

Интерференция света

Принцип Гюйгенса

- Волновая теория света основана на **принципе Гюйгенса**: *каждая точка, до которой доходит волна, служит центром вторичных волн, а огибающая этих волн даёт положение волнового фронта в последующий момент времени*
- На основе волновой теории удалось правильно объяснить законы отражения и преломления света

Интерференция

- При соблюдении некоторых условий наблюдается отклонение от закона независимости световых пучков. Действие, производимое несколькими световыми лучами отличается от суммы воздействий всех лучей. Такое явление называется **интерференцией**
- При интерференции происходит увеличение средней интенсивности света в одних областях и уменьшение в других

Интерференция света (от лат. *inter* – взаимно, между собой и *ferio* – ударяю, поражаю) – **пространственное перераспределение энергии света при наложении двух или нескольких световых волн.**

Интерференция волн – одно из основных свойств волн любой природы (упругих, электромагнитных, в т.ч. световых и др.). Такие характерные волновые явления, как излучение, распространение и дифракция, тоже связаны с интерференцией.

Интерференцией света объясняются окраска тонких масляных пленок на поверхности воды, металлический отлив в окраске крыльев насекомых и птиц, появление цветов побежалости на поверхности металлов, голубоватый цвет просветленных линз оптических приборов и пр.

Некоторые явления интерференции света исследовались еще И. Ньютоном в XVII в., но не могли быть им объяснены с точки зрения его корпускулярной теории. Правильное объяснение интерференции света как типично волнового явления было дано в начале XIX в. Т. Юнгом и О. Френелем.

Когерентность и монохроматичность

- Необходимыми условиями возникновения интерференции являются монохроматичность и когерентность световых потоков
- **Монохроматичность** световых волн означает неизменность во времени их длин и частот колебаний
- Любой световой поток можно представить как суперпозицию монохроматичных волн

Когерентность и монохроматичность

- Интерферировать между собой могут только монохроматические составляющие нескольких световых потоков. При этом суммарная интерференционная картина является наложением всех монохроматических интерференционных картин

Когерентность и монохроматичность

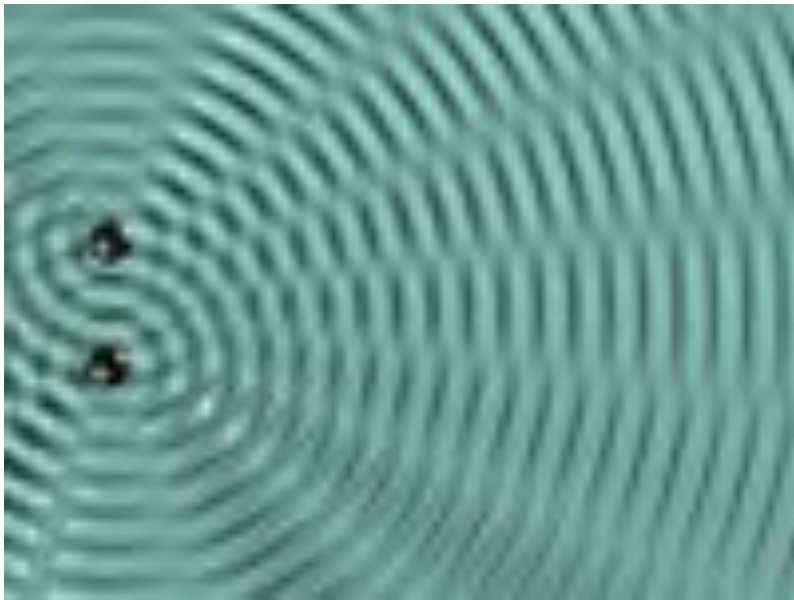
- Строго монохроматическое излучение получить невозможно
- При излучении света одной длины волны источником, происходит случайное изменение фазы колебаний, это приводит к случайным быстрым изменениям интерференционной картины. Инерционный фоточувствительный прибор при этом не успевает зарегистрировать её

Когерентность и монохроматичность

- Стабильную интерференционную картину можно получить используя когерентные источники
- **Когерентность** источников излучения означает, что колебательные процессы протекают в них согласованно во времени

Когерентность и монохроматичность

- Когерентное излучение можно получить двумя способами
 1. От нескольких независимых источников света высокой степени монохроматичности (лазеров)
 2. Выделяя лучи от одного и того же источника
- Второй способ получил наибольшее распространение



***Волновые
свойства света***
наиболее отчетливо
обнаруживают себя в
интерференции и
дифракции.

Пусть две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

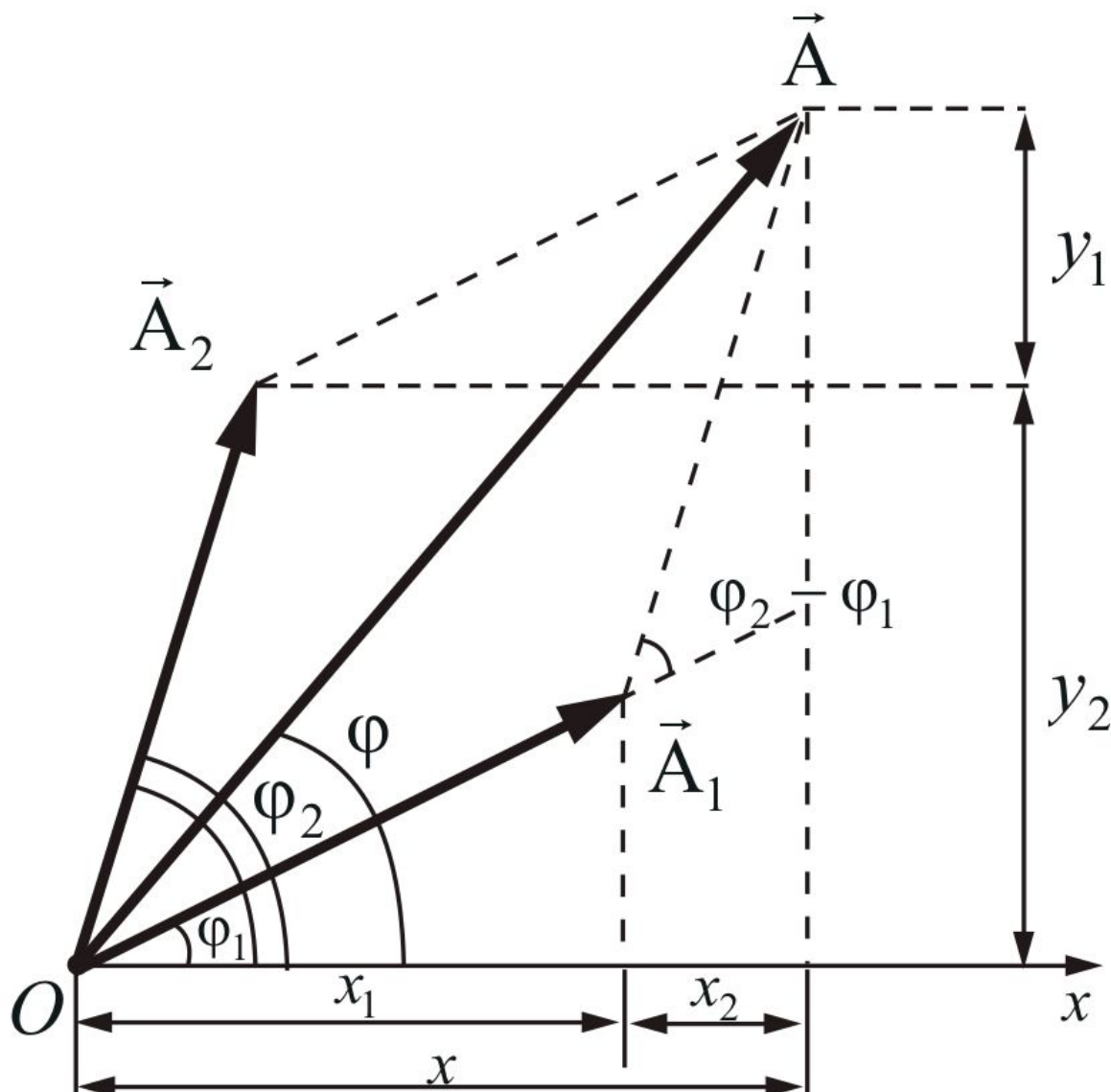
$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad - \text{ амплитуда}$$

результатирующего
колебания



$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Если разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ колебаний возбужденных волнами в некоторой точке пространства остается постоянной во времени, то такие волны называются когерентными.

В случае некогерентных волн разность фаз $\varphi_2 - \varphi_1$ непрерывно изменяется.

Интенсивность световой волны J равна квадрату амплитуды A . Тогда суммарная интенсивность:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_2 - \phi_1)$$

Последнее слагаемое в этом выражении

$2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_2 - \phi_1)$ -интерференционный член.

В случае когерентных волн $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \text{const}$

$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$ $I > I_1 + I_2$; **в максимуме**,

$$I = 4I_1$$

где $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$, интенсивность

$I < I_1 + I_2$; **в минимуме** $I = 0$

Для некогерентных источников интенсивность результирующей волны всюду одинакова и, равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:

$$I = I_1 + I_2 = 2I_1$$

Некогерентность естественных источников света обусловлена тем, что излучение тела складывается из волн, хаотически испускаемых многими атомами.

Фазы каждого *цуга волны, испускаемого отдельным атомом* никак не связаны друг с другом. **Атомы излучают хаотически.**

*Периодическая последовательность горбов и впадин волны и образующиеся в процессе акта излучения одного атома, называется **цугом волн** или **волновым цугом**.*

Процесс излучения одного цуга атома длится 10^{-8} с.

Длина цуга $l = ct = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-8} = 3$ м

В одном цуге укладывается примерно 10^7
длин волн.

Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн:

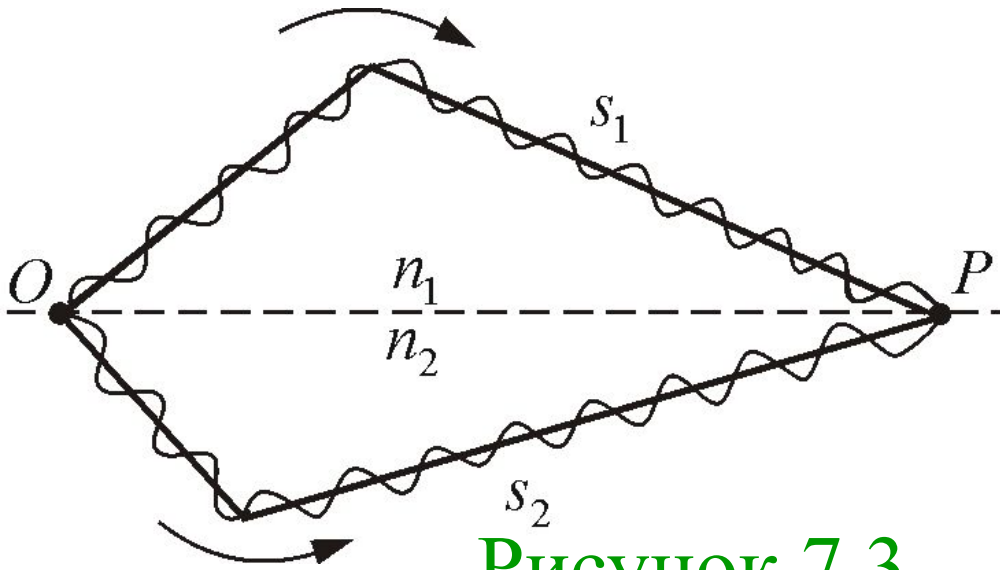


Рисунок 7.3

Первая волна

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left(t - \frac{s_1}{v_1} \right)$$

вторая

$$x_2 = A_2 \cos \omega \left(t - \frac{s_2}{v_2} \right)$$

Разность фаз двух когерентных волн - $\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$

Оптическая разность хода -

$$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$$

L – оптическая длина пути; s – геометрическая длина пути; n – показатель преломления среды.

Условие максимума и минимума интерференции:

• *Если оптическая разность хода равна целому числу длин волн*

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

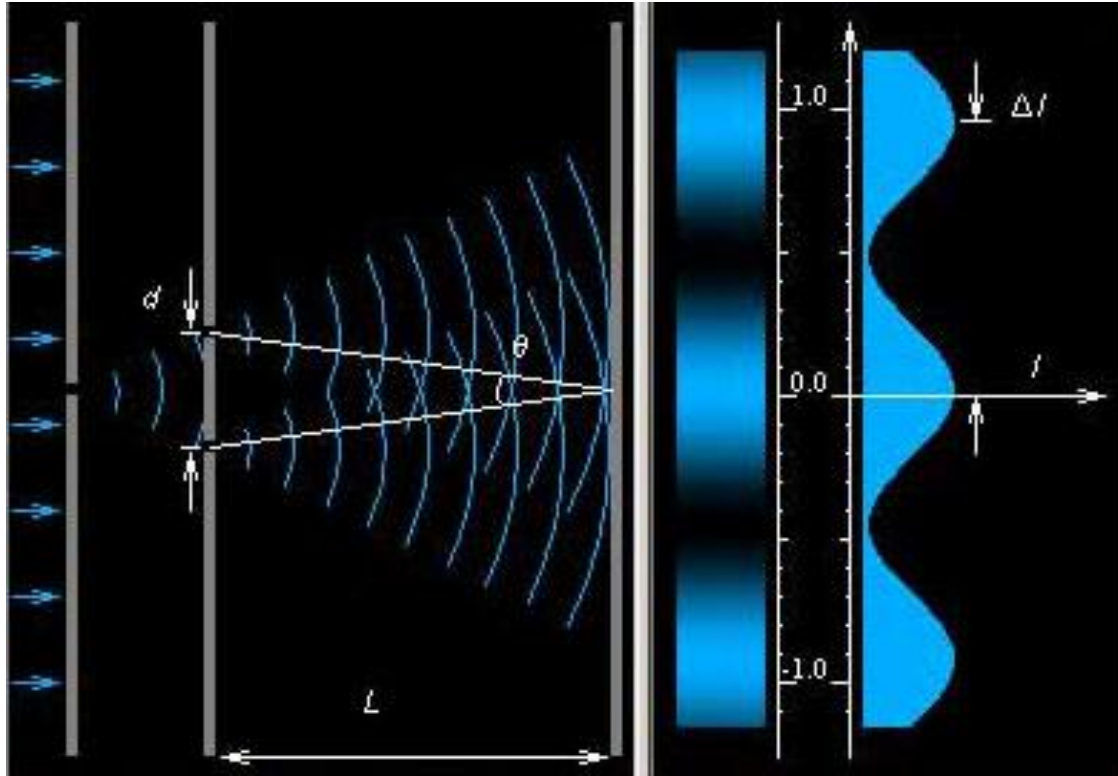
- условие интерференционного максимума.

