

понедельник, 31 октября  
2016 г.

# Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика

Кузнецов Сергей Иванович  
доцент кафедры  
ОФ ЕНМФ ТПУ

## **Тема 8 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА**

**8.1 Интерференция световых волн**

**8.2 Опыт Юнга**

**8.3 Когерентность и  
монохроматичность**

**8.4 Методы наблюдения  
интерференции**

**8.5 Интерференция в тонких пленках**

**8.6 Применение интерференции  
света**

**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.

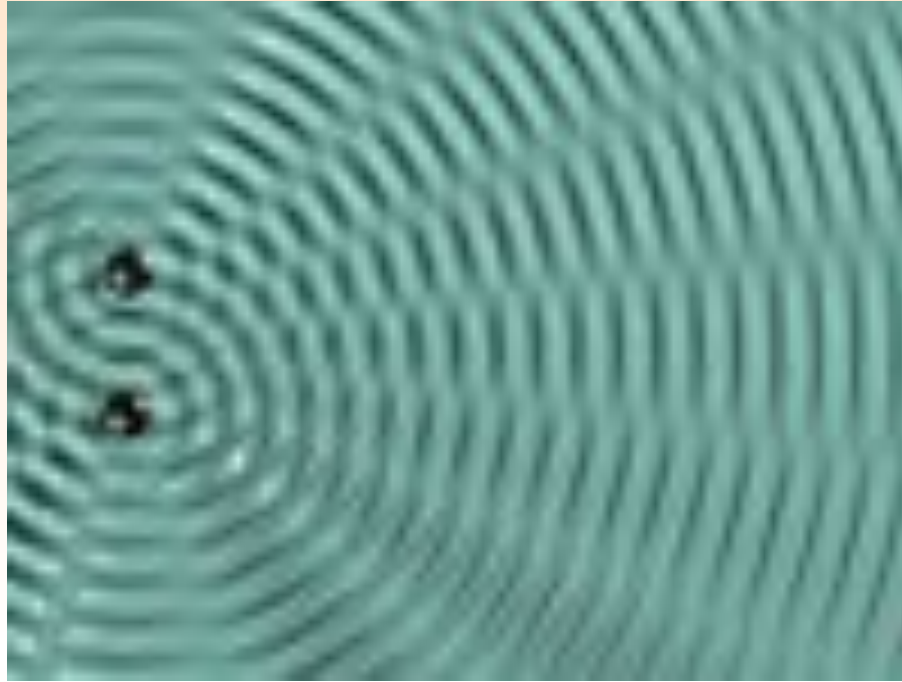
Интерференцией света объясняются окраска тонких масляных пленок на поверхности воды, металлический отлив в окраске крыльев насекомых и птиц, появление цветов побежалости на поверхности металлов, голубоватый цвет просветленных линз оптических приборов и пр.

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.



## **Интерференция двух волн на поверхности жидкости, возбуждаемых вибрирующими стержнями**

Волны распространяются в противоположных направлениях и интерферируют с образованием стоячей волны. Красный шарик расположен в пучности стоячей волны и колеблется с максимальной амплитудой. Параллелепипед расположен в узле интерференционной картины и амплитуда его колебаний равна нулю (он совершает лишь вращательные движения, следуя наклону волны)



## **Интерференция поверхностных волн от двух точечных источников**

В точках, для которых  $r_2 - r_1 = \lambda (1/2 + n)$ , поверхность жидкости не колеблется  
(узловые точки (линии))



### **Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки**

Расстояние от источника до стенки  $r$  кратно целому числу полуволн, исходная круговая волна интерферирует с волной, отражённой от стенки. Согласно пр. Гюйгенса, **отражённая волна совпадает с той, которая бы возбуждалась фиктивным точечным источником, расположенным по другую сторону стенки симметрично реальному источнику**. Т.к.  $r$  кратно целому числу полуволн, то справа от источника на оси соединяющей фиктивный и реальный источник разность фаз будет кратна целому числу волн, и круговая волна накладывается **в фазе с волной**, отражённой от стенки, увеличивая высоту гребней в интерференционной картине



### **Интерференция круговой волны в жидкости с её отражением от стенки**

Расстояние между точечным источником и стенкой кратно целому числу полуволн плюс четверть волны. При этом справа от источника круговая волна накладывается в противофазе с волной, отражённой от стенки. В результате в широкой полосе справа от источника колебания жидкости отсутствуют

