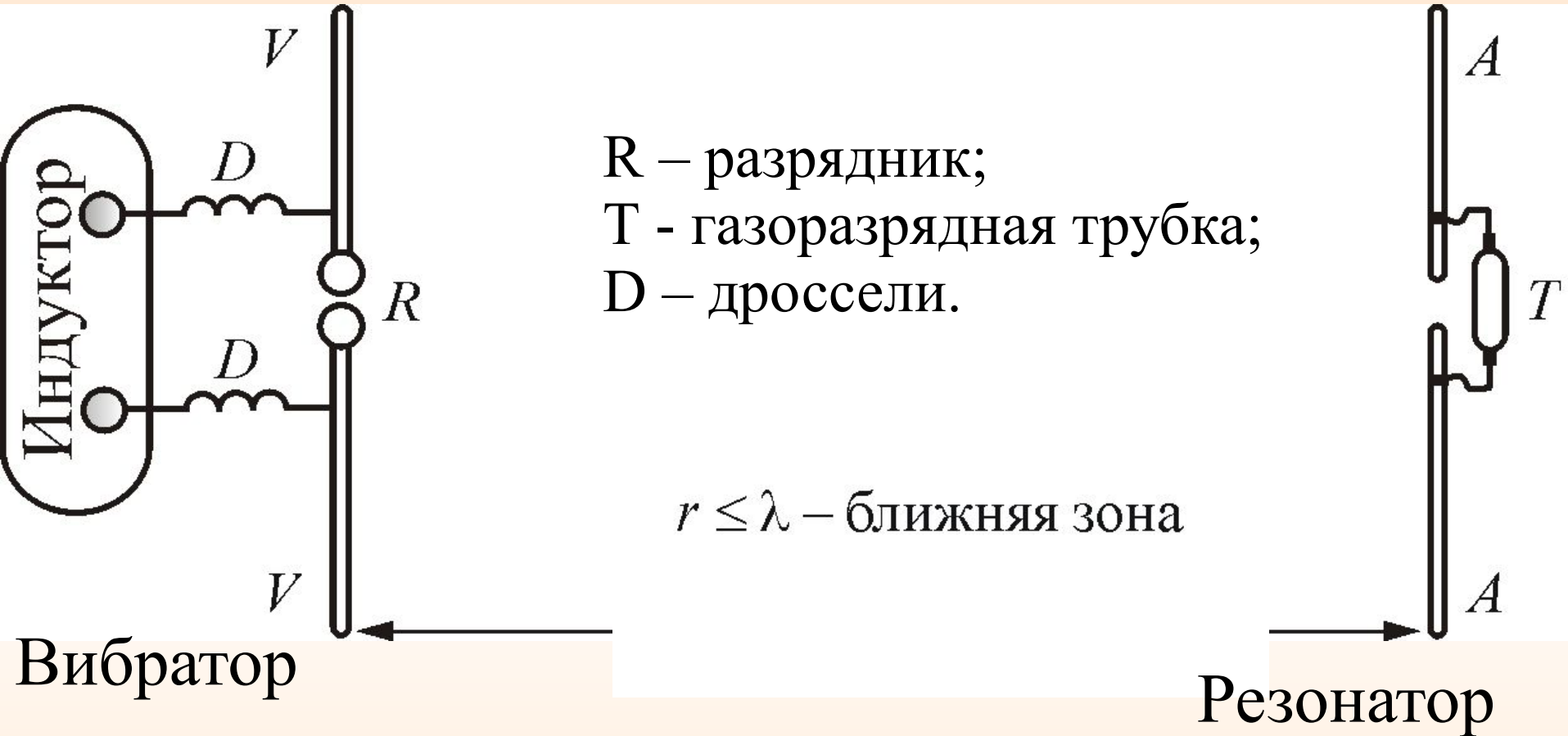


В колебательном контуре, образованном конденсатором  $C$  и катушкой  $L$ , электрическое поле сосредоточено в зазоре между обкладками, а магнитное – внутри катушки.

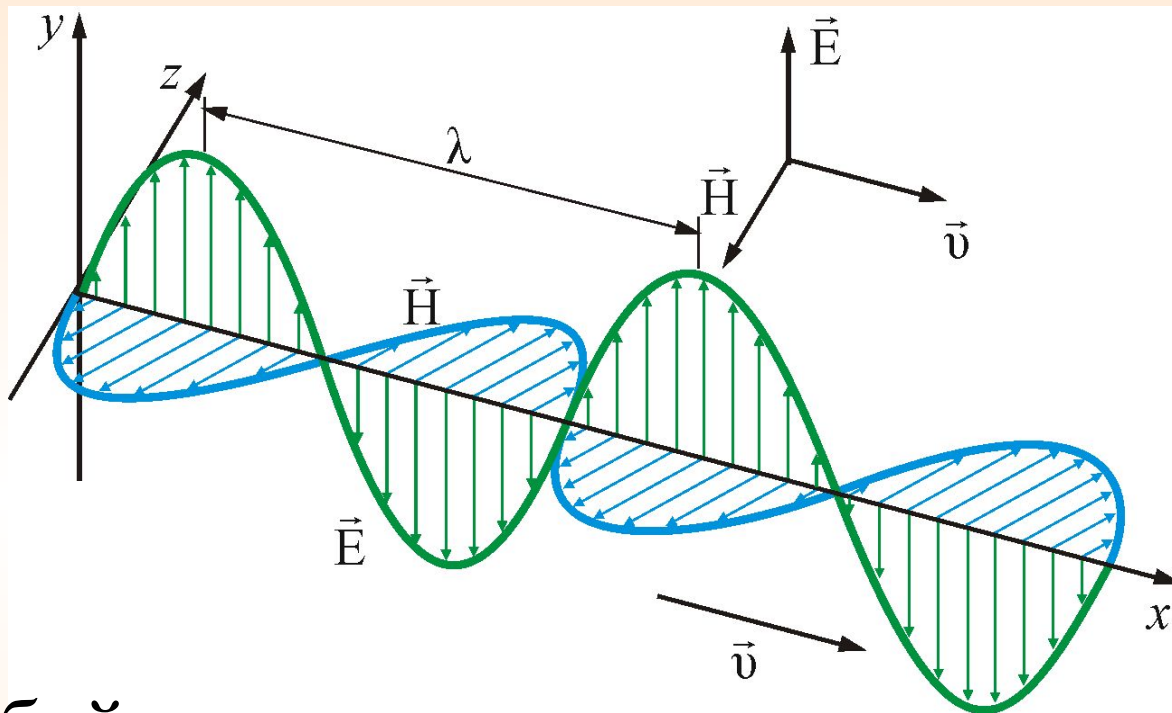
В окружающем конденсатор и катушку пространстве поля практически равны нулю...

# Вибратор Герца

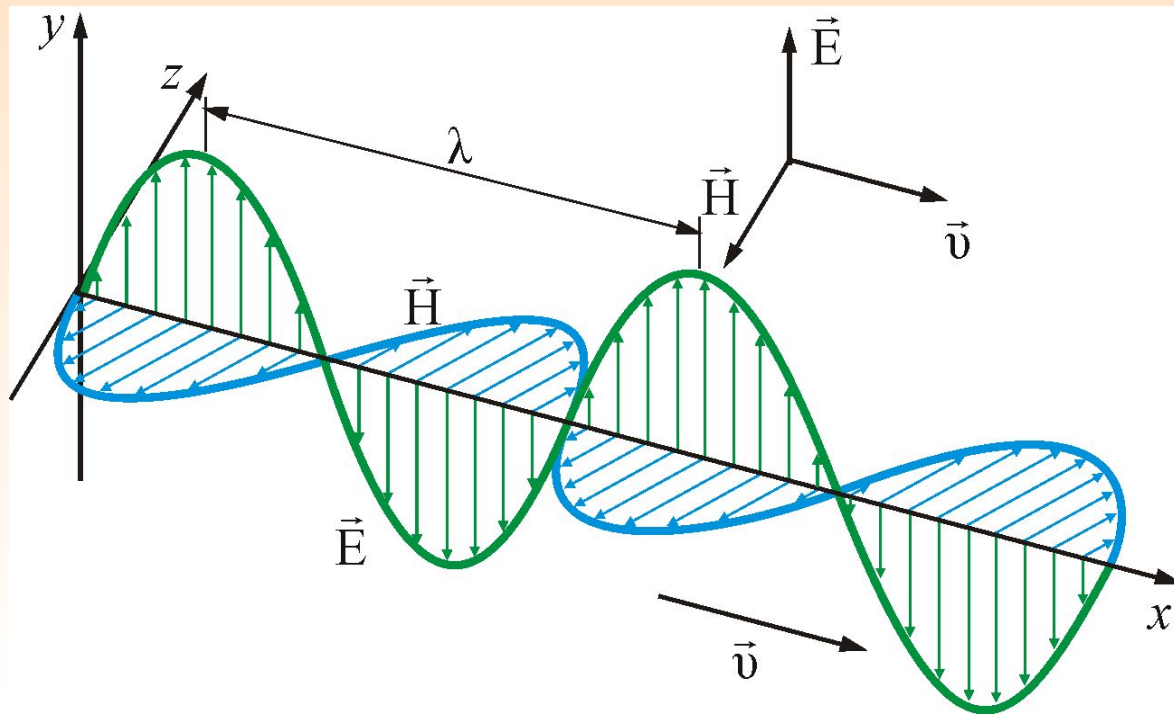


Движущийся с ускорением электрический заряд испускает электромагнитные волны.

ЭМВ распространяются в пространстве, удаляясь от вибратора во все стороны.



В любой точке векторы напряженности электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей взаимно перпендикулярны и перпендикулярны направлению распространения  $\vec{v}$



Поля изменяют свое направление в пространстве: в одних точках вектор  $\mathbf{H}$  направлен к плоскости страницы, в других – от нее; аналогично ведет себя и вектор  $\mathbf{E}$ . Электрическое и магнитное поля находятся в фазе, т.е. они достигают максимума и обращаются в нуль в одних и тех же точках.

Электромагнитные волны представляют собой поперечные волны и, в этом, аналогичны другим типам волн. Однако в ЭМВ происходят *колебания полей*, а не *вещества*, как в случае распространения волн на воде или в натянутом шнуре.

Фазовая скорость ЭМВ определяется выражением

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

где  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$  – скорость света в вакууме;

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$$

$$\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} \cdot \text{м}^{-1}$$

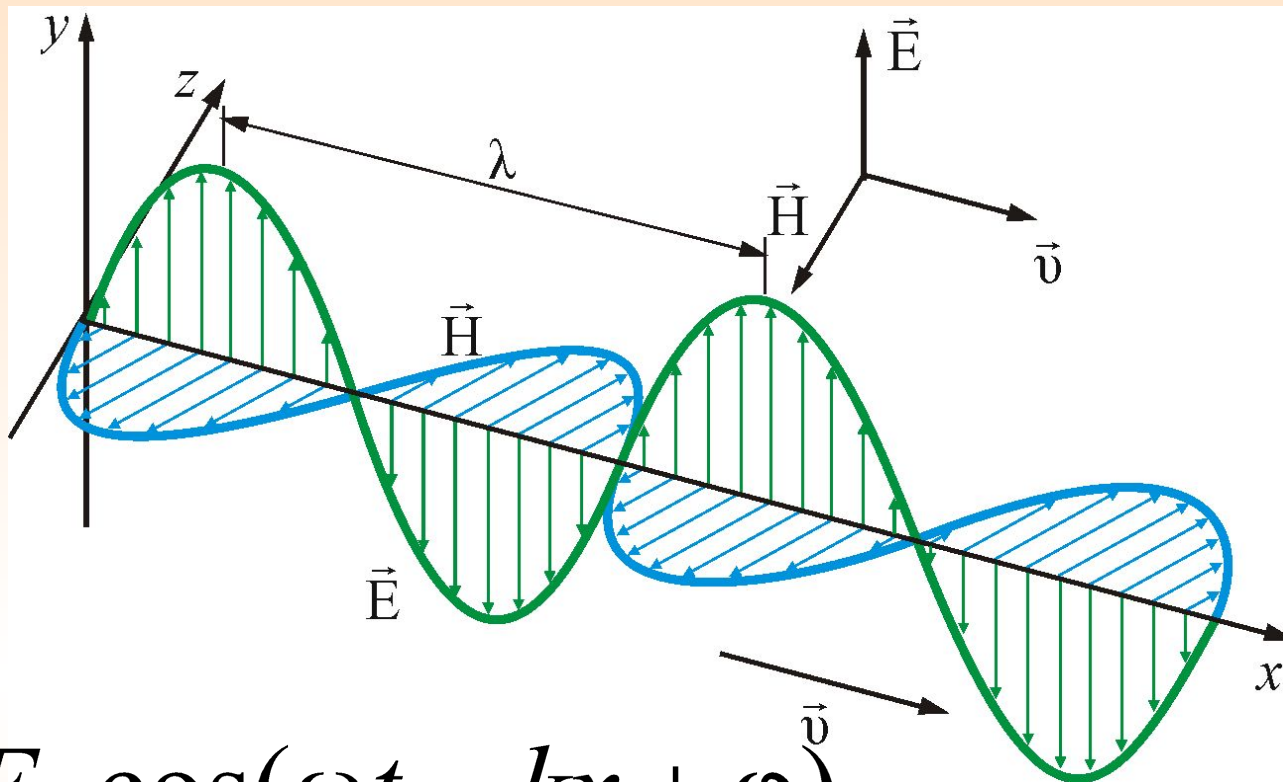
$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

В веществе скорость распространения электромагнитных возмущений меньше в  $n = \sqrt{\epsilon \mu}$  раз.

