

Лекция 25

5. Оптика

5.2. Волновая оптика

Поляризация света. Естественный и поляризованный свет. Поляризация при отражении и преломлении.

Закон Брюстера. Поляризация при двойном лучепреломлении. Призма Николя. Поляроиды.

Анализ поляризованного света. Закон Малюса.

Интерференция поляризованного света. Вращение плоскости поляризации. Сахариметр. Искусственная анизотропия. Эффект Фарадея. Ячейка Керра.

Плоскость поляризации

Плоскость, в которой происходят колебания светового вектора (напряженности электрического поля) – плоскость поляризации.

Естественный свет

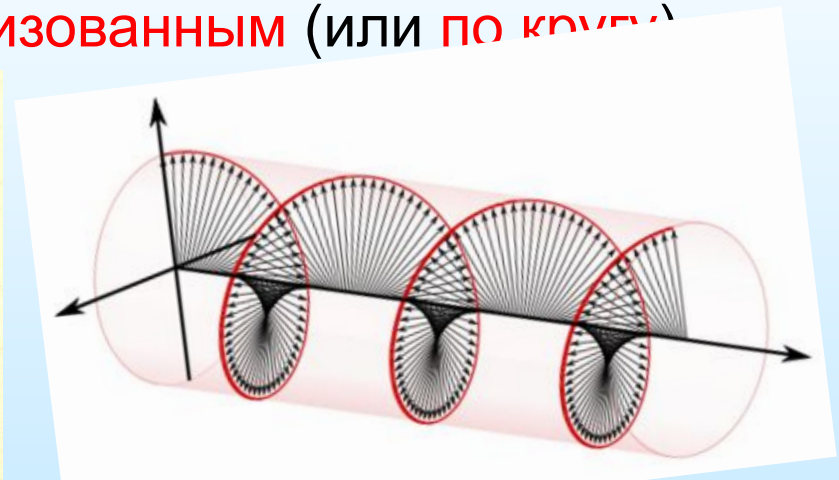
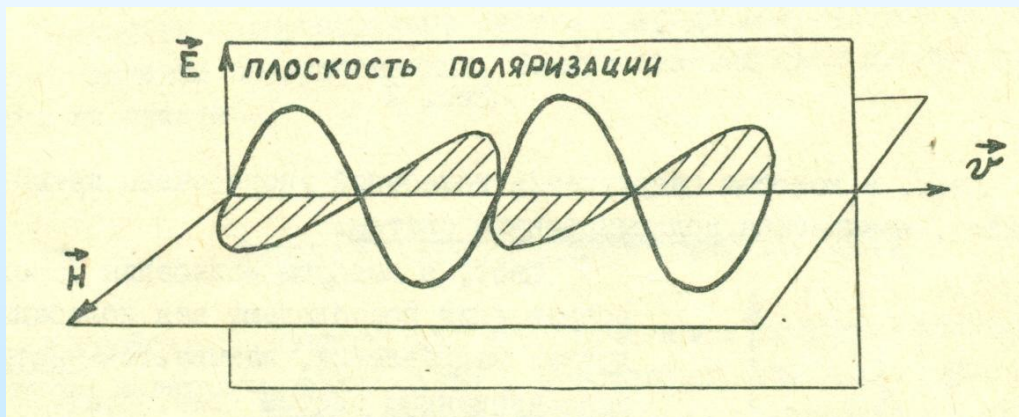
Свет, в котором направления колебаний светового вектора ориентированы случайным образом, причем разные направления представлены с равной вероятностью, называется естественным.

Поляризованный свет

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-либо образом упорядочены, называется поляризованным.

Если колебания происходят только в одной плоскости, то такой свет называется **плоско-** или **линейно-поляризованным**.

Если конец светового вектора описывает в пространстве эллипс, то свет называется **эллиптически поляризованным** (или **по кругу**).

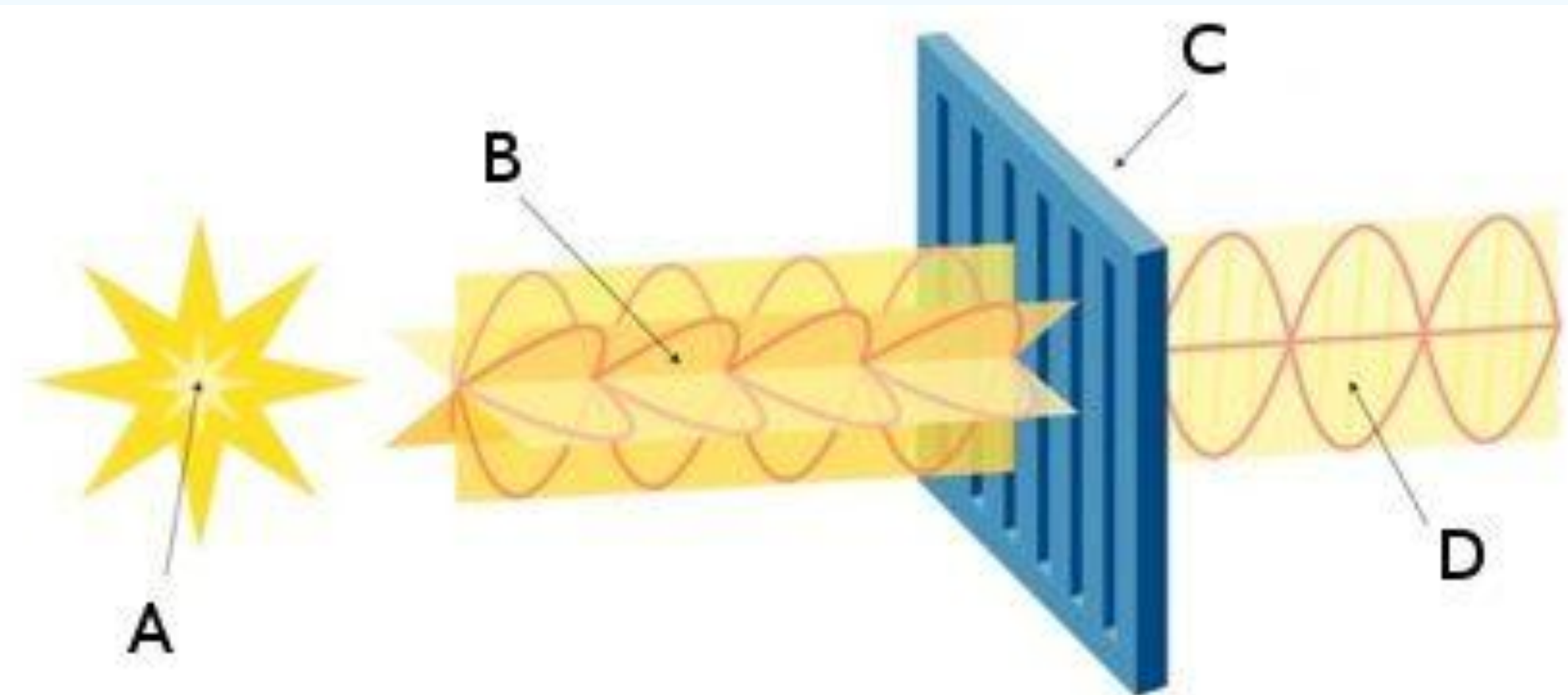


Поляризаторы

Поляризаторы – устройства, пропускающие колебания только одного направления (происходящие в плоскости поляризатора).

