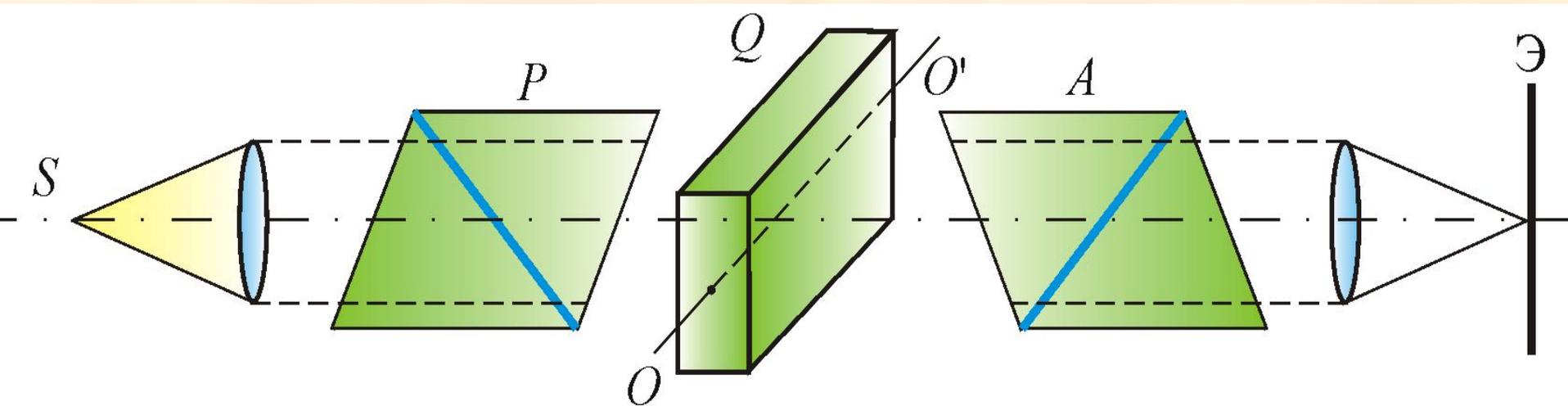
Жидкокристаллический дисплей



5. Интерференция поляризованного света

Явления интерференции поляризованных лучей исследовались в классических опытах Френеля и Арго (1816 г.), доказавших поперечность световых колебаний.

Схема получения интерференции поляризованных лучей



Анализатор А здесь необходим также, для того чтобы свести колебания двух различно поляризованных лучей в одну плоскость.

Разность хода между двумя компонентами поляризации зависит от толщины пластинки, среднего угла преломления и разности показателей n_o и n_e . Разность фаз:

$$\delta = 2\pi\Delta / \lambda$$

Интенсивность на выходе при скрещенных поляризаторе и анализаторе.

$$J_i = 0,5I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \delta / 2$$

6. Искусственная анизотропия

Двойное лучепреломление можно наблюдать в изотропных средах (аморфных телах), если **подвергнуть их механическим нагрузкам**.

Явление, открытое в 1818 г. Брюстером, получило название **фотоупругости** или **пьезооптического эффекта**.