• *Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн*

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

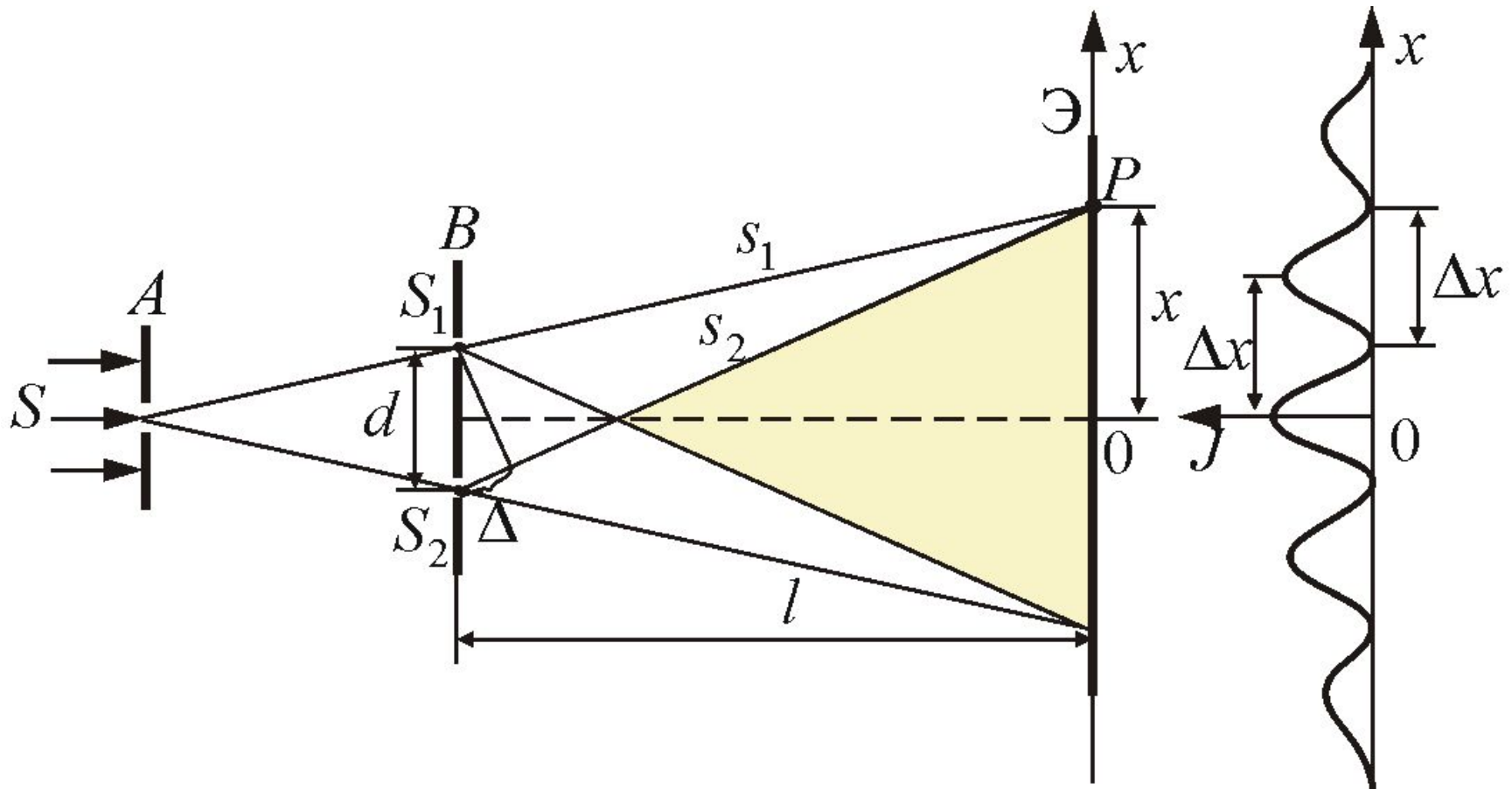
- условие интерференционного минимума.

Классический интерференционный опыт Юнга



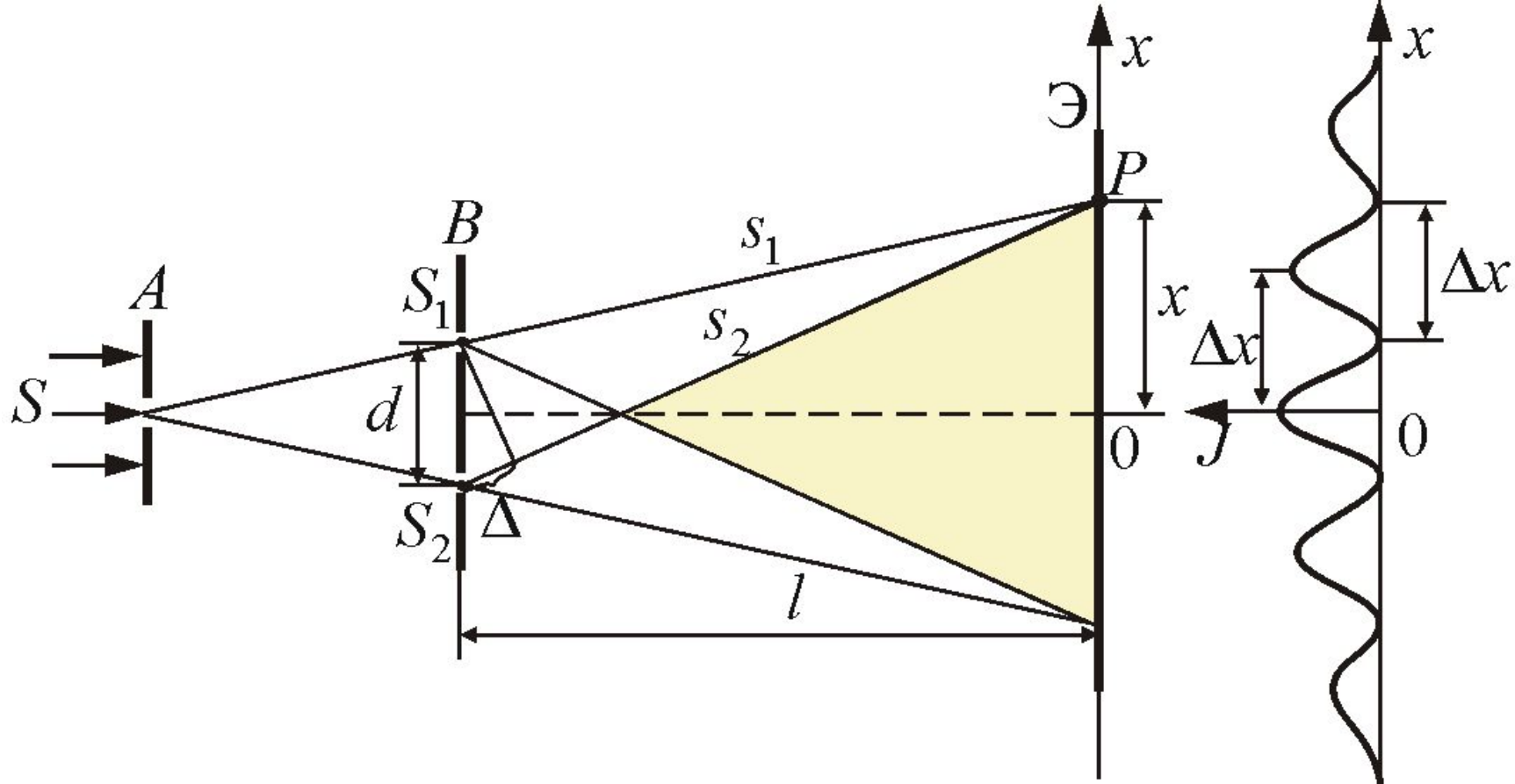
Параллельный пучок света падает на экран с небольшим отверстием. Пройдя через отверстие, свет доходит до второго экрана, в котором проделаны две щели. Когерентные пучки, излучаемые каждой из щелей, интерferируют на третьем экране.

Опыт Юнга



Расстояние l от щелей, причем $l \gg d$

Показатель преломления среды – n .



Главный максимум, соответствующий $m = 0$ проходит через точку O . Вверх и вниз от него располагаются максимумы (минимумы) первого ($m = 1$), второго ($m = 2$) порядков, и т. д.

Максимумы интенсивности будут

наблюдаться **в координатах:**

$$x_{\max} = \pm \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots),$$

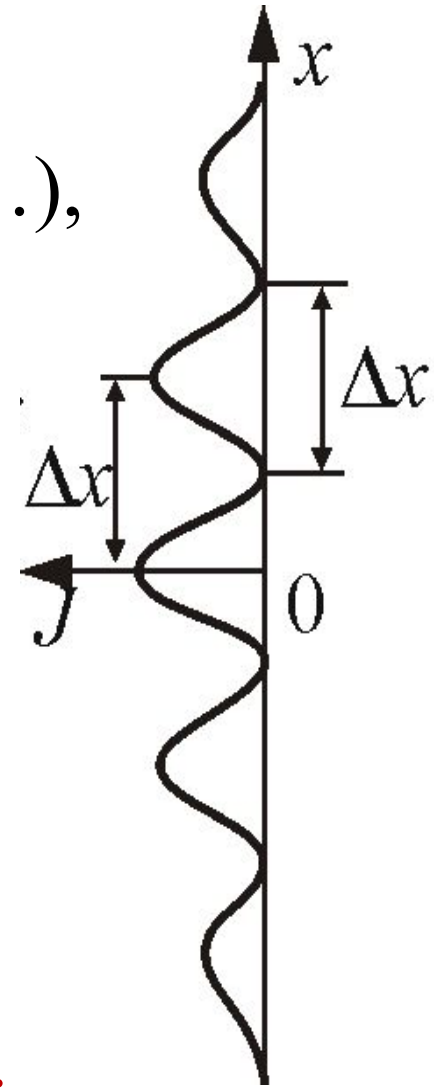
а **минимумы – в координатах:**

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda_0$$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0$$

- ширина интерференционной полосы.



Измерив Δx , зная l и d , можно вычислить длину волны λ . Именно так вычисляют длины волн разных цветов в спектроскопии.

Световые волны одинаковой длины волны, которые приходят в данную точку с постоянной (не изменяющейся со временем) разностью фаз, называются **когерентными**. Когерентные волны дают неизменную со временем интерференционную картину (распределение интенсивности света в пространстве или на экране).

Область пространства, в которой амплитуда результирующей волны усиливается, называется областью **конструктивной** интерференции, а в которой ослабляется – **деструктивной**.

Когерентность и монохроматичность

Необходимым условием интерференции волн является их *когерентность*, т.е. согласованное протекание *во времени и пространстве* нескольких колебательных или волновых процессов.

Этому условию удовлетворяют *монохроматические волны* – *волны одной определенной и строго постоянной частоты*.

Волну можно приближенно считать *монохроматической* только в течение времени

$$\Delta t \ll \tau_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega}$$

где $\tau_{\text{ког}}$ – *время когерентности*

За промежуток времени $\tau_{\text{ког}}$ разность фаз колебаний изменится на π .

Время когерентности – время, по истечению которого разность фаз волны в некоторой, но одной и той же точке пространства, изменяется на π .

Когерентность колебаний которые совершаются в одной и той же точке пространства, определяемая степенью монохроматичности волн, называется временной когерентностью.

Пространственная когерентность

Два источника, размеры и взаимное расположение которых позволяют наблюдать интерференцию, называются пространственно-когерентными.

Радиусом когерентности (или длиной пространственной когерентности) называется максимальное, поперечное направлению распространения волны расстояние, на котором возможно проявление интерференции.

$$\rho_k = \frac{\lambda}{\theta}$$

ρ_k – радиус пространственной когерентности;
 λ – длина волны;
 θ – угловой размер источника.

Условия пространственной когерентности двух волн

1) постоянная во времени разность фаз:

$$\omega_1 t + \varphi_{01} - \omega_2 t - \varphi_{02} = \text{const},$$

откуда следует

$$(\omega_1 - \omega_2)t + \varphi_{01} - \varphi_{02} = \text{const}.$$

Это справедливо лишь при

$$\omega_1 = \omega_2$$

Таким образом, условие постоянства во времени разности фаз эквивалентно условиям одинаковости для когерентных лучей циклических частот в вакууме.

2) соизмеримость амплитуд интерферирующих волн,

3) одинаковое состояние поляризации,

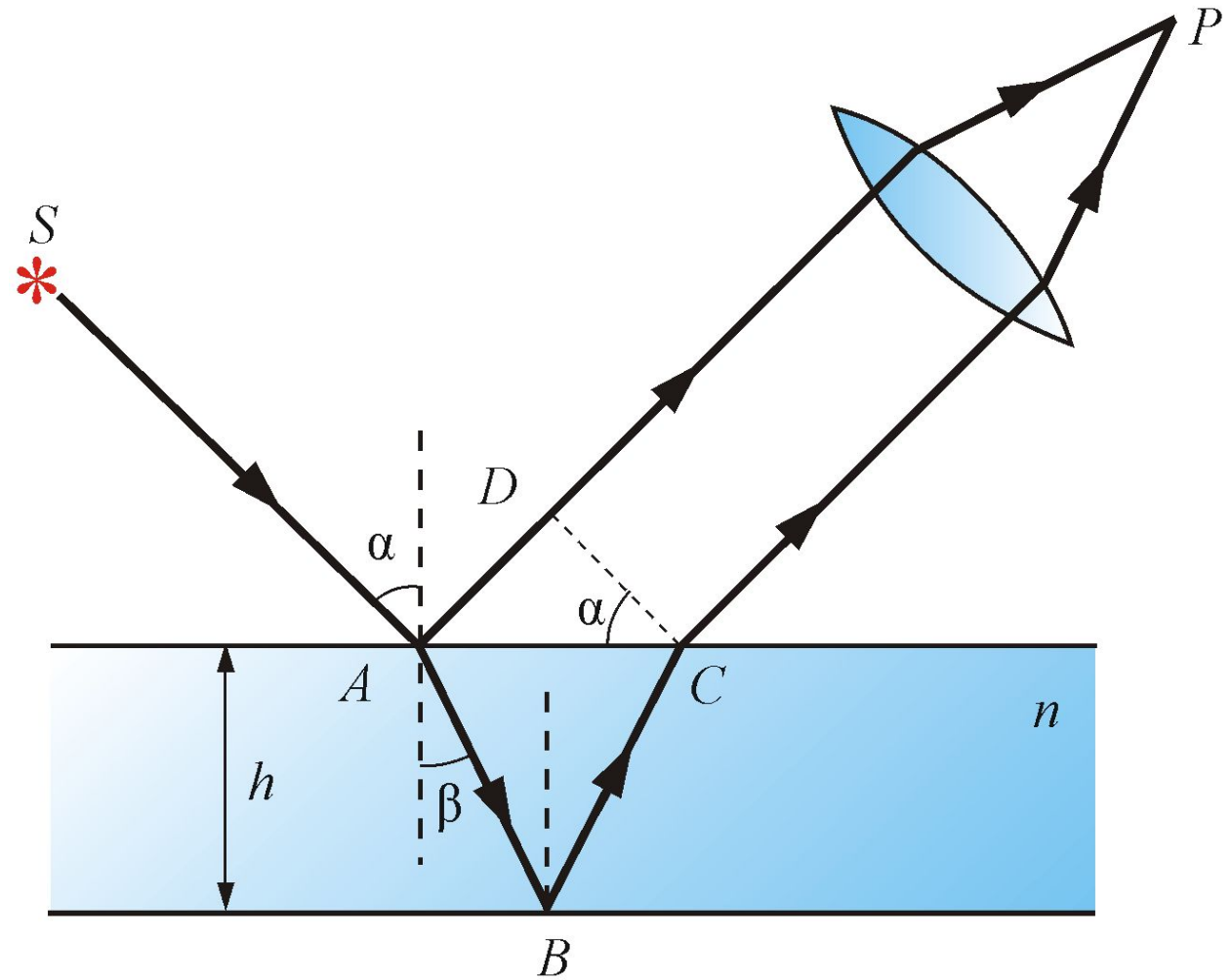
4) лучи, пройдя разные пути, встречаются в некоторой точке пространства.