Скорость распространения электромагнитных волн в среде зависит от ее электрической и магнитной проницаемостей. Величину  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$  называют *абсолютным показателем преломления*. С учетом последнего имеем:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{n} \quad \text{и} \quad n = \frac{c}{v}$$

Следовательно, *показатель преломления* есть физическая величина, равная отношению скорости электромагнитных волн в вакууме к их скорости в среде.



$$E = E_0 \cos(\omega t - kx + \varphi)$$

$k = \frac{\omega}{v}$  – волновое число,  $\omega$  – круговая частота,

$\varphi$  – начальная фаза колебаний в точках с координатой  $x = 0$ ,

$v$  – фазовая скорость.



Таким образом:

- векторы  $\vec{E}$   $\vec{H}$   $\vec{v}$  взаимно перпендикулярны, т. к.  $\vec{k}$  и  $\vec{v}$  направлены одинаково;
- электромагнитная волна является поперечной;
- электрическая и магнитная составляющие распространяются в одном направлении;
- векторы  $\vec{E}$   $\vec{H}$  колеблются в одинаковых фазах.

## 4.3 Энергия и импульс ЭМП

Распространение электромагнитных волн связано с переносом ЭМ энергии (подобно тому, как распространение упругих волн в веществе связано с переносом механической энергии). Сама возможность обнаружения ЭМВ указывает на то, что они переносят энергию.

**ЭМВ - способ передачи энергии и информации (в вакууме)**

**Объемная плотность энергии  $w$   
электромагнитной волны**

$$w = w_{\text{э}} + w_{\text{м}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} + \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$$

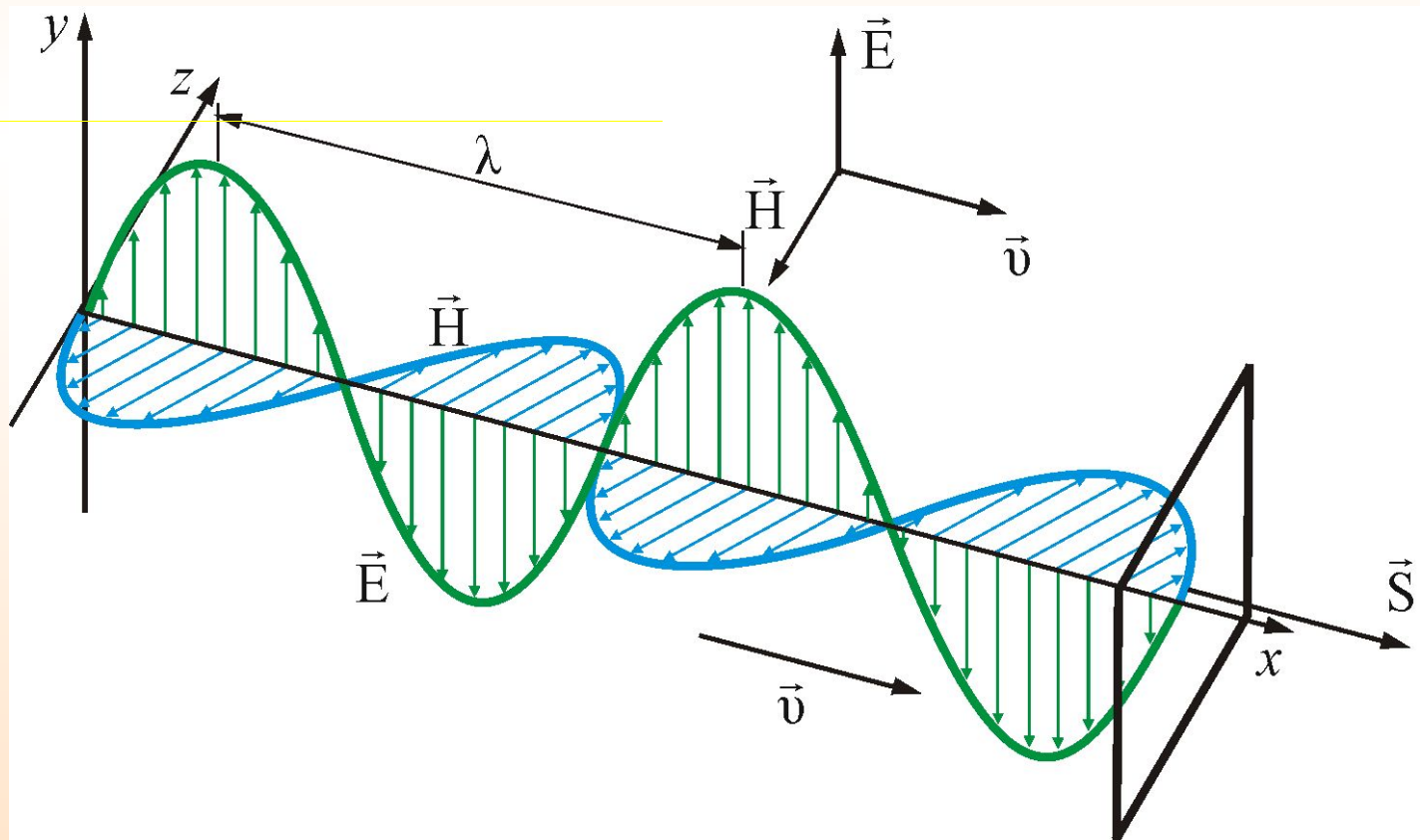
*Поток энергии через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени:*

$$S = wv = EH$$

*Вектор плотности потока электромагнитной энергии называется вектором Умова-Пойнтинга:*

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}]$$

Вектор  $\vec{S}$  направлен в сторону распространения электромагнитной волны, а его модуль равен энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны.



Модуль среднего значения вектора Умова-Пойнтинга называется *интенсивностью*:

$$J = \left| \langle \vec{S} \rangle \right|$$

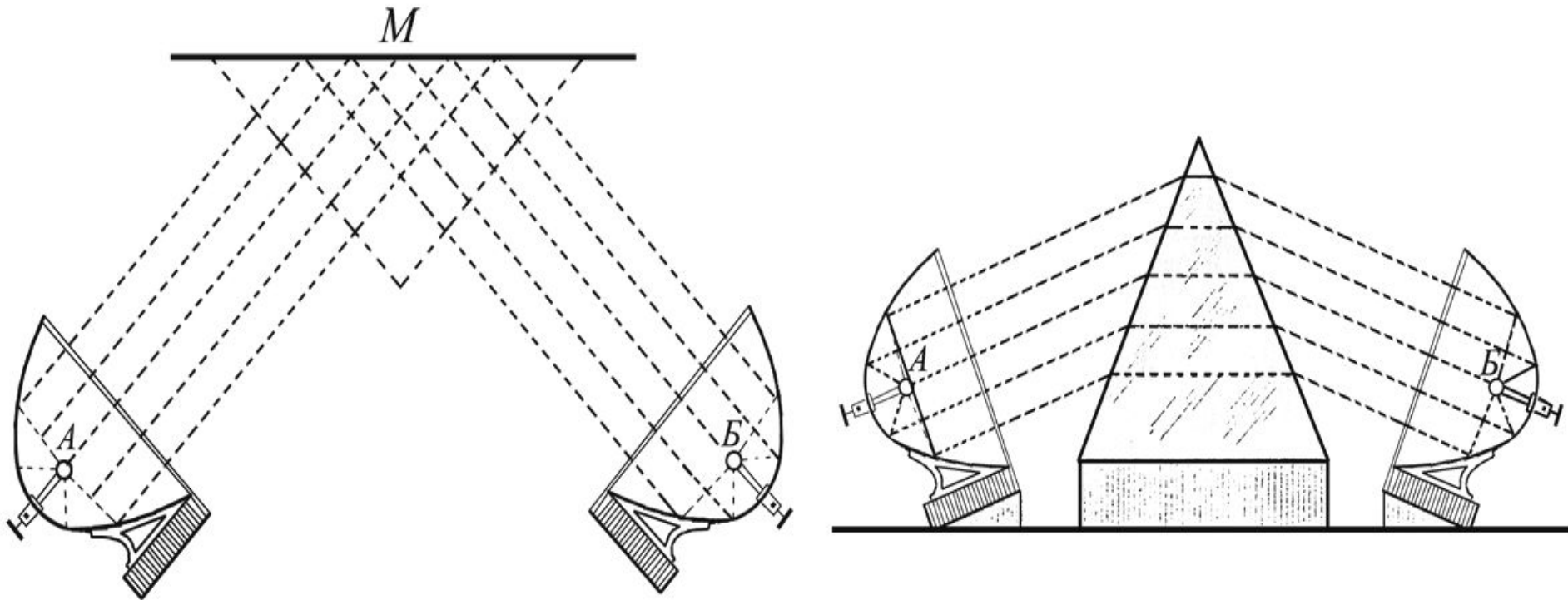
### *“Электромагнитная” масса и импульс*

Существование давления ЭМВ приводит к выводу о том, что электромагнитному полю (световым квантам) присущ электромагнитный импульс и масса.

$$p = mc = \frac{E}{c}$$

$$E = mc^2$$

# Опыт Герца с металлическими параболическими зеркалами и призмой



Установлена полная аналогия преломления и отражения ЭМВ со световыми волнами

Усовершенствовав вибратор Герца и применив свой приемник, профессор Петербургского электротехнического института А.С. Попов 1896 г. наладил опытную радиотелеграфную связь и осуществил с помощью электромагнитных волн передачу сообщения на расстояние около 250 м. В 1899 г. Попов довел расстояние беспроводной передачи сигналов до 50 км.

В 1901 г. была осуществлена радиотелеграфная связь через Атлантический океан. Изобретение электронных ламп (1904 – 1907) и применение их для генерирования незатухающих колебаний (1913 г.) сделали возможным развитие радиотелеграфии и радиовещания. В 20 – 30-ых гг. весь мир покрылся сетью мощных радиопередающих станций. Человечество вступило в новую эру коммуникационных отношений.