## 8.1 Интерференция световых волн

***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:

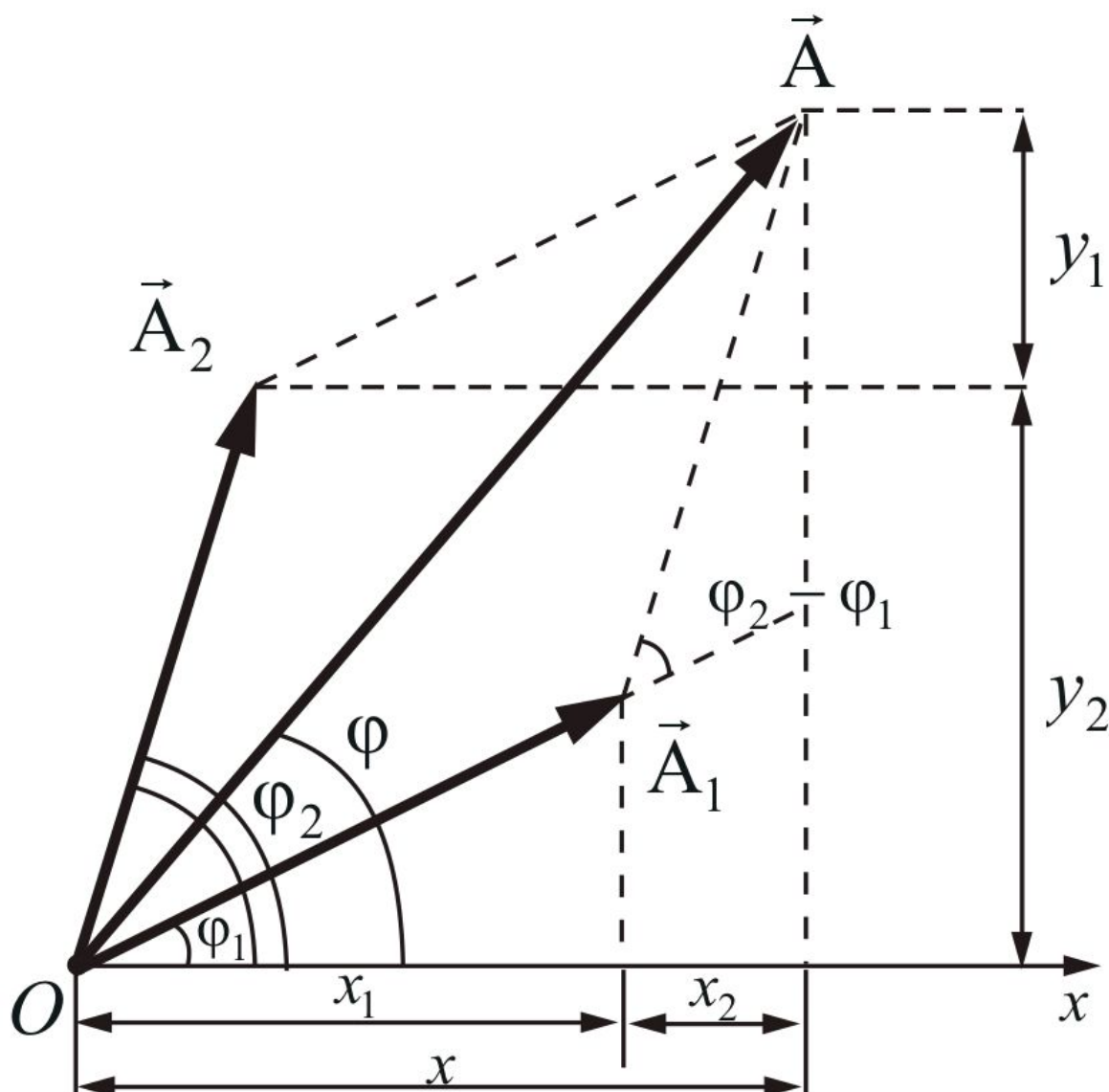
$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$



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

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

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



результатирующего  
колебания при  
сложении колебаний  
направленных вдоль  
одной прямой

$Ox$  – опорная прямая

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

*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:

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

Последнее слагаемое в этом выражении

$2\sqrt{J_1 J_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$  - *интерференционный член*.

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

$\cos(\varphi_2 - \varphi_1) > 0$   $J > J_1 + J_2$ ; **в максимуме**,

$$J = 4J_1$$

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

$J < J_1 + J_2$ ; **в минимуме**  $J = 0$

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

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

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.

Одной из важных характеристик наблюдаемой интерференционной картины является **видность  $V$** , которая характеризует контраст интерференционных полос:

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

где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения интенсивности в интерференционной картине.