Интерференция в тонких пленках

Интерференцию света по *методу деления амплитуды* во многих отношениях наблюдать проще, чем в опытах с *делением волнового фронта*.

Интерференция в тонких пленках

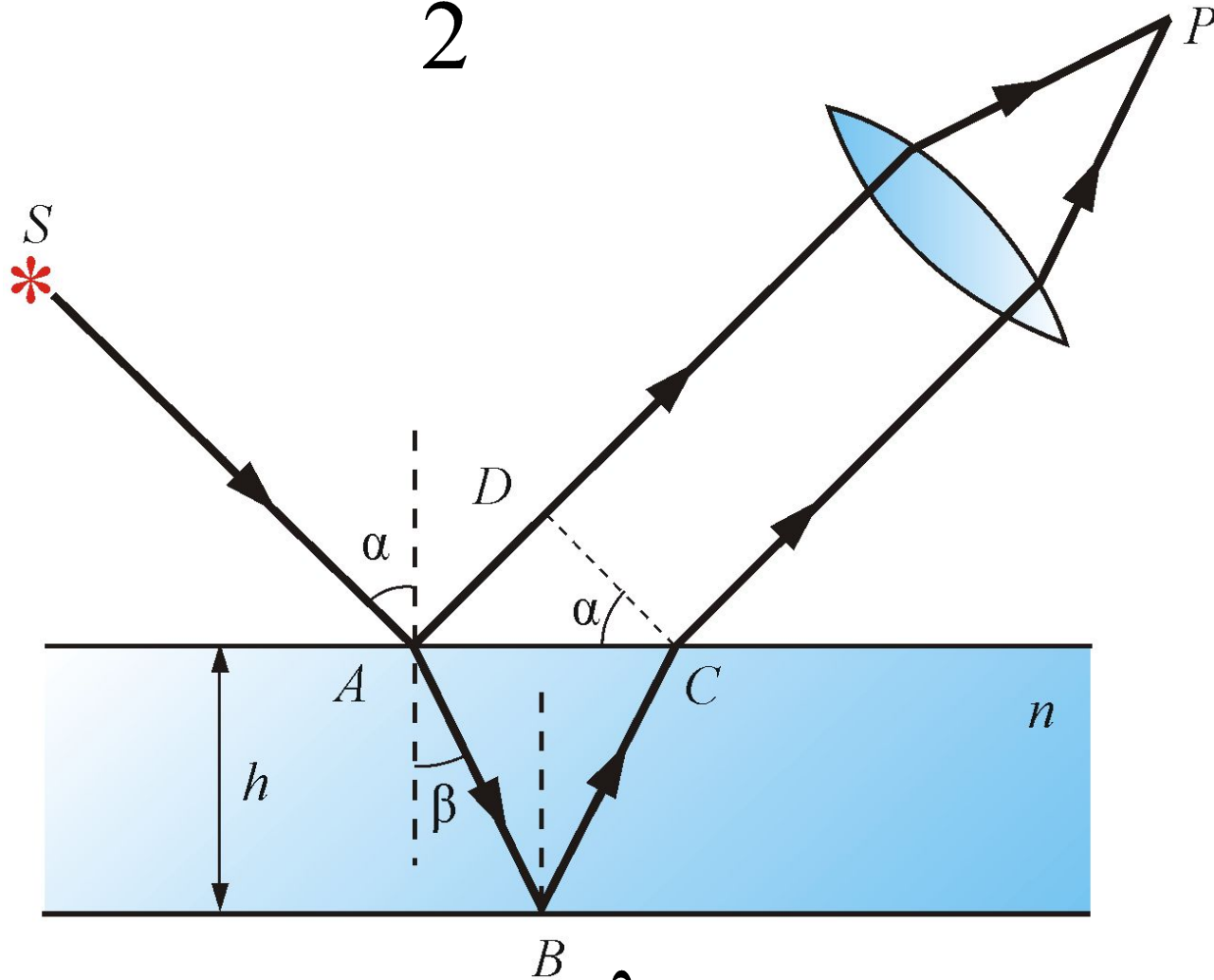
Интерференционные *полосы равного наклона*



**Оптическая
разность хода**
с учетом потери
полуволны:

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

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2} - \text{max интерференции}$$



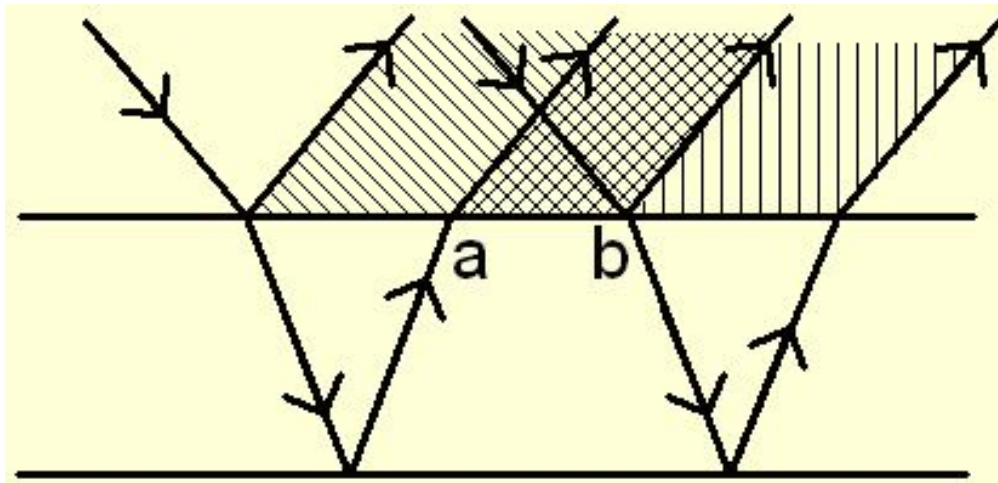
$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} - \text{min интерференции}$$

Виды интерференционных картин на тонких пленках

1. Цвета тонких пленок

– интерференция при освещении пленки широким пучком

Условия: $h = \text{const}$, пучок лучей широкий и параллельный



Проявление интерференции

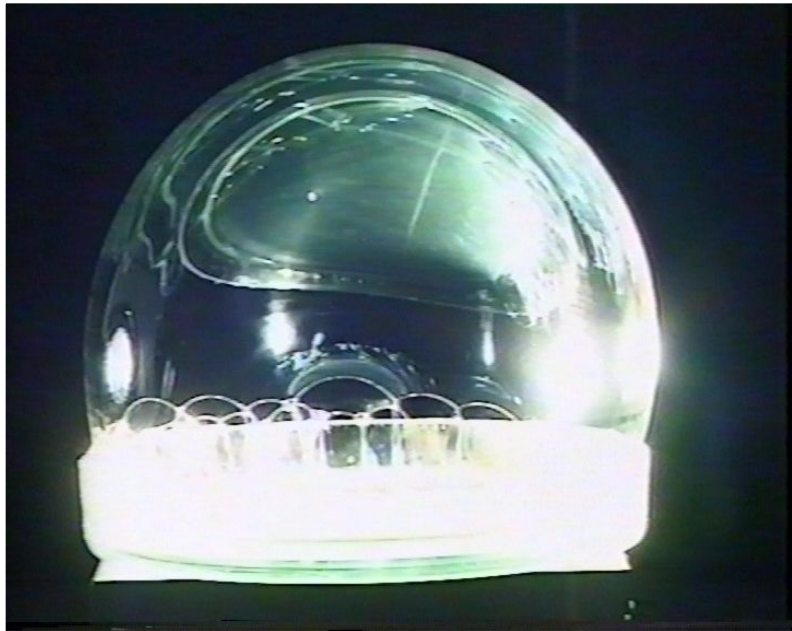
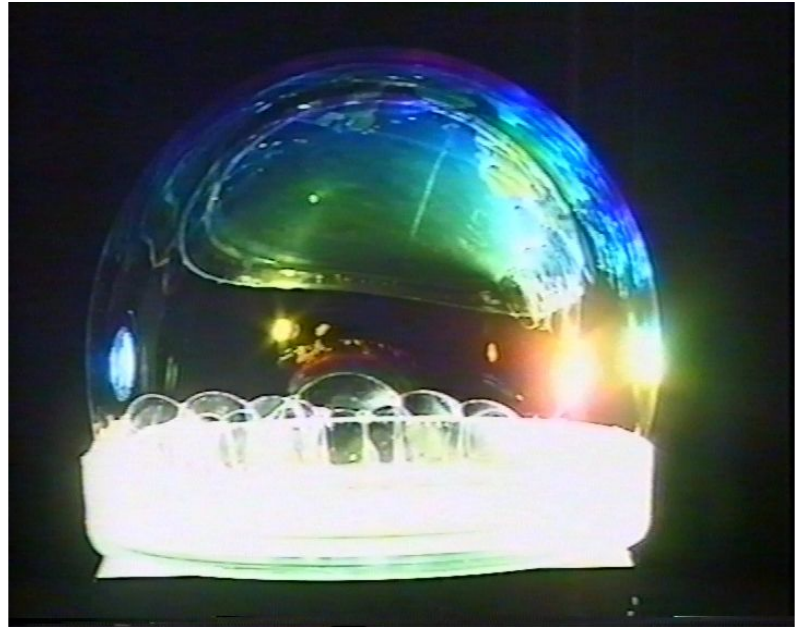
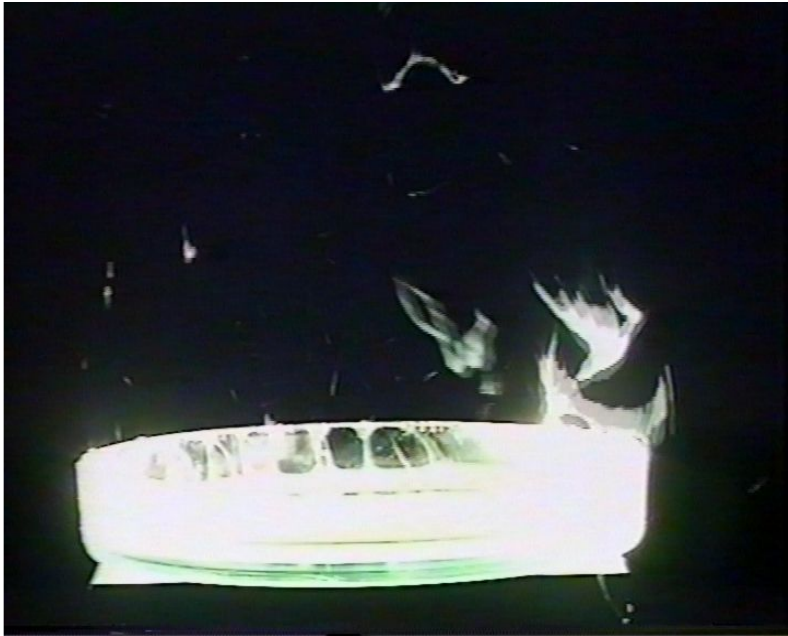
При освещении **белым светом** – окраска области **ab** в тот цвет, для λ которого выполняется условие максимума: $\Delta_{12} = m\lambda$.

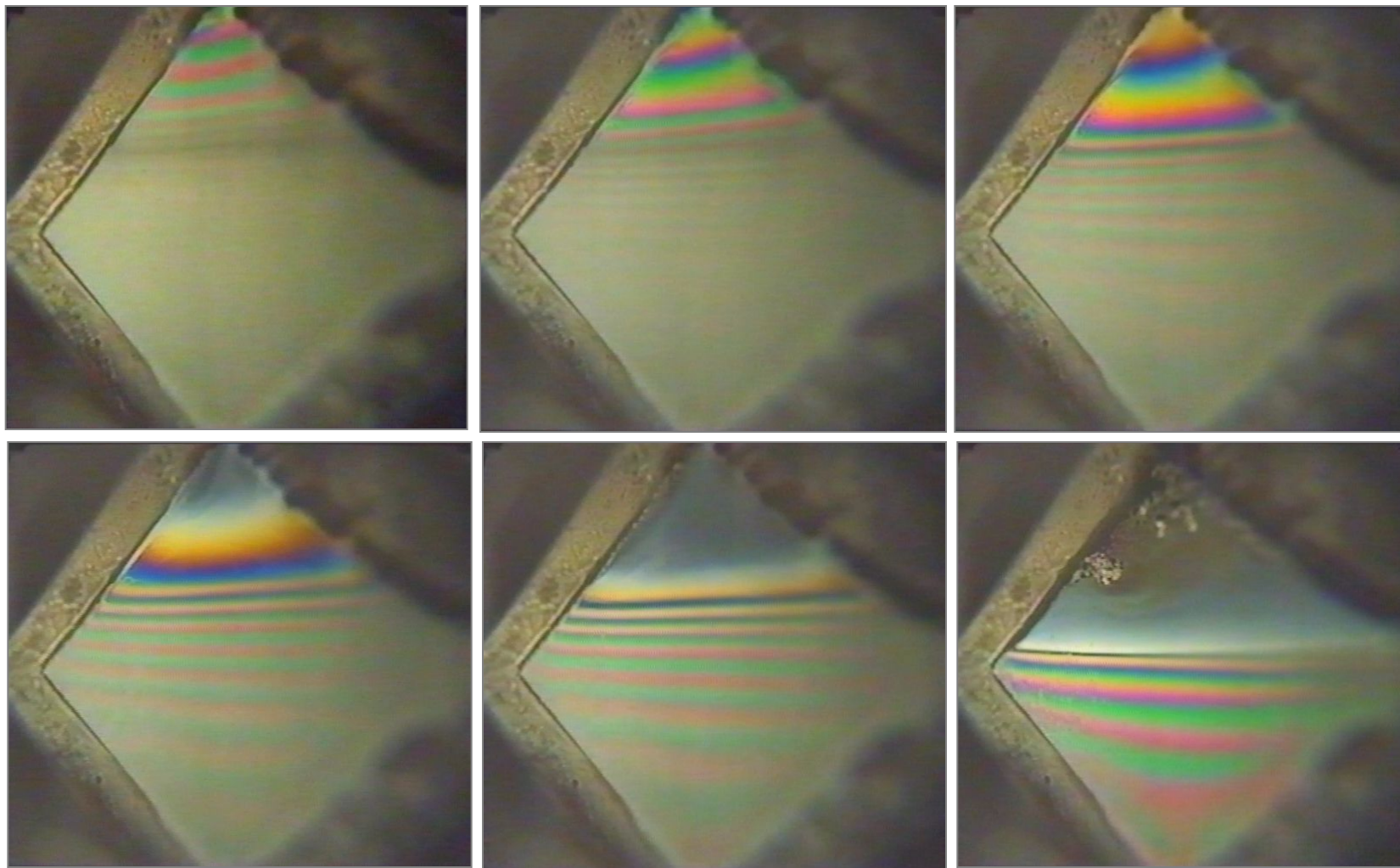
При освещении **монохроматическим светом** ($\lambda = \text{const}$) – область **ab** ярко освещена, если для λ выполняется условие максимума; область **ab** черная, если для λ выполняется условие минимума $\Delta_{12} = (m + \frac{1}{2}) \lambda$.