## 4.5. Шкала ЭМВ

В оптике условно рассматривается три области:

Длина волны ( $\lambda$ )  $<$  размеров приборов;

**геометрическая оптика.**

$\lambda$  сравнима с размеров приборов;

**волновая оптика.**

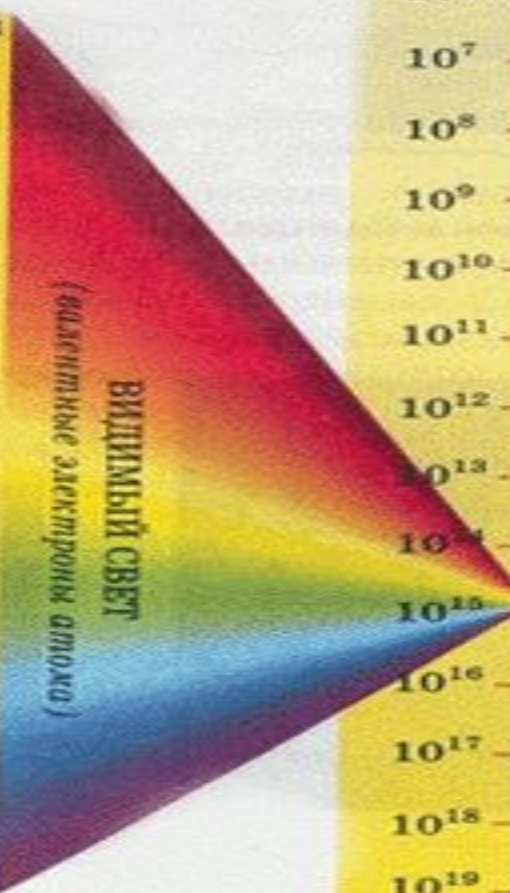
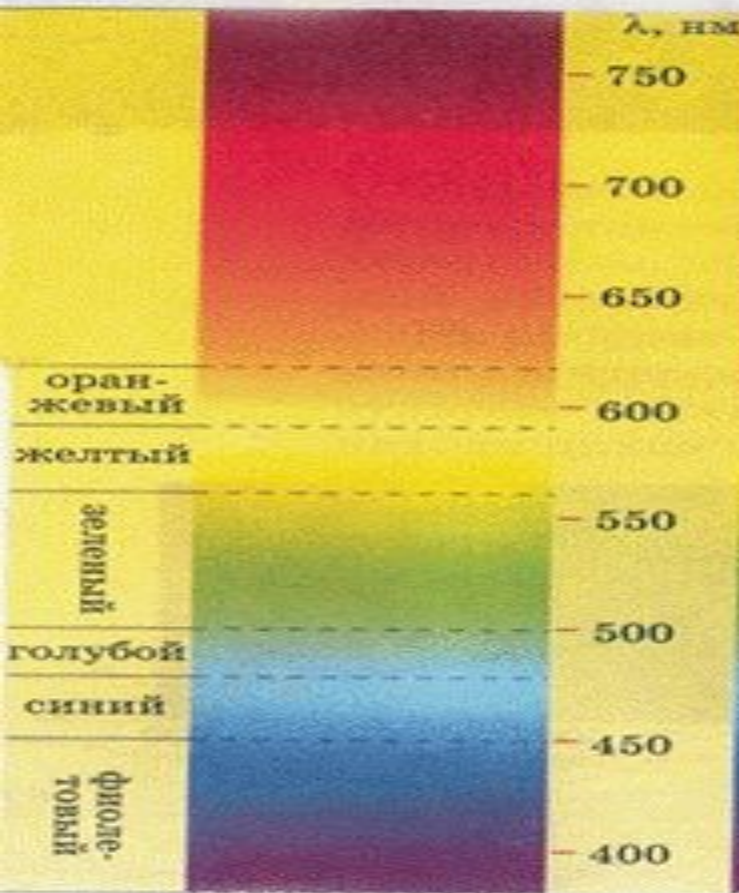
$\Lambda$   $<$  размеров приборов;

**квантовая оптика.**



Длина	Название	Частота
более 100 км	Низкочастотные электрические колебания	0 – 3 кГц
100 км – 1 мм	Радиоволны	3 кГц – 3 ТГц
100 – 10 км	<i>сверх низкие частоты</i>	3 – 3-кГц
10 – 1 км	<i>километровые (низкие частоты)</i>	30 – 300 кГц
1 км – 100 м	<i>гектометровые (средние частоты)</i>	300 кГц – 3 МГц
100 – 10 м	<i>декаметровые (высокие частоты)</i>	3 – 30 МГц
10 – 1 м	<i>метровые (очень высокие частоты)</i>	30 – 300 МГц
1 м – 10 см	<i>дециметровые (ультравысокие)</i>	300 МГц – 3 ГГц
10 – 1 см	<i>сантиметровые (сверхвысокие)</i>	3 – 30 ГГц
1 см – 1 мм	<i>миллиметровые (крайне высокие)</i>	30 – 300 ГГц
1 – 0.1 мм	<i>децимиллиметровые (гипервысокие)</i>	300 ГГц – 3 ТГц
2 мм – 760 нм	Инфракрасное излучение	150 ГГц – 400 ТГц
760 – 380 нм	Видимое излучение (оптический спектр)	400 - 800 ТГц
380 – 3 нм	Ультрафиолетовое излучение	800 ТГц – 100 ПГц
10 нм – 1 пм	Рентгеновское излучение	30 ПГц – 300 ЭГц
<10 пм	Гамма-излучение	>30 ЭГц





# **КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА**

**3.5 Развитие взглядов на природу света**

**3.6 Интерференция световых волн**

**3.7 Опыт Юнга**

**3.8 Когерентность и монохроматичность**

**3.9 Методы наблюдения интерференции**

**3.10 Интерференция в тонких пленках**

**3.11 Применение интерференции света**

### 3.5 Развитие взглядов на природу света

Основные законы геометрической оптики известны ещё с древних времен. Так, Платон (430 г. до н.э.) установил закон прямолинейного распространения света. В трактатах Евклида формулируется закон прямолинейного распространения света и закон равенства углов падения и отражения. Аристотель и Птолемей изучали преломление света. Но точных формулировок этих *законов геометрической оптики* греческим философам найти не удалось.

В конце XVII века, на основе многовекового опыта и развития представлений о свете возникли две мощные теории света – *корпускулярная* (Ньютон-Декарт) и *волновая* (Гук-Гюйгенс).

*Геометрическая оптика* является предельным случаем волновой оптики, когда *длина световой волны стремится к нулю*.

Простейшие оптические явления, например возникновение теней и получение изображений в оптических приборах, могут быть поняты в рамках геометрической оптики. В основу формального построения последней положено четыре закона, установленных опытным путем:

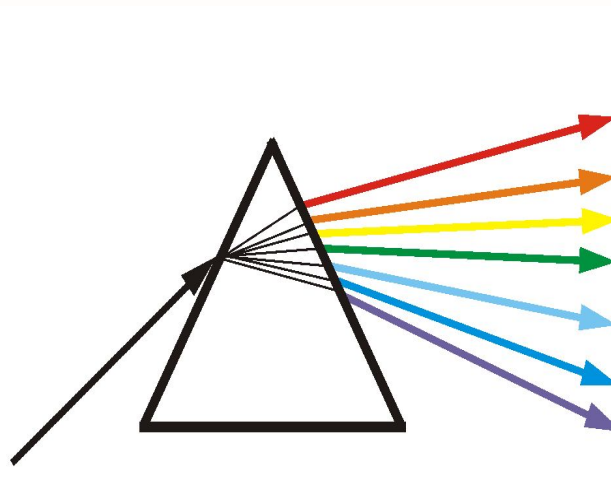
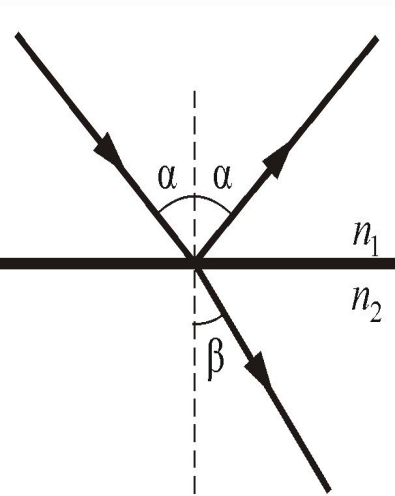
- закон прямолинейного распространения света;
- закон независимости световых лучей;
- закон отражения;
- закон преломления света.

# Законы отражения и преломления света:

$\alpha = -\alpha$ ; (угол падения равен углу отражения);

$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v}{c} = n$  (отношение синуса угла падения к синусу угла преломления – величина

постоянная равная отношению скорости света в среде  $v$  к скорости света в вакууме  $c$ ).



Таким образом,  
Ньютон утверждал,  
что скорость света в  
веществе больше  
скорости света в  
вакууме.



## *Принцип Гюйгенса*

*Гюйгенс Христиан* (1629 – 1695), нидерландский ученый. Жил и работал в Париже. Изобрел маятниковые часы, установил законы колебаний физического маятника.

Опубликовал в 1690 г. созданную им волновую теорию света, объяснил двойное лучепреломление. Усовершенствовал телескоп; сконструировал окуляр, названный его именем. Открыл кольцо у Сатурна и его спутник Титан. Автор одного из первых трудов по теории вероятностей.



## *Принцип Гюйгенса*

Каждая точка, до которой доходит световое возмущение, является в свою очередь центром вторичных волн; поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны.



## *Принцип Ферма*

*Ферма Пьер* (1601 – 1665) –

французский математик и физик.

Его исследования относятся в большинстве к оптике,

где он установил основной принцип геометрической оптики (принцип Ферма).

Аналогия между принципом Ферма и вариационными принципами механики сыграла значительную роль в развитии современной динамики и теории оптических инструментов.

## *Принцип Ферма*

Согласно принципу Ферма, свет распространяется между двумя точками по пути, для прохождения которого необходимо наименьшее время.

## 3.6 Интерференция световых волн

Начало XIX в. характеризуется интенсивным развитием математической *теории колебаний и волн* и ее применением к объяснению ряда оптических явлений. В связи с работами Т. Юнга и О. Френеля, победа временно перешла к *волновой оптике*:

1801 г. Т. Юнг сформулировал принцип интерференции и объяснил цвета таких пленок;

1818 г. О. Френель получает премию Парижской Академии за объяснение дифракции;

1840 г. О. Френель и Д. Арго исследуют интерференцию поляризованного света и доказывают поперечность световых колебаний;



Парижской академии наук (1788 -1827) - французский физик, член Парижской академии наук. Научные работы посвящены физической оптике (1788 -1827) - французский физик, член Парижской академии наук.

Гюйгенса Гюйгенса, введя так называемые зоны Френеля (принцип Гюйгенса - Френеля). Разработал в 1818 году теорию дифракции света Гюйгенса, введя так называемые зоны Френеля (принцип Гюйгенса - Френеля). Разработал в 1818 году теорию дифракции света. Член Лондонского



немецкий физик, профессор Мюнхенского университета. Научные работы относятся к физической оптике (1787-1826) - немецкий физик, профессор Мюнхенского университета. Научные работы относятся к физической оптике. Внёс существенный

вклад в исследование дисперсии и Фраунгофер изучал дифракцию в параллельных лучах (так называемая дифракция Фраунгофера) сначала от одной щели, а потом от многих. Большой заслугой учёного является использование дифракционных решёток Фраунгофер изучал дифракцию в параллельных лучах (так называемая дифракция Фраунгофера) сначала от одной щели, а потом от

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.

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

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

Амплитуда результирующего колебания при сложении колебаний направленных вдоль одной прямой

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

*Если разность фаз колебаний возбужденных волнами в некоторой точке пространства остается постоянной во времени, то такие волны называются когерентными.*



*В случае некогерентных волн разность фаз непрерывно изменяется.*

$$\phi_2 - \phi_1 = f(t).$$

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

$$J = J_1 + J_2 = 2J_1$$

В случае когерентных волн  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \text{const}$  (для каждой точки пространства) так, что

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.2.2)$$

Последнее слагаемое в этом выражении

$2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$  называется

*интерференционным членом.*

В точках пространства, где  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$ ,

$J > J_1 + J_2$  (в максимуме  $J = 2J_1$ )

$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$ , интенсивность  $J < J_1 + J_2$

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

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

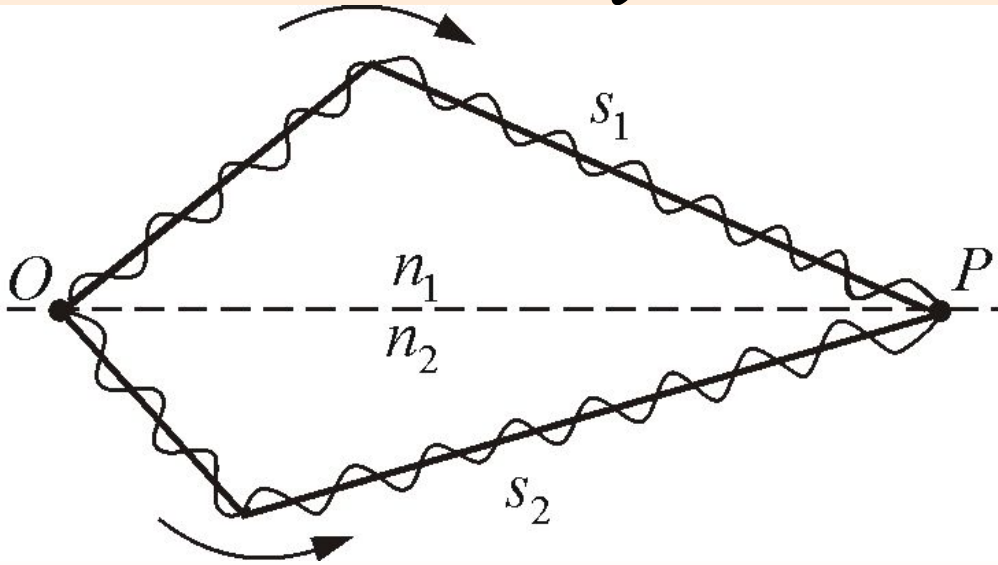
Фазы каждого *цуга волны* никак не связаны друг с другом. Атомы излучают хаотически.