При интерференции **монохроматических** волн **видность  $V$**  зависит только от соотношения интенсивностей интерферирующих пучков света :

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2}$$

# Рассмотрим интерференцию двух когерентных волн:

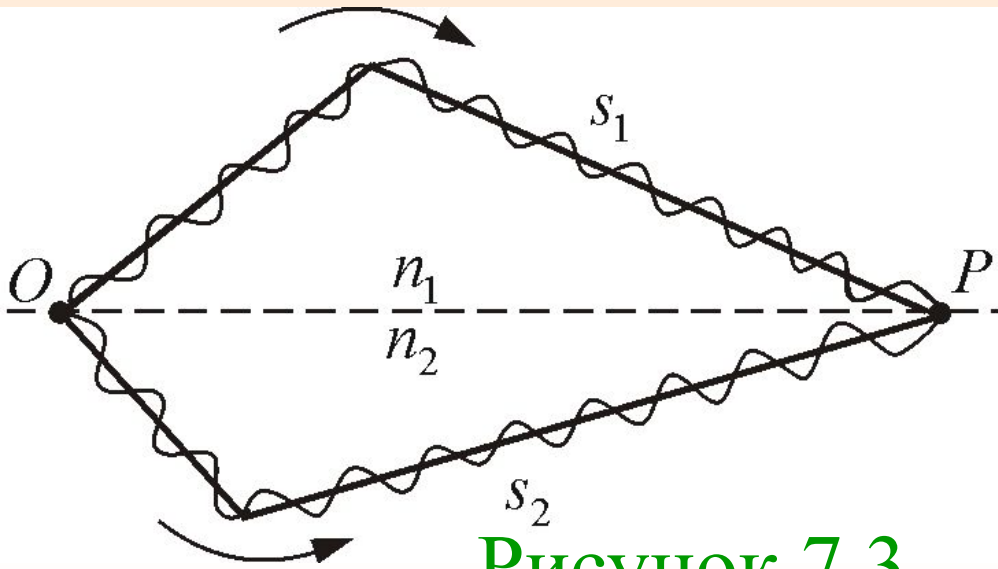


Рисунок 7.3

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*

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.3)$$

*- условие интерференционного максимума.*

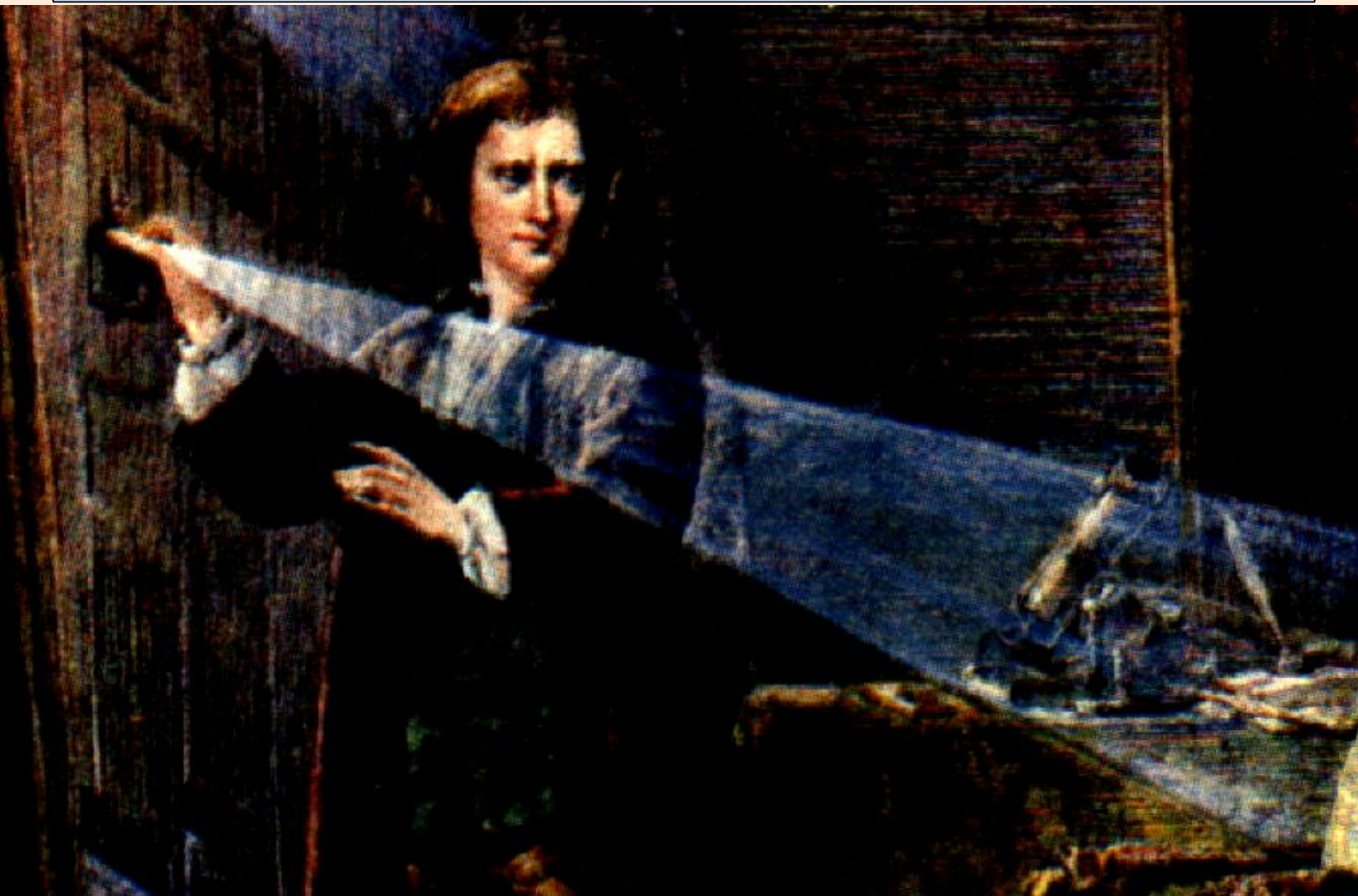
• *Если оптическая разность хода равна полуцелому числу длин волн*