Частично поляризованный свет

Свет, в котором колебаний одного направления преобладают над колебаниями другого направления – частично поляризованный.



Степень поляризации

Степенью поляризации частично поляризованного света называется безразмерная физическая величина

где $I_{\min}$ и $I_{\max}$ – минимальная и максимальная интенсивности

света при повороте поляризатора вокруг своей оси, наблюдаемые в двух взаимно-перпендикулярных направлениях.

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

Для плоско-поляризованного света:

$$I_{\min} = 0 \quad \longrightarrow \quad P = \frac{I_{\max}}{I_{\max}} = 1$$

Для естественного света:

$$I_{\min} = I_{\max} \quad \longrightarrow \quad P = 0$$

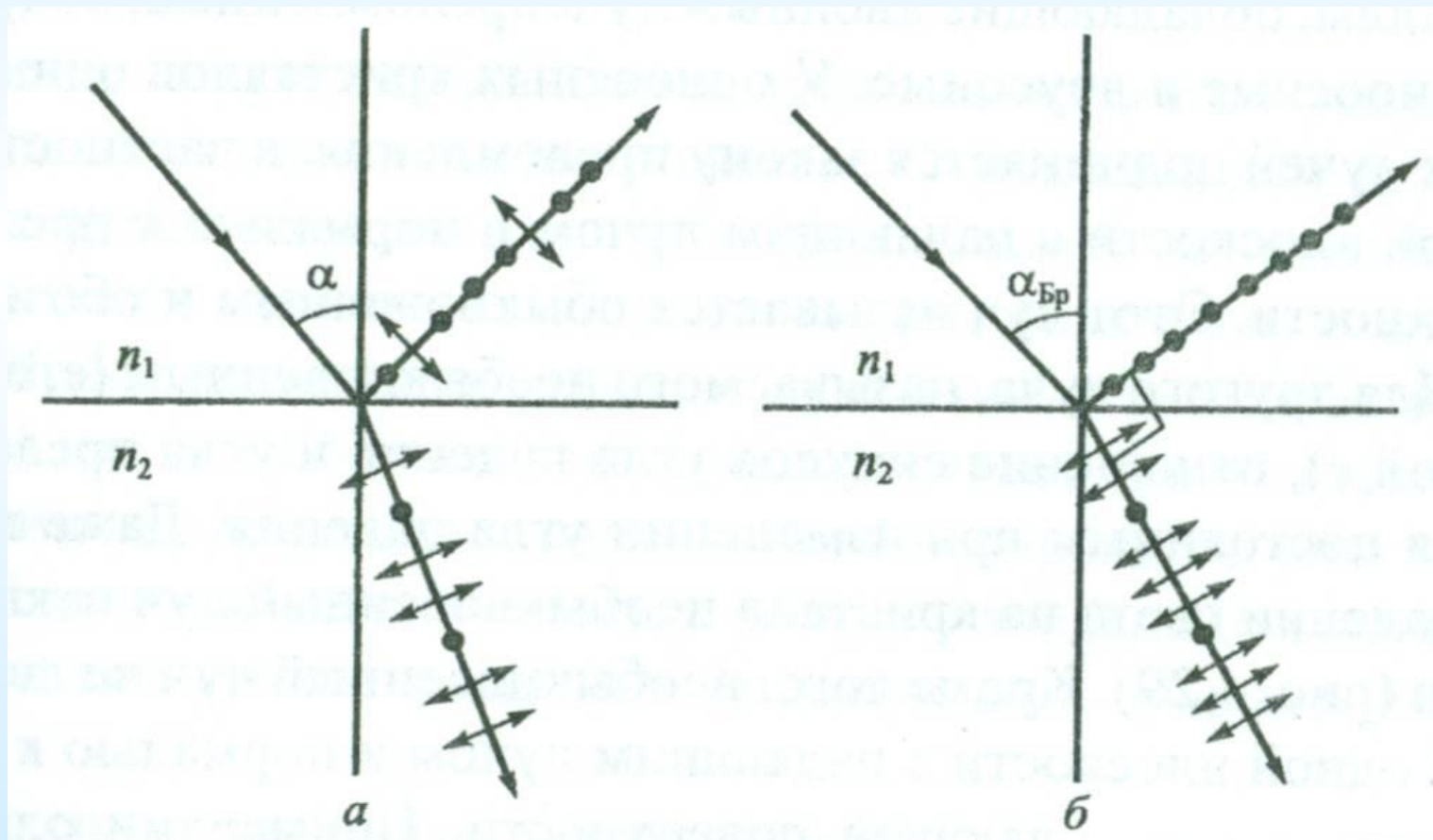
Интенсивность световой волны

Интенсивностью световой волны называется скалярная величина, численно равная световой энергии, переносимой волной за единицу времени сквозь единицу площади поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны.

$$I \sim E^2$$

Поляризация при отражении и преломлении на границе раздела двух диэлектриков

Отраженный и преломленный лучи оказываются частично поляризованными. При этом лучше отражаются колебания, перпендикулярные к плоскости падения, а преломляются лучше колебания, лежащие в плоскости падения.



Применимо только к диэлектрикам, не применимо к металлам !

Закон Брюстера (1815, поляризации)

При некотором угле падения (угле Брюстера) отраженный луч оказывается полностью поляризован.

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \boxed{\operatorname{tg} \alpha_{\text{Бр}} = n}$$



Сэр Дэвид
Брюстер
1781-1868

При падении света под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны.

$$\alpha + \beta = \pi / 2 \rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(\pi / 2 - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$$

Преломленный луч всегда остается частично поляризован, хотя степень его поляризации максимальна (~15%). Однако можно его пропустить через несколько (5-10) пластинок (стопа Столетова).