Интерференция от клина.

Полосы равной толщины

В белом свете интерференционные полосы, при отражении от тонких пленок - окрашены. Поэтому такое явление называют ***цвета тонких пленок.*** Его легко наблюдать на мыльных пузырях, на тонких пленках масла или бензина, плавающих на поверхности воды, на пленках окислов, возникающих на поверхности металлов при закалке, и т.п.





Изменение картины интерференции по мере уменьшения толщины мыльной пленки

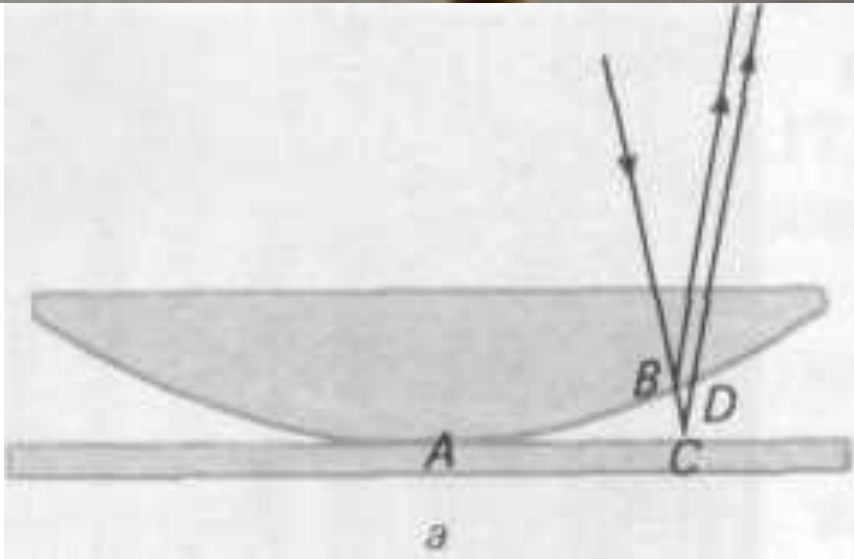
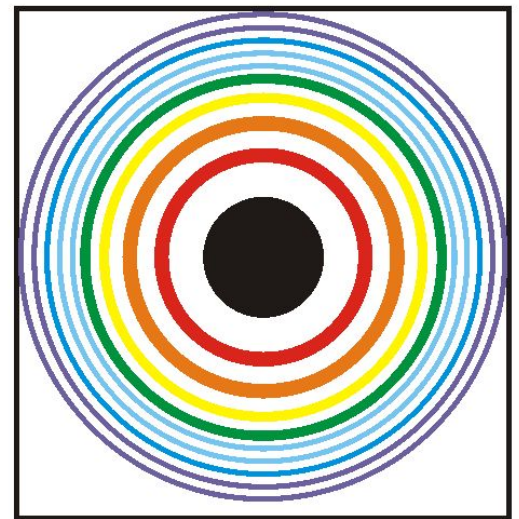
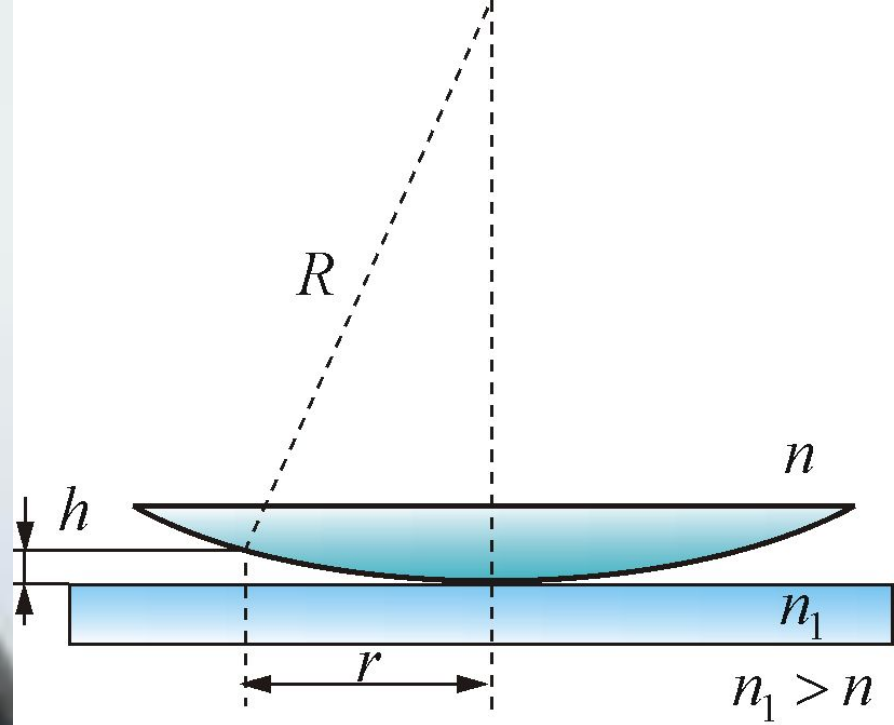


Кольца Ньютона

*Кольцевые **полосы** **равной** **толщины**, наблюдаемые в воздушном зазоре*

*между **соприкасающимися** **выпуклой** **сферической** **поверхностью** **линзы** **малой** **кривизны** **и** **плоской** **поверхностью** **стекла**, называют **кольцами Ньютона**.*

Ньютон объяснил это явление на основе корпускулярной теории света.



Кольца Ньютона

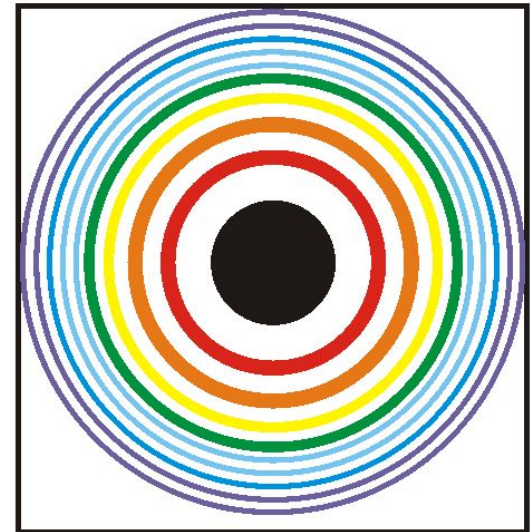
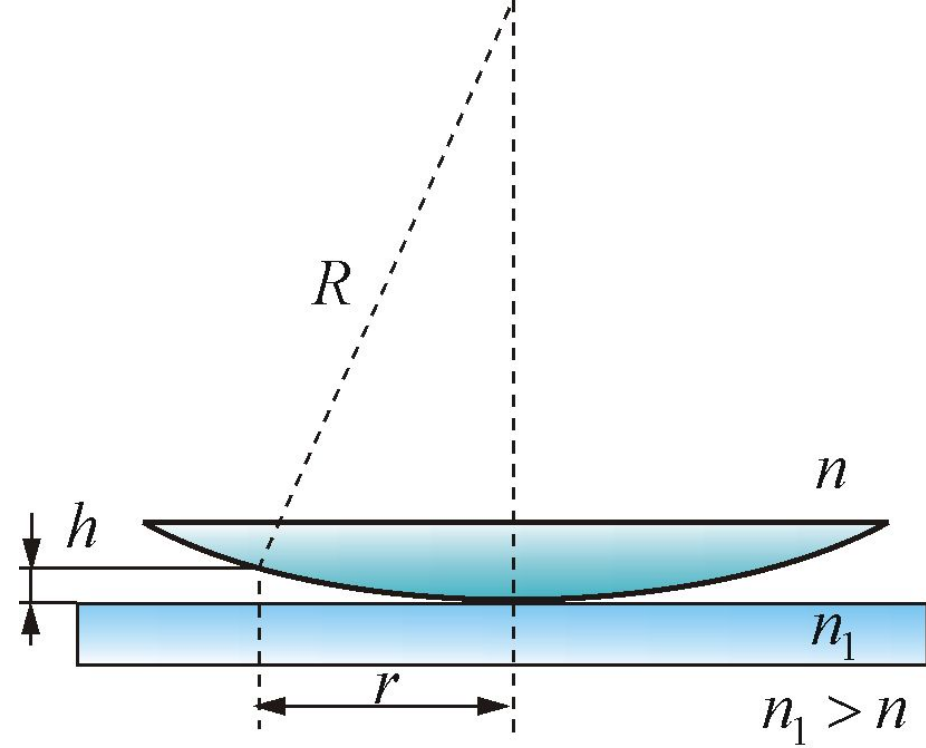
$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R}$$

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

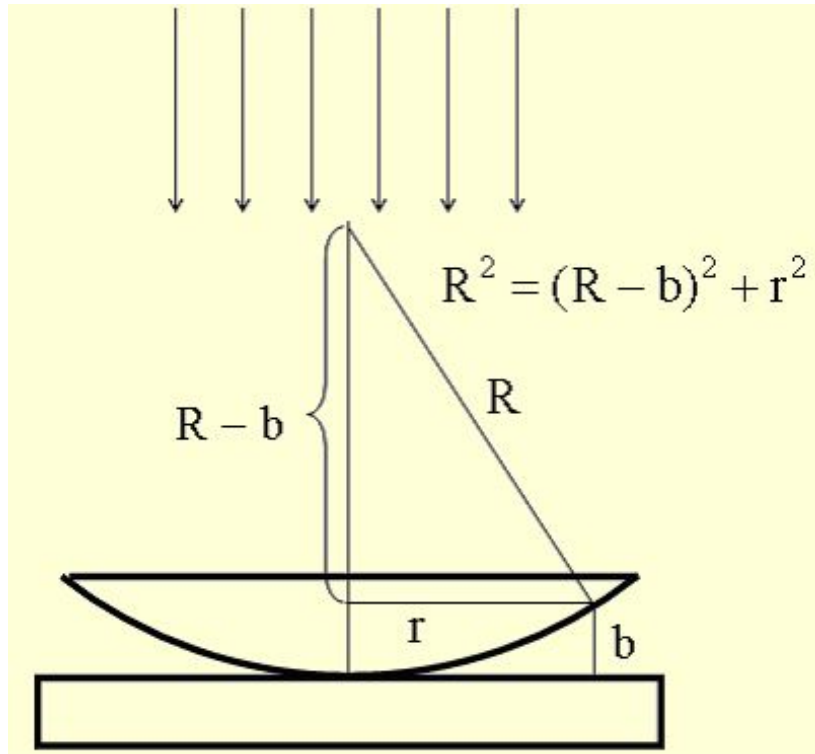
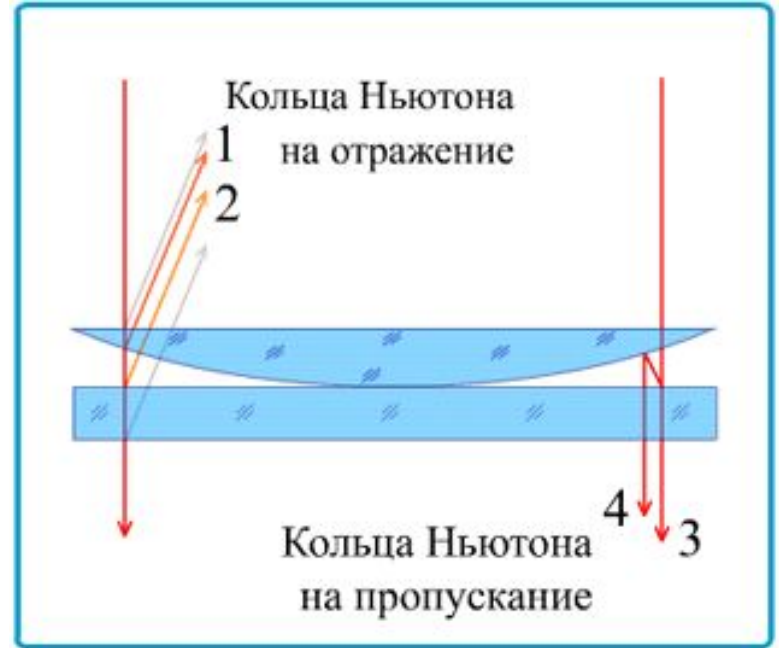
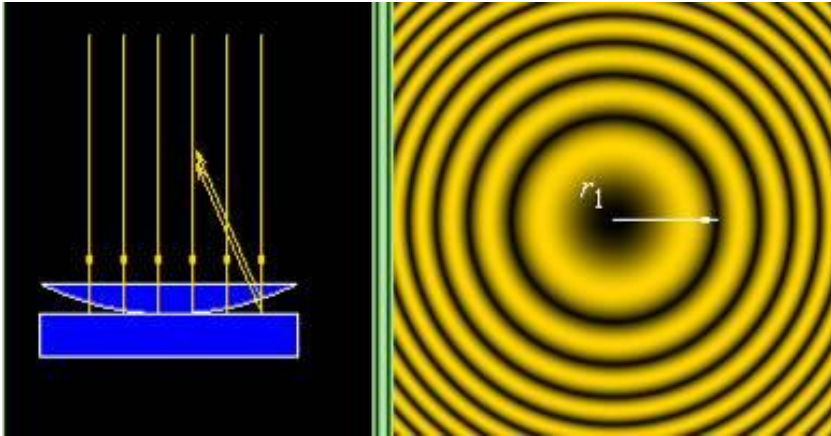
$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R}$$

**- Радиус m -го
светлого кольца**

$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0} \quad \text{- Радиус } m\text{-го темного кольца}$$



Кольца Ньютона



$$b = \frac{r^2}{2R}, \text{ т.к. } b^2 \rightarrow 0$$

$$\Delta = 2bn + \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{R} + \frac{\lambda}{2}$$

Условие максимума (светлые кольца) $\Delta = m \lambda$, где m – целое число.