$$\Delta = \pm(2m + 1)\frac{\lambda_0}{2} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (7.2.4)$$

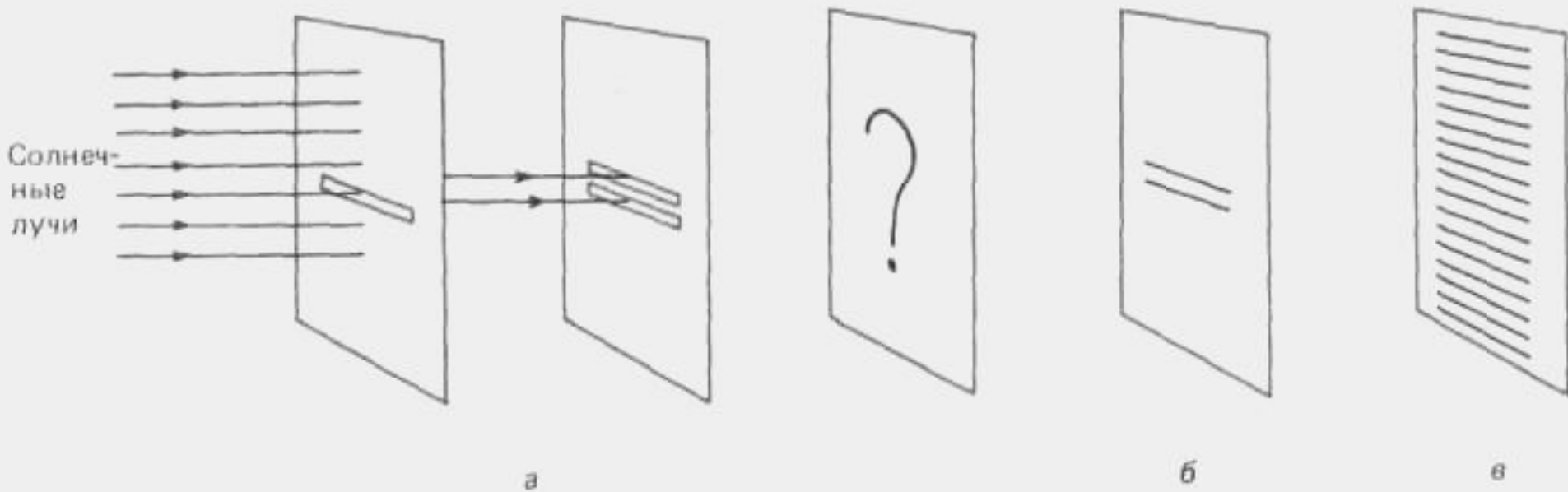
*- условие интерференционного минимума.*



