

Учреждение образования «Гомельский
государственный медицинский университет»

Кафедра медицинской и биологической физики

Лекция № 5 – Геометрическая и волновая оптика.
Поляризация света.

План лекции

- ◆ Шкала электромагнитных волн.
- ◆ Оптика геометрическая, волновая и квантовая.
- ◆ Законы геометрической оптики.
- ◆ Основы волновой оптики:
 - общие сведения о световых волнах;
 - дисперсия;
 - интерференция;
 - дифракция;
 - поляризация.
- ◆ Естественный и поляризованный свет.
- ◆ Способы получения поляризованного света.
- ◆ Поляризаторы.
- ◆ Оптически активные вещества.

Литература

- Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – М.: Дрофа, 2004. – 560 с.
- Ливенцев Н.М. Курс физики Т.1. 6-е изд., доп. — Москва: Высшая школа, 1978. — 336 с.: ил.
- Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. Книга 4. Волны. Оптика. – М.: АСТ: Астрель, 2008.
- Оценка уровня электромагнитного фона и способы защиты от СВЧ-излучения / Банный В.А. Учебно-методическое пособие для студентов I курса всех факультетов медицинских вузов – Гомель, ГомГМУ, 2015.

Шкала электромагнитных волн (ЭМВ)

Существование ЭМВ предсказано М. Фарадеем в 1832 г., а Дж. Максвелл, в 1865 г. теоретически показал, что электромагнитные колебания не остаются локализованными в пространстве, а распространяются во все стороны от источника. Теория Дж. Максвелла позволила единым образом подойти к описанию радиоволн, оптического излучения, рентгеновского излучения, гамма-излучения. Оказалось, что все эти виды излучения – ЭМВ с различной длиной волны λ , т. е. родственны по своей природе. Каждое из них имеет своё определённое место в единой шкале ЭМВ