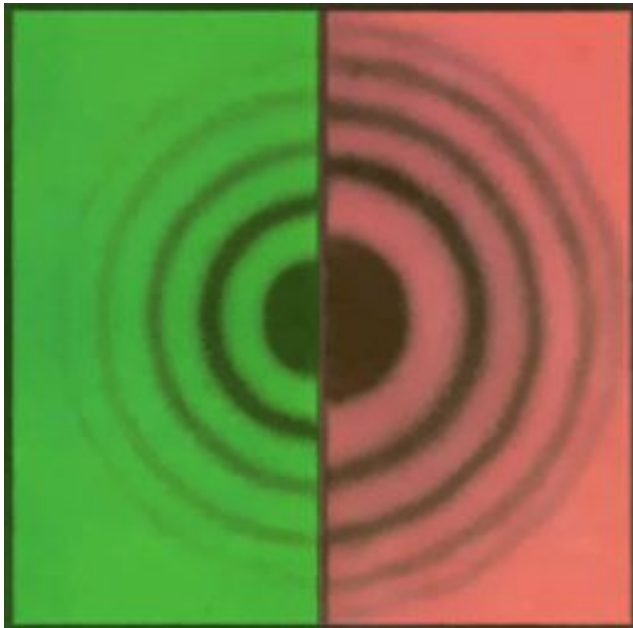
$$r_m = \sqrt{(m - 1/2)\lambda R}$$

- радиус m -го *светлого* кольца в *отраженном* свете
(и *темного* – в *прошедшем*)

Условие минимума (темные кольца) $\Delta = (m + 1/2) \lambda$.

$$r_m = \sqrt{m\lambda R}$$

- радиус m -го *темного* кольца в *отраженном* свете
(и *светлого* – в *прошедшем*)



Кольца Ньютона в зеленом и красном свете

Пример применения – проверка качества шлифовки линз.

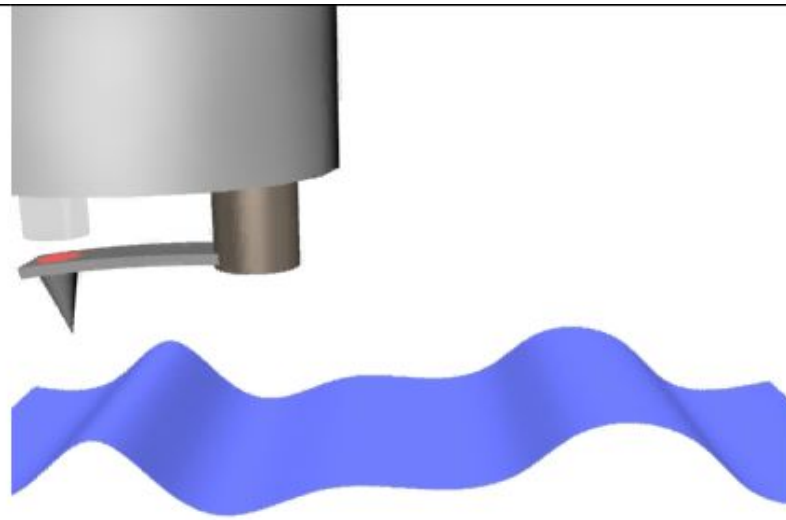
Использование интерференции

- Явление интерференции нашло широкое практическое применение
 - Создание просветлённых покрытий
 - Измерение малых расстояний и перемещений
 - Контроль поверхности
 - Измерение показателя преломления
 - Голография

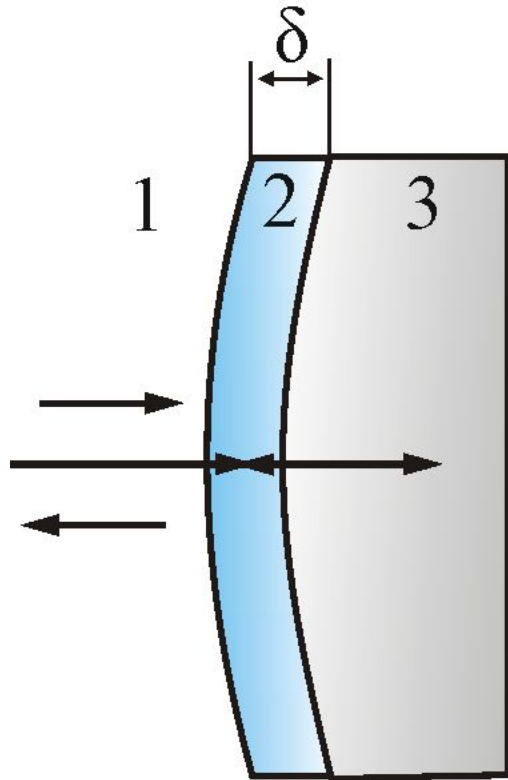
Применение интерференции света

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

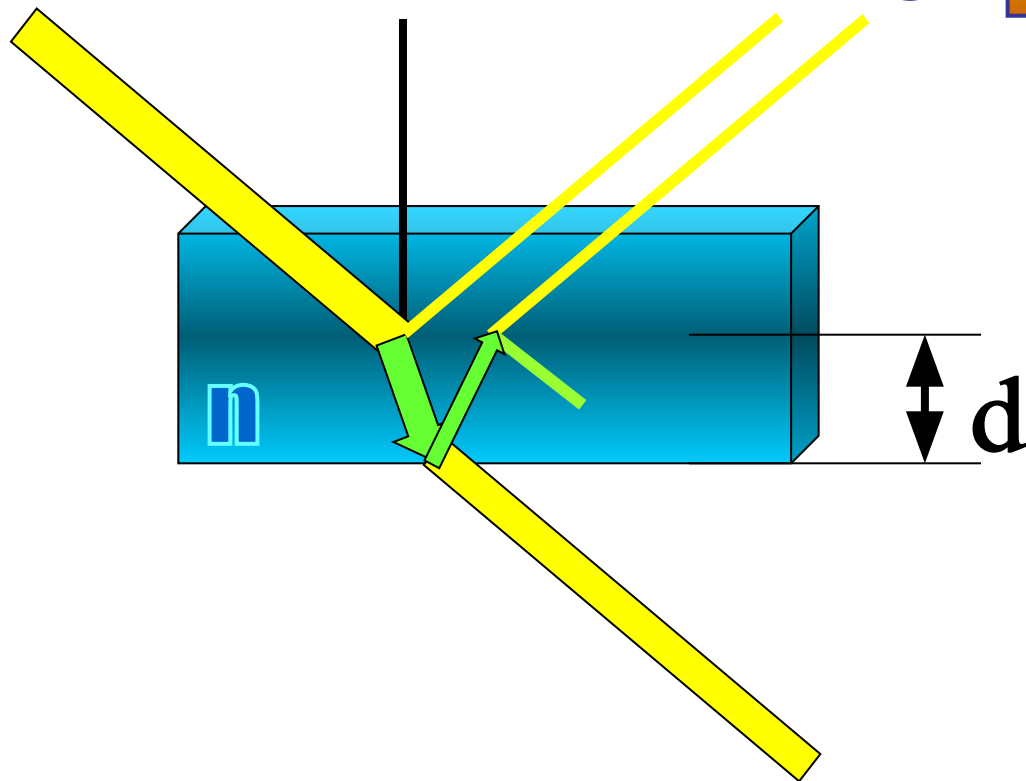
2. По интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды (в т.ч. фазовые), в которой распространяются волны, или отклонения формы поверхности от заданной.



Просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.



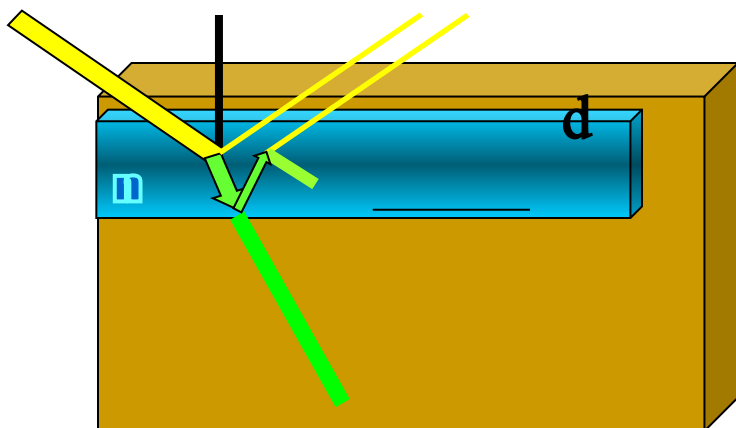
min отражения



тах пропускания!

Просветление линз и солнечных батарей

Мин интерференции



Тонкая пленка
ОКИСЛОВ

тах пропускания света в рабочий объем

Дифракция света

- приводит к огибанию световыми волнами препятствий и проникновению света в область геометрической тени.

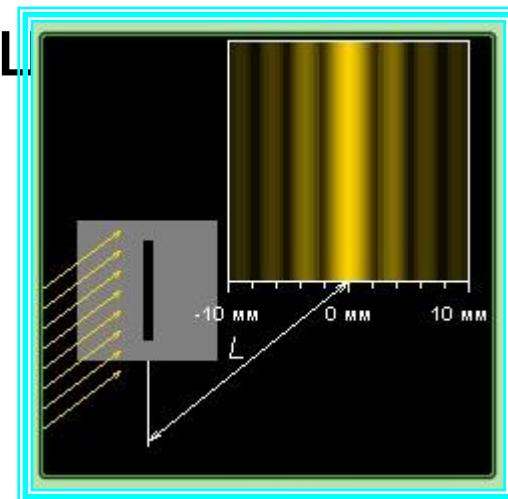
Дифракция света сопровождается интерференцией.

Интерферируют волны, обогнувшие препятствие (опыт Юнга).



- ***Дифракционная картина*** – система чередующихся светлых и темных колец, если препятствие круг или отверстие.

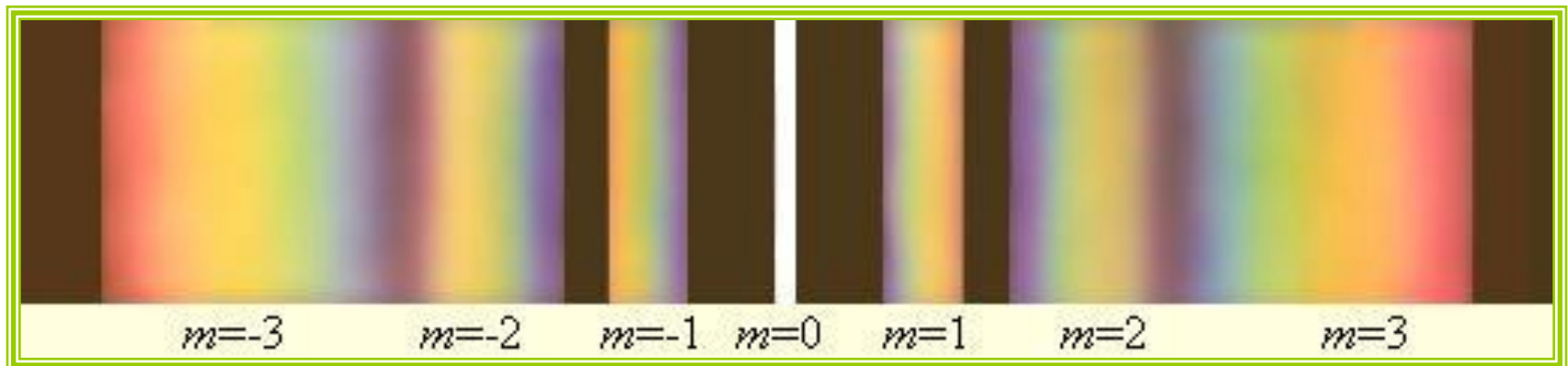
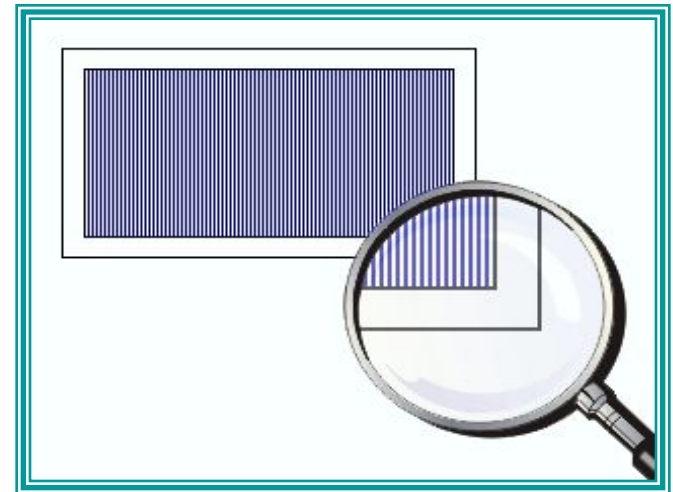
Если препятствие имеет линейный характер (щель, нить, край экрана), то на экране возникает система параллельных дифракционных полос.



Применение дифракции

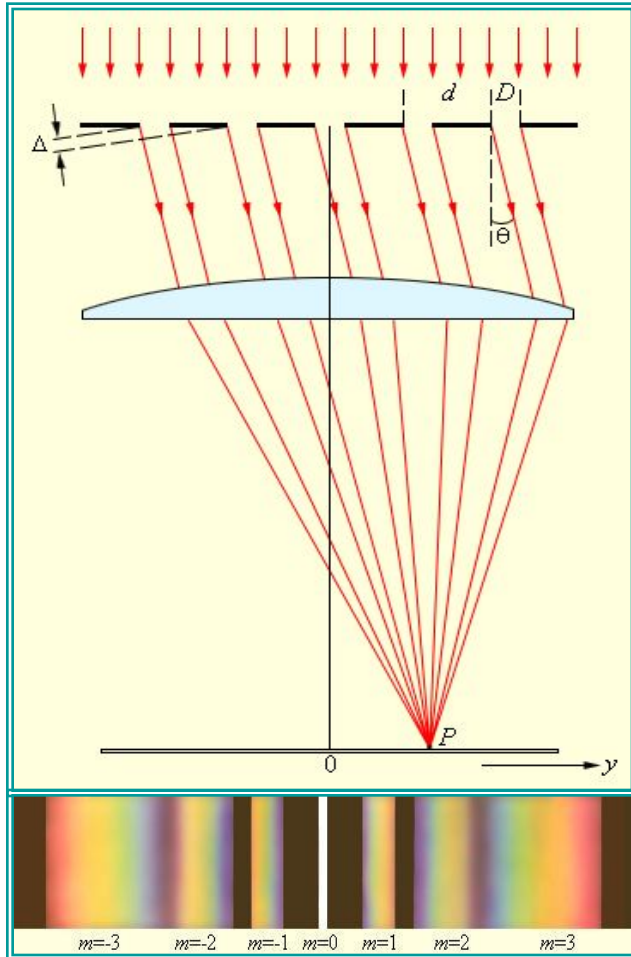
Дифракционная решетка

- оптический прибор, представляющий собой совокупность большого числа регулярно расположенных штрихов (щелей, выступов), нанесенных на некоторую поверхность (от 0,25 до 6000 штрихов на 1 мм).