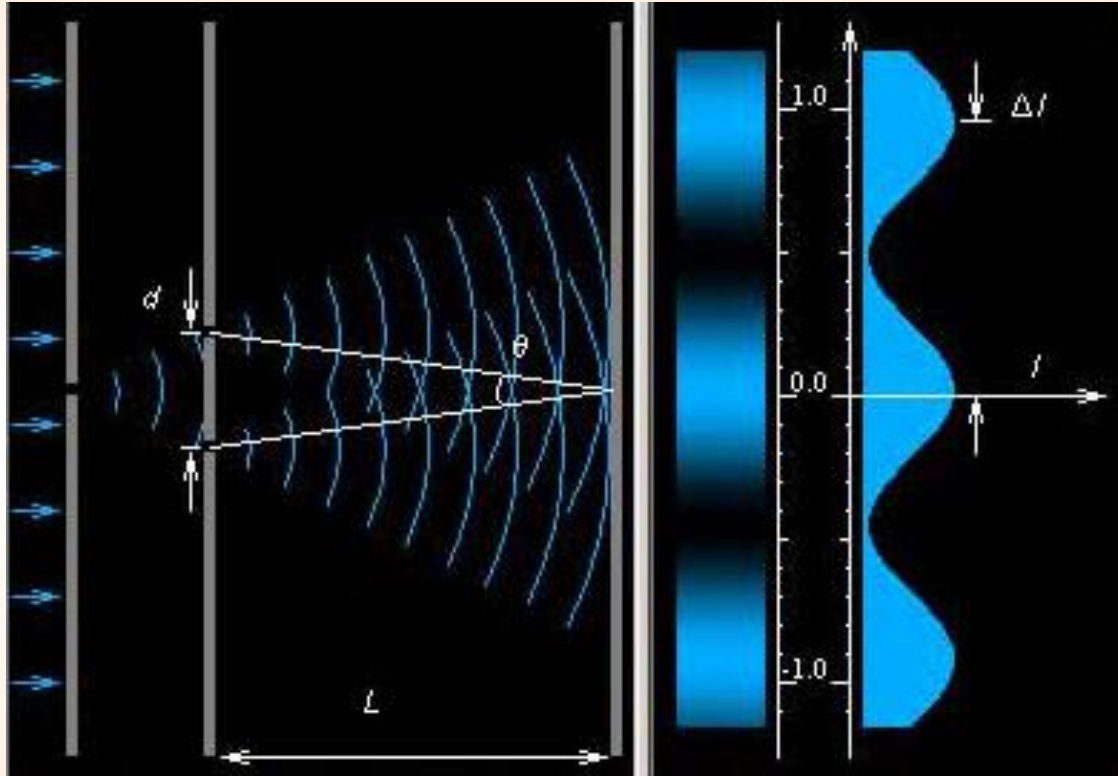
## 8.2 Опыт Юнга



# Опыт Юнга



# 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, интерферируют