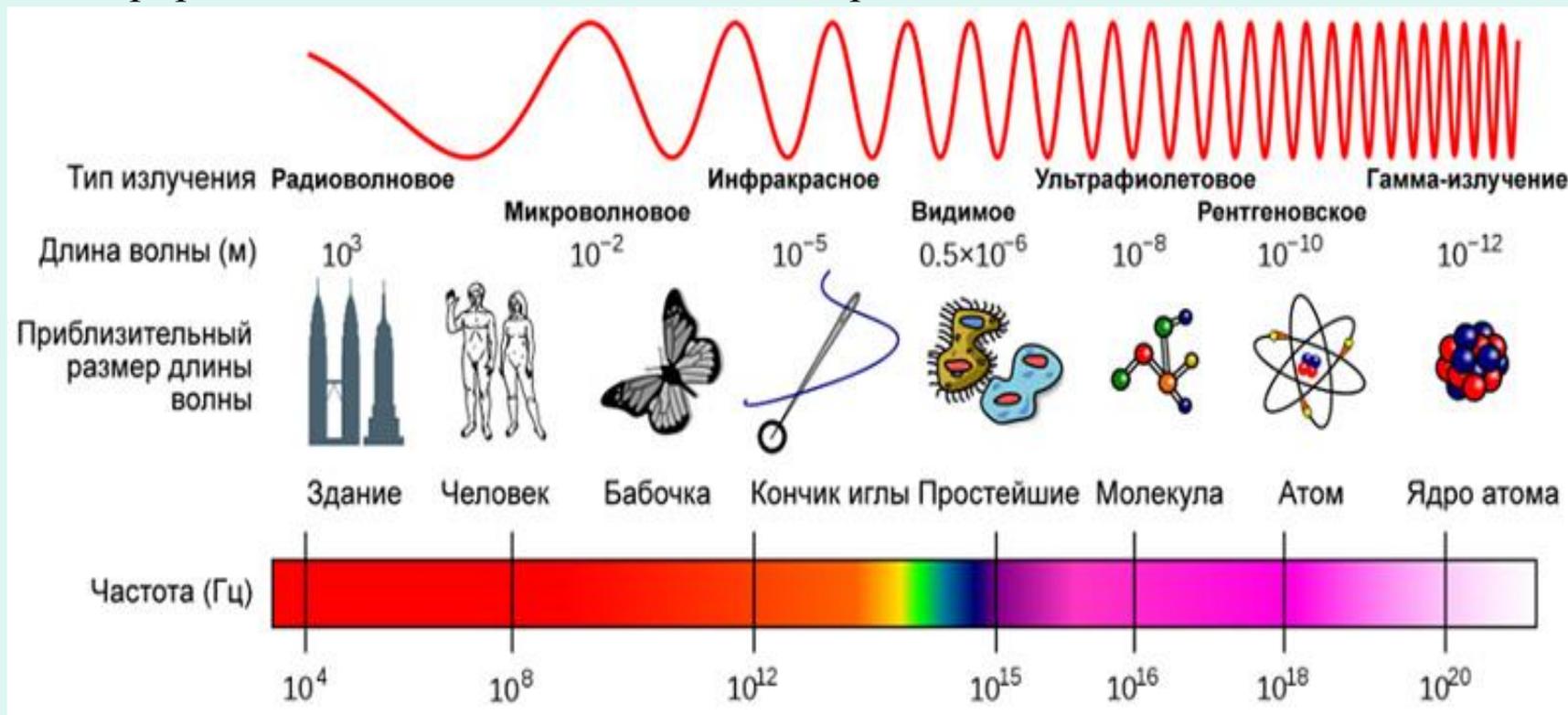


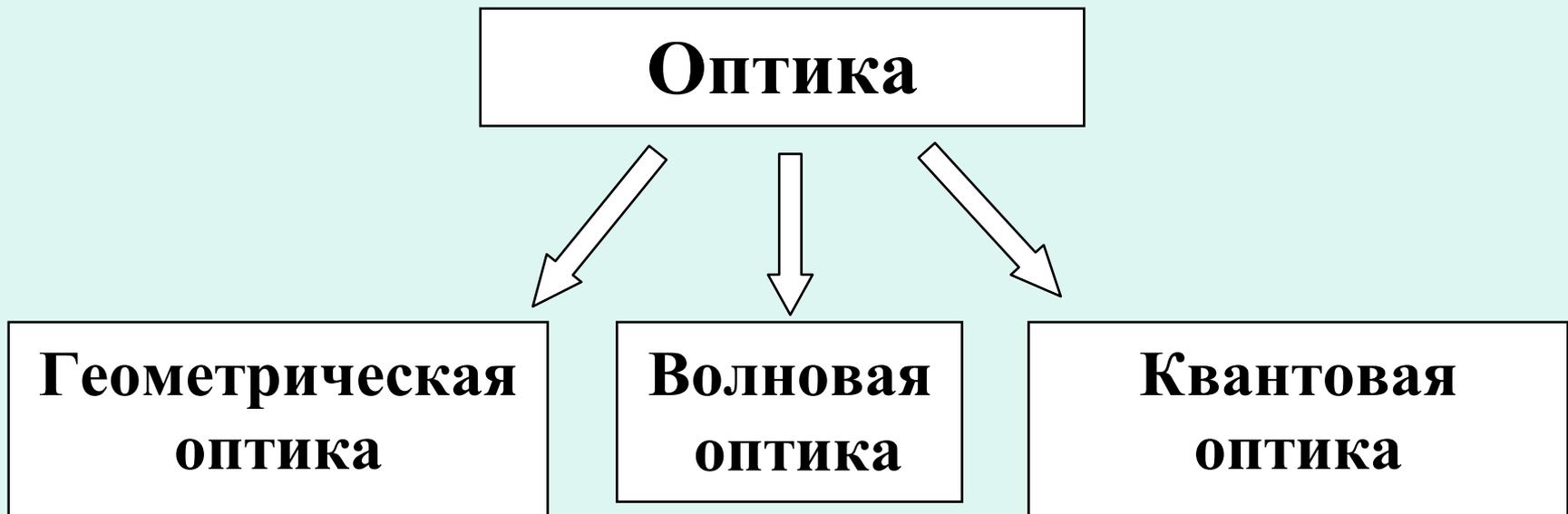
Рисунок – Шкала ЭМВ.

Шкала электромагнитных волн (ЭМВ)

Вид излучения	Длина волны
Радиоволны	$\lambda > 1 \text{ мм}$
Световые волны:	
инфракрасное излучение	$760 \text{ нм} < \lambda < 1 \text{ мм}$
видимый свет	$400 \text{ нм} < \lambda < 760 \text{ нм}$
ультрафиолетовое излучение	$80 \text{ нм} < \lambda < 400 \text{ нм}$
Рентгеновское излучение	$10^{-5} \text{ нм} < \lambda < 80 \text{ нм}$
Гамма-излучение	$\lambda < 10^{-5} \text{ нм}$

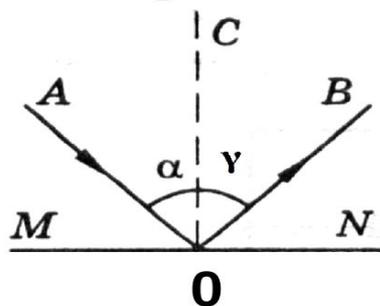
Оптика геометрическая, волновая и квантовая

Оптика (от греч. *optike* – наука о зрительных восприятиях) является разделом физики, в котором изучаются процессы излучения света, его распространения в различных средах и взаимодействия с веществом.



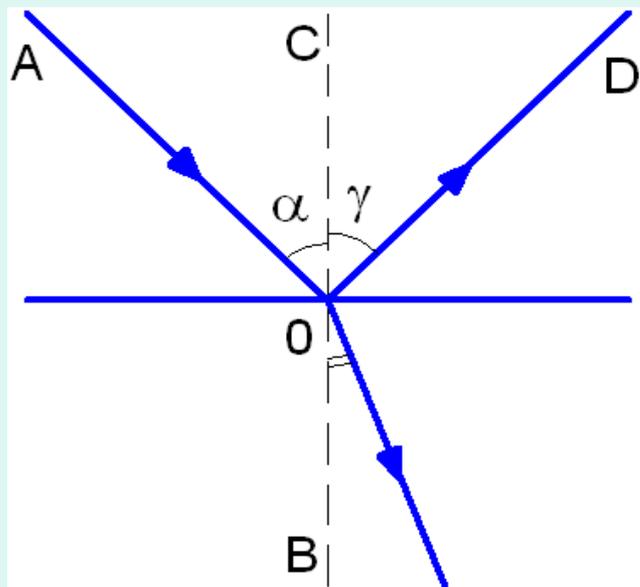
Законы геометрической оптики

Закон отражения света.



1. Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости.
2. Угол падения α равен углу отражения γ .