Процесс излучения одного атома длится примерно  $10^{-8}$  с. При этом, длина цуга

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

В одном цуге укладывается примерно  $10^7$  длин волн.

# Условие максимума и минимума интерференции



а первая

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

а вторая

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

разности фаз двух когерентных волн

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

**Оптическая разность хода двух волн:**

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

$L$  – оптическая длина пути.

Если разность хода равна целому числу длин волн в вакууме

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

*условие интерференционного максимума.*

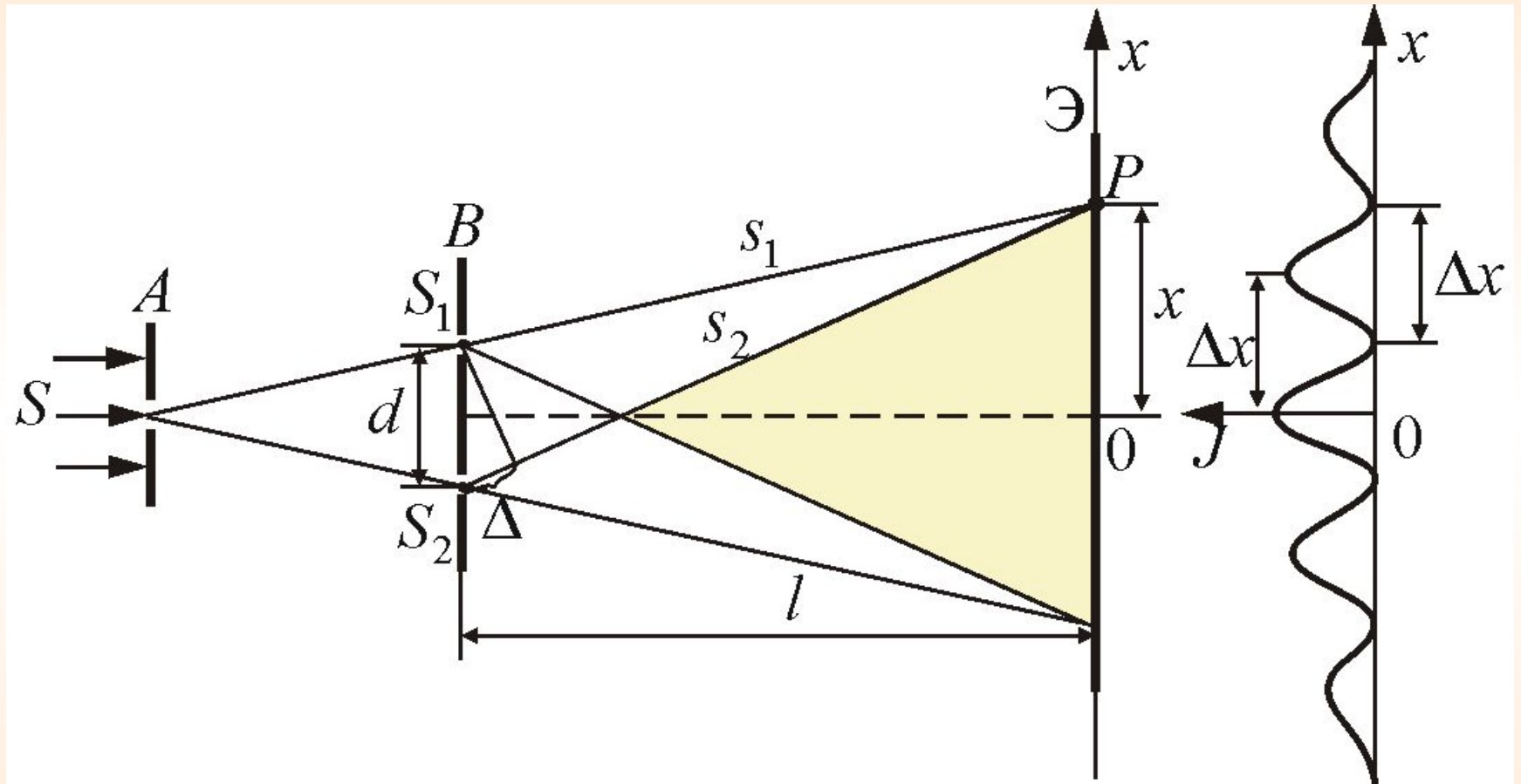
Если оптическая разность хода

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

то  $\delta = \pm(2m + 1)\pi$

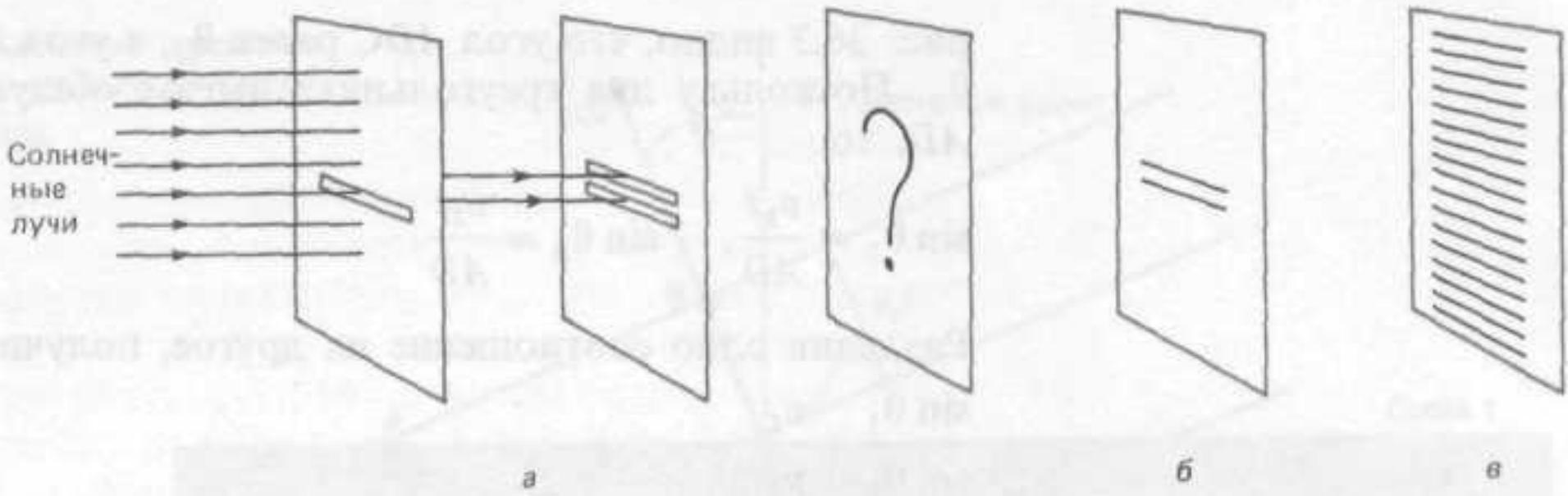
*это - условие интерференционного минимума.*