на третьем экране.

# Опыт Юнга

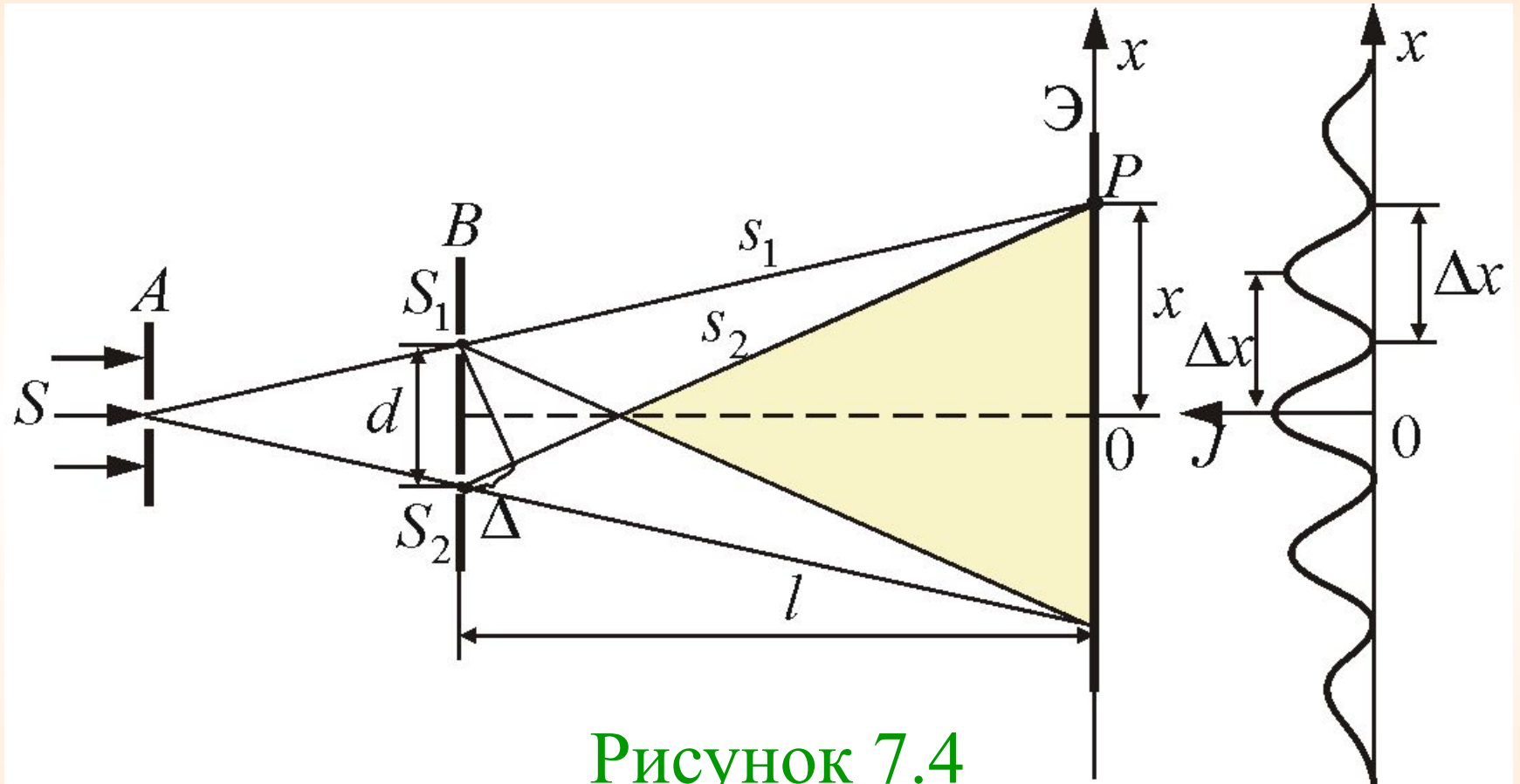
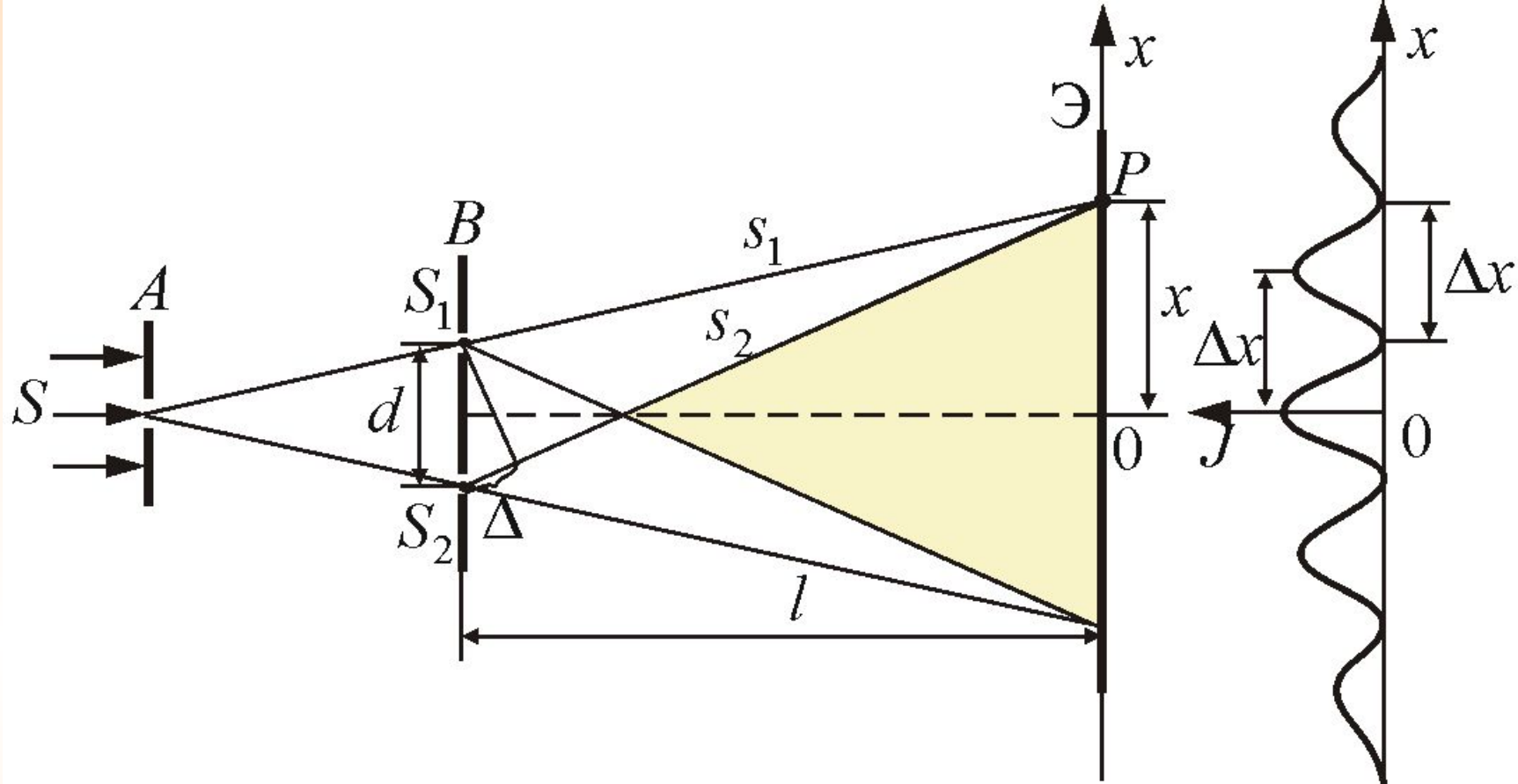