Закон Брюстера (полного внутреннего отражения)

При падении света под углом Брюстера (из более оптически плотной среды в менее плотную) преломленный луч исчезает.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \boxed{\sin \alpha_{\text{Бр}} = \frac{1}{n}}$$

Поляризация при двойном лучепреломлении в кристалле

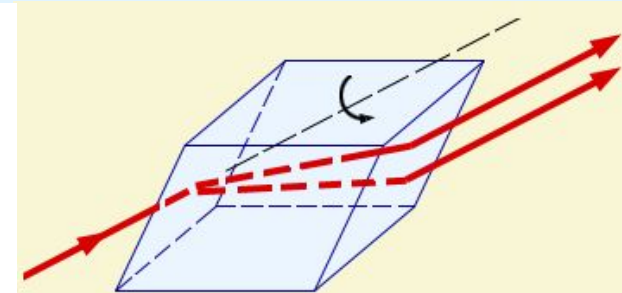
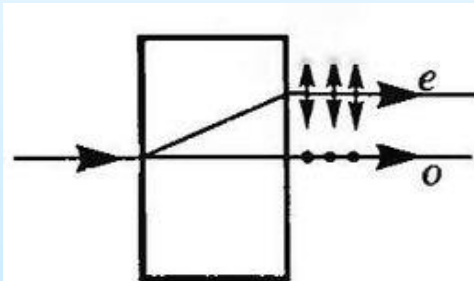
Двойное лучепреломления — эффект расщепления в анизотропных средах луча света на две составляющие. Впервые обнаружен на кристалле исландского шпата (углекислый кальций, кальцит CaCO_3 , известковый шпат) Бартолином (1669). Если луч падает перпендикулярно к поверхности кристалла, то он расщепляется на два луча.



Эразм
Бартолин
1625-1698



Первый луч продолжает распространяться прямо, и называется обыкновенным (o – ordinary), второй же отклоняется в сторону, нарушая обычный закон преломления света, и называется необыкновенным (e – extraordinary).



Эти два луча оказываются полностью поляризованы, причем во взаимно перпендикулярных плоскостях .

Кристалл обладает **анизотропией** – расстояние между атомами (т.е. скорость распространения волны и показатель преломления) для разных направлений различны.

Однако в любом кристалле есть такое направление (в некоторых – даже два, под углом друг к другу), распространяясь вдоль которого лучи не испытывают двойного лучепреломления – идут все с одной скоростью, как в изотропной среде, поскольку все колебания перпендикулярны этому направлению. Это **оптическая ось кристалла**. Плоскость, проведенная через падающий луч и оптическую ось – **главная плоскость** кристалла.

Если же луч падает под некоторым углом к оптической оси, то все его колебания могут быть разложены на две составляющие: колебания, перпендикулярные главной плоскости, и колебания, лежащие в главной плоскости.

Колебания, совершающиеся в направлении перпендикулярном главной плоскости кристалла, распространяются с одинаковой скоростью по всему кристаллу ($n = \text{const}$) и дают **обыкновенный луч**.

Колебания, лежащие в главной плоскости, распространяются с некоторой скоростью, зависящей от угла падения (т.е. показатель преломления для такого луча зависит от направления его распространения и его поведение не подчиняется обычному закону преломления. Это **необыкновенный луч**. Поэтому лучи и поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Если свет падает перпендикулярно оптической оси, то обыкновенный и необыкновенный лучи также не будут раздваиваться, однако пойдут по одному направлению с разной скоростью.

Кристаллы, для которых $v_0 \geq v_e$ ($n_0 \leq n_e$) — **положительные** (кварц).

Кристаллы, для которых $v_0 \leq v_e$ ($n_0 \geq n_e$) — **отрицательные** (исландский шпат).

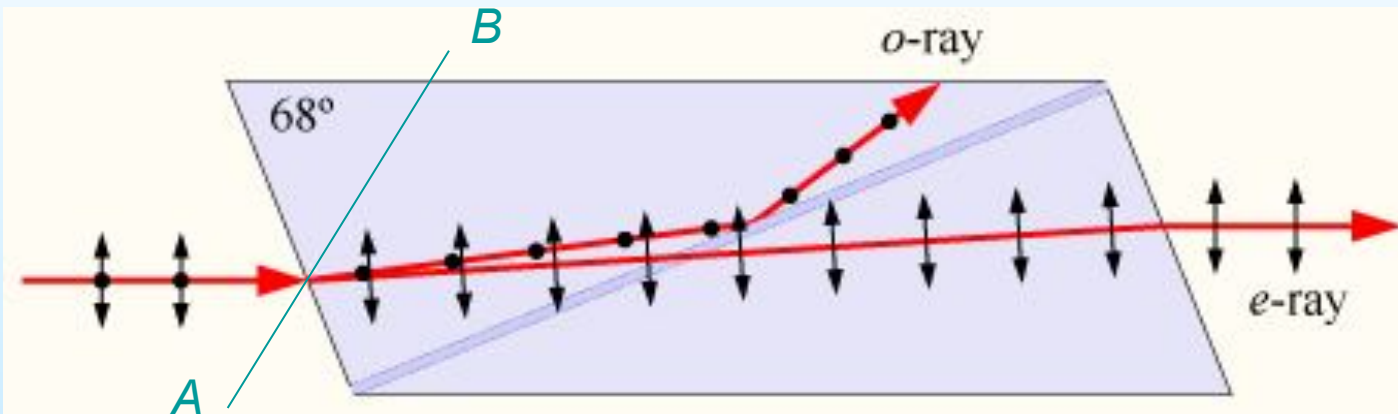
Понятия луч обыкновенный и необыкновенный имеют смысл только пока они распространяются в кристалле, вне его это просто два поляризованных луча !

Призма Николя (николь, 1828)

Призма Николя представляет собой две одинаковые треугольные призмы из исландского шпата, склеенные тонким слоем канадского бальзама. Призмы вытачиваются так, чтобы торец был скошен под углом 68° относительно направления проходящего света, а склеиваемые стороны составляли прямой угол с торцами. При этом оптическая ось кристалла (AB) находится под углом 64° с направлением света.

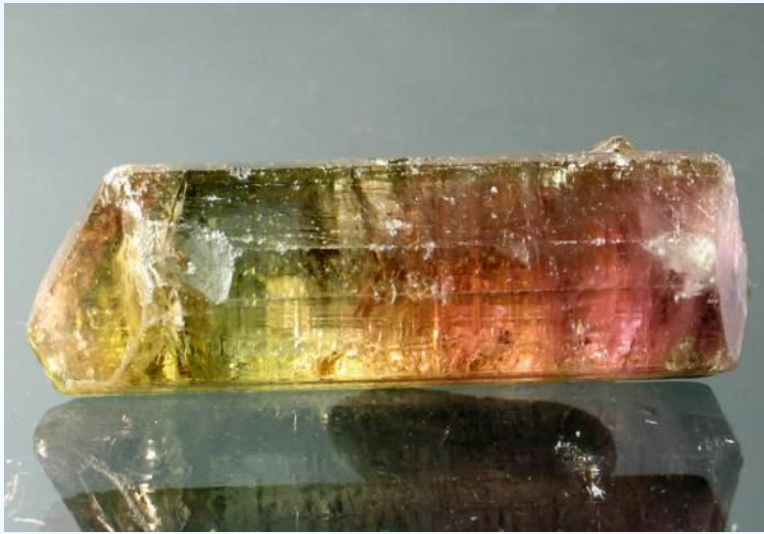
$$n_{\text{кб}} = 1,550 \quad n_e = 1,486 \quad n_o = 1,658 \quad \longrightarrow \quad n_e < n_{\text{кб}} < n_o$$

Необыкновенный луч отражается от более оптически плотного вещества – проходит, а обыкновенный отражается от оптически менее плотного, да еще под углом большим предельного – претерпевает полное внутренне отражение.