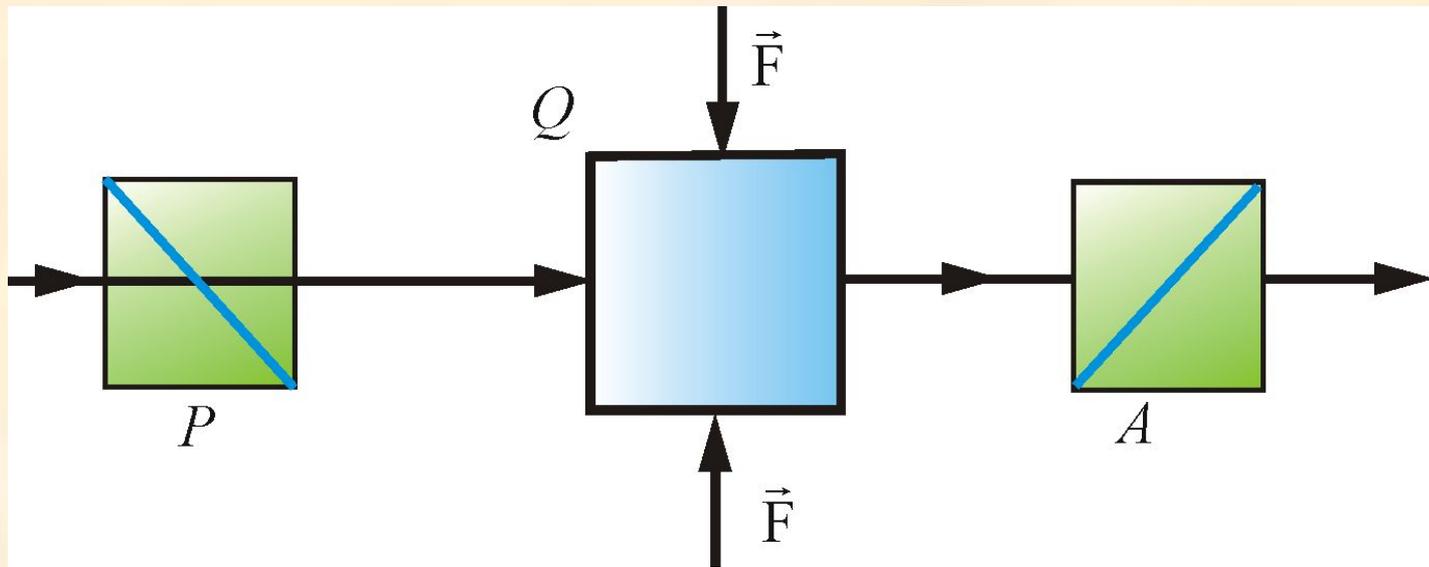
Обозначим напряжение

$$\sigma = \frac{dF}{dS}$$

От этого напряжения будет зависеть разность показателей преломления:

$$n_o - n_e = k\sigma$$

Поместим стеклянную пластинку Q между двумя поляризаторами P и A :

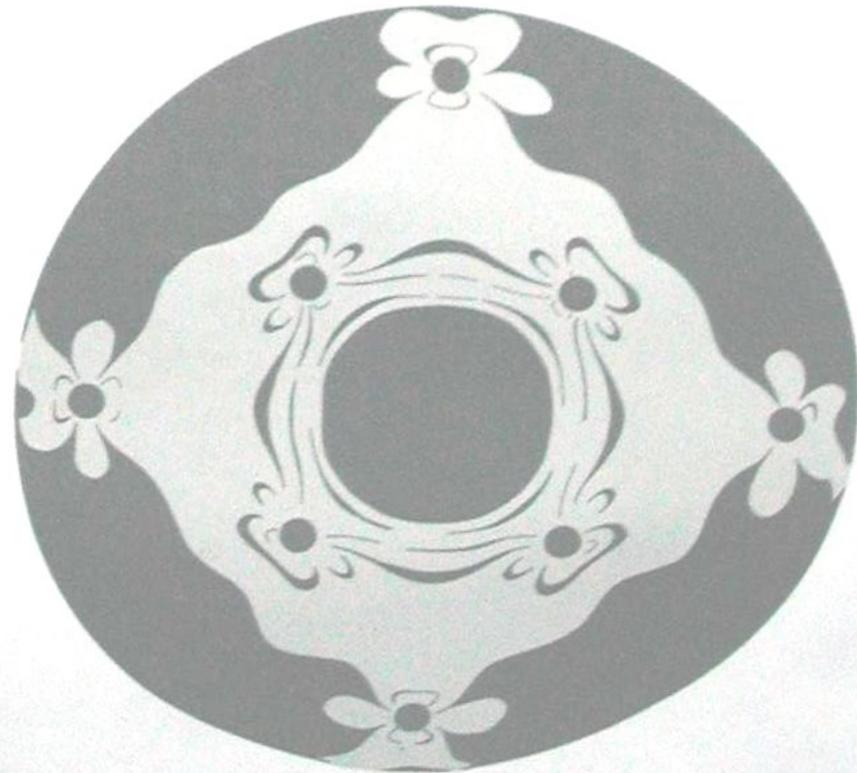


В отсутствие механической деформации свет через них проходить не будет.

Если же стекло подвергнуть деформации, то свет может пройти, причем картина на экране получится цветная.