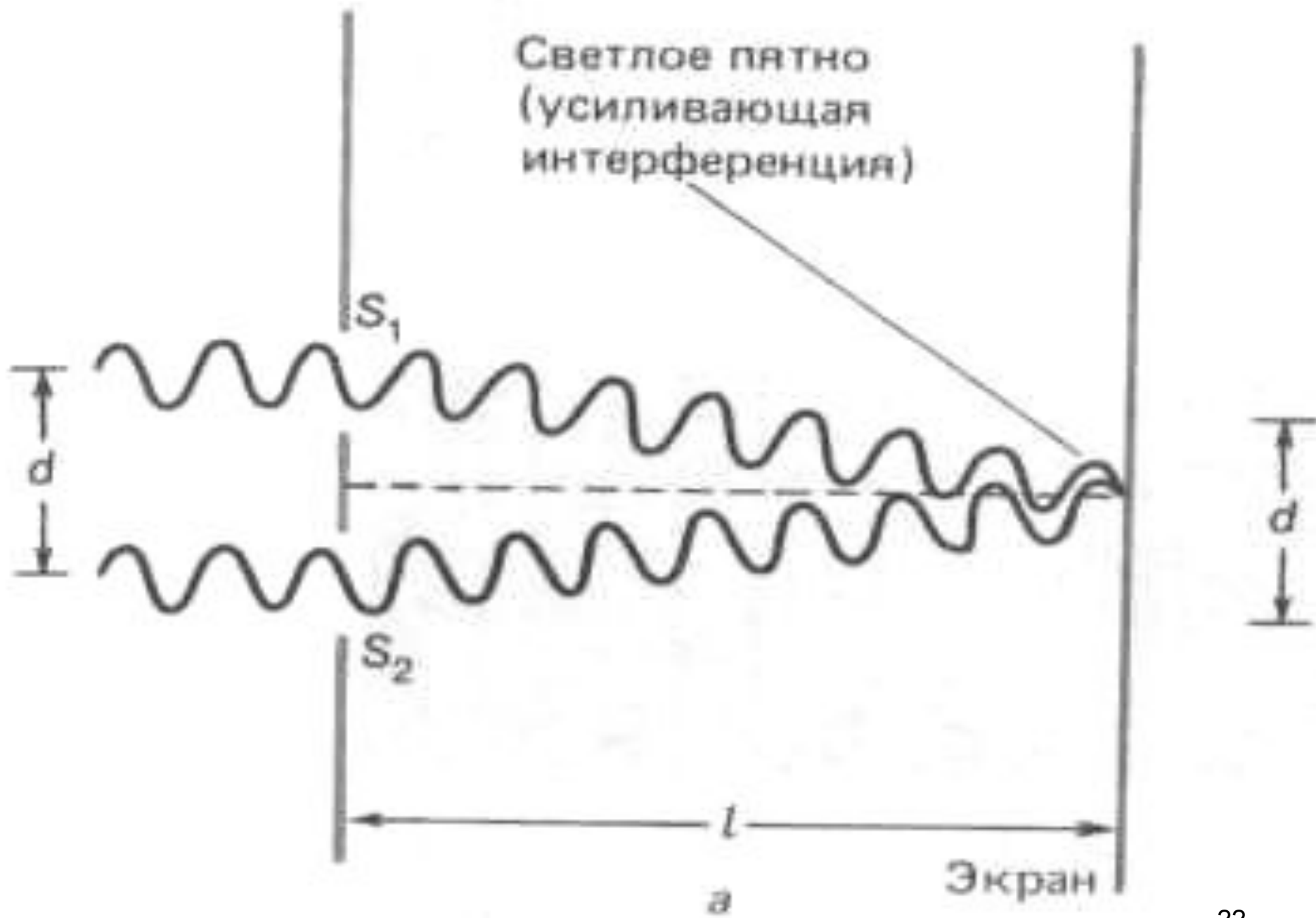
Рисунок 7.4