Дихроизм

Существуют такие анизотропные кристаллы, которые сильно поглощают один из лучей. Например, пластинка **турмалина** толщиной 1 мм полностью поглощает обыкновенный луч. Это явление называется дихроизмом. Еще сильнее поглощают свет кристаллы **бисульфата йодистого хинина** (~0,1 мм).

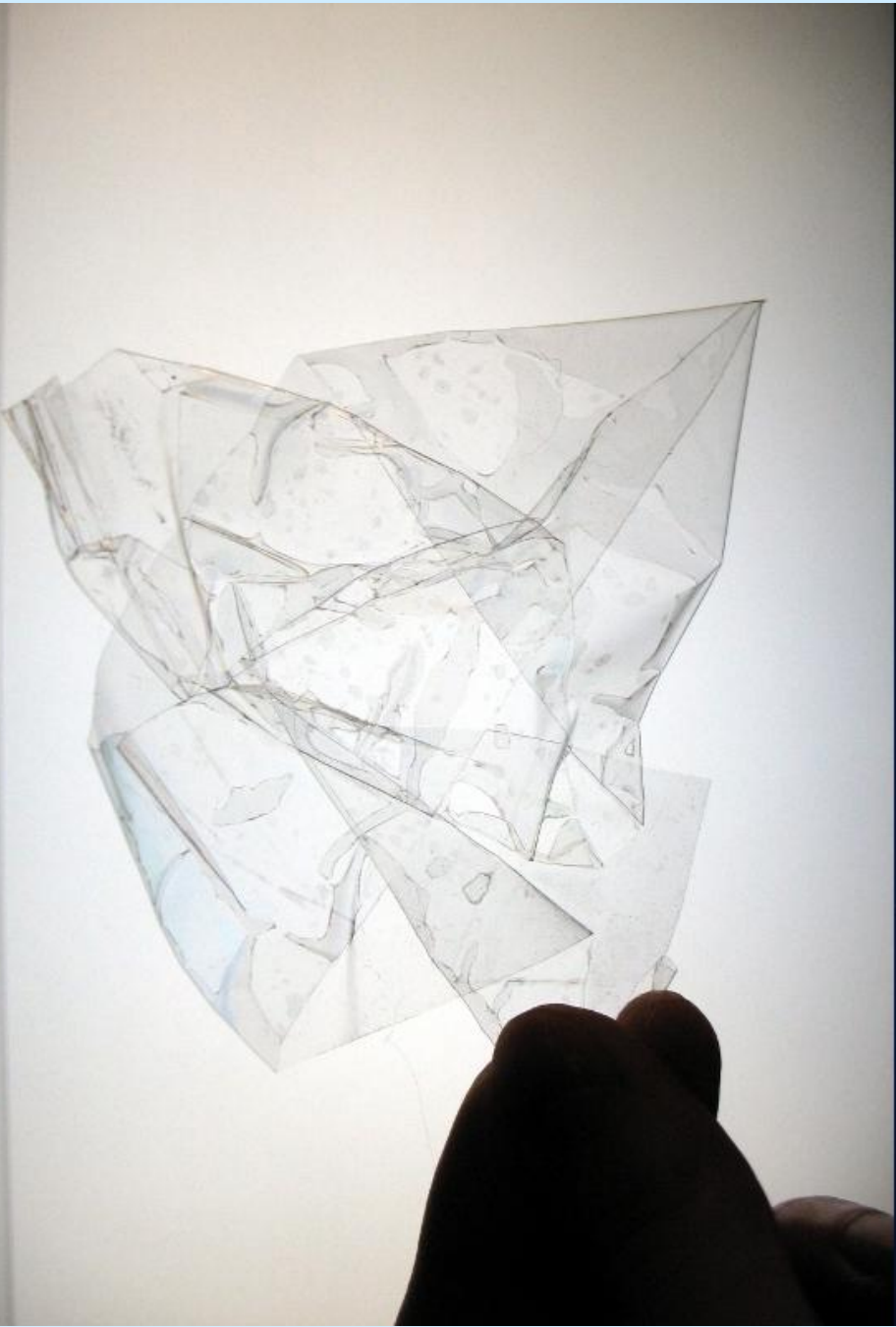


Поляроиды (1935)

Целлулоидная пленка, в которую вкраплено большое количество маленьких одинаково ориентированных кристалликов бисульфата йодистого хинина, помещенная между двумя плоскими стеклами – поляроид.