Применение дифракции

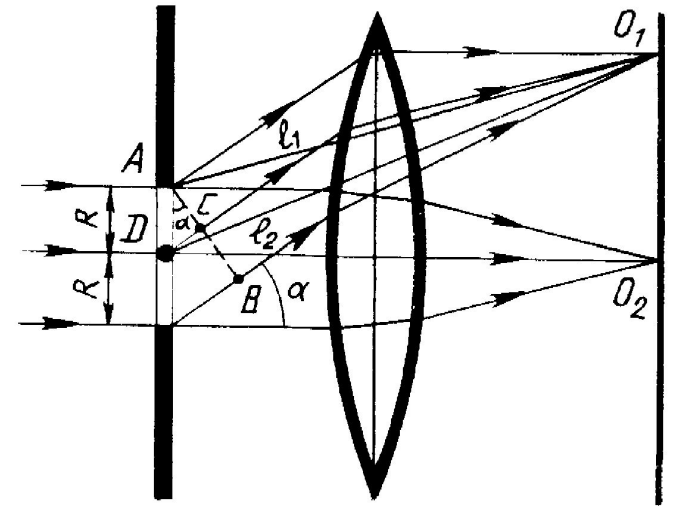
Дифракционная решетка



- Существуют отражательные и прозрачные дифракционные решетки.
- Дифракционные решетки используются для разложения электромагнитного излучения в спектр.

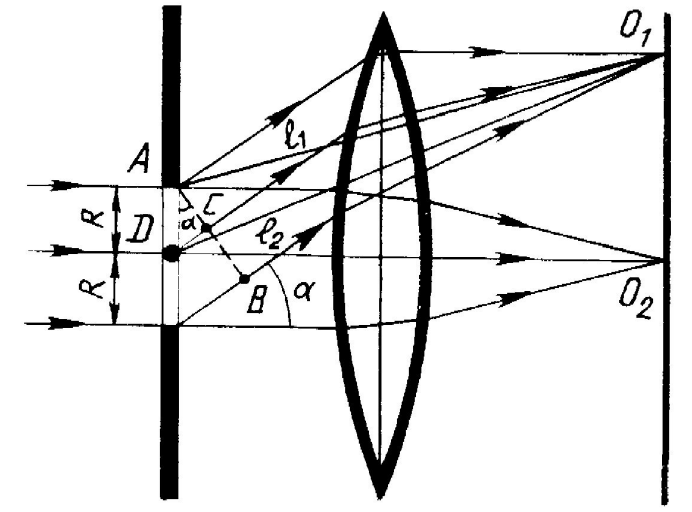
Дифракционная решетка

- Величина $d = a + b$ называется *постоянной дифракционной решетки*, где a — ширина щели; b — ширина непрозрачной части



Дифракционная решетка

- Угол ϕ - угол отклонения световых волн вследствие дифракции.
- Наша задача - определить, что будет наблюдаться в произвольном направлении ϕ - максимум или минимум

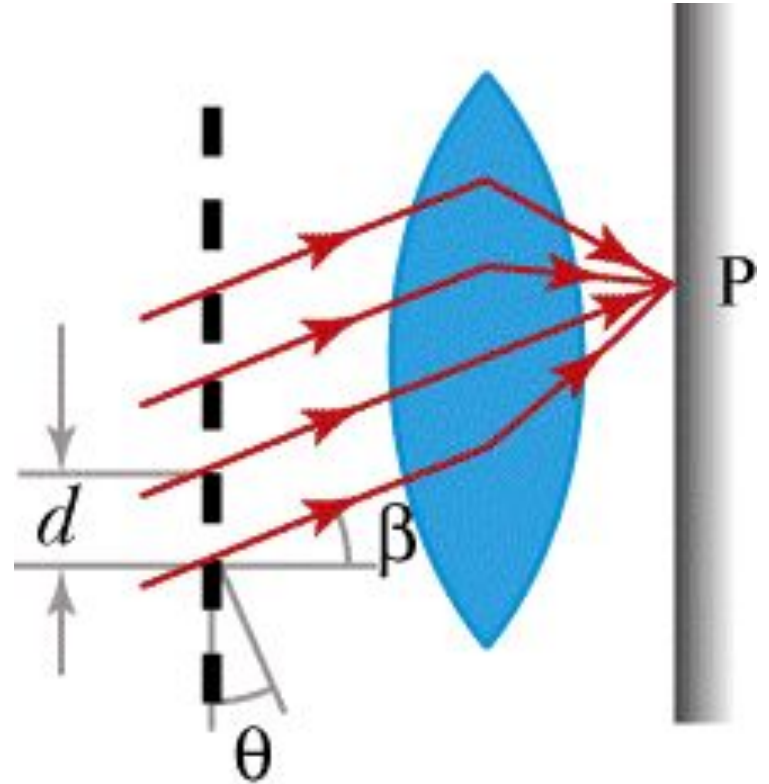


Дифракционная решетка

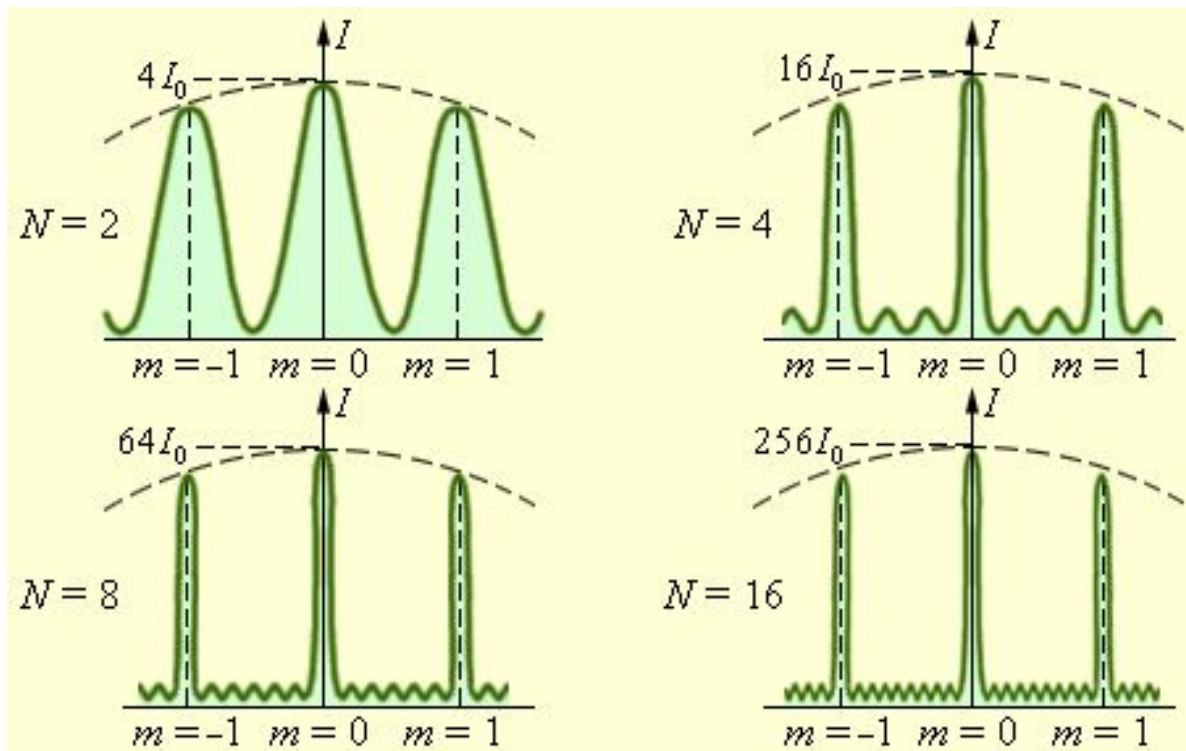
$$d \sin \varphi = k \lambda$$

- формула
дифракционной
решетки.

Величина k — порядок
дифракционного
максимума
(равен $0, \pm 1, \pm 2$ и т.д.)



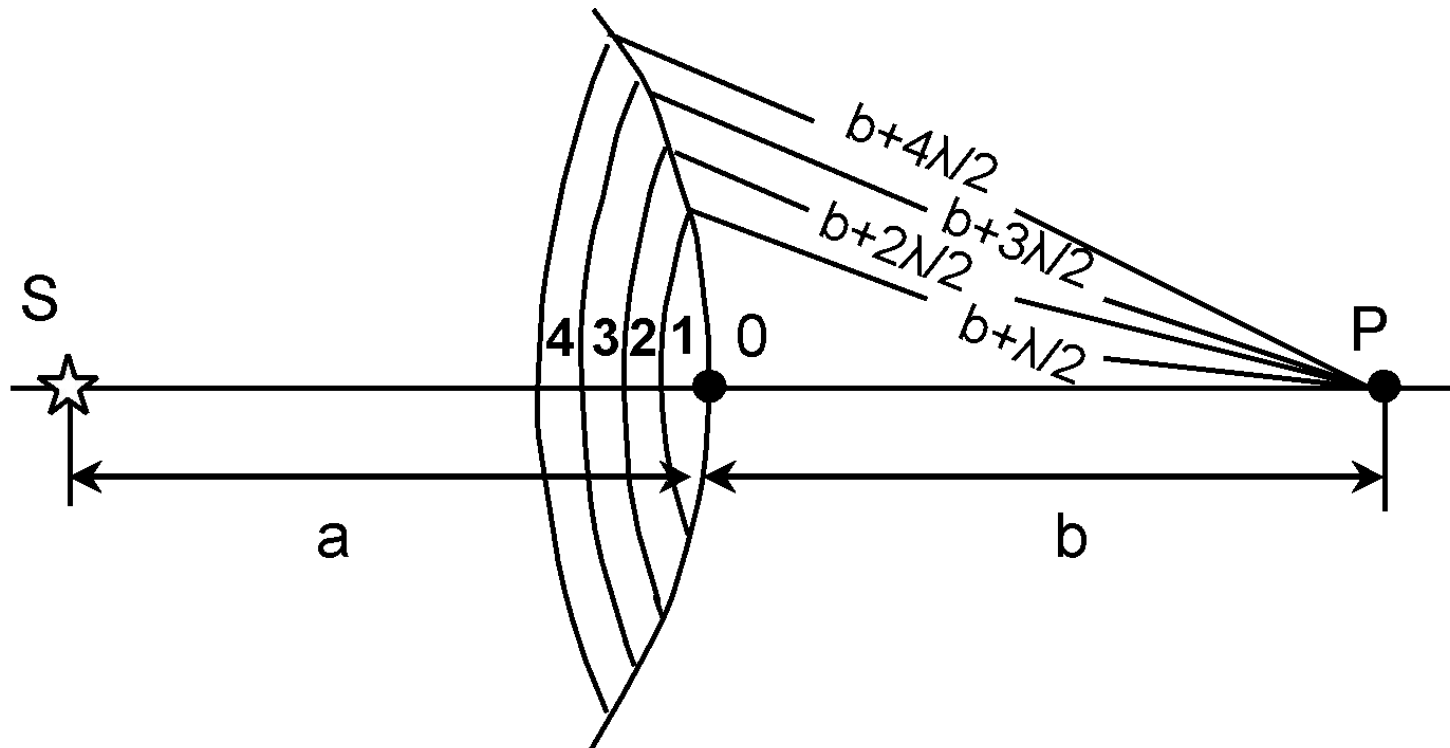
при дифракции света на решетке главные максимумы чрезвычайно узки. Изменение остроты главных максимумов при увеличении числа щелей решетки.



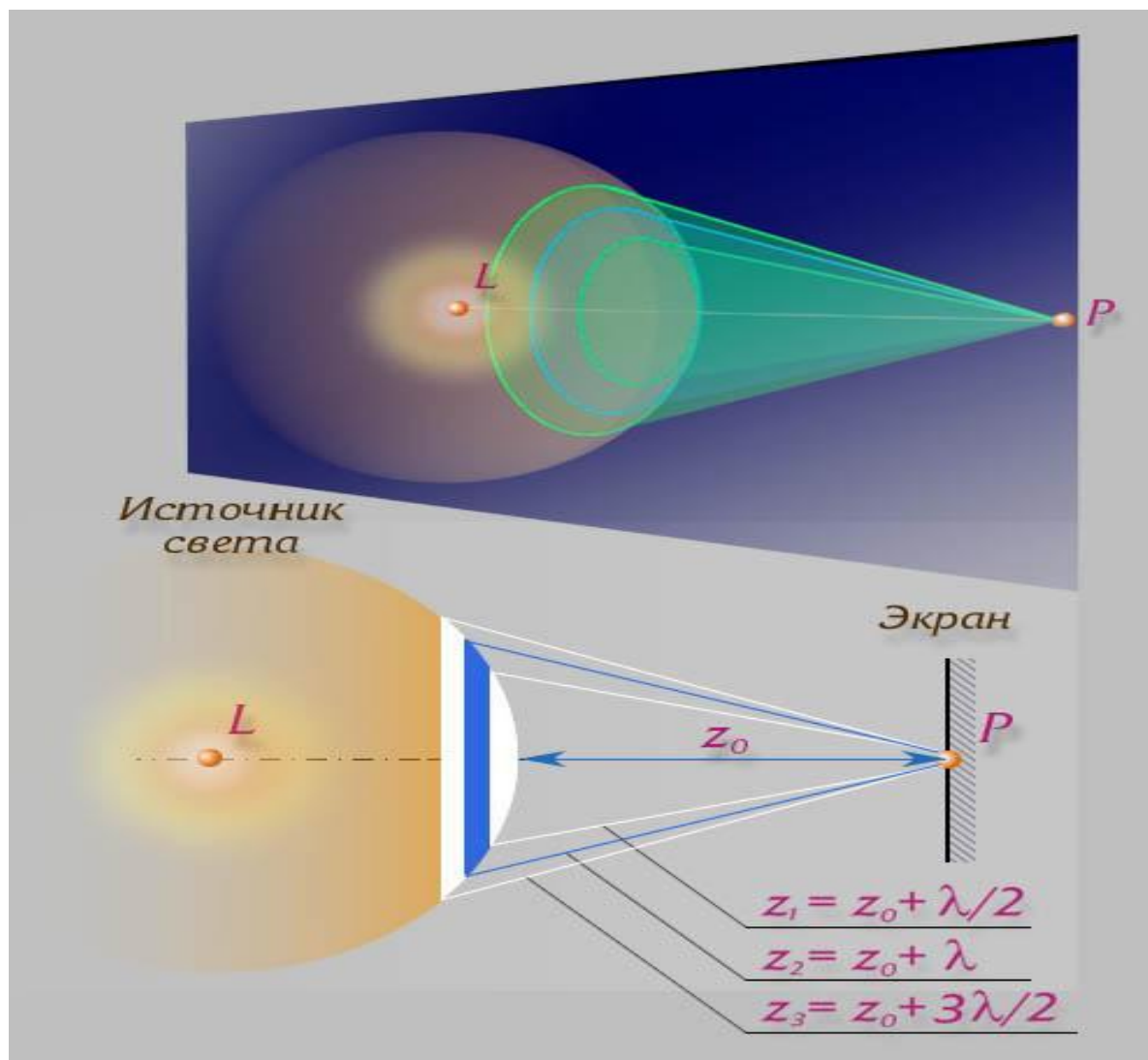
Распределение интенсивности при дифракции монохроматического света на решетках с различным числом щелей. I_0 – интенсивность колебаний при дифракции света на одной щели

Зоны Френеля

Для того чтобы найти амплитуду световой волны от точечного монохроматического источника света S в произвольной точке P изотропной среды, надо источник света окружить сферой радиусом $r=ct$

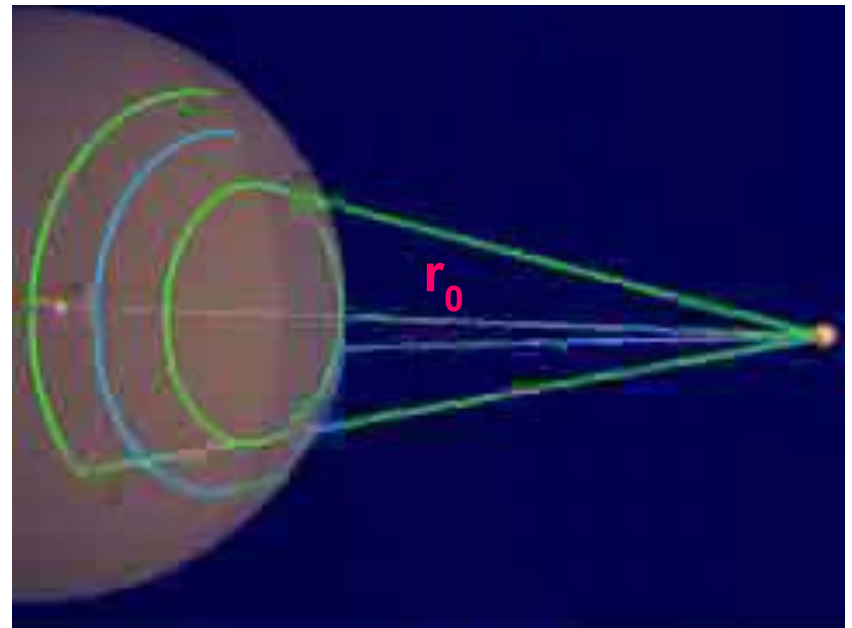


Интерференция волны от вторичных источников, расположенных на этой поверхности, определяет амплитуду в рассматриваемой точке Р, т. е. необходимо произвести сложение когерентных колебаний от всех вторичных источников на волновой поверхности



Так как расстояния от них до точки О различны, то колебания будут приходить в различных фазах.