Закон преломления света



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

n_1, n_2 – абсолютный показатель преломления

α – угол падения

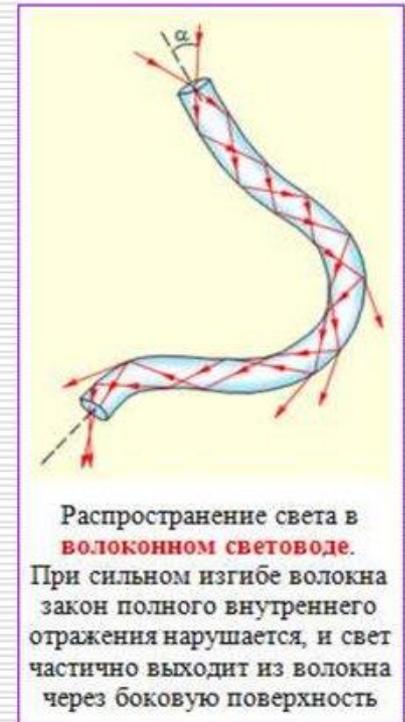
β – угол преломления

v_1, v_2 – скорости света в граничащих средах

$[v] = 1 \frac{м}{с}$ $[n]$ – безразмерная

Законы геометрической оптики

Явление полного внутреннего отражения. Световоды

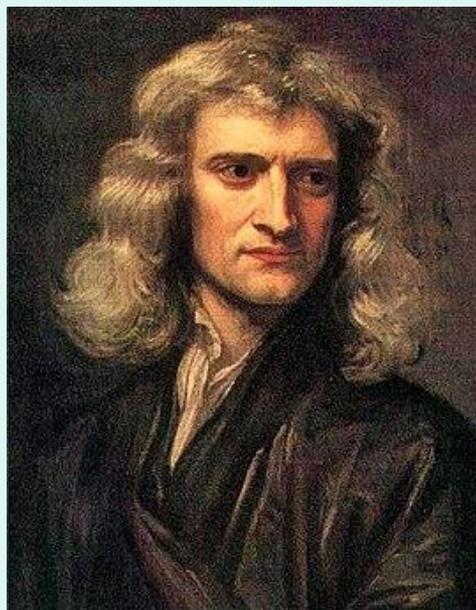


- Явление наблюдается при углах падения, **превышающих** некоторый критический угол α_{np} , который называется **предельным углом полного внутреннего отражения**. Для угла падения $\alpha = \alpha_{np}$ **имеем** $\sin \beta = 1$; тогда значение $\sin \alpha_{np} = n_2 / n_1 < 1$.
- Если второй средой является воздух ($n_2 \approx 1$), то формулу удобно переписать в виде: $\sin \alpha_{np} = 1 / n$, где $n = n_1 > 1$ – абсолютный показатель преломления первой среды.
- Для границы раздела **стекло–воздух** ($n = 1,5$) **критический угол** равен $\alpha_{np} = 42^\circ$, для границы **вода–воздух** ($n = 1,33$) $\alpha_{np} = 48,7^\circ$.
- Явление полного внутреннего отражения **используется** в **световодах**, представляющих собой тонкие, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала.
- Из **световодов** изготавливаются гибкие зонды, с помощью которых свет можно передавать на расстояние практически по любой траектории и позволяющие видеть, диагностировать, например, поверхность цилиндра автомобильного двигателя, внутренность желудка и т. п.

ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Дисперсия

Дисперсию мы нередко наблюдаем в природе. Самым красивым ее проявлением является радуга, которая образуется благодаря рассеиванию солнечных лучей при прохождении их через многочисленные капли дождя.



Исаак Ньютон

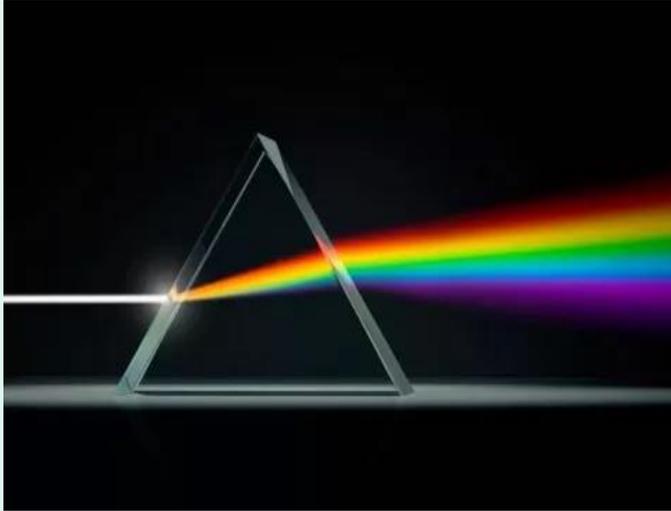
Первое экспериментальное исследование дисперсии света в стеклянной призме было выполнено И. Ньютоном в 1672 г.

Дисперсией света называется зависимость показателя преломления n вещества от частоты ν (длины волн λ) света или зависимость фазовой скорости световых волн от их частоты $n = f(\lambda)$.

▪

Основы волновой оптики

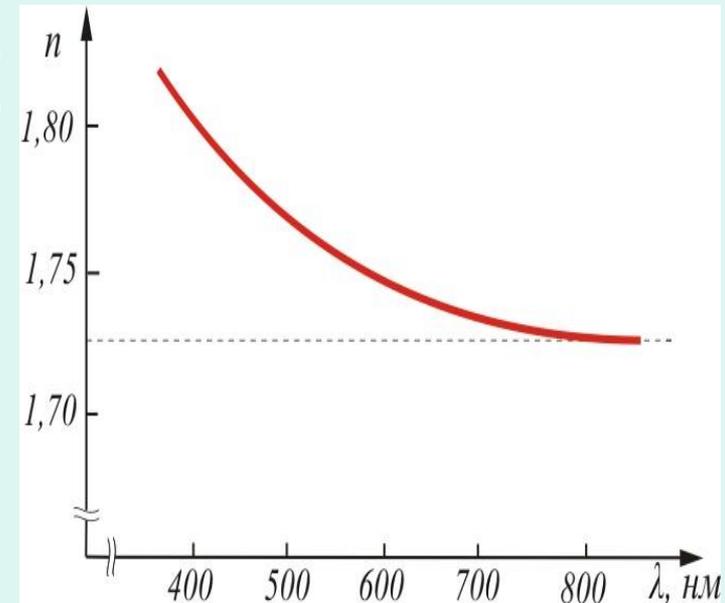
Дисперсия



Поскольку $n = f(\lambda)$, то лучи разных длин волн после прохождения призмы окажутся отклоненными на разные углы, т.е. пучок белого света, падающий на призму, за призмой разлагается в спектр. Значит, с помощью призмы, так же как и с помощью дифракционной решетки, разлагая свет в спектр, можно определить его спектральный состав.

Следствием дисперсии света является разложение в спектр пучка белого света при прохождении его через призму.

На явлении нормальной дисперсии основано действие **призменных спектрометров**, широко используемых в спектральном анализе. Это объясняется тем, что изготовить призму значительно проще, чем дифракционную решетку. Призменные спектрометры имеют также большую светосилу.



ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

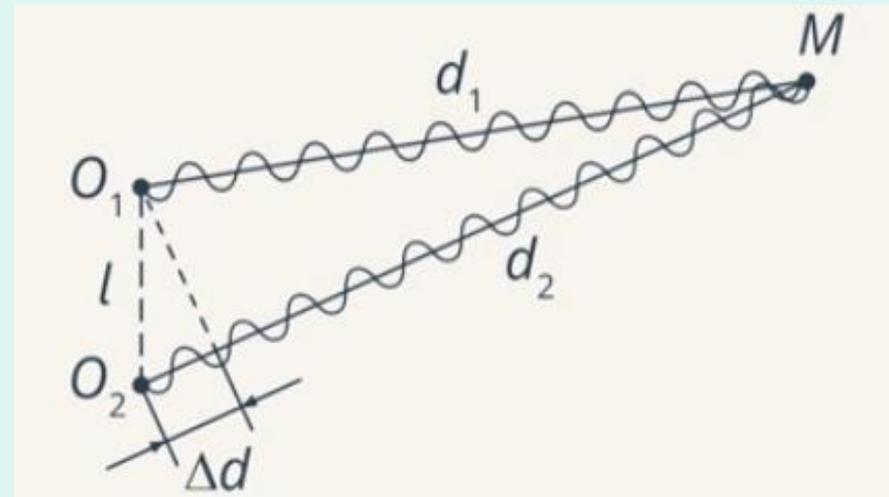
Интерференция

Интерференция света - перераспределение интенсивности света в результате наложения (суперпозиции) нескольких световых волн. Это явление обычно характеризуется чередующимися в пространстве максимумами и минимумами интенсивности света. В некоторых точках пространства результирующая амплитуда является суммой амплитуд исходных волн, в других точках пространства результирующая амплитуда становится равной нулю. Конкретный вид такого распределения интенсивности света в пространстве или на экране, куда падает свет, называется интерференционной картиной.