Поляризационные светофильтры





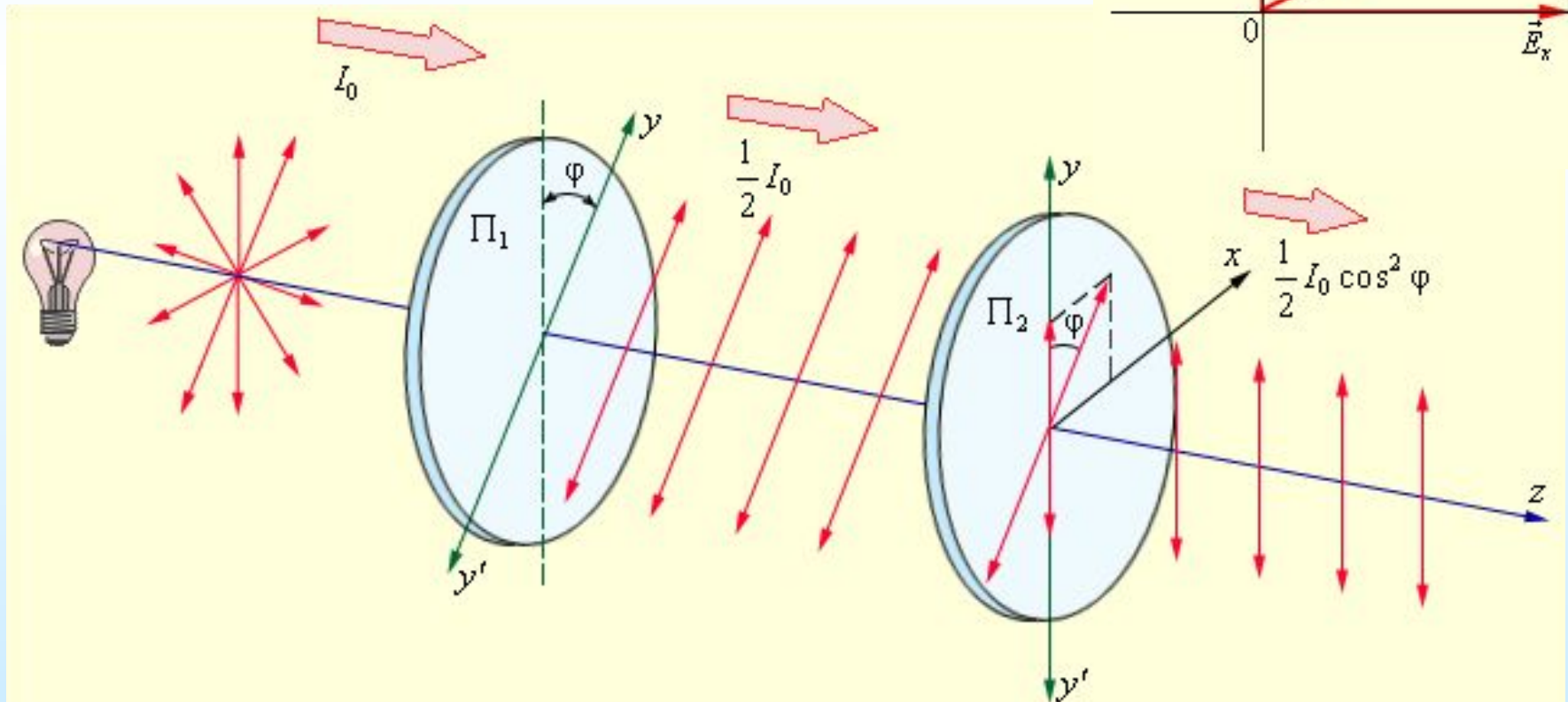
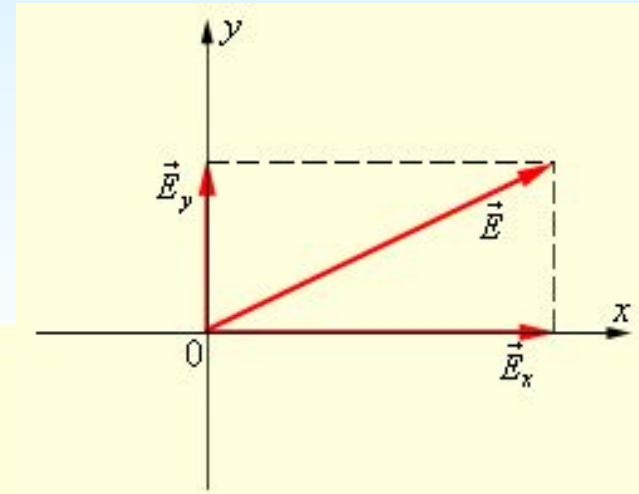


Анализ поляризованного света

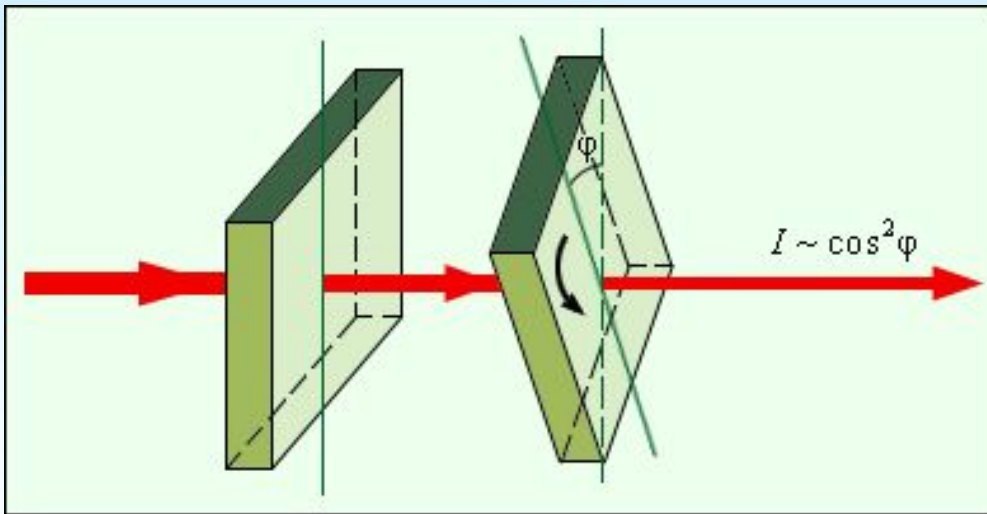
Важно не только получить поляризованный свет, но и определить степень его поляризации и ориентацию плоскости поляризации в пространстве. Приборы для исследования поляризованного света называются анализаторами.

В качестве анализатора используется второй точно такой же поляризатор.

$$I_P = \frac{1}{2} I_0$$



Закон Малюса (1810)

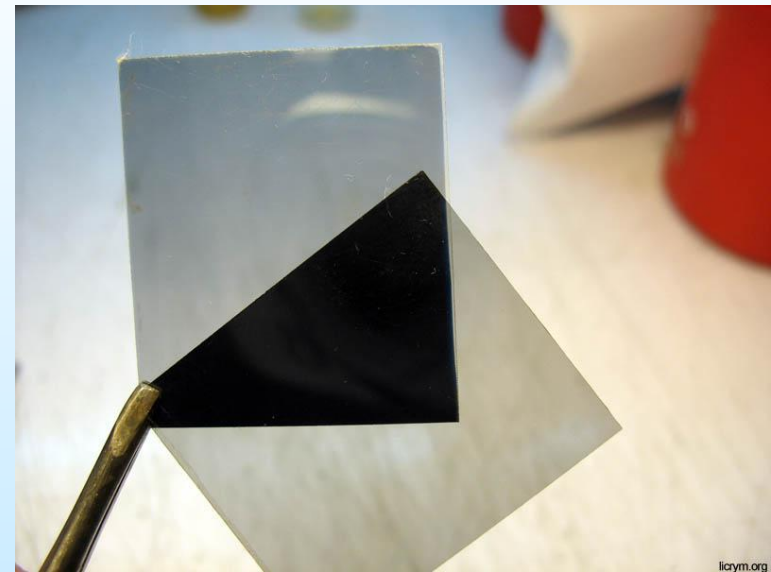


Этьен Луи
Малюс
1775-1812

$$E_A = E_P \cos \varphi \quad \longrightarrow \quad \frac{I_A}{I_P} = \frac{E_A^2}{E_P^2} = \frac{E_P^2 \cos^2 \varphi}{E_P^2} = \cos^2 \varphi$$

$$I_A = I_P \cos^2 \varphi$$

Интенсивность света, прошедшего через анализатор, равна интенсивности света, прошедшего через поляризатор, умноженной на квадрат косинуса угла между плоскостями пропускания анализатора и поляризатора.



Интерференция поляризованного света

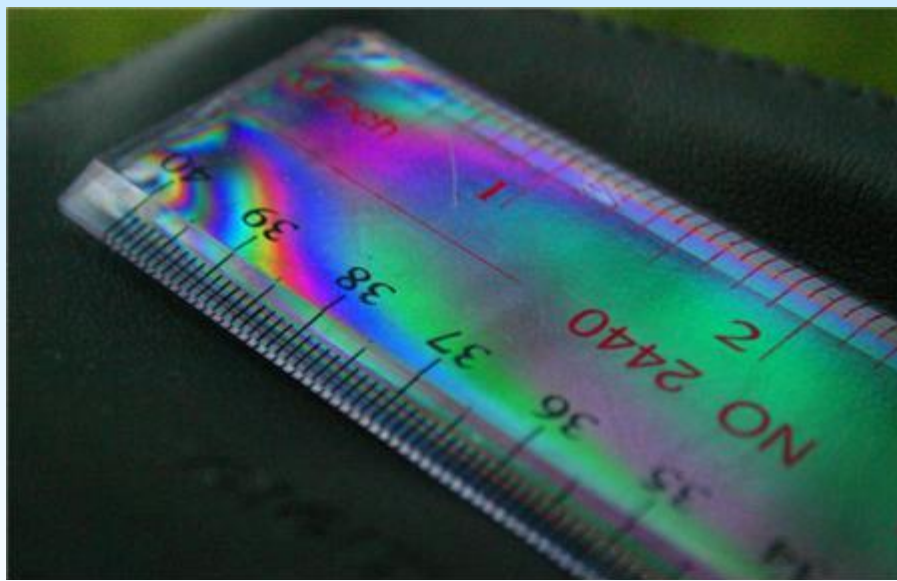
Лучи, получившиеся из естественного света в результате двойного преломления к кристалле, не когерентны, т.к. их колебания принадлежат к разным атомам. Однако, если на кристалл направить уже предварительно плоско поляризованный луч, то лучи обыкновенный и необыкновенный уже будут когерентны. Но интерференции все равно не дадут, т.к. плоскости их колебаний не совпадают (перпендикулярны). Их можно снова свести в одну плоскость, направив на анализатор, установленный так, чтобы его плоскость пропускания не совпадала с плоскостями колебаний ни одного из этих лучей.

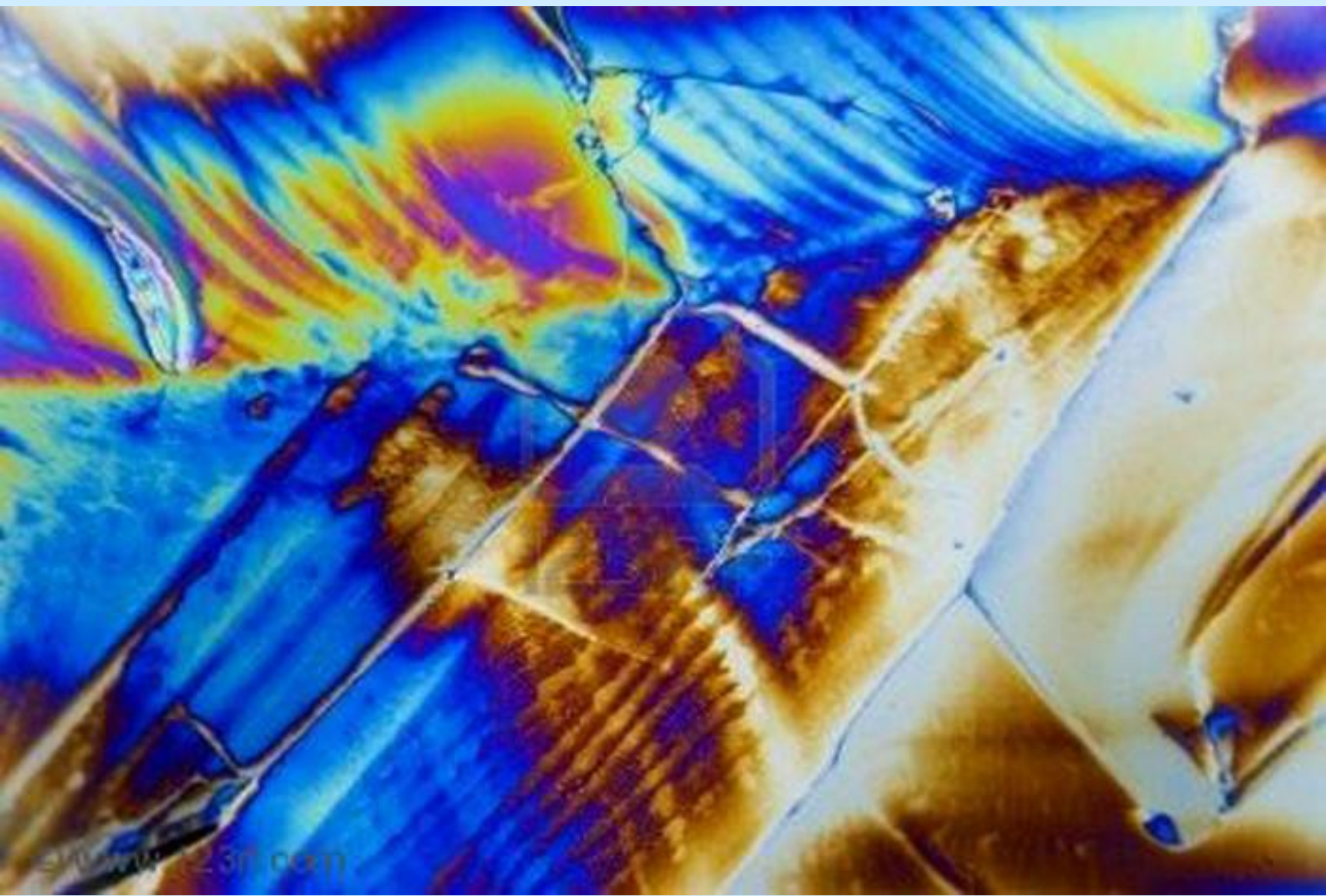
Анализ упругих напряжений

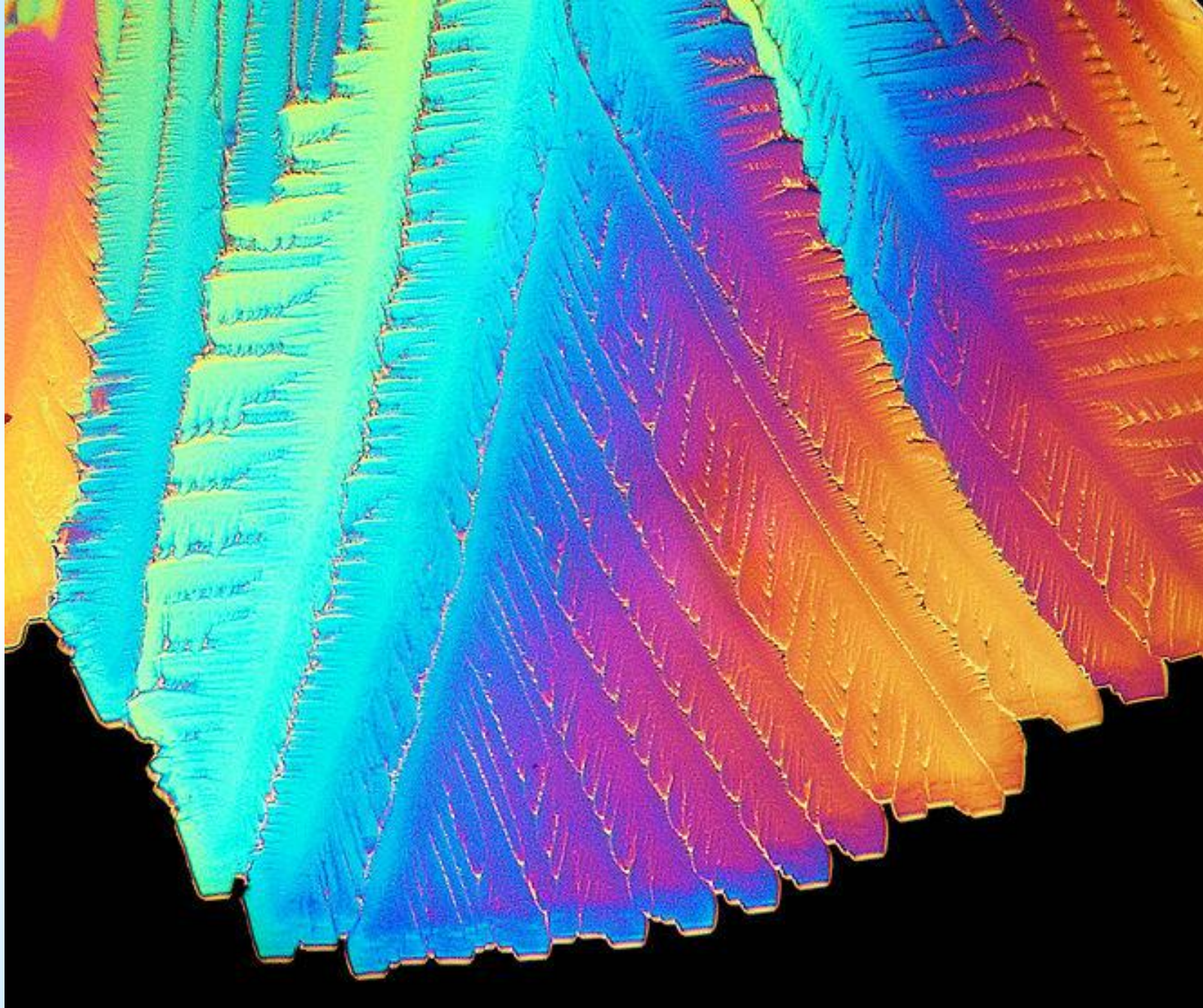
Если прозрачную изначально изотропную пластинку подвергнуть напряжению (сжатию или растяжению), то в этом направлении она станет анизотропна и приобретет свойства одноосного кристалла.

$$(n_o - n_e) = a \sigma \quad \longrightarrow \quad \Delta = (n_o - n_e) d = a \sigma d = k \lambda \quad \longrightarrow \quad \boxed{\sigma = \frac{k \lambda}{d}}$$

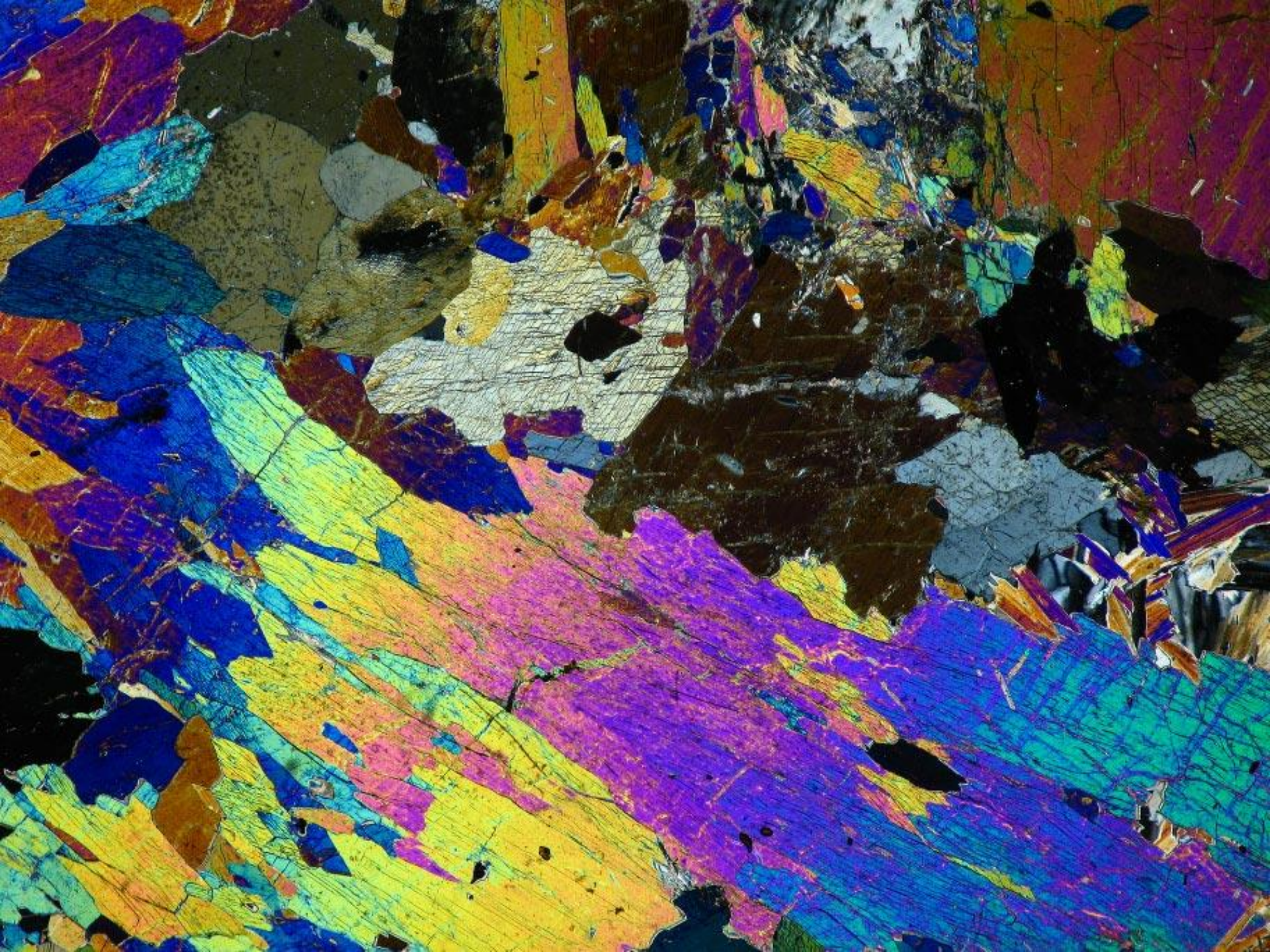
σ – нормальное механическое напряжение (сила на единицу площади по нормали), a – коэффициент, зависящий от вещества.







Анизотропный кристалл лимонной кислоты (увеличение 200×).



Вращение плоскости поляризации

Некоторые вещества (**оптически активные**), могут поворачивать плоскость поляризации проходящего через них света.

Твердые тела (кварц, сахар, киноварь), чистые жидкости (скипидар, никотин, винная кислота) и растворы оптически активных веществ (сахара, кислоты, спирта и пр.). Причина – асимметрия молекул.

Угол поворота пропорционален пути света в этом веществе.

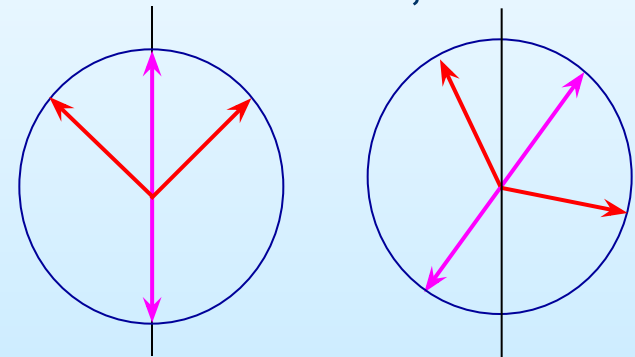
$$\alpha = \alpha_0 l$$

$$\alpha_0 \sim 1/\lambda^2$$

Коэффициент α_0 , численно равный углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины – **постоянная вращения**.

Она зависит от длины волны (дисперсия вращательной способности). Например, кварцевая пластинка толщиной 1 мм поворачивает плоскость поляризации красного света на 15° , а фиолетового света - на 51° .

Объяснение дано Френелем: возникают 2 вида кругополяризованных лучей, поляризованных по правому и левому кругам.



Вращение плоскости поляризации

В растворах угол поворота пропорционален еще и концентрации C :

Закон Био:

$$\alpha = [\alpha_0]_D^{20} C l$$

Оптическую активность растворов характеризуют **удельным оптическим вращением** $[\alpha_0]$, т. е. вращением плоскости поляризации в кювете длиной 1 дм при определённой концентрации C оптически активного вещества. Как правило, определение оптического вращения проводят при 20°C, используя излучение с длиной волны линии D спектра натрия (589 нм).

Для чистых жидкостей, например масел, вместо концентрации используют плотность (ρ) жидкости:

$$\alpha = [\alpha_0]_D^{20} \rho l$$

Сахариметр СУ-4

Определение концентрации.

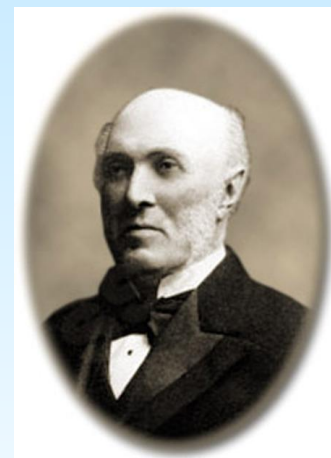
Эффект Фарадея (1845)

Активные – в магнитном поле.



Эффект и ячейка Керра (1875)

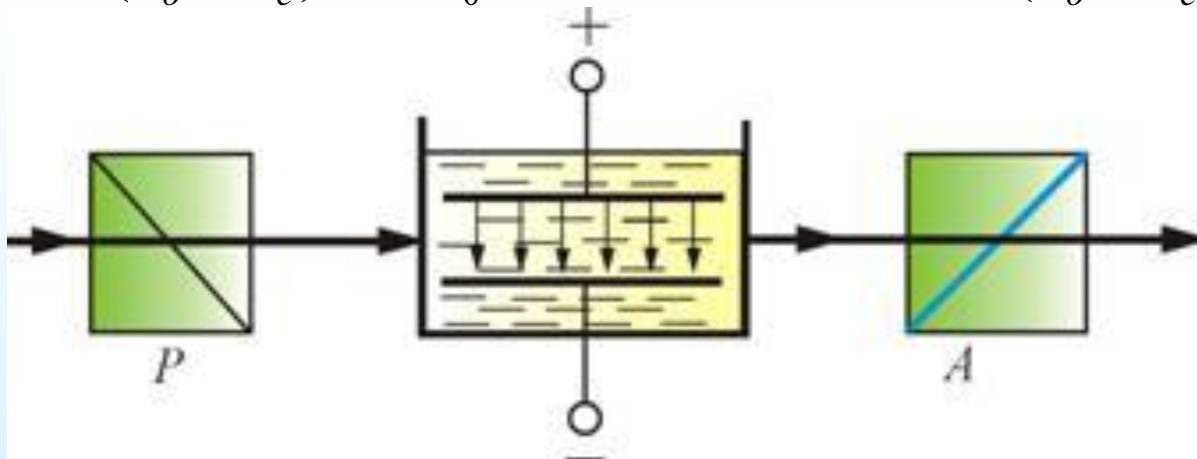
Возникновение двойного лучепреломления в газах, жидкостях и аморфных твердых телах (диэлектриках) под действием сильного однородного электрического поля называется **эффектом Керра** или **квадратичным электрооптическим эффектом**.



Джон Керр
1824-1907

Возникают изменения значения показателя преломления оптического материала пропорционально второй степени напряженности приложенного электрического поля.

$$(n_o - n_e) = B\lambda_0 E^2 \quad \longrightarrow \quad \Delta = (n_o - n_e)d = B\lambda_0 d E^2$$



B – постоянная Керра, зависящая от длины волны, вещества и температуры (max у нитробензола).

Причина анизотропии – поляризуемость молекул в направлении поля. Ячейка отличается высоким быстродействием (10^{-9} – 10^{-12} сек) – оптический затвор и модулятор света.

РАССКАЖИТЕ МНЕ
ПРО ПОЛЯРИЗАЦИЮ
СВЕТА.



Я НЕ СВЕТА.
Я НАТАША.