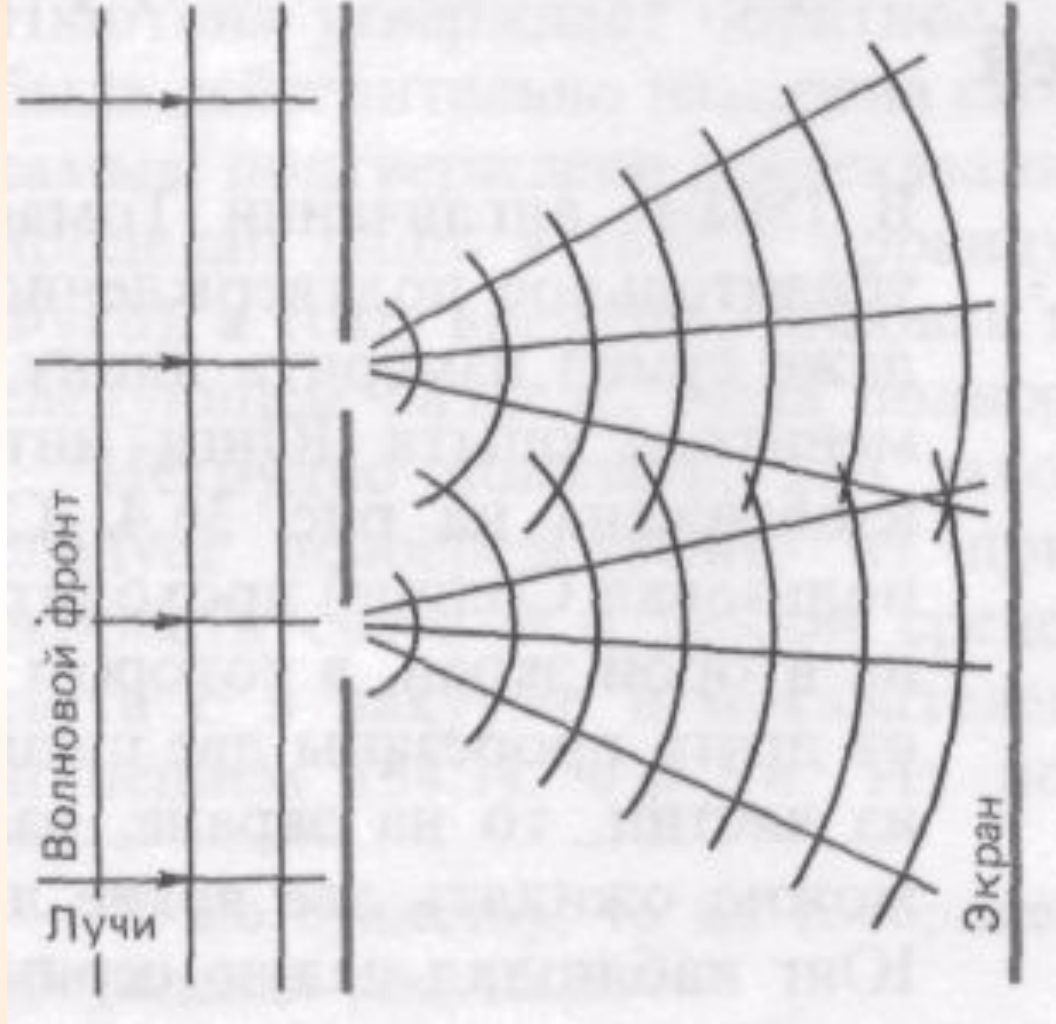
### 3.7. Опыт Юнга



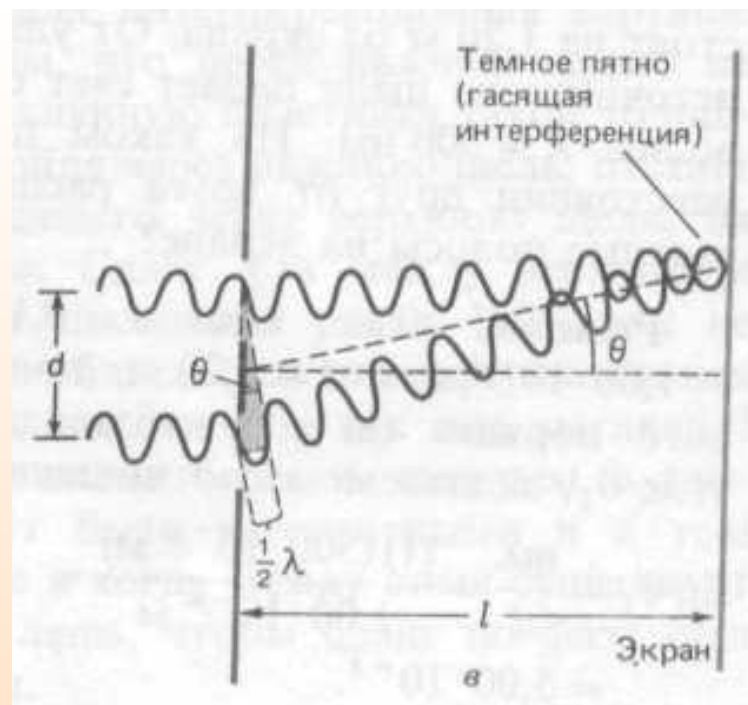
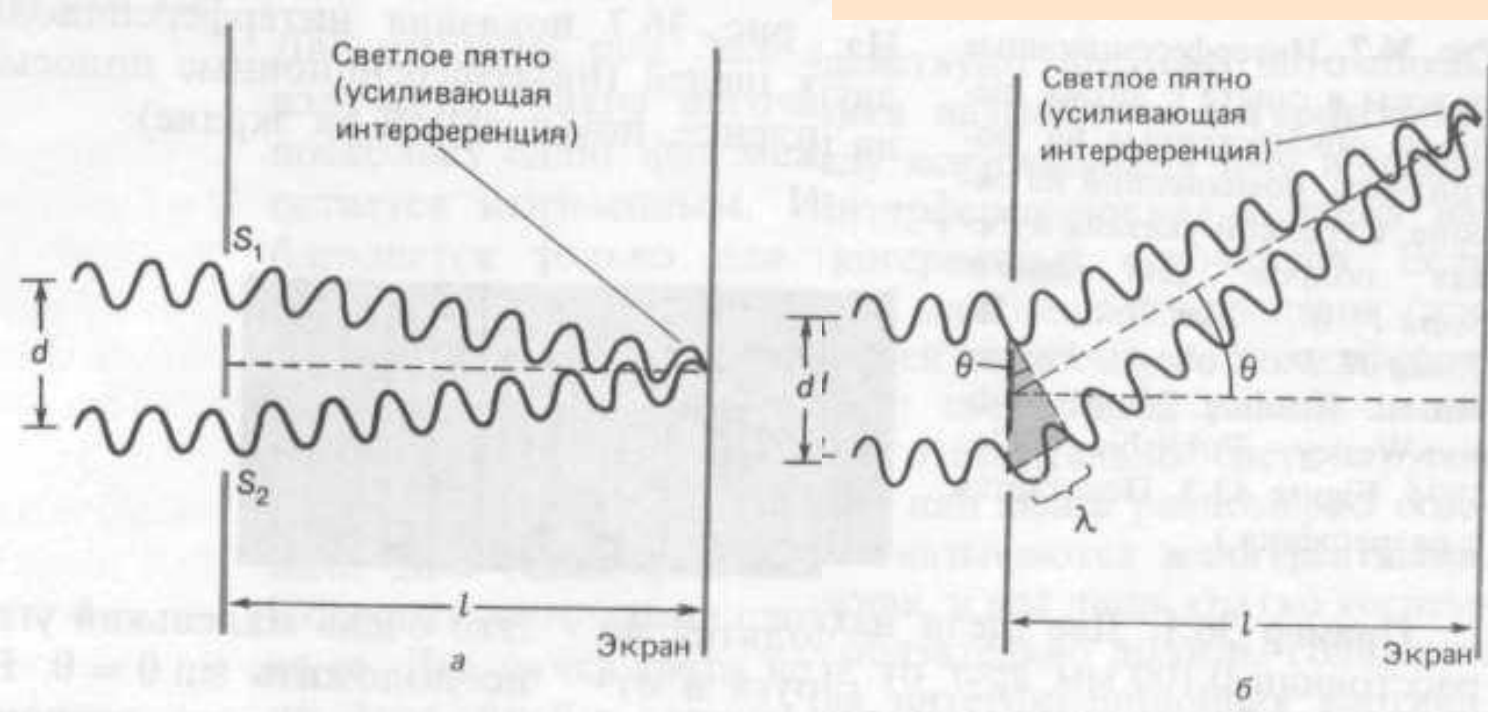
Расстояние  $l$  от щелей, причем  $l \gg d$

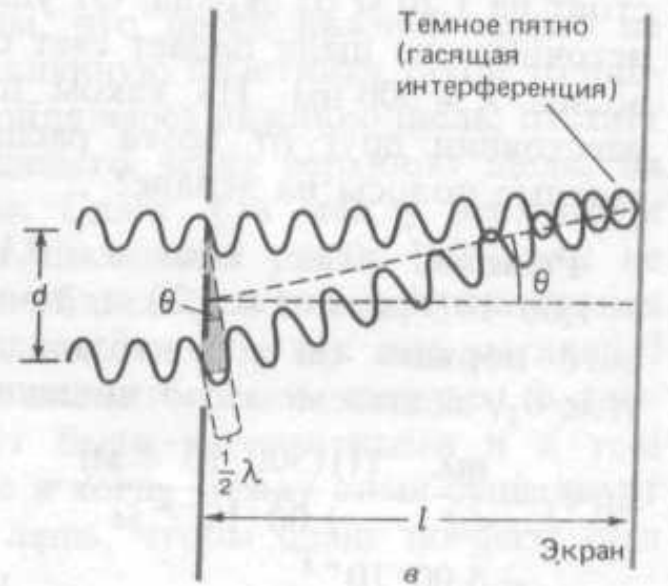
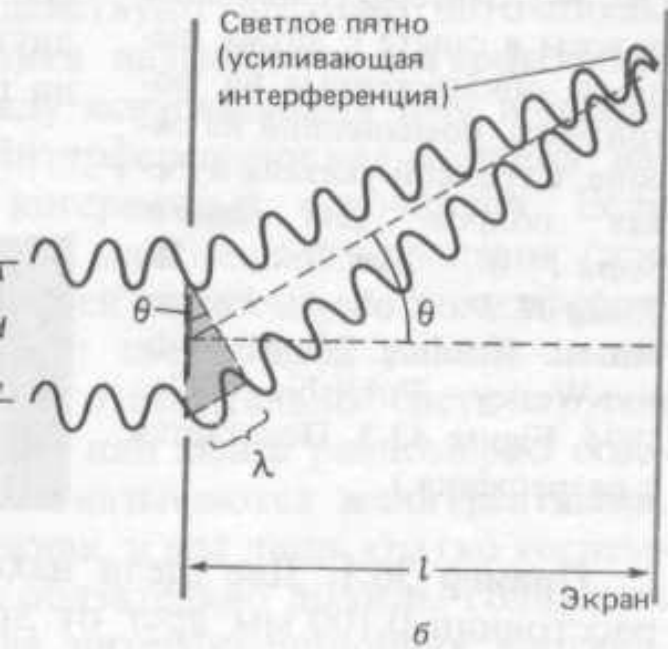
Показатель преломления среды –  $n$ .











В этом случае происходит ослабляющая (гасящая) интерференция и экран оказывается темным. Так образуется серия светлых и темных полос (или *линий*). Определим теперь точное положение светлых линий. Прежде всего заметим, что на рис. а масштаб несколько нарушен. В действительности расстояние  $d$  между щелями очень мало по сравнению с расстоянием  $l$  до экрана. Поэтому лучи от каждой щели, по существу, параллельны, и  $\theta$  - угол, образуемый ими с горизонталью. Из затемненного треугольника на рис. б видно, что дополнительное расстояние, проходимое нижним лучом, равно

$$d \sin \theta$$

**максимумы** интенсивности будут наблюдаться в случае, если

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

а **минимумы** – в случае, если

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

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

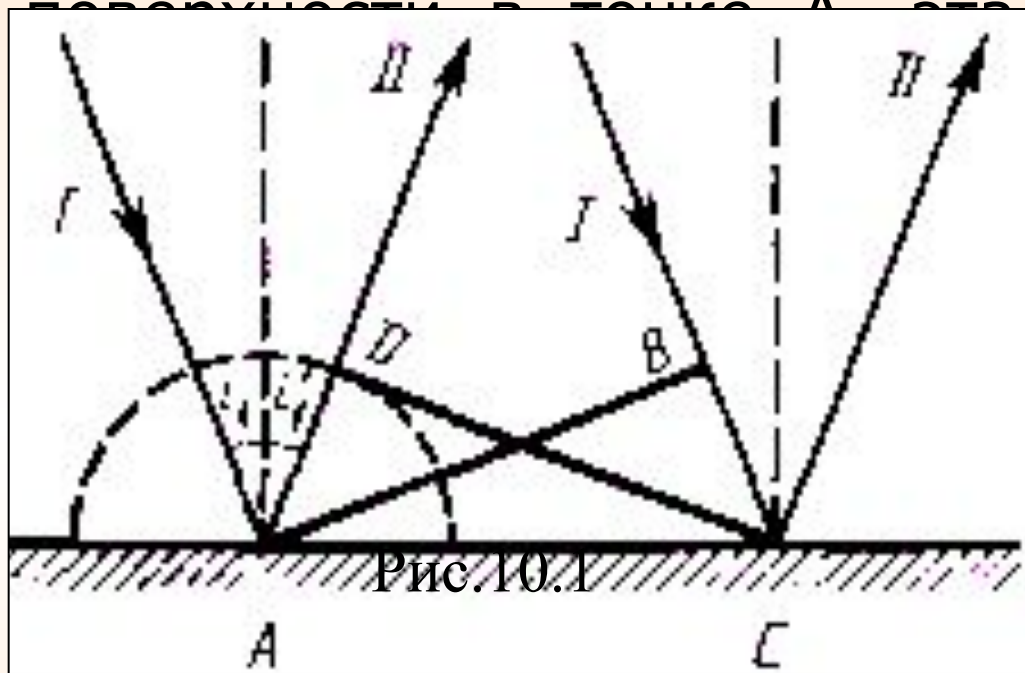
$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0$$

**ширина интерференционной полосы.**

*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.*

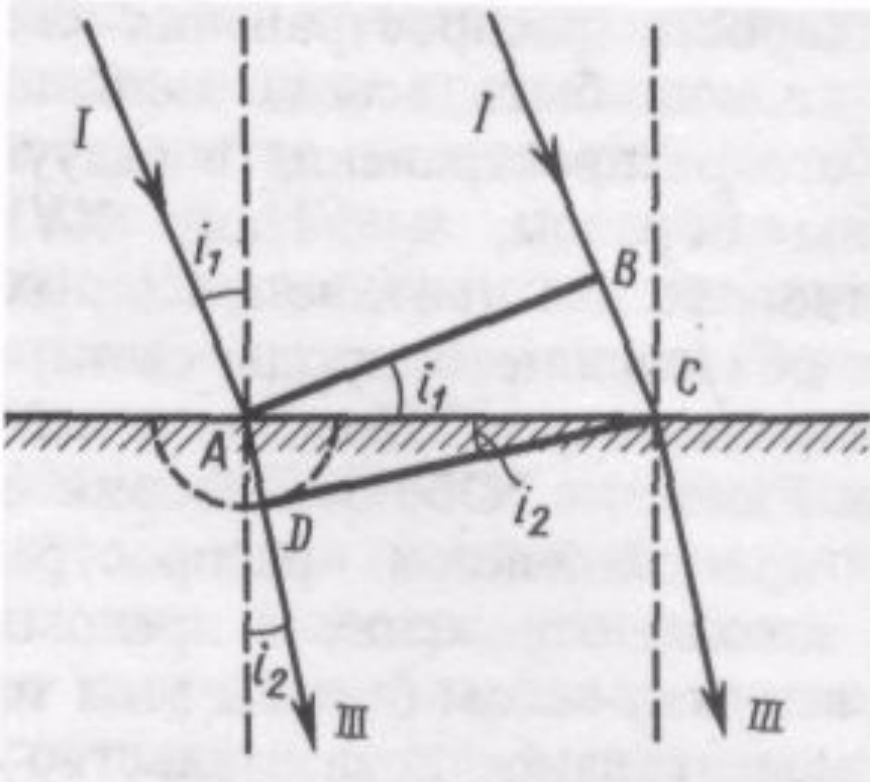
# Принцип Гюйгенса и законы геометрической оптики

Когда фронт волны достигнет отражающей поверхности в точке  $A$ , эта точка начнет излучать



Для прохождения волной расстояния  $BC$  требуется время  $\Delta t = BC/u$ . За это же время фронт вторичной волны достигнет точек полусферы, радиус  $AD$  которой равен  $u\Delta t = BC$ . Положение фронта

отраженной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью  $DC$ , а направление распространения этой волны — лучом  $I'$ . Из равенства треугольников  $ABC$  и  $ADC$  вытекает закон отражения: угол отражения  $i'1$  равен углу падения  $i1$ .



Для вывода закона преломления предположим, что плоская волна (фронт волны — плоскость  $AB$ ), распространяющаяся в вакууме вдоль направления  $I$  со скоростью света  $c$ , падает на границу раздела со средой, в которой скорость ее распространения равна  $u$ .

Пусть время, затрачиваемое волной для прохождения пути  $BC$ , равно  $\Delta t$ . Тогда  $BC = c\Delta t$ . За это же время фронт волны, возбуждаемой точкой  $A$  в среде со скоростью  $v$ , достигнет точек полусферы, радиус которой  $AD = v\Delta t$ . Положение фронта преломленной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью  $DC$ , ее распространения - лучом  $III$ .

$$AC = BC/\sin i_1 = AD/\sin i_2,$$

т. е.  $c \Delta t/\sin i_1 = v \Delta t/\sin i_2,$

Из рисунка следует, что

## 3.8 Методы наблюдения интерференции

### Опыт Юнга

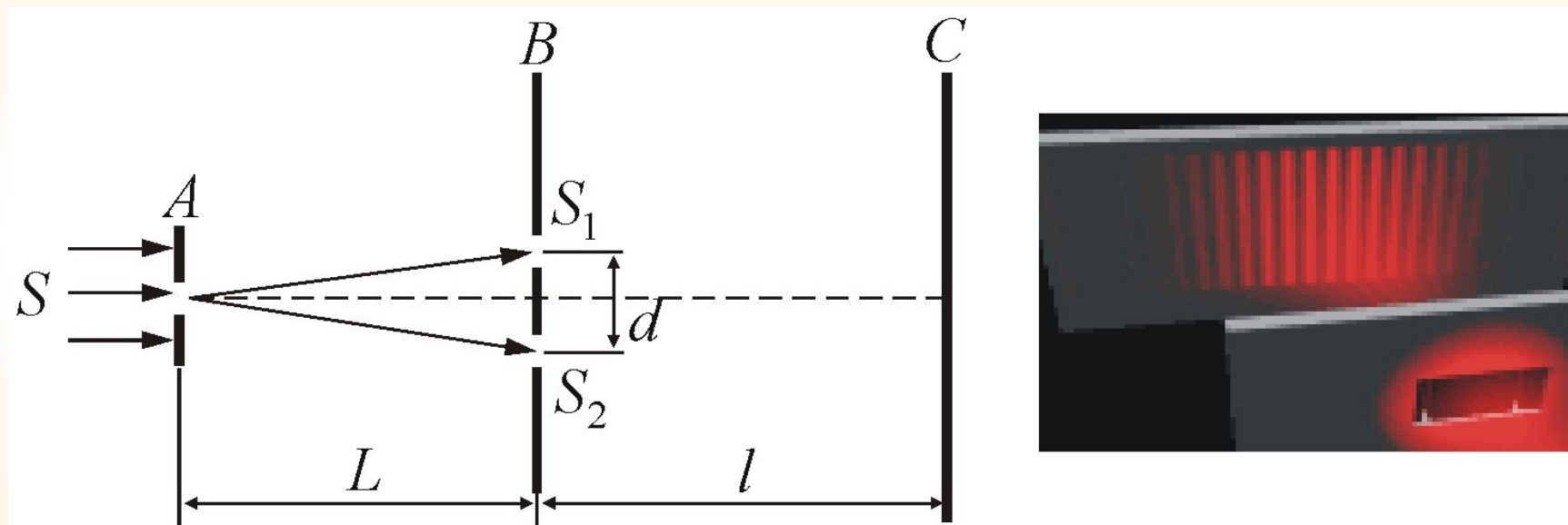


Рисунок 7.5

# Зеркала Френеля

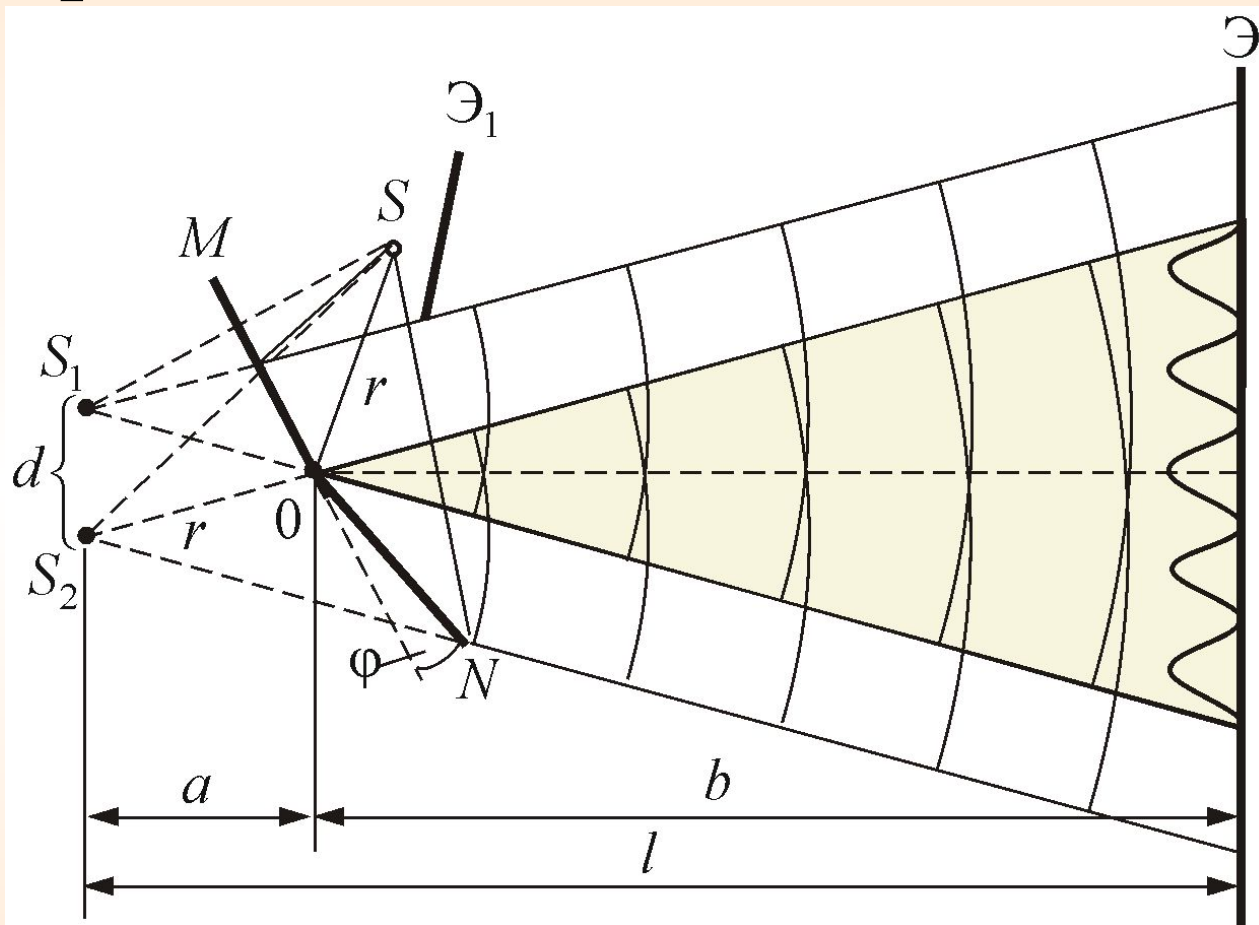


Рисунок 7.6



# Бипризма Френеля

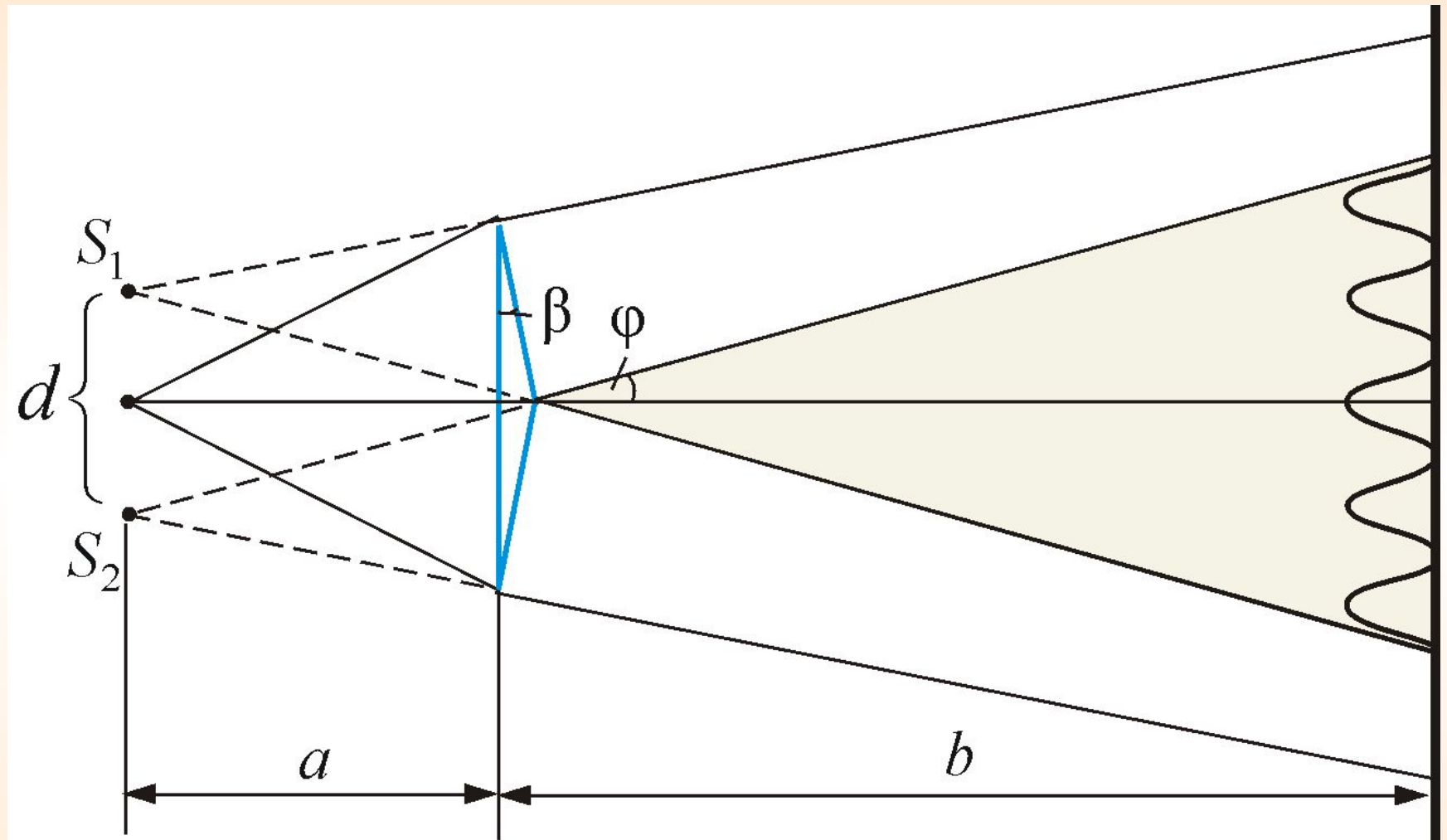


Рисунок 7.7

# *Билинза Бийе*

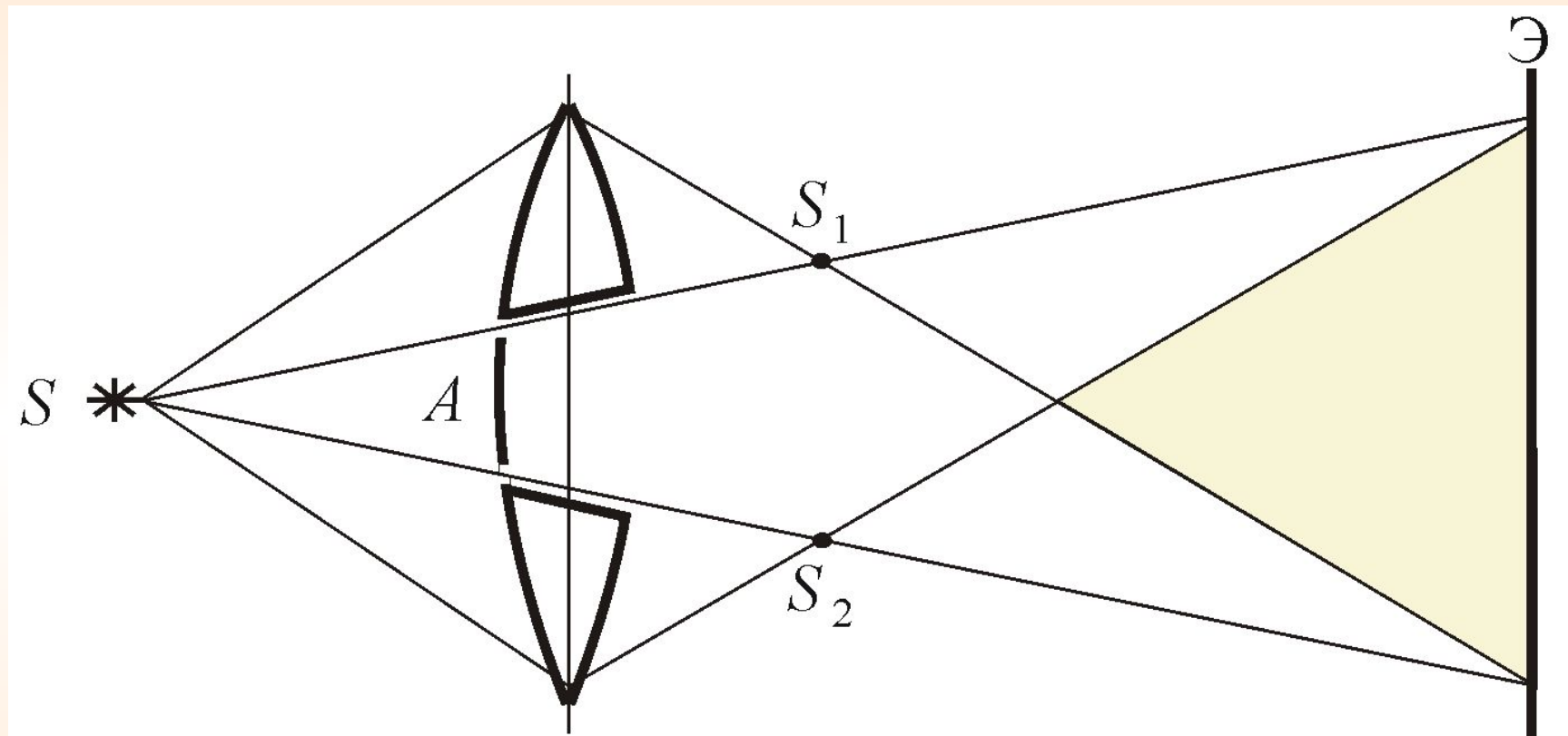
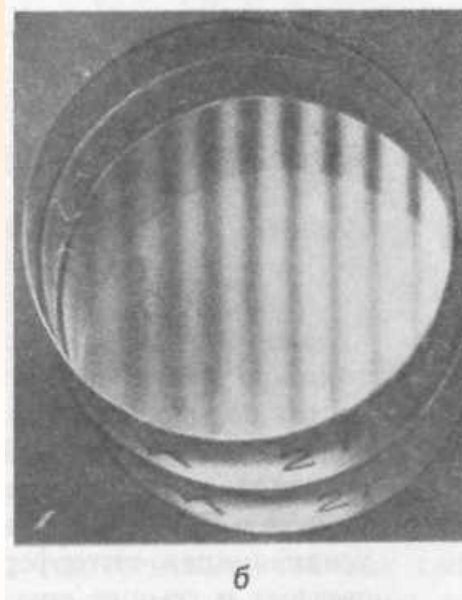
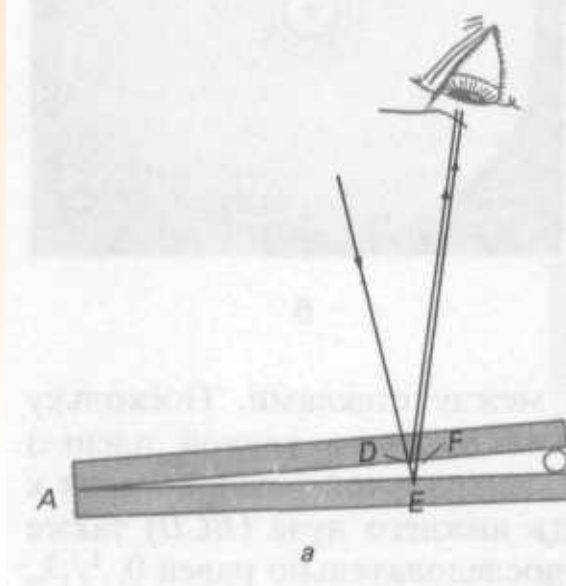


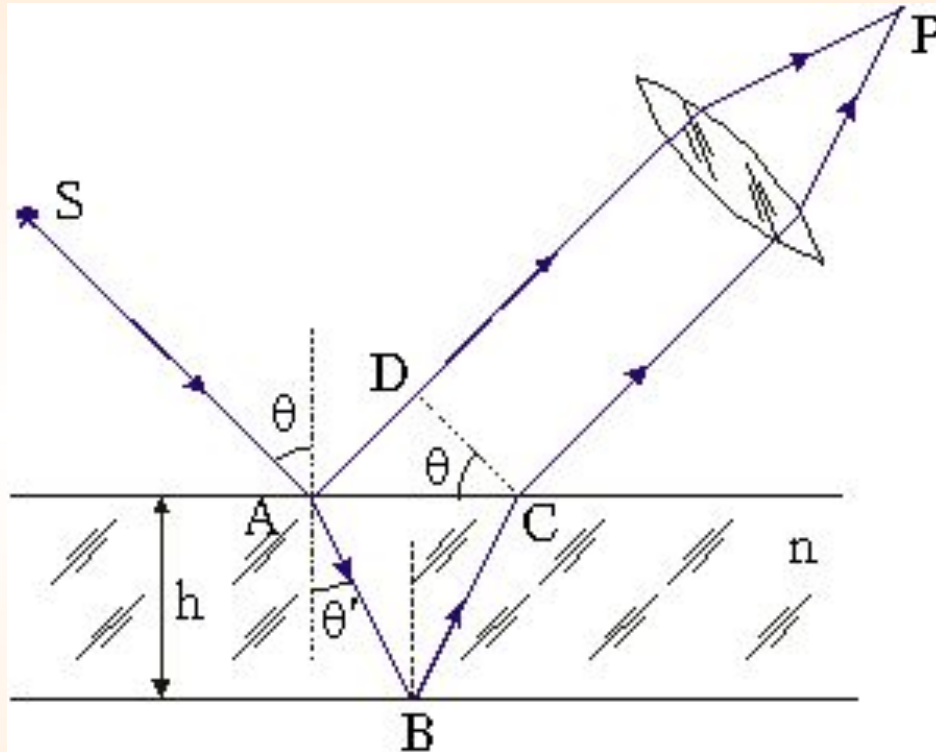
Рисунок 7.8

## 3.9 Интерференция в тонких пленках

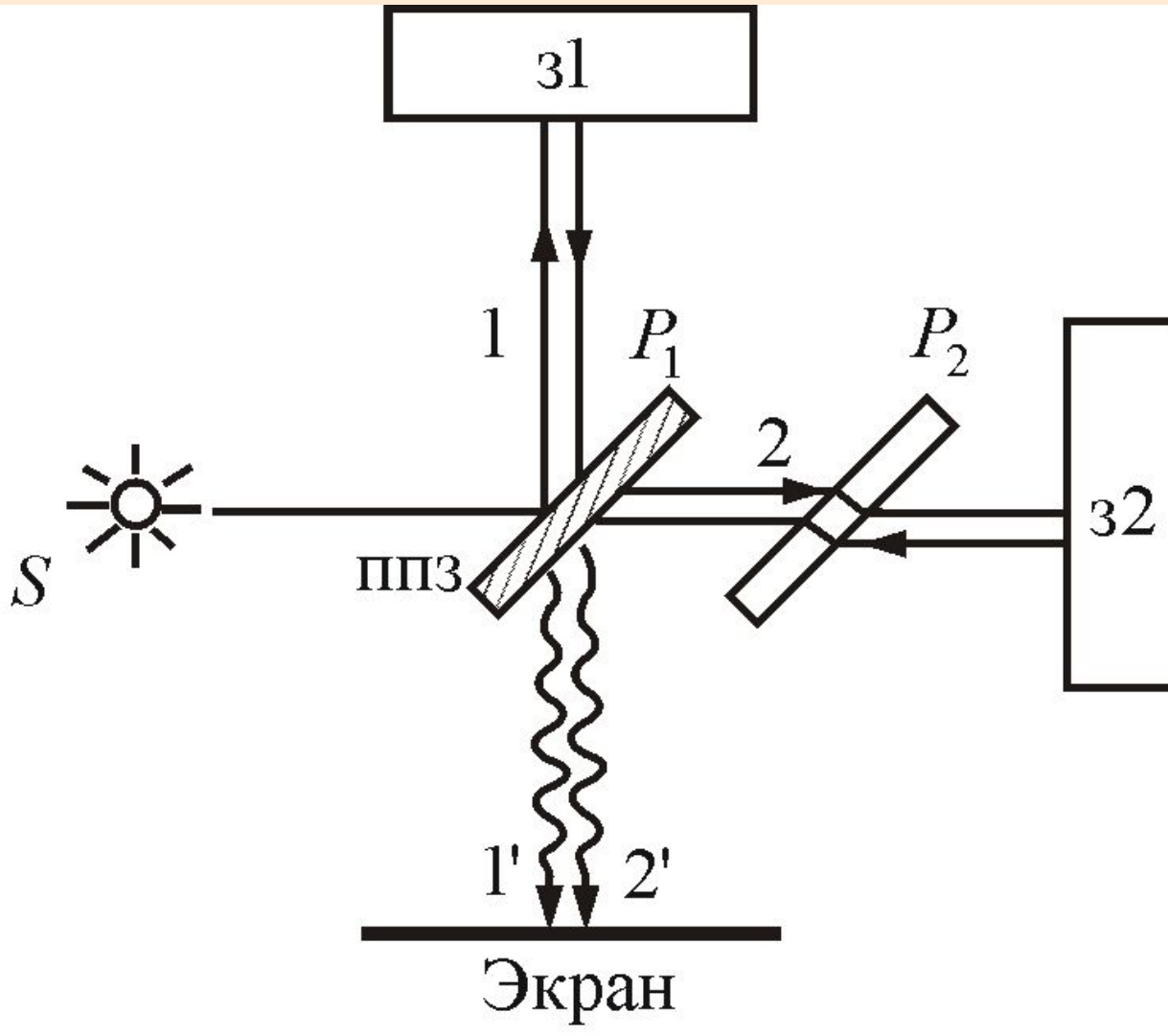


*a* - световые лучи, отражаясь от верхней и нижней поверхностей тонкого воздушного клина, интерферируют и образуют светлые и темные полосы: *б* - интерференционная картина, наблюдаемая в случае оптически плоских стеклянных пластин; *в* - интерференционная картина, наблюдаемая в случае неплоских пластин.

# *Полосы равного наклона*



*интерференционные полосы равного наклона.*



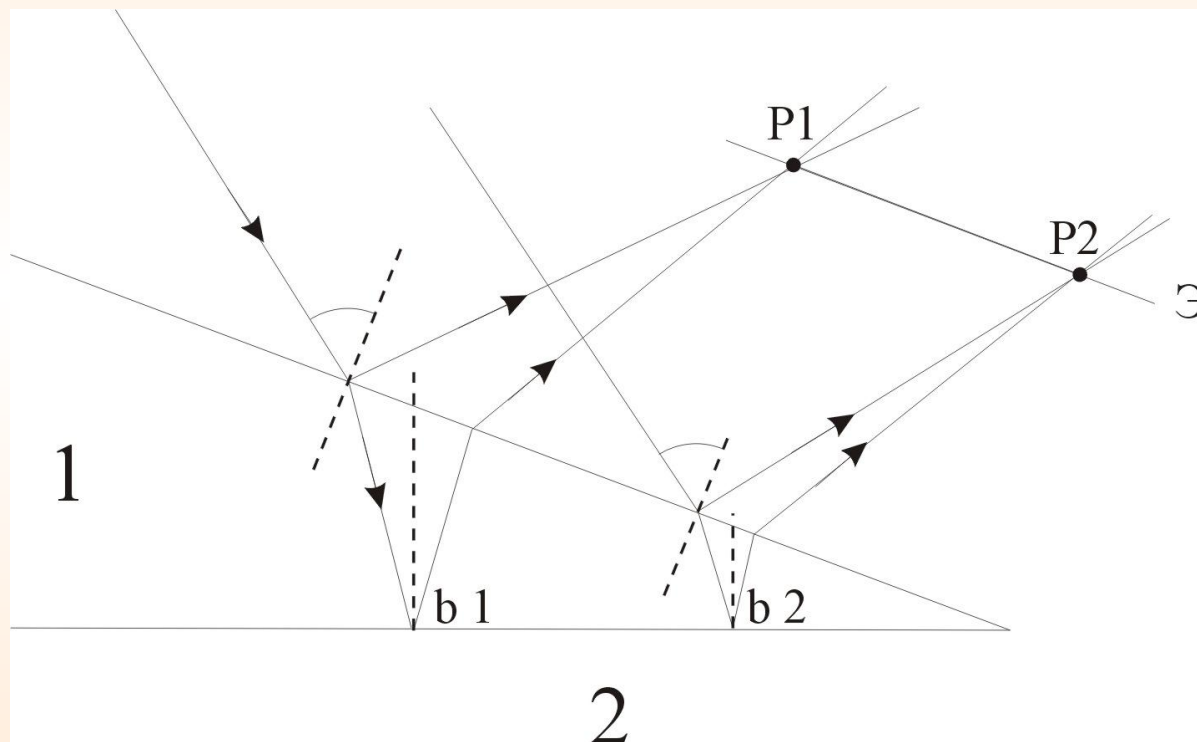
Для наблюдения  
полос равного  
наклона вместо  
плоскопараллель  
ной пластинки  
удобно  
использовать  
*интерферометр  
Майкельсона*

Рисунок 7.11

## *Интерференция от клина. Полосы равной толщины*

В белом свете интерференционные полосы окрашены. Поэтому такое явление называют *цветами 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.

# *Полосы равной толщины*





## *Кольца Ньютона*

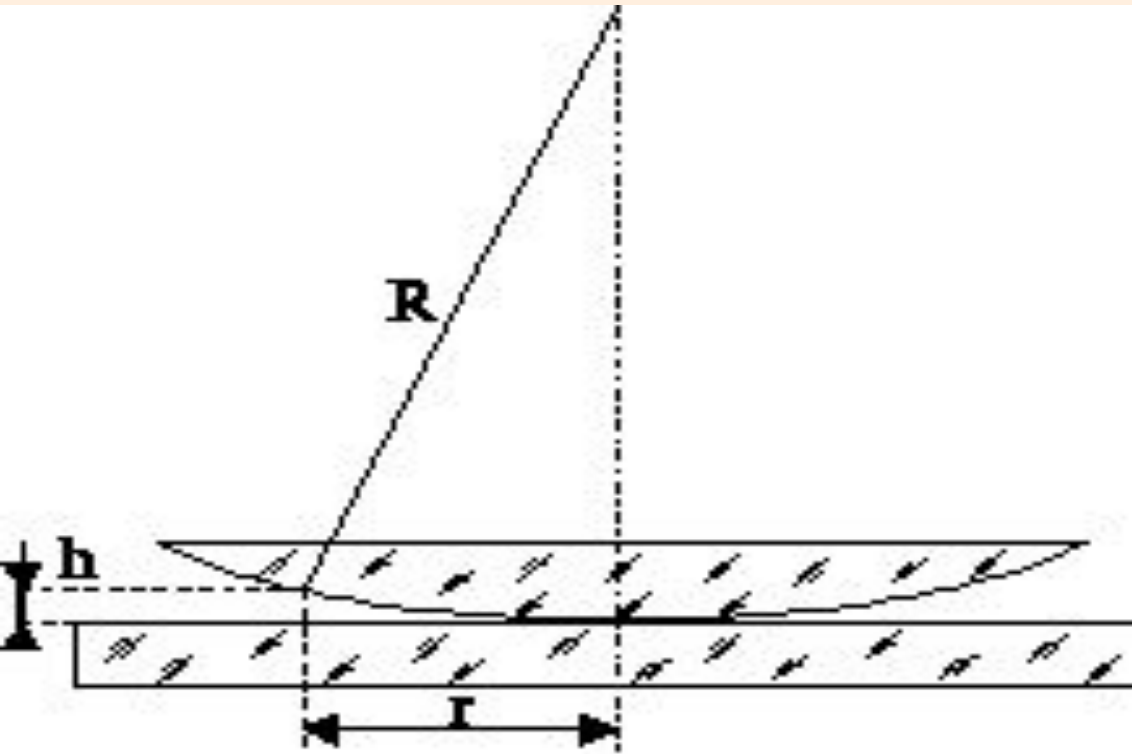
*Кольцевые полосы  
равной толщины,  
наблюдаемые в  
воздушном зазоре*

*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



$r_m = \sqrt{mR\lambda}$  радиус  $m$ -го темного кольца

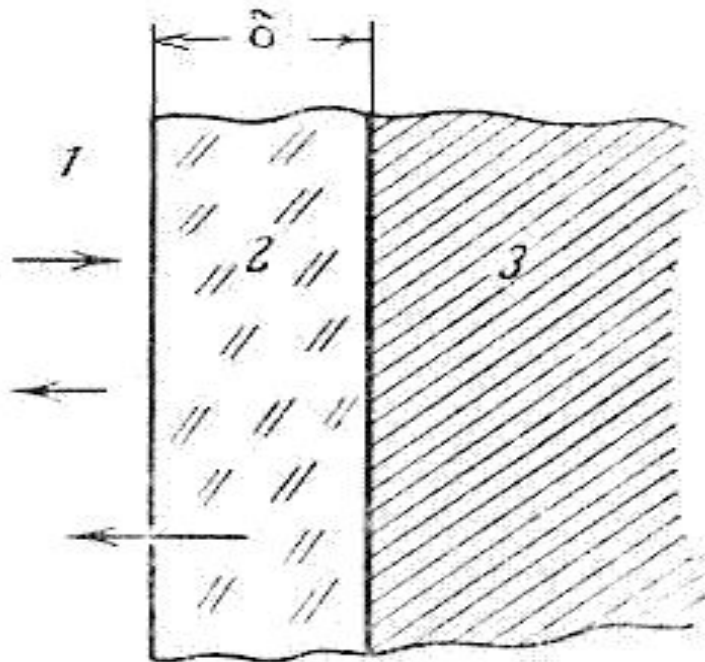
Итак: *полосы равного наклона* получаются при освещении пластинки постоянной толщины ( $b = \text{const}$ ) *рассеянным светом* в котором содержатся лучи разных направлений. *Полосы равной толщины* наблюдаются при освещении пластинки переменной толщины (клина) ( $b \neq \text{const}$ ) *параллельным пучком света*.

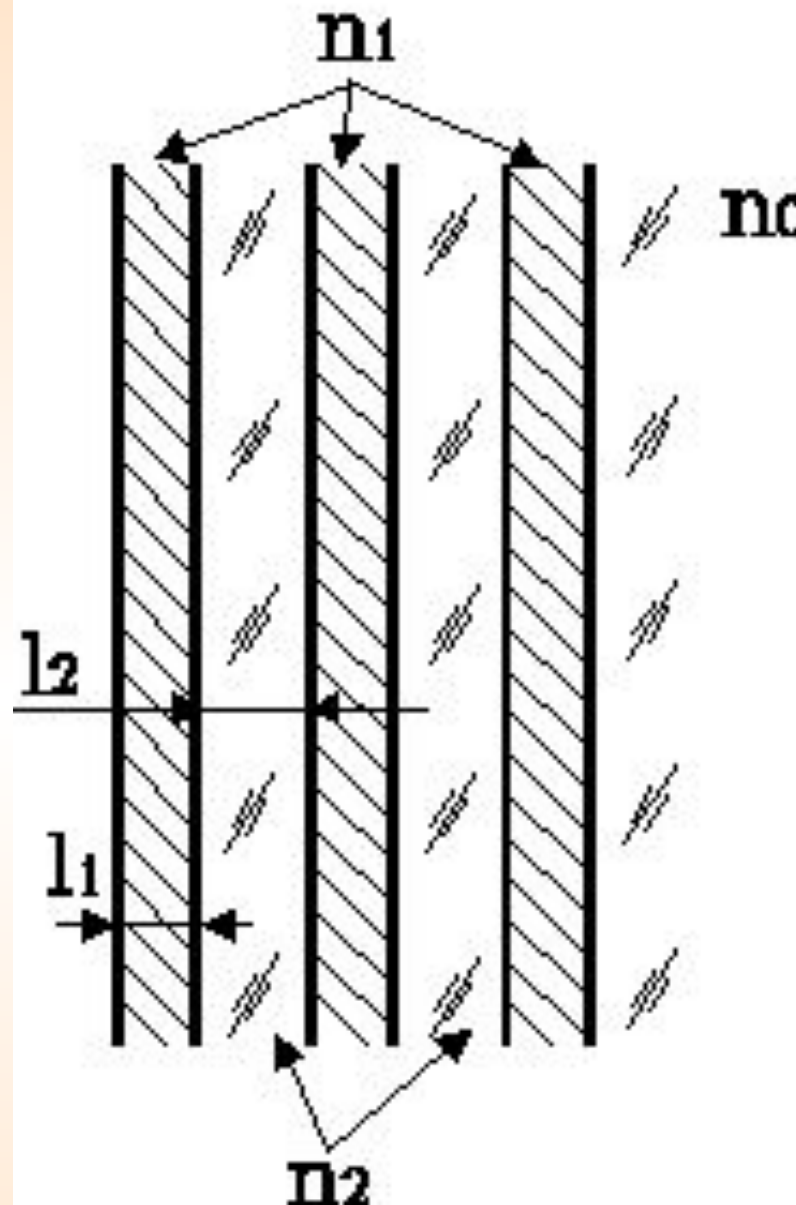
## 3.10 Применение интерференции света

- 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*).

- Кроме того, по интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды (в т.ч. фазовые), в которой распространяются волны, или отклонения формы поверхности от заданной.
- Явление интерференционных волн, рассеянных от некоторого объекта (или прошедших через него), с «опорной» волной лежит в основе *голографии* (в т.ч. оптической, акустической или СВЧ-голографии).

- Интерференционные волны от отдельных «элементарных» излучателей используется при создании сложных излучающих систем (антенн) для электромагнитных и акустических волн.
- *Просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.*





$$\delta = (2m + 1)\lambda / 4$$

- *Получение высокоотражающих электрических зеркал*

Для получения коэффициента отражения  $R = 0,99$  (такие зеркала используются в лазерных резонаторах) надо нанести 11 – 13 слоев.

# КОНЕЦ ЛЕКЦІИ