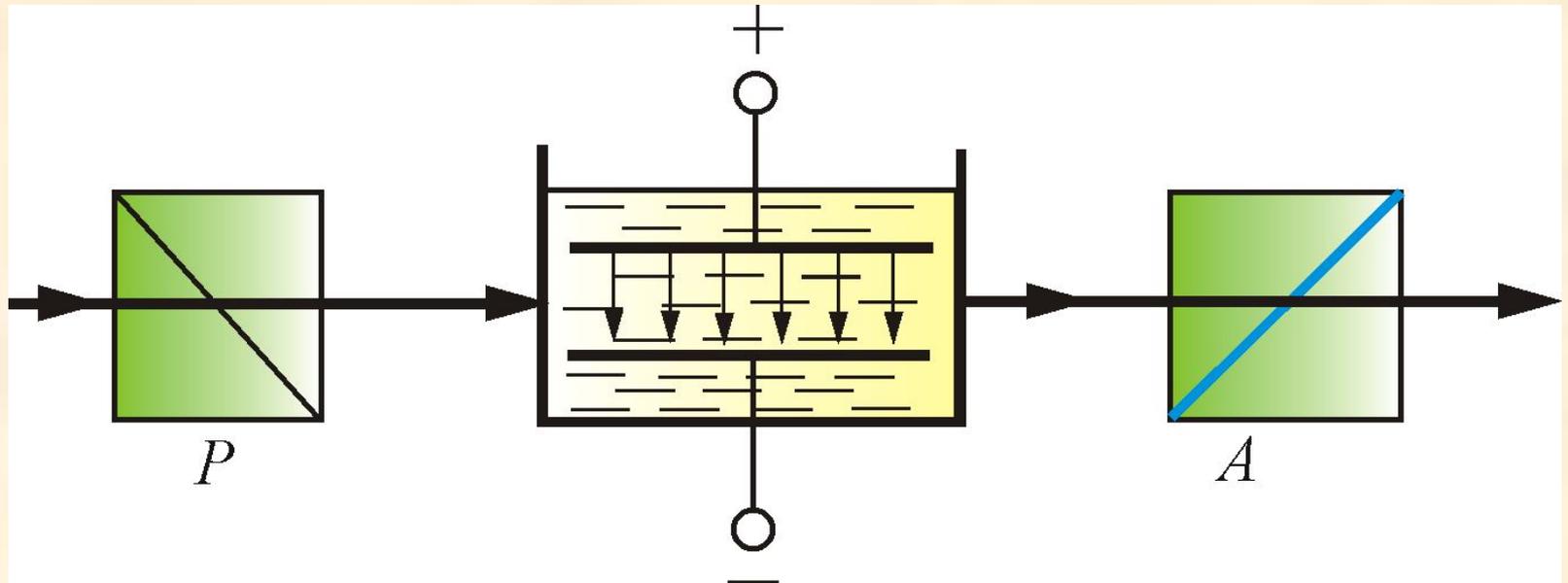
По распределению цветных полос можно судить о распределении напряжений в стеклянной пластинке.

Помещая прозрачные фотоупругие модели между поляризатором и анализатором и подвергая их различным нагрузкам, **можно изучать распределения возникающих внутренних напряжений.**



Явление искусственной анизотропии может возникать в изотропных средах **под воздействием электрического поля (эффект Керра).**

Ячейка Керра:



Свет, прошедший через кювету, поворачивает плоскость поляризации, и система становится прозрачной.

Ячейка Керра может служить затвором света, который управляется потенциалом одного из электродов конденсатора, помещенного в ячейку.

На основе ячеек Керра построены практически безинерционные затворы и модуляторы света с временем срабатывания до 10^{-12} с.

Величина двойного лучепреломления прямо пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля:

$$\Delta n = nkE^2 \quad (\text{закон Керра}).$$

Здесь n – показатель преломления вещества в отсутствии поля,

$\Delta n = n_e - n_o$ – показатели преломления для необыкновенной и обыкновенной волн,

k – постоянная Керра.

Вращение плоскости поляризации

Оптически активные вещества – среды, которые при прохождении через них плоскополяризованного света способны вращать его плоскость поляризации.

Выделяют 2 типа оптически активных веществ:

1. оптически активные в **любом агрегатном состоянии** (сахара, камфора, винная кислота): оптическая активность обусловлена асимметричным строением их молекул,
2. оптически активны только в **кристаллической фазе** (кварц, киноварь); оптическая активность обусловлена специфической ориентацией молекул (ионов) в элементарных ячейках кристалла.

Оптически активные вещества существуют в 2 формах:

(в зависимости от направления вращения плоскости поляризации) - **правой и левой**.

При этом молекула или кристалл правой формы зеркально-симметричны молекуле или кристаллу левой формы.

Направление вращения:

«+» - **вправо** относительно наблюдателя, к которому свет приближается;

«-» - **влево** относительно данного наблюдателя.

В кристаллах:

(сильнее всего вращают плоскость поляризации, если луч распространяется вдоль оптической оси).

$$\varphi = \alpha l$$

φ – угол поворота;

l – расстояние, пройденное лучом в кристалле;

α – ***постоянная вращения*** (зависит от длины волны).

В растворах:

$$\varphi = [\alpha] cl$$

c – концентрация активного вещества;

$[\alpha]$ – ***удельная постоянная вращения***.