При этом на частоты и фазы исходно складывающихся волн должны быть наложены определенные ограничения.

Пример сложения двух световых волн

Увеличение или уменьшение амплитуды зависит от того, с какой разностью фаз две складывающиеся волны приходят в данную точку. На рис. показан случай сложения двух волн от точечных источников O_1 и O_2 , находящихся на расстоянии l и от точки M , в которой производят измерения амплитуды. Обе волны имеют в точке M в общем случае различные амплитуды, так как до попадания в эту точку они проходят разные пути и их фазы различаются.



ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Интерференция

Максимальное значение результирующей амплитуды будет наблюдаться в том случае, когда разность фаз между двумя складывающимися волнами равна нулю. То же самое должно наблюдаться, когда разность фаз равна 2π , 4π , 6π ... так как 2π – период функции синуса (рис.)

Если $\phi_1 = \phi_2 = 0$ и $A_1 = A_2 = A$

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \quad y_2 = A \sin(kx - \omega t)$$

$$y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx - \omega t) = \\ = 2A \sin(kx - \omega t)$$

*Амплитуда колебаний в данной точке максимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебание в этой точке, равна **целому числу длин волн** или **четному числу полуволн***

$$\Delta d = \pm k\lambda \quad - \text{условие максимума интерференции}$$

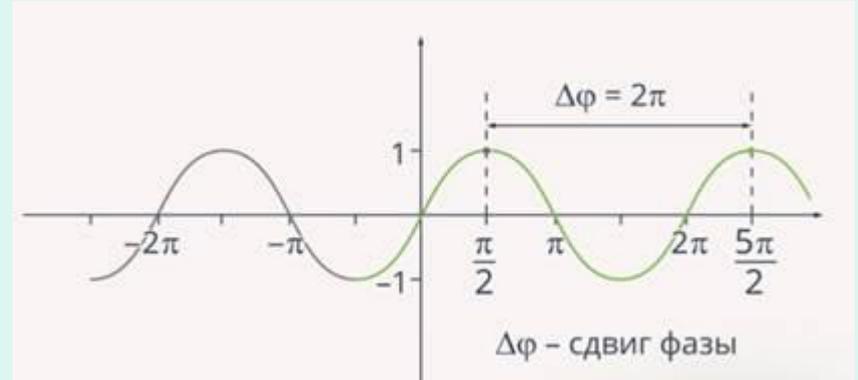


Рис. Максимальное значение результирующей амплитуды

ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Интерференция

Если $\phi_1 = 0^\circ$ $\phi_2 = 180^\circ$ и $A_1 = A_2 = A$

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t - 0) \quad \text{и} \quad y_2 = A \sin(kx - \omega t - 180)$$

$$\begin{aligned} y_1 + y_2 &= A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx - \omega t - 180) = \\ &= A \sin(kx - \omega t) - A \sin(kx - \omega t) = 0 \end{aligned}$$

*Амплитуда колебаний в данной точке минимальна, если разность хода двух волн, возбуждающих колебание в этой точке, равна **нечетному числу полуволн** или **полуцелому числу длин волн***

$$\Delta d = \pm(2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad - \text{условие минимума интерференции}$$

ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Дифракция

Дифракция волн (лат. *diffractus* — буквально разломанный, переломанный, огибание препятствия волнами) — явление, которое проявляет себя как отклонение от законов геометрической оптики при распространении волн. Она представляет собой универсальное волновое явление и характеризуется одними и теми же законами при наблюдении волновых полей разной природы.



Дифракция в природе. Паутина работает, как дифракционная решетка



Томас Юнг



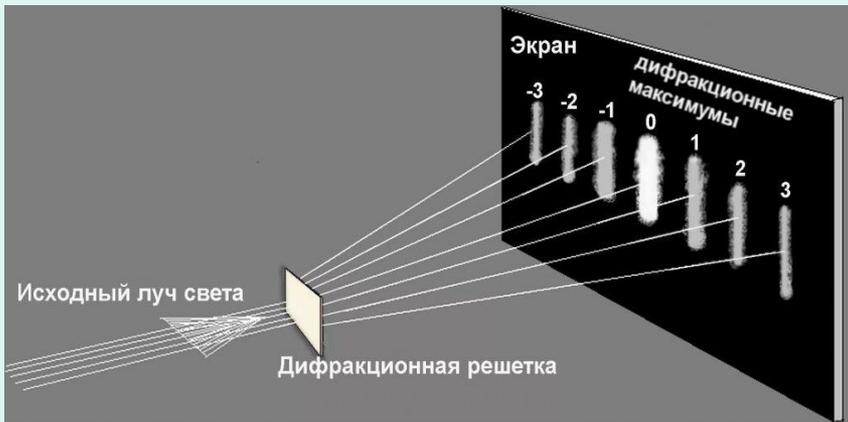
Огюстен Жан
Френель

Первое качественное объяснение явления дифракции на основе волновых представлений было дано английским ученым Т. Юнгом. Независимо от него французский ученый О. Френель развил количественную теорию дифракционных явлений (1818 г.).

Основы волновой оптики

Дифракция

Для наблюдения явления дифракции используется специальный прибор – **дифракционная решетка**. Дифракционная решетка представляет собой систему препятствий, которые по размеру сопоставимы с длиной волны. Это специальные параллельные штрихи, выгравированные на поверхности металлической или стеклянной пластины. Расстояние между краями соседних щелей решетки называется периодом решетки или ее постоянной.



$$d \sin \varphi = k \lambda$$

где d – период решетки, φ – угол отклонения света после прохождения решетки, k – порядок дифракционного максимума, λ – длина волны.