Наименьшее расстояние от точки О до волновой поверхности В равно r_0

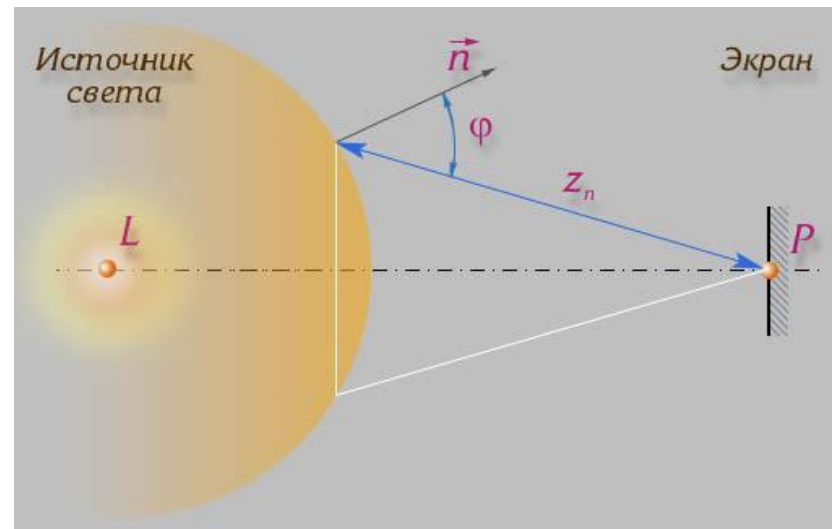


Зоны Френеля

Первая зона Френеля ограничивается точками волновой поверхности, расстояния от которых до точки O равны:

$$r_1 = r_0 + \frac{\lambda}{2}$$

где λ — длина световой волны

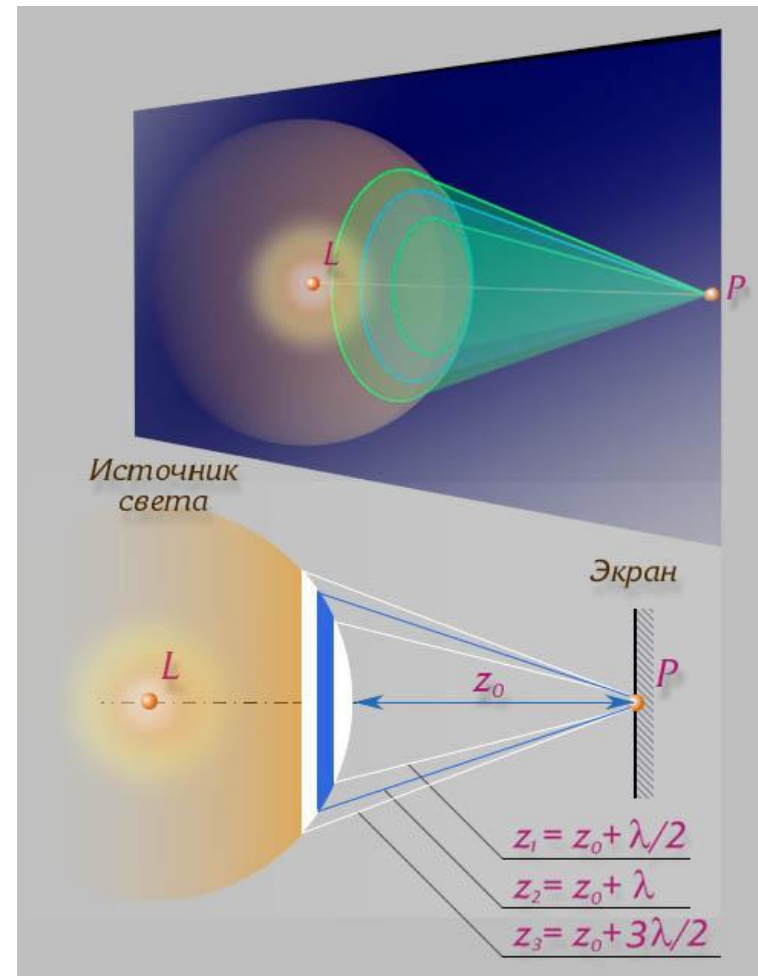
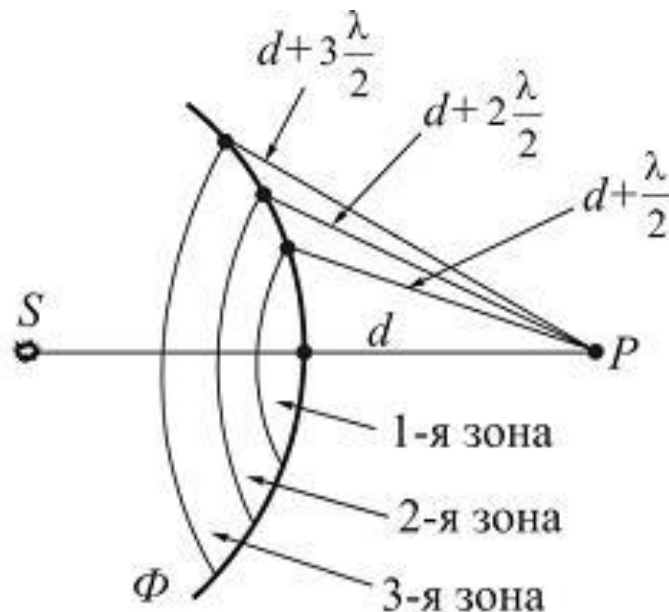


Зоны Френеля

Вторая зона:

$$r_2 = r_1 + \frac{\lambda}{2} = r_0 + \lambda$$

Аналогично
определяются
границы других
зон



Если разность хода от двух соседних зон равна половине длины волны, то колебания от них приходят в точку O в противоположных фазах и наблюдается интерференционный минимум, если разность хода равна длине волны, то наблюдается интерференционный максимум

Поляризация света

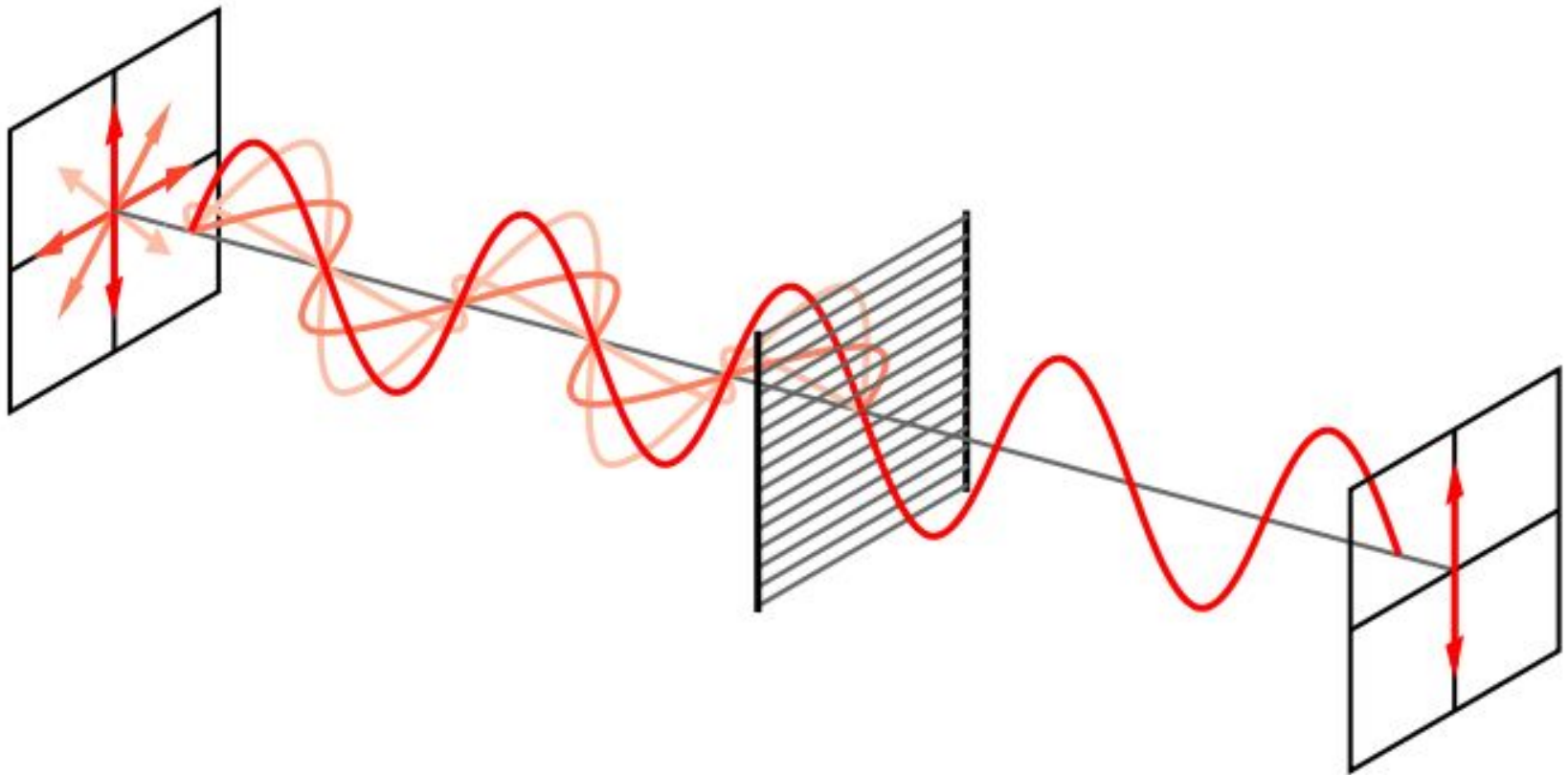
В поперечной волне колебания могут происходить в любых направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Если направления колебаний при этом беспорядочно меняются, но амплитуды их во всех направлениях одинаковы, то такая волна называется **естественной**.

Если колебания происходят только в одном постоянном направлении, то такая волна называется **поляризованной**. Если колебания происходят в различных направлениях, но в определенных направлениях амплитуды колебаний больше, чем в других – **частично поляризованная** волна.

Искусственную поляризацию можно осуществить, пропуская волну через **поляризатор**.

Поляризатор

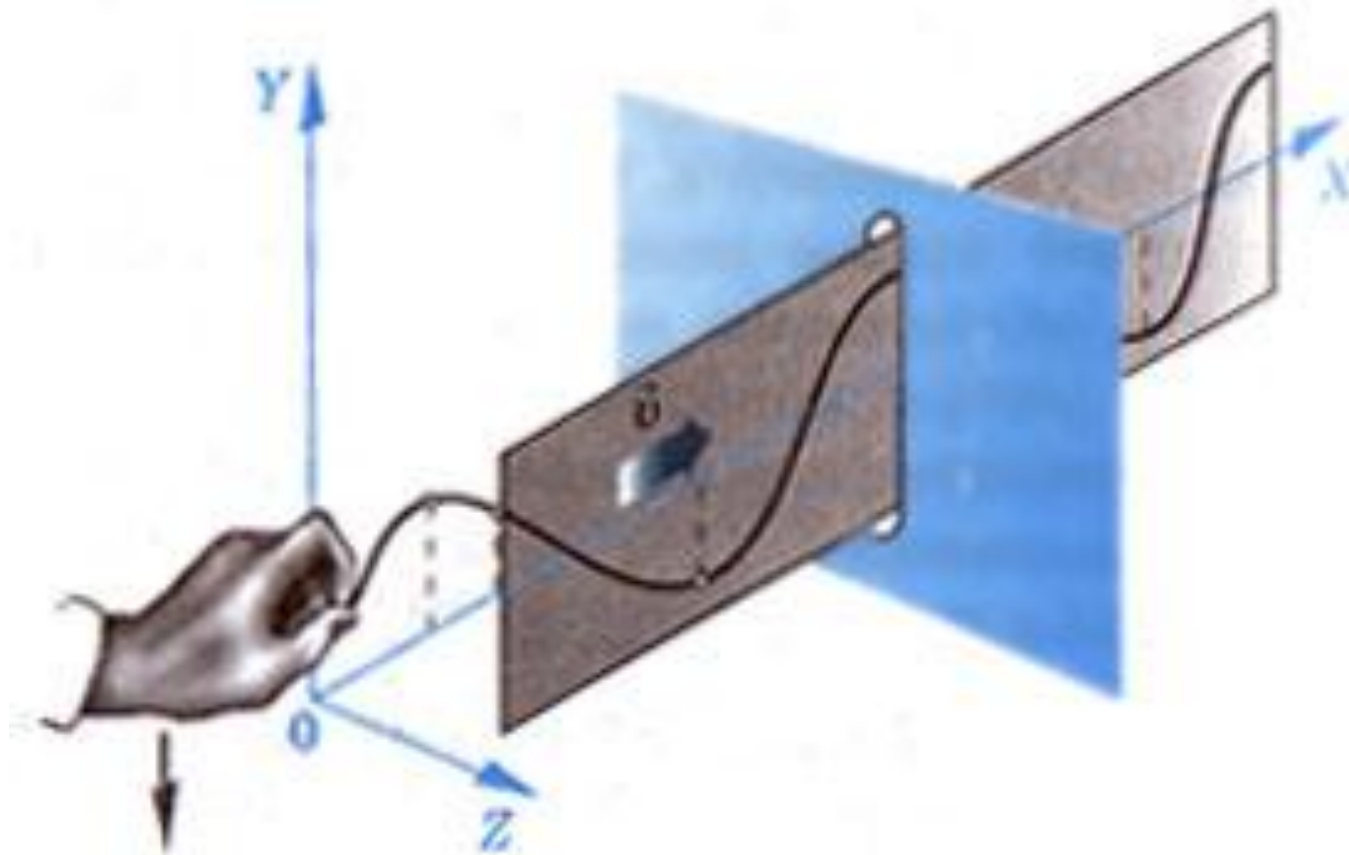
Поляризатор, устройство для получения полностью или частично поляризованного оптического излучения из излучения с произвольными поляризационными характеристиками .



