

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

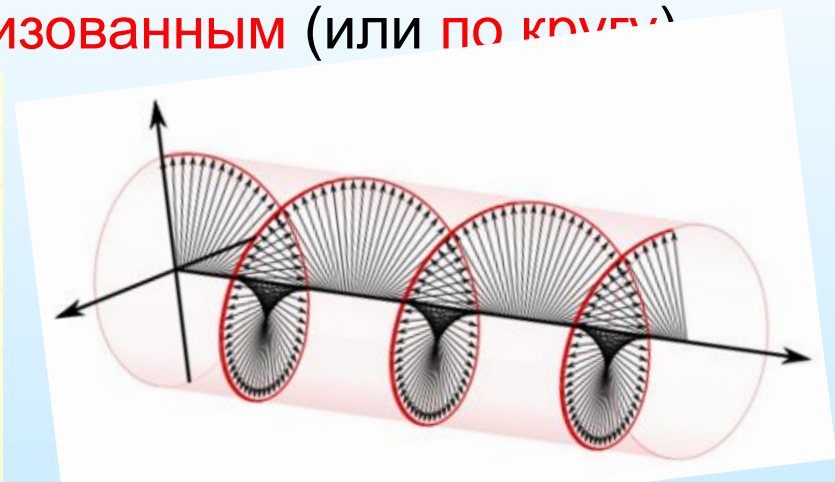
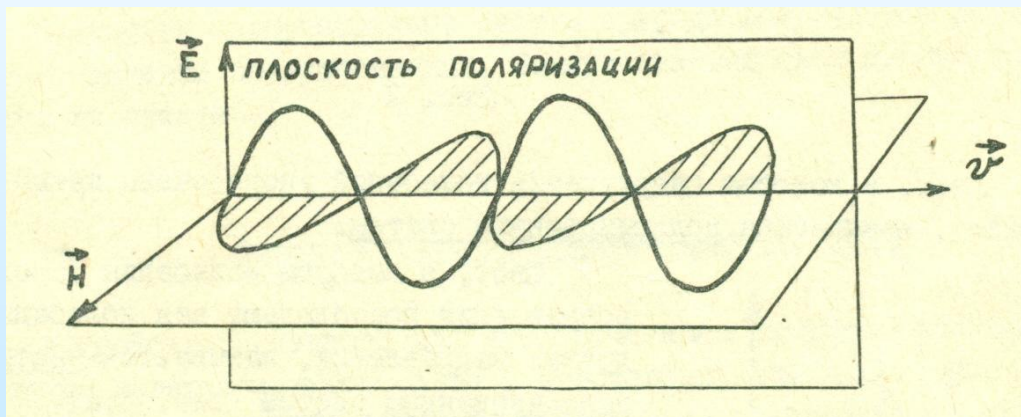
Свет, в котором направления колебаний светового вектора ориентированы случайным образом, причем разные направления представлены с равной вероятностью, называется естественным.

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**).

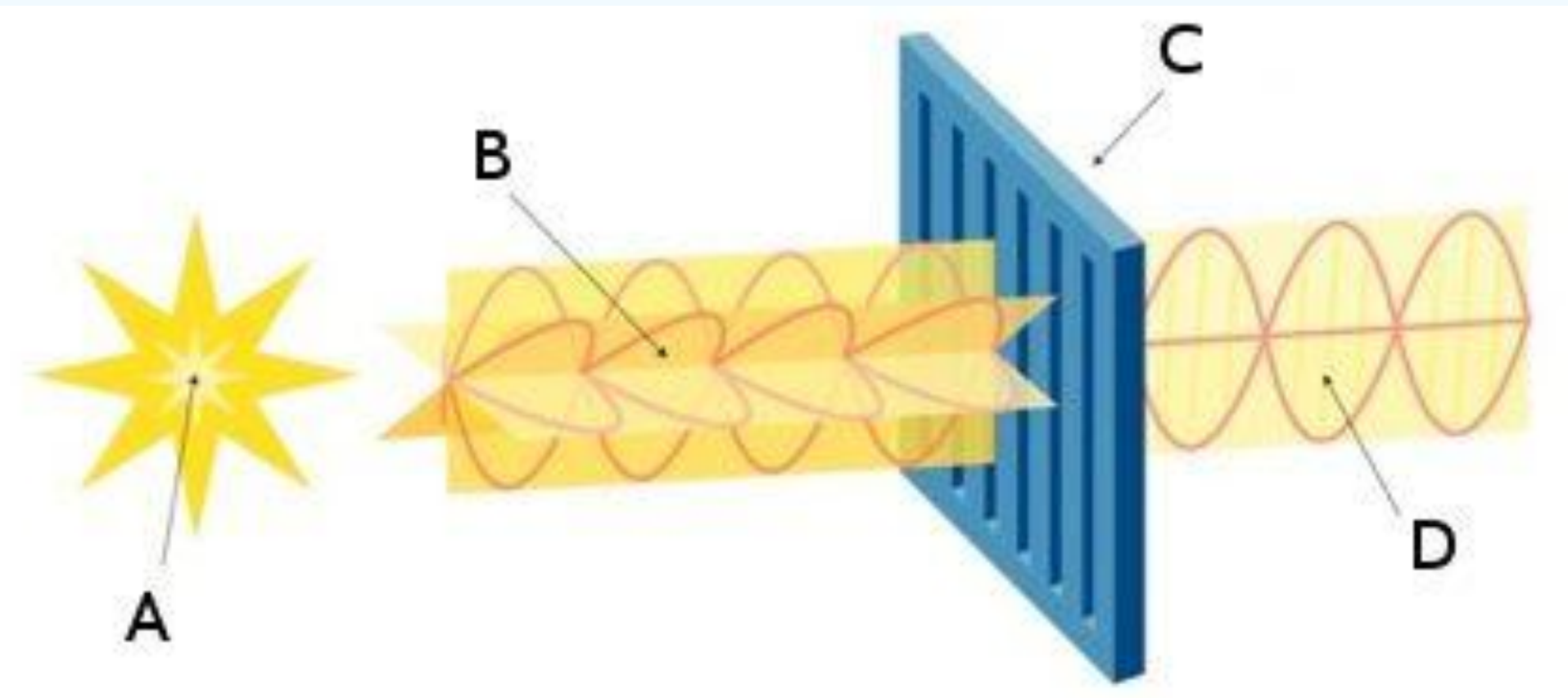


Поляризаторы

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:

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

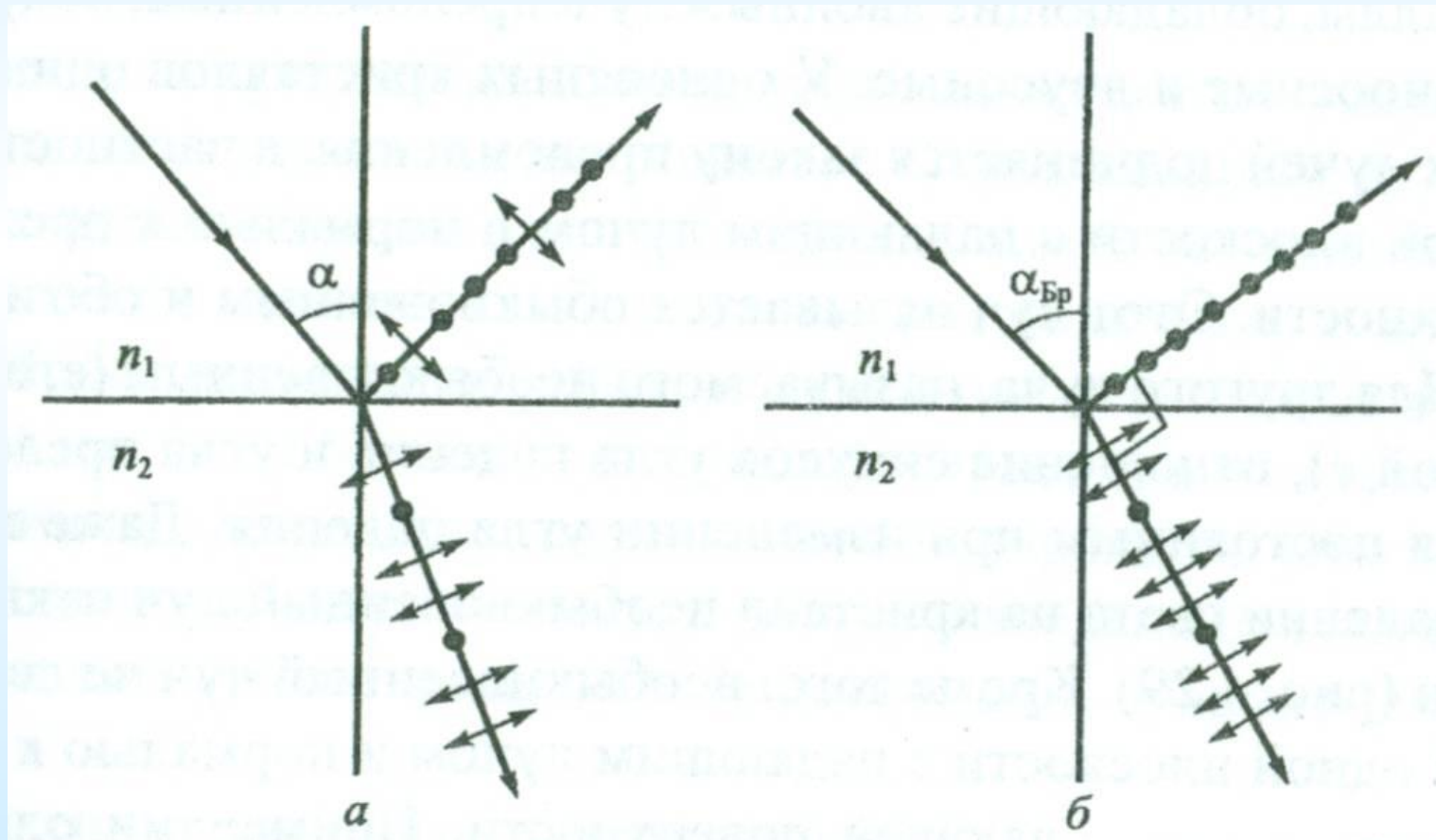
Интенсивность световой волны

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)

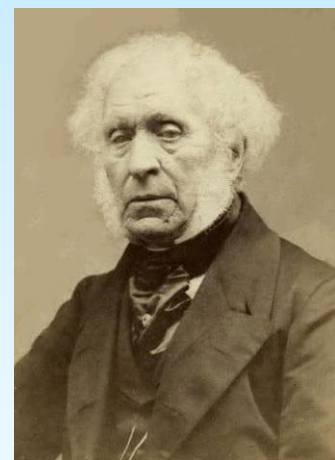
При некотором угле падения (угле Брюстера) отраженный луч оказывается полностью поляризован.

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

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).



Сэр Дэвид
Брюстер
1781-1868

Закон Брюстера (полного внутреннего отражения)

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

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

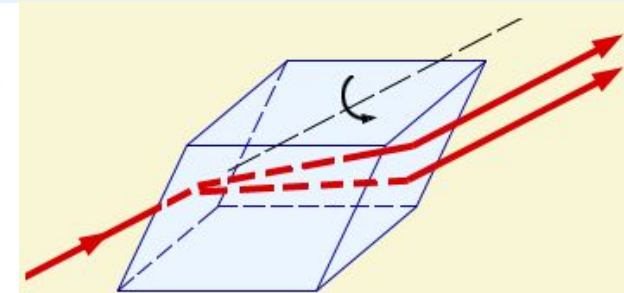
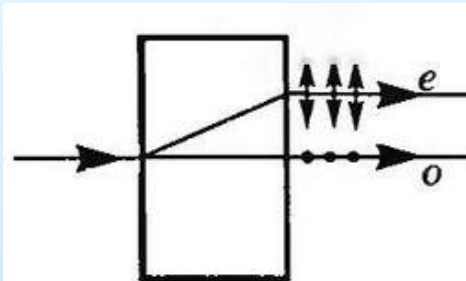
Поляризация при двойном лучепреломлении в кристалле

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 $v_o \geq v_e$ ($n_o \leq n_e$) – **положительные** (кварц).

Кристаллы, для которых $v_o \leq v_e$ ($n_o \geq n_e$) – **отрицательные** (исландский шпат).

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

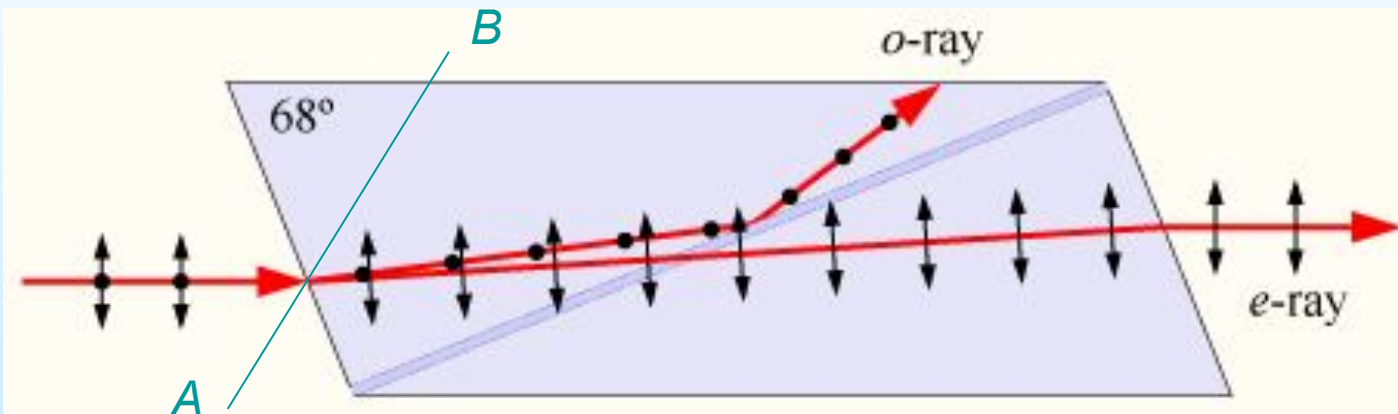
Уильям
Николь
1768-1851

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.

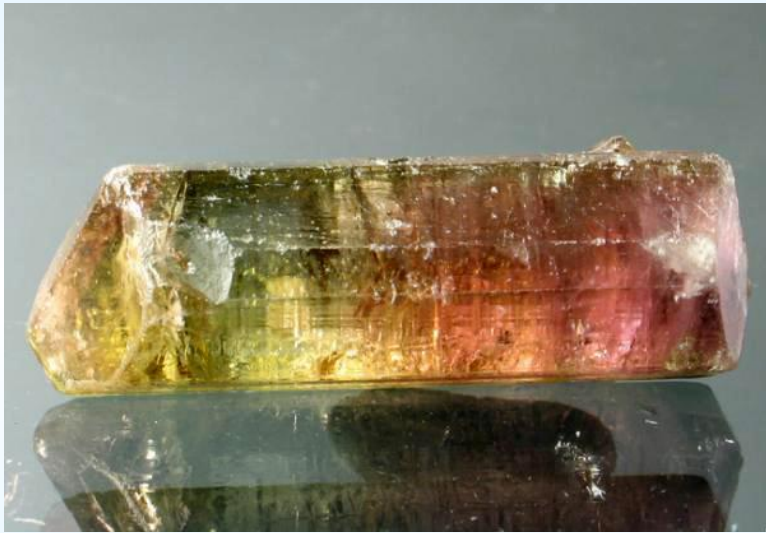
$$n_{кб} = 1,550 \quad n_e = 1,486 \quad n_o = 1,658 \quad \longrightarrow \quad n_e < n_{кб} < n_o$$

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).



Поляриды (1935)

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

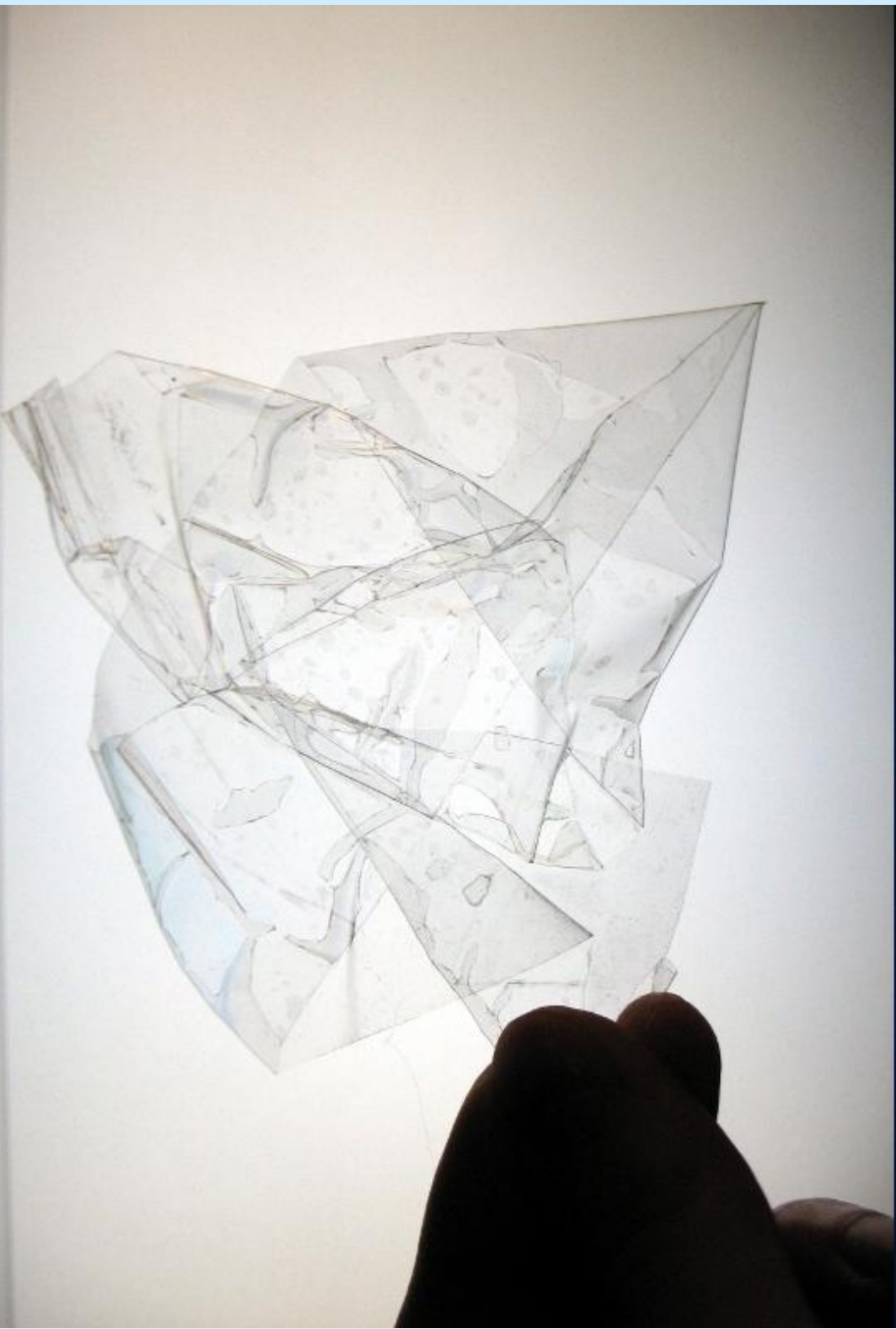
Поляризационные светофильтры



БЕЗ ФИЛЬТРА



С ФИЛЬТРОМ



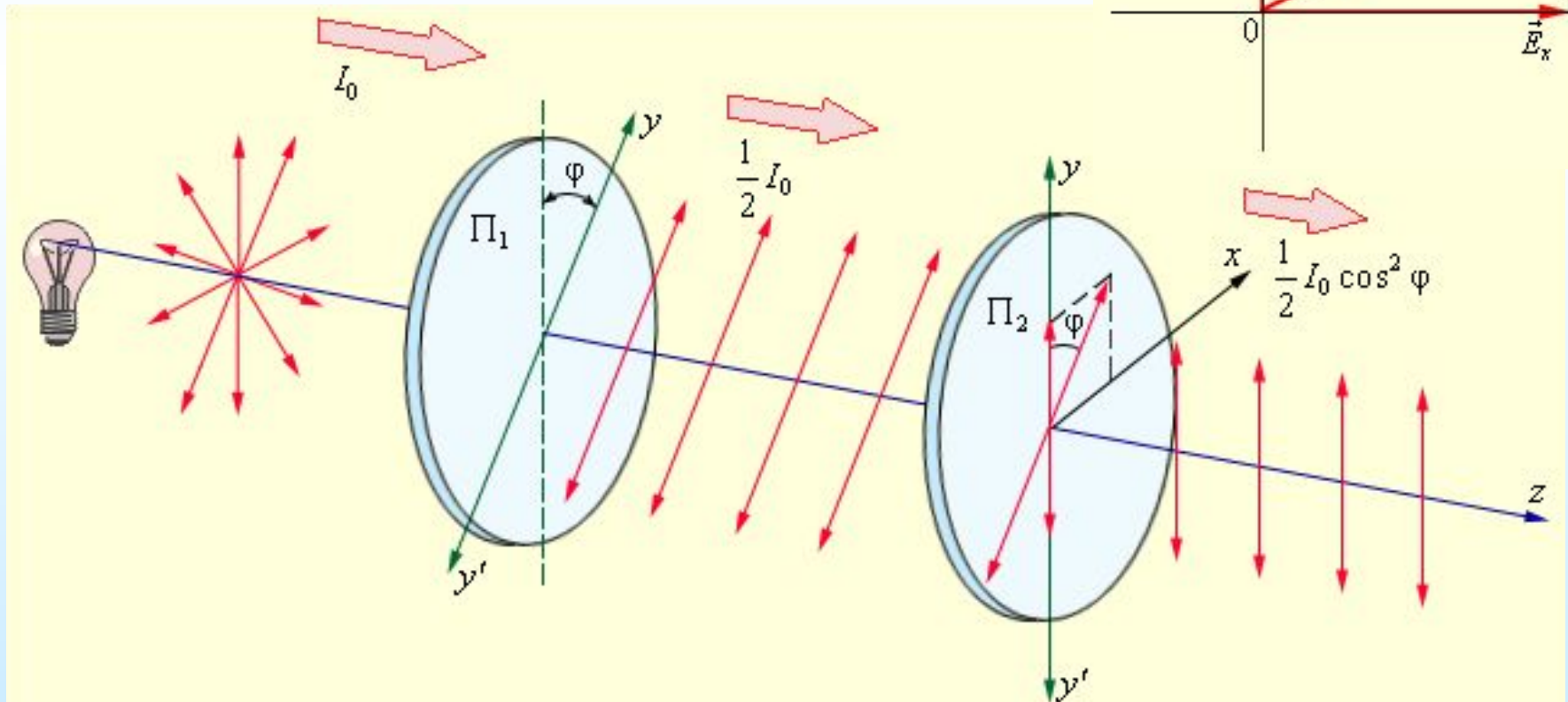
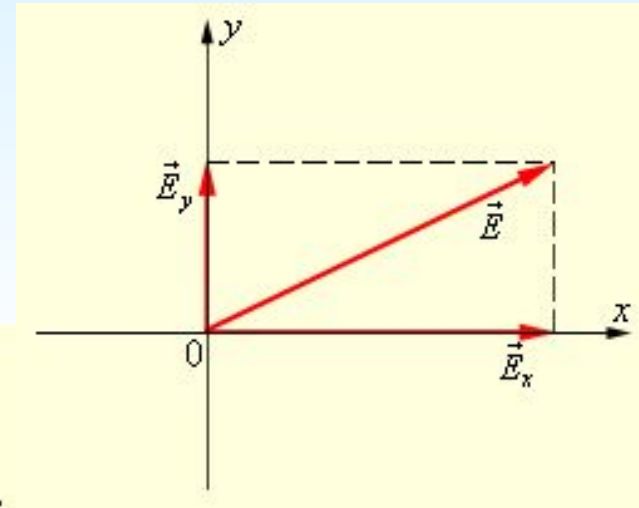


Анализ поляризованного света

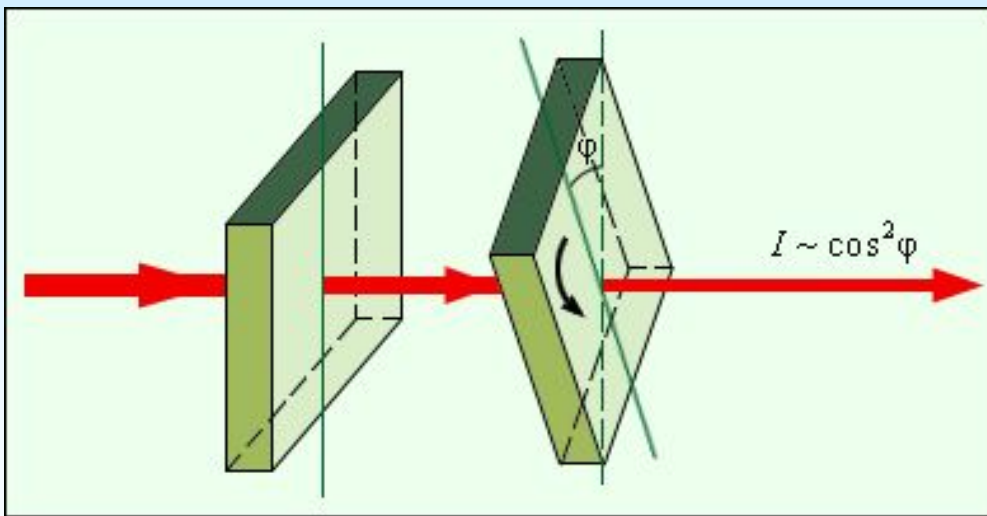
Важно не только получить поляризованный свет, но и определить степень его поляризации и ориентацию плоскости поляризации в пространстве. Приборы для исследования поляризованного света называются анализаторами.

В качестве анализатора используется второй точно такой же поляризатор.

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



Закон Малюса (1810)

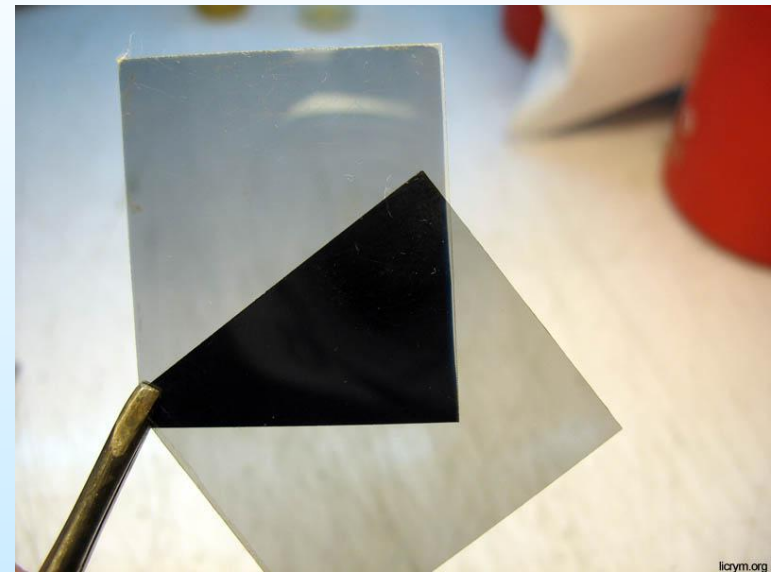


Этьен Луи
Малюс
1775-1812

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

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

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.

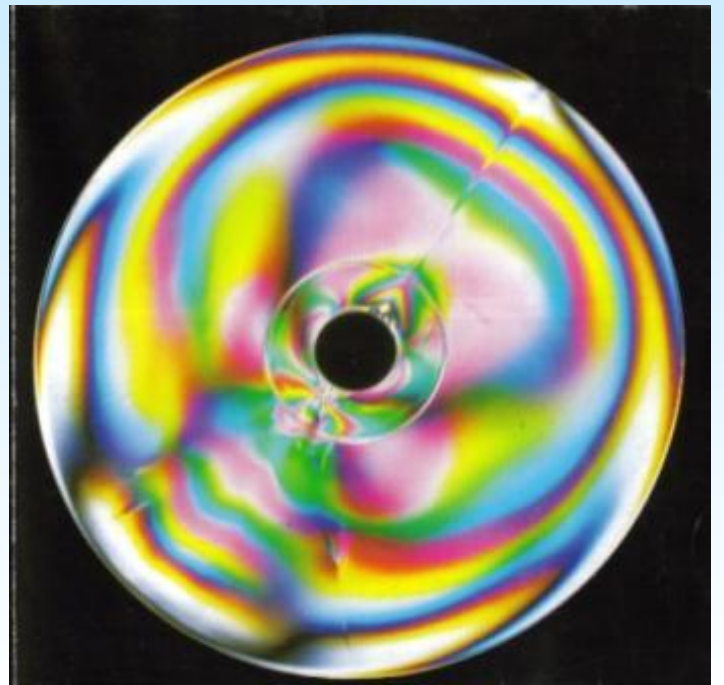
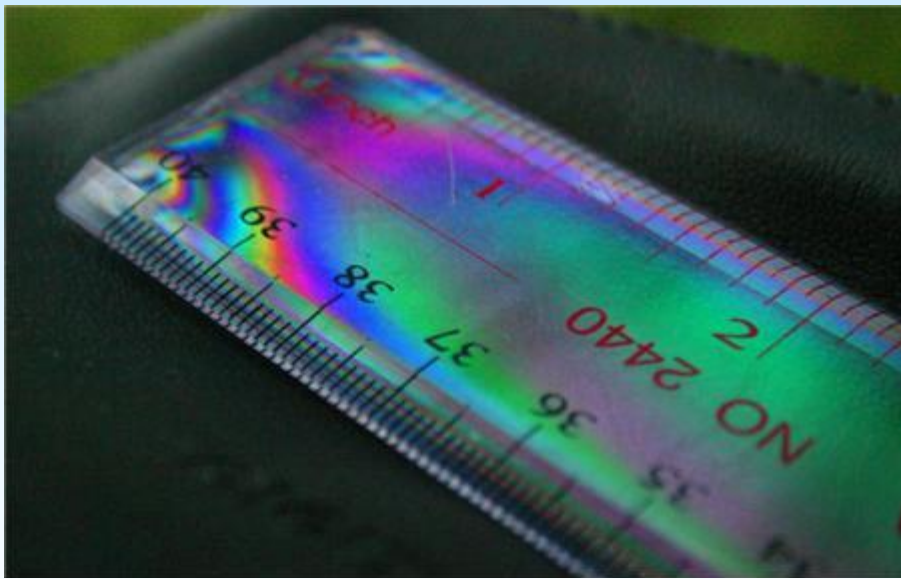
Но интерференции все равно не дадут, т.к. плоскости их колебаний не совпадают (перпендикулярны). Их можно снова свести в одну плоскость, направив на анализатор, установленный так, чтобы его плоскость пропускания не совпадала с плоскостями колебаний ни одного из этих лучей.

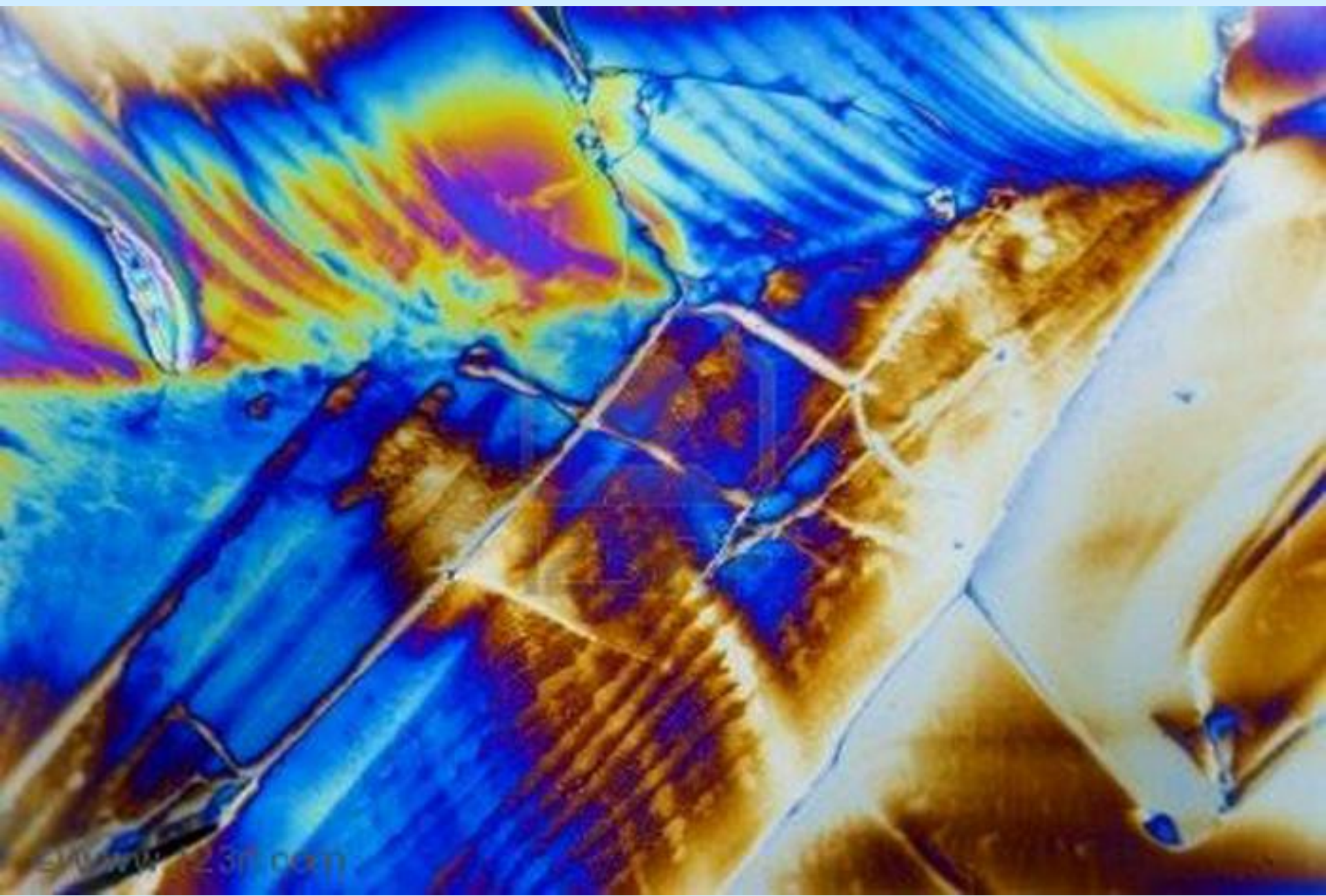
Анализ упругих напряжений

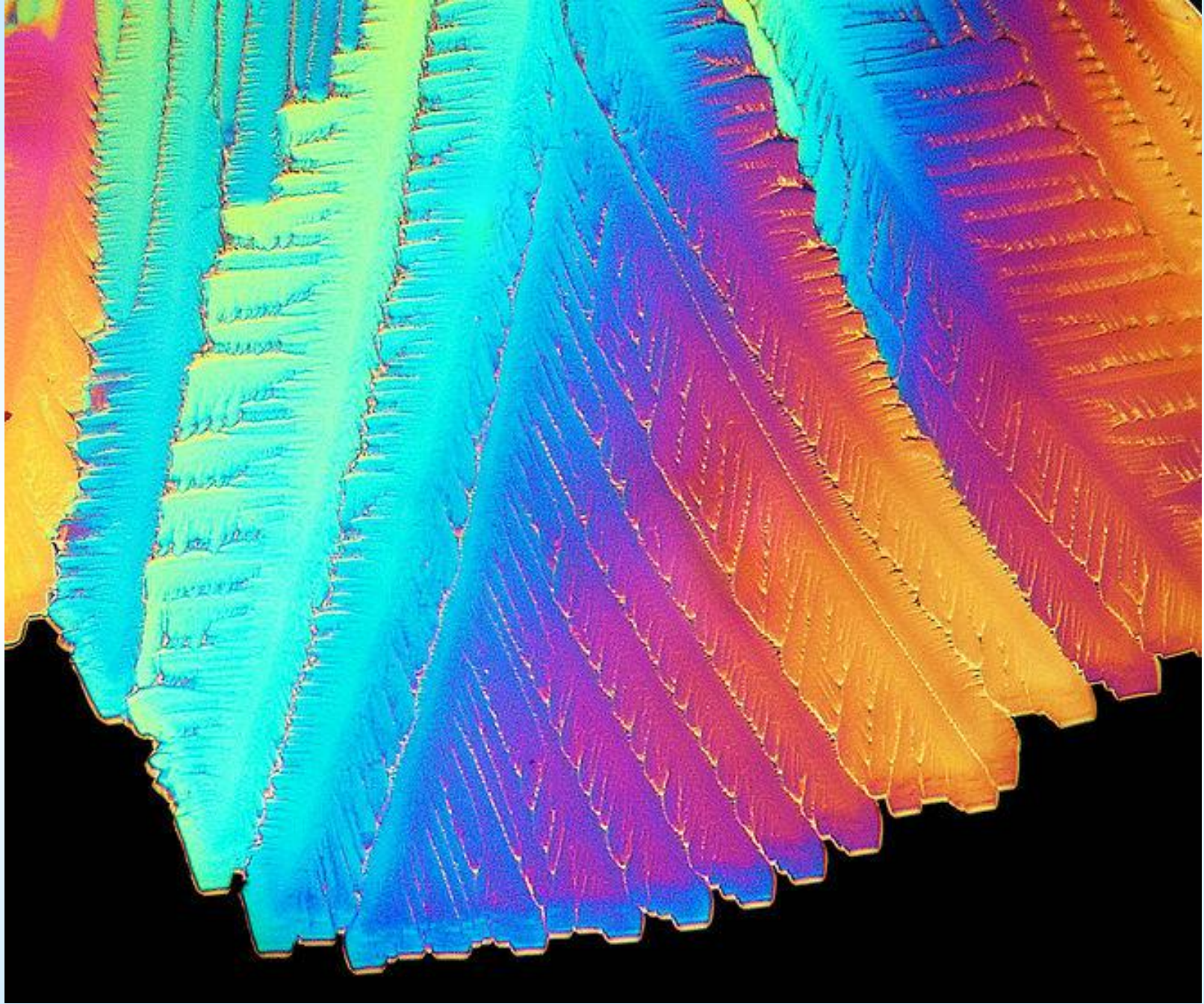
Если прозрачную изначально изотропную пластинку подвергнуть напряжению (сжатию или растяжению), то в этом направлении она станет анизотропна и приобретет свойства одноосного кристалла.

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

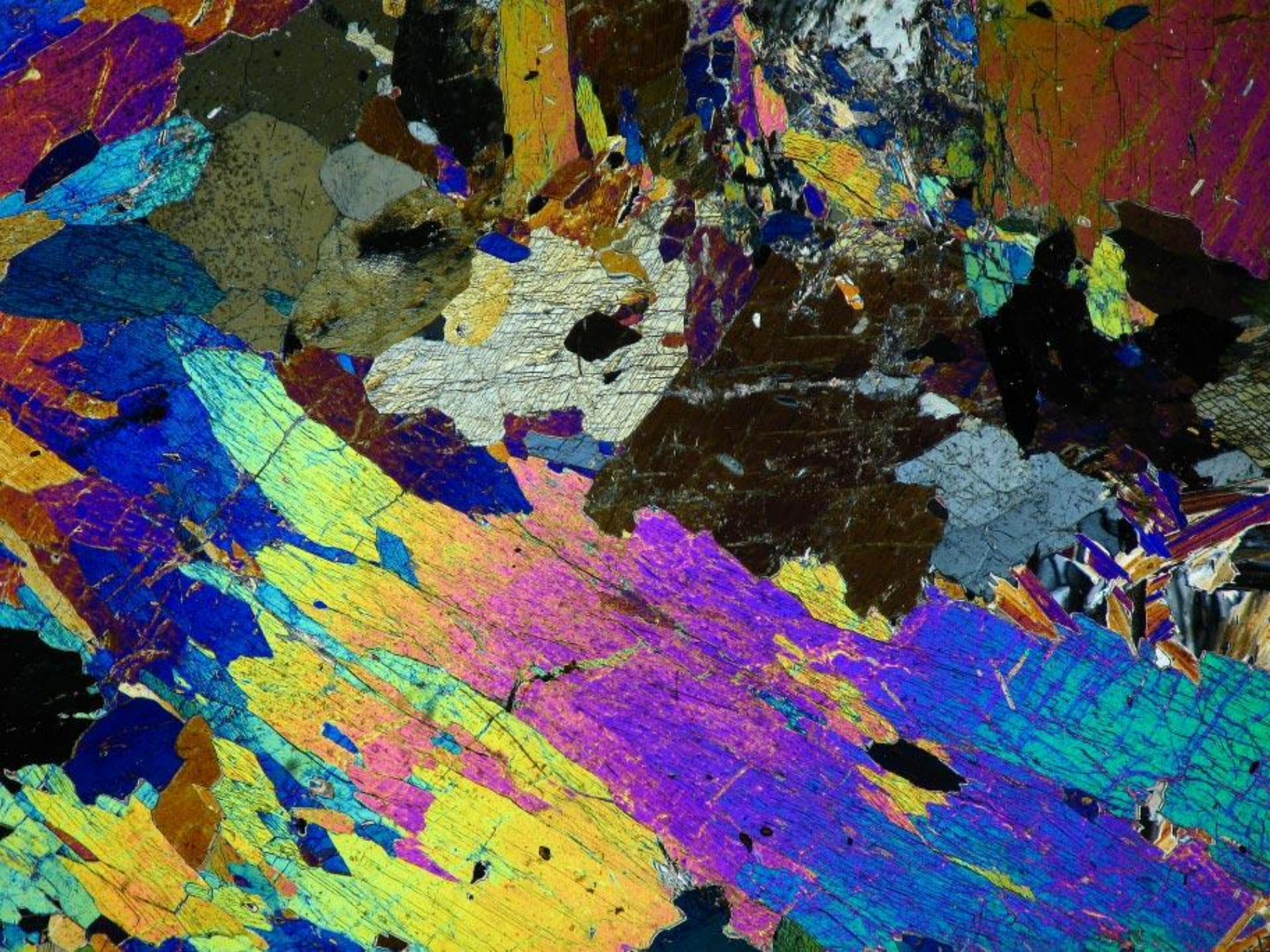
σ – нормальное механическое напряжение (сила на единицу площади по нормали), a – коэффициент, зависящий от вещества.







Анизотропный кристалл лимонной кислоты (увеличение 200×).



Вращение плоскости поляризации

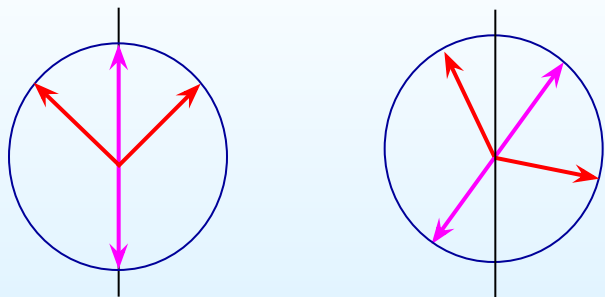
Некоторые вещества (**оптически активные**), могут поворачивать плоскость поляризации проходящего через них света.

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.

$$\varphi = [\varphi_0]l \quad \text{В растворах – еще и концентрации } C: \quad \varphi = [\varphi_0]Cl$$

Коэффициент φ_0 , численно равный углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины – **удельное вращение**.



Сахариметр

Определение концентрации.

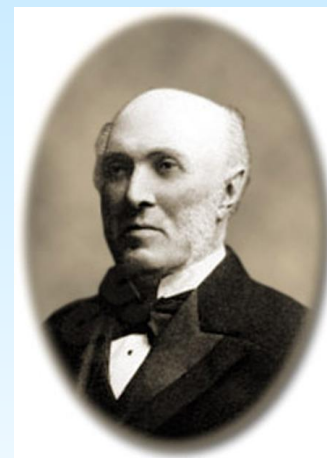
Эффект Фарадея (1845)

Активные – в магнитном поле.



Эффект и ячейка Керра (1875)

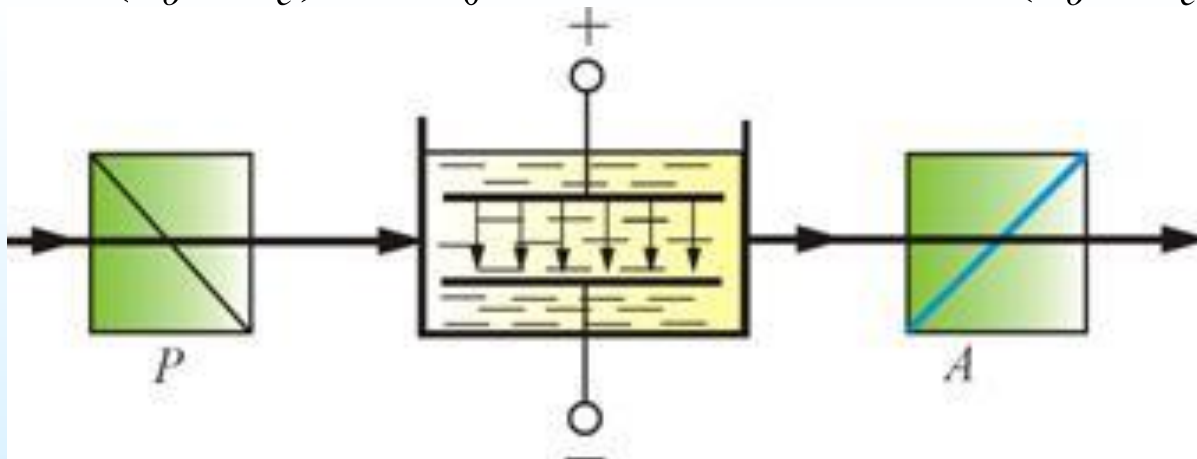
Возникновение двойного лучепреломления в газах, жидкостях и аморфных твердых телах (диэлектриках) под действием сильного однородного электрического поля называется **эффектом Керра** или **квадратичным электрооптическим эффектом**.



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.

РАСКАЖИТЕ МНЕ
ПРО ПОЛЯРИЗАЦИЮ
СВЕТА.



Я НЕ СВЕТА.
Я НАТАША.