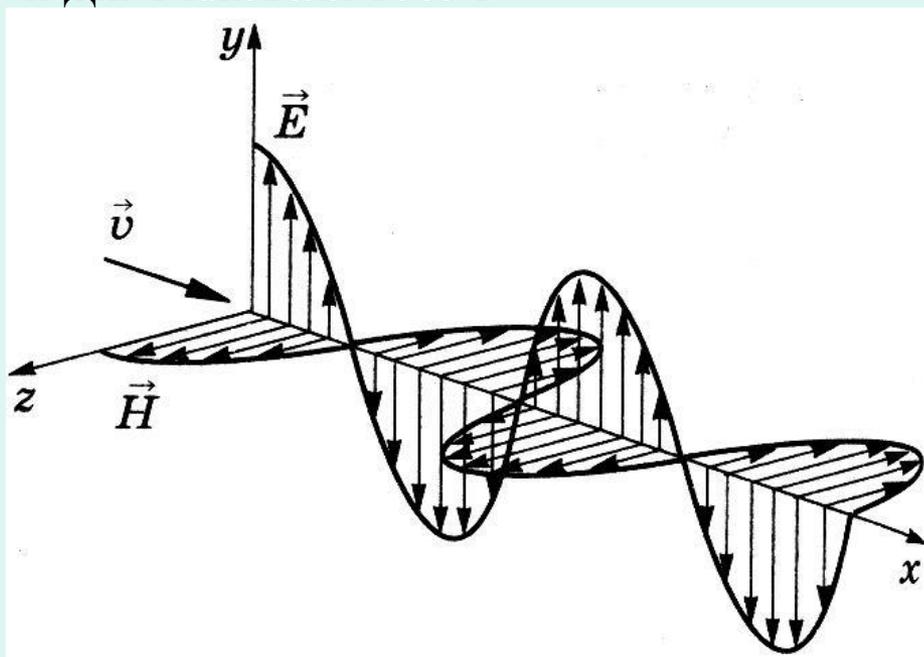
Попадая на решетку и встречая препятствие, световая волна проходит через систему прозрачных и непрозрачных областей, в результате чего **разбивается на отдельные пучки когерентного света, которые после дифракции интерферируют друг с другом**. Каждая длина волны отклоняется при этом на определенный угол, и происходит разложение света в спектр. В результате мы наблюдаем дифракцию света на решетке.

Явление дифракции накладывает границы на применимость законов геометрической оптики и определяет предел разрешающей способности оптических приборов.

ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Общие сведения о световых волнах

Электромагнитная волна – это электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью. (М. Фарадей 1832 г. и Дж. Максвелл 1865 г.)



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

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

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

В электромагнитной волне колебания векторов напряженности переменного электрического поля и напряженности переменного магнитного поля взаимно перпендикулярны и лежат в плоскости, перпендикулярной вектору скорости распространения волны.

ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Общие сведения о световых волнах

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

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

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

В вакууме $\epsilon = \mu = 1$, скорость электромагнитной волны максимальна и равна $2,99792458 \cdot 10^8$ м/с

$$\vec{E} = \epsilon \cdot \vec{D}$$

Уравнения Максвелла – основные уравнения электродинамики

$$\vec{H} = \mu \cdot \vec{B}$$

где ϵ и μ - диэлектрическая и магнитная проницаемости;
 E и H – векторы напряженности электрического и магнитного поля;
 D и B – векторы индукции электрического и магнитного полей.

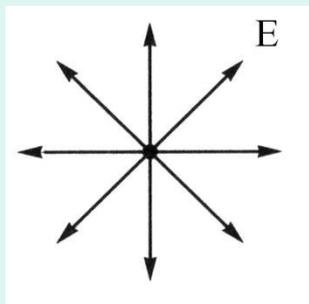
ОСНОВЫ ВОЛНОВОЙ ОПТИКИ

Поляризация. Естественный и поляризованный свет.

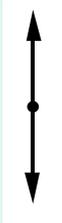
Поляризация света – это совокупность явлений волновой оптики, в которых проявляется поперечность электромагнитных световых волн.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется *поляризованным светом*.

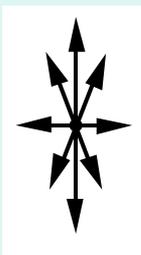
Свет со всевозможными равновероятными направлениями колебаний вектора E называется естественным светом.



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.

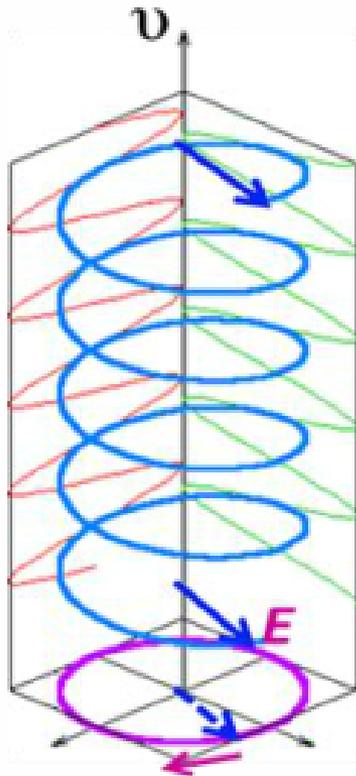


Плоскополяризованный (линейно-поляризованный) свет – это свет, в котором вектор E колеблется только в одном направлении .



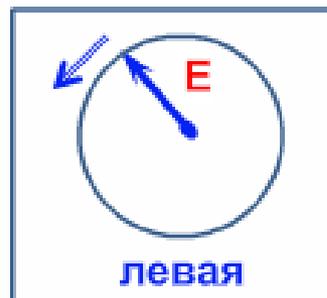
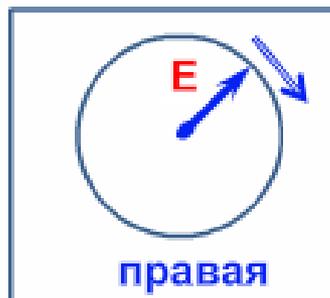
Частично поляризованный свет – это свет с преимущественным (но не исключительным!) направлением колебаний вектора E .