(Поляризатор -пластина по середине)

Как действует поляризатор

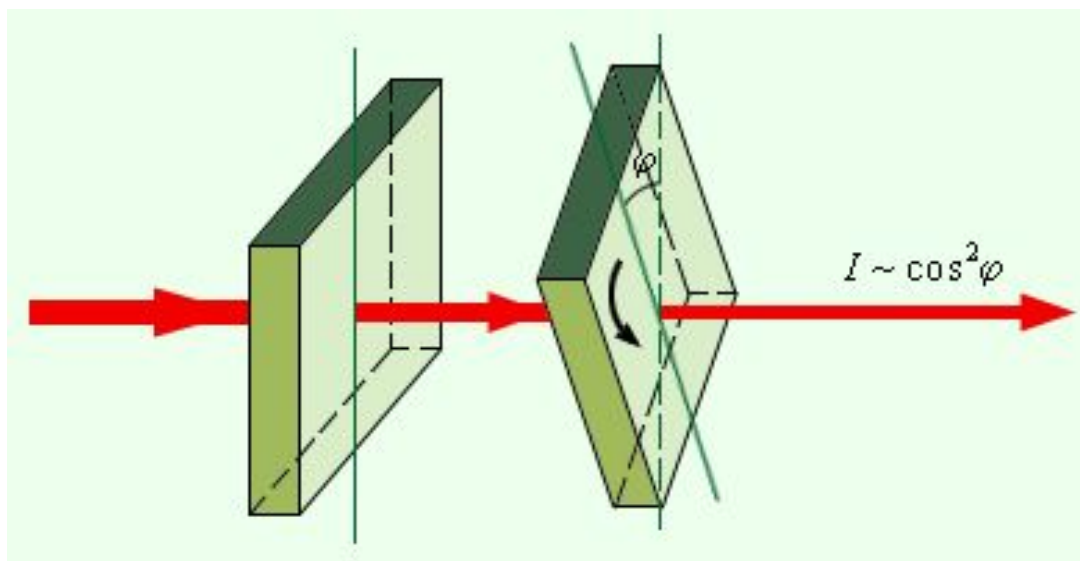
Этот прибор свободно пропускает те волны которые параллельны плоскости поляризации.



В 1809 году французский инженер [Э. Малюс](#) открыл закон, названный его именем. В опытах Малюса свет последовательно пропускался через две одинаковые пластинки из турмалина (прозрачное кристаллическое вещество зеленоватой окраски). Пластинки можно было поворачивать друг относительно друга на угол φ

Интенсивность прошедшего света оказалась прямо пропорциональной $\cos^2 \varphi$:

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

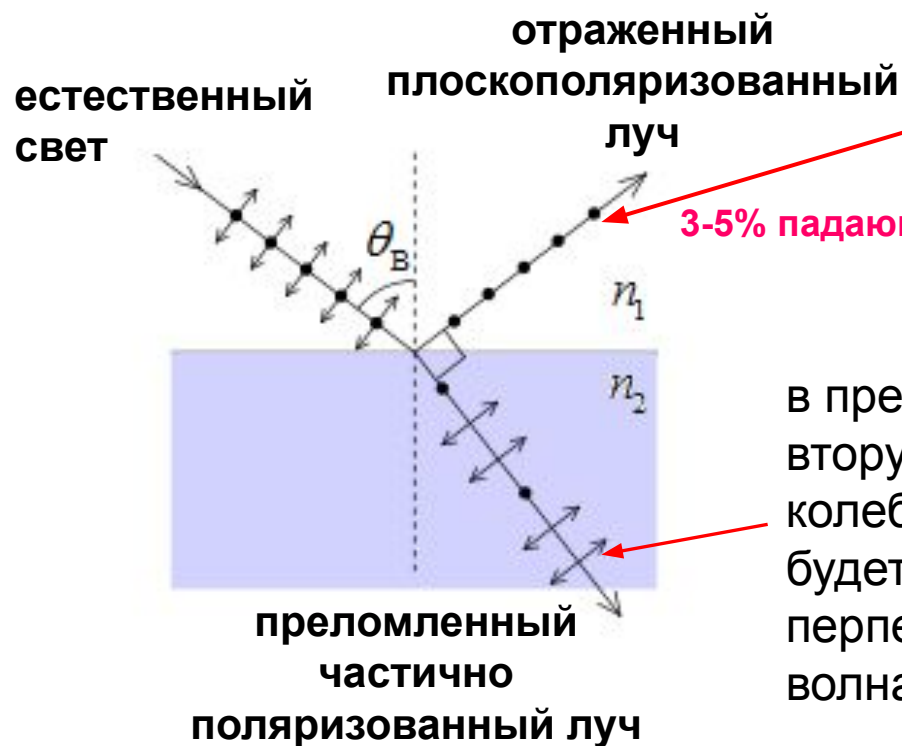


Поляризация при отражении и преломлении.

Если естественный свет падает на отражающую поверхность диэлектрика (стекла, слюды и т. п.) под углом α , удовлетворяющим условию Брюстера:

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{n_2}{n_1}$$

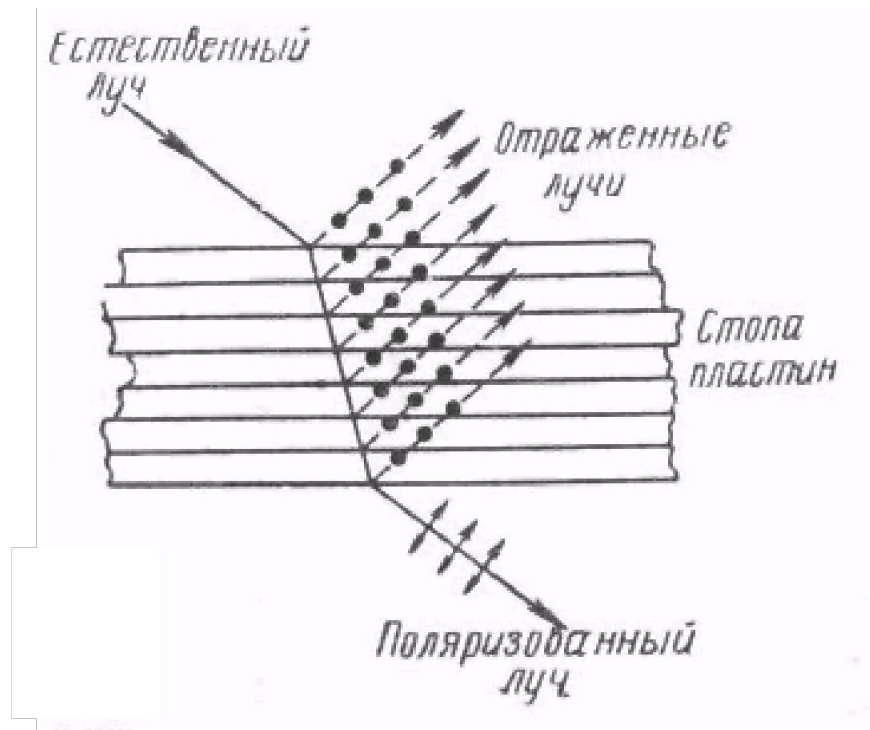
то отраженная волна оказывается плоскополяризованной



У отраженной волны вектор E перпендикулярен к плоскости падения

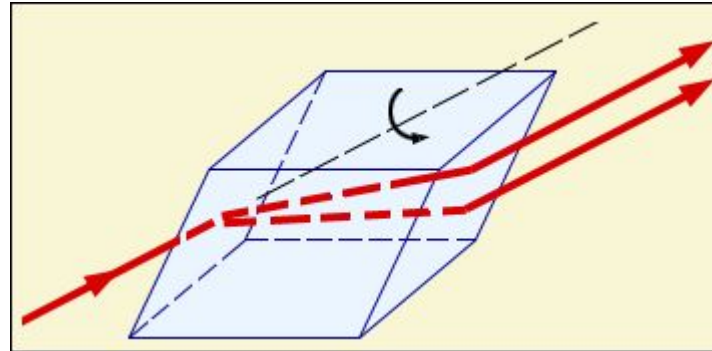
в преломленной (прошедшей во вторую среду) волне энергия колебаний в плоскости падения будет больше, чем в перпендикулярной плоскости, и волна частично поляризована.

пользуются многократным отражением волны от «стопы пластин»; отраженные лучи уносят колебания, перпендикулярные к плоскости падения, и проходящий луч, постепенно «очищаясь» от этих колебаний, становится почти плоско поляризованным (с вектором E , лежащим в плоскости падения).



Поляризация при двойном лучепреломлении в кристаллах

Обыкновенный и необыкновенный лучи имеют в кристалле различные скорости распространения, следовательно, различные показатели преломления n_o и n_e ; этим объясняется двойное лучепреломление в точке падения волны на грань призмы



Это явление наблюдается в **оптически анизотропной среде**, если ее оптические свойства (скорость распространения света или показатели преломления) различны в различных направлениях.

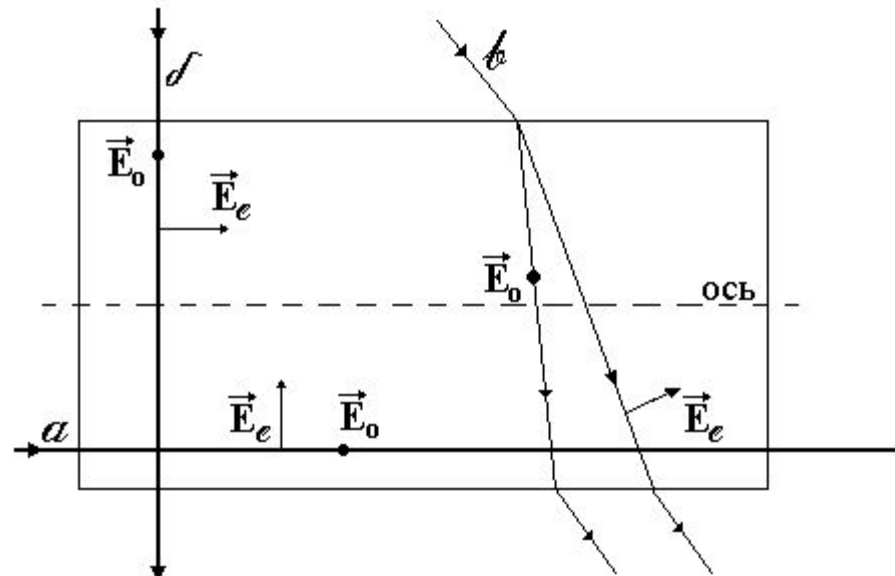
в кристаллах существует одно или несколько направлений, вдоль которых скорость света не зависит от ориентировки вектора E . Эти направления называются **оптическими осями** кристалла.

Так как вектор E перпендикулярен к своему лучу, то при распространении света вдоль оптической оси вектор E при всех его различных ориентировках в пространстве всегда перпендикулярен также и к оптической оси.

Плоскость, проходящая через данный луч и оптическую ось кристалла - **главная плоскость**. В кристаллах различают:

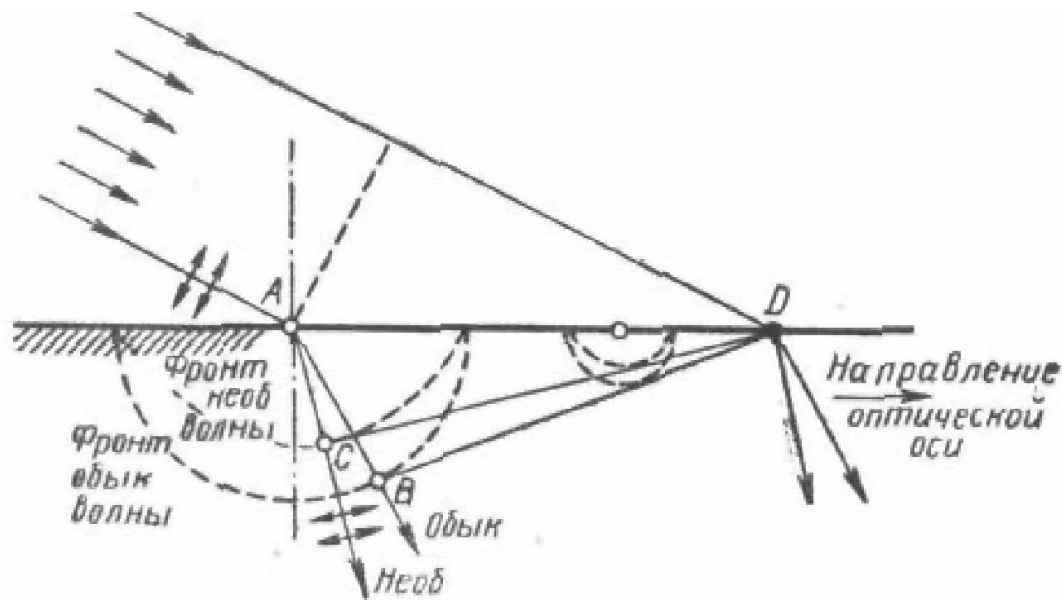
- 1) обыкновенные лучи, у которых вектор \vec{E} ориентирован перпендикулярно к главной плоскости (следовательно, перпендикулярен и к оптической оси);
- 2) необыкновенные лучи, у которых вектор \vec{E} лежит в главной плоскости (следовательно, образует с оптической осью некоторые углы).

Обыкновенные лучи распространяются по всем направлениям в кристалле с одной и той же скоростью c_0 . Необыкновенные лучи распространяются в кристалле с различными скоростями в зависимости от угла между вектором \vec{E} и оптической осью c_e .



Применяя принцип Гюйгенса, проведем огибающие элементарных сферических фронтов обыкновенной волны BD и элементарных эллипсоидальных фронтов необыкновенной волны CD . Таким образом, при преломлении плоской волны на границе анизотропной среды появляются две плоские волны, распространяющиеся в различных направлениях и с различными скоростями.

Обе эти волны наблюдаются только в том случае, если падающий свет либо естественный, либо же имеет вектор E , колеблющийся под углом к плоскости падения, отличным от нуля или 90° .



направление распространения необыкновенной волны не перпендикулярно к ее фронту.