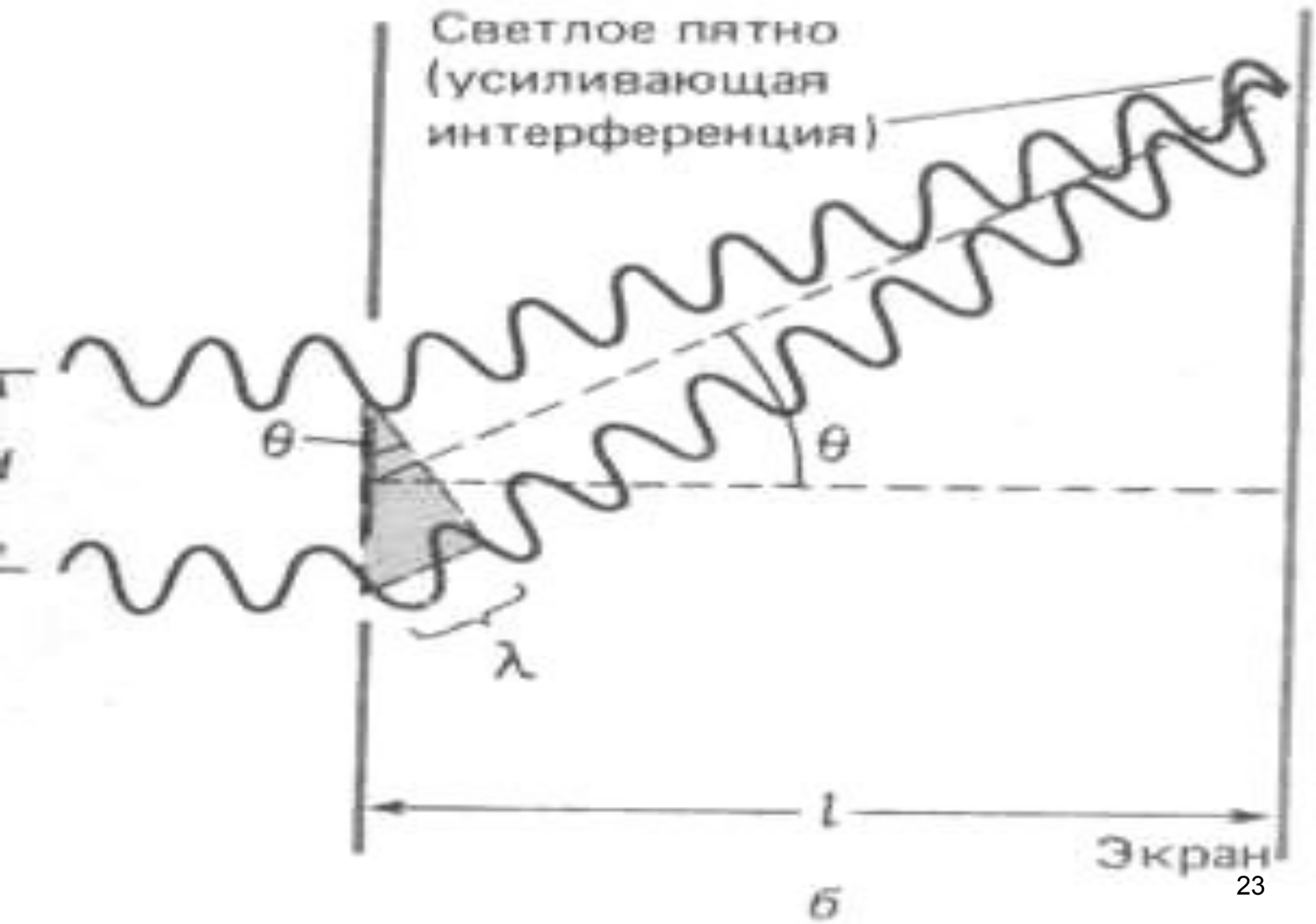
Расстояние  $l$  от щелей, причем  $l \gg d$