Круговая (циркулярная) поляризация



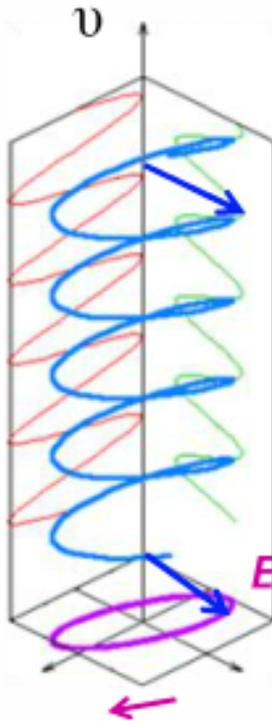
- За один период волны вектор E делает **полный оборот вокруг** направления распространения волны, при этом его длина остается постоянной; а **проекция вектора E описывает окружность** в плоскости наблюдения

- Если вектор E вращается **по часовой стрелке** (волна должна распространяться **к наблюдателю**), то поляризация называется **правой** круговой, а если **против часовой** – то **левой** круговой.

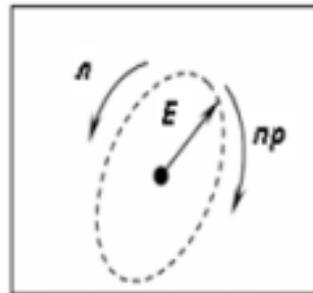


Эллиптически поляризованный свет – это свет, для которого **вектор E** **изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс**.

Эллиптическая поляризация:

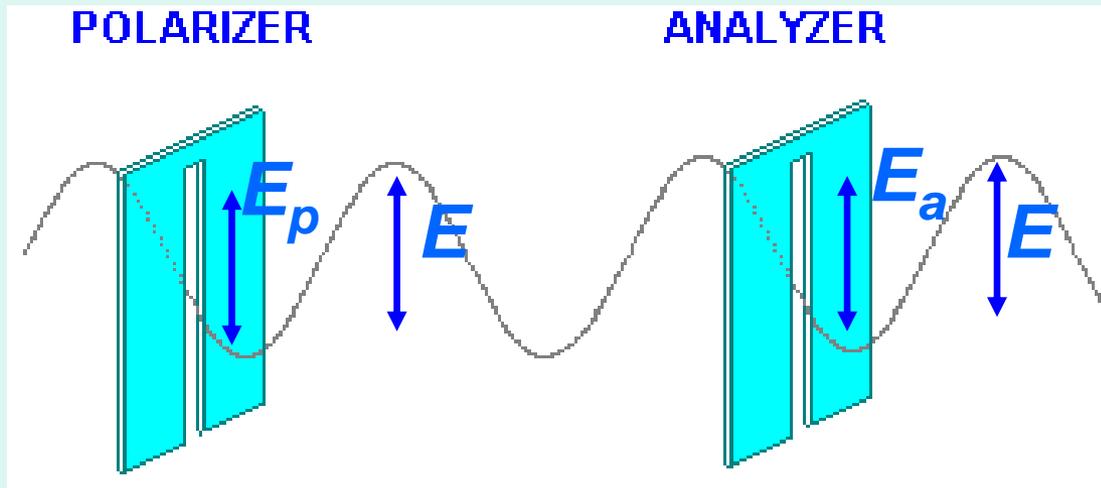


- Вектор E за один период волны **описывает эллипс** в плоскости наблюдения.
- Если для наблюдателя вектор E **вращается по часовой стрелке**, то поляризация называется **правой**, а если **против – левой** эллиптической.



– эллиптическая поляризация

1. Главные плоскости P и A параллельны друг другу



$$\varphi = 0$$

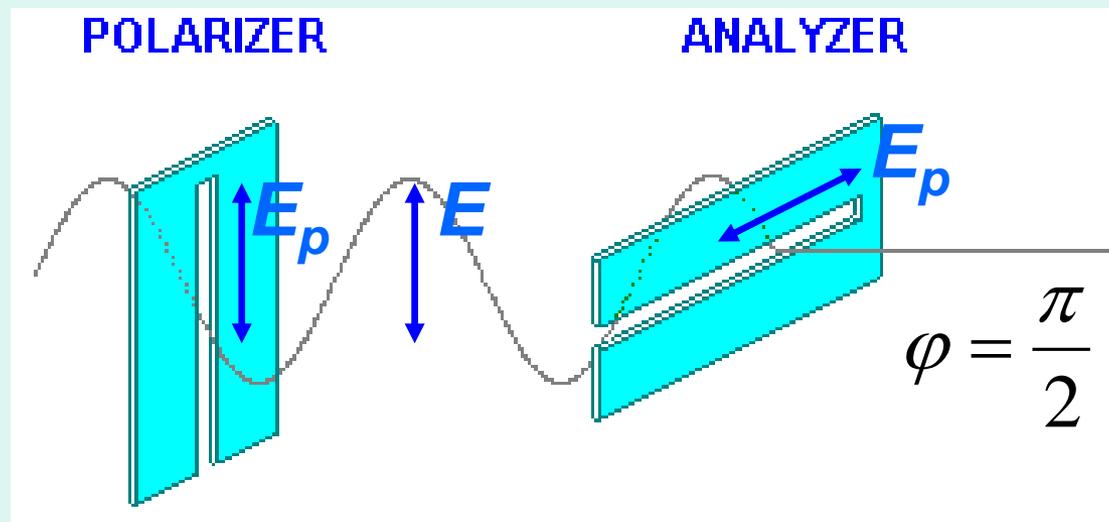
Если на поляризатор падает естественный свет, то после прохождения поляризатора он становится *линейно поляризованным*. При этом интенсивность волны :

$$I_{\text{полн}} = \frac{1}{2} I_0.$$

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

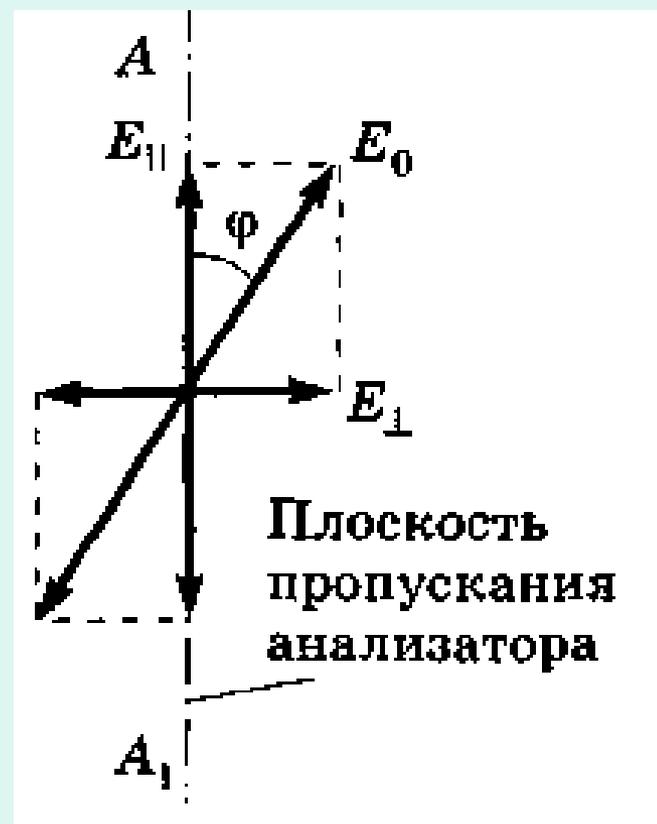
Если плоскости поляризатора и анализатора параллельны, то свет проходит через поляризатор полностью и *на выходе интенсивность света максимальна*.

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



$$\cos \varphi = \frac{E_{\text{вых}}}{E_0}$$

$$E_{\text{вых}} = E_0 \cos \varphi$$



$$E_{\text{вых}}^2 = E_0^2 \cos^2 \varphi$$

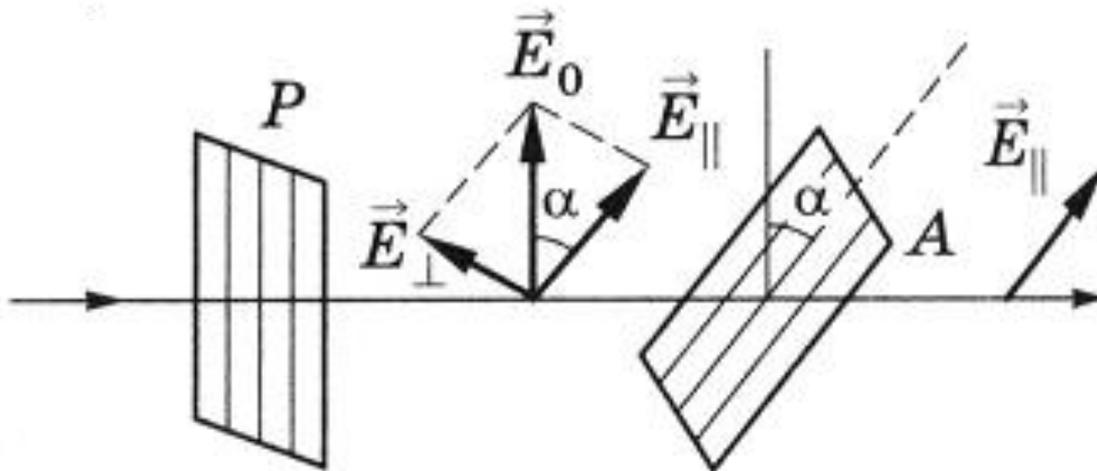
Закон Малюса

Интенсивность плоскополяризованного света, прошедшего через анализатор

$$I = I_0 \cos^2 \varphi$$

где I_0 – интенсивность плоско поляризованного света, падающего на анализатор; I – интенсивность света, вышедшего из анализатора.

Поставим на пути естественного луча два поляризатора, плоскости которых образуют угол φ . Из первого поляризатора выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого I_0 составит половину интенсивности естественного света $I_{ест}$.



Поляризация при отражении и преломлении

Закон Брюстера

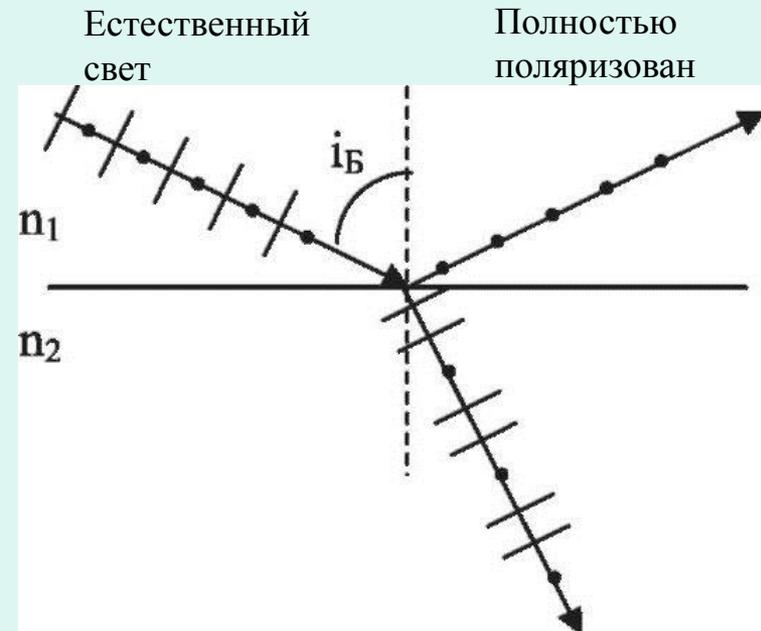
При угле падения естественного света на границу прозрачных изотропных диэлектриков, равном **углу Брюстера**, определяемому соотношением:

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

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**.

Легко убедиться в том, что при падении света под углом Брюстера отраженный и преломленный лучи **взаимно перпендикулярны**.

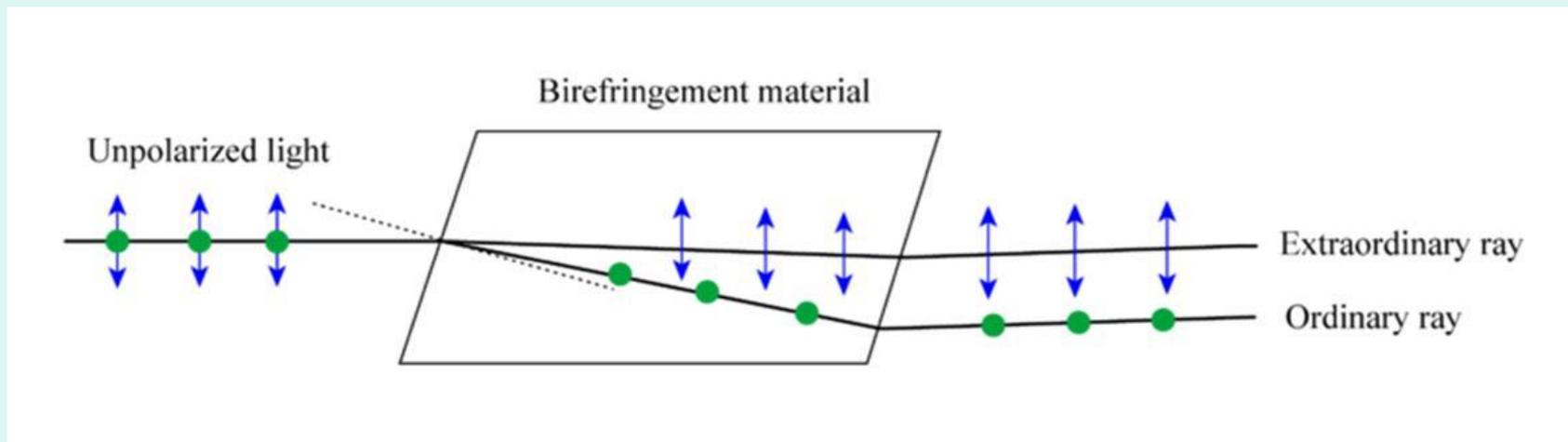


Точками и черточками на отраженном и преломленном лучах этого рисунка показаны направления колебаний вектора E .

Поляризация при двойном лучепреломлении

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 равном нулю).



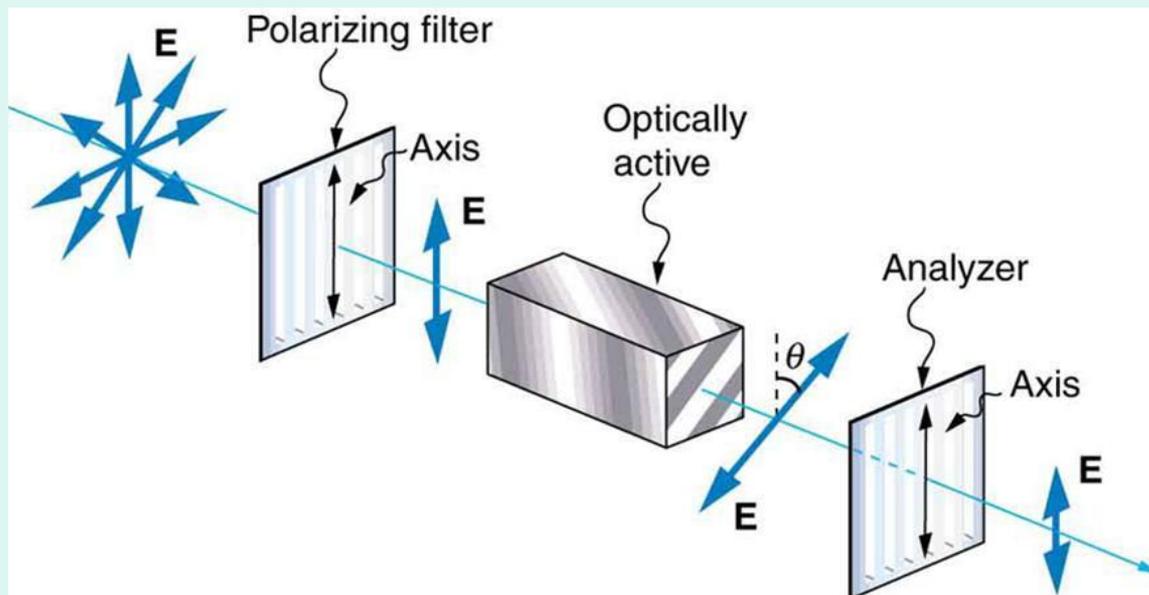
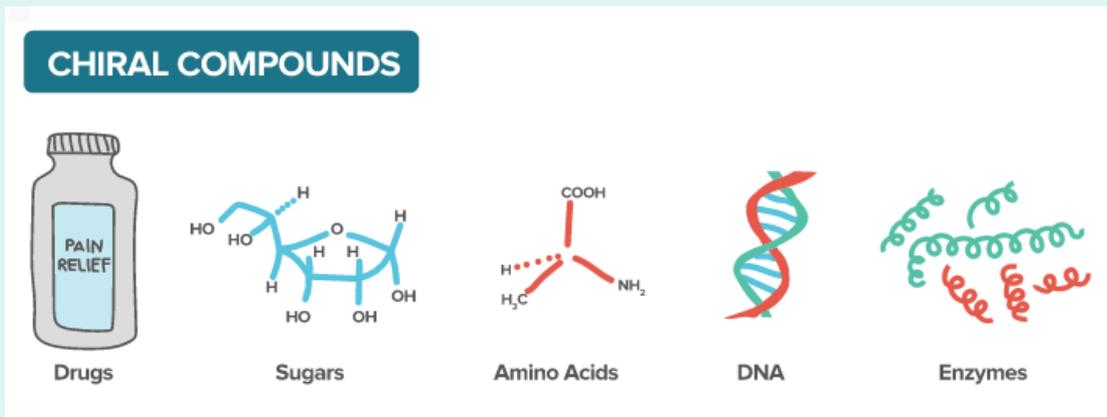
Это явление наблюдается в средах, оптические свойства которых различны в разных направлениях. Такие среды называются **анизотропными**. К анизотропным материалам, которые существуют в природе, относятся, например, исландский шпат (CaCO_3), кварц.

Оптическая активность

Оптическая активность – это способность некоторых химических веществ поворачивать плоскость поляризации линейно поляризованного света.

Такие вещества называют **оптически активными веществами**.

Молекулы данных веществ ассиметричны (хиральны).



$$\alpha = \alpha(T, \lambda)LC$$

где $\alpha(T, \lambda)$ – постоянная вращения, измеряется [град/мм] и зависит от природы вещества, длины волны λ и температуры T , L – оптическая длина света в веществе, C – концентрация.



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



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



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



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

Для количественного описания частично поляризованного света вводится специальный параметр - **степень поляризации P** , который может принимать значения от нуля до единицы:

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

$$p = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \begin{cases} 0 & \text{— естественный свет (неполяри-} \\ & \text{зованный), } I_{\max} = I_{\min}, \\ 1 & \text{— линейно поляризованный} \\ & \text{свет, } I_{\min} = 0, \\ < 1 & \text{— частично поляризованный} \\ & \text{свет,} \end{cases}$$

Поляриметрия. Спектрополяриметрия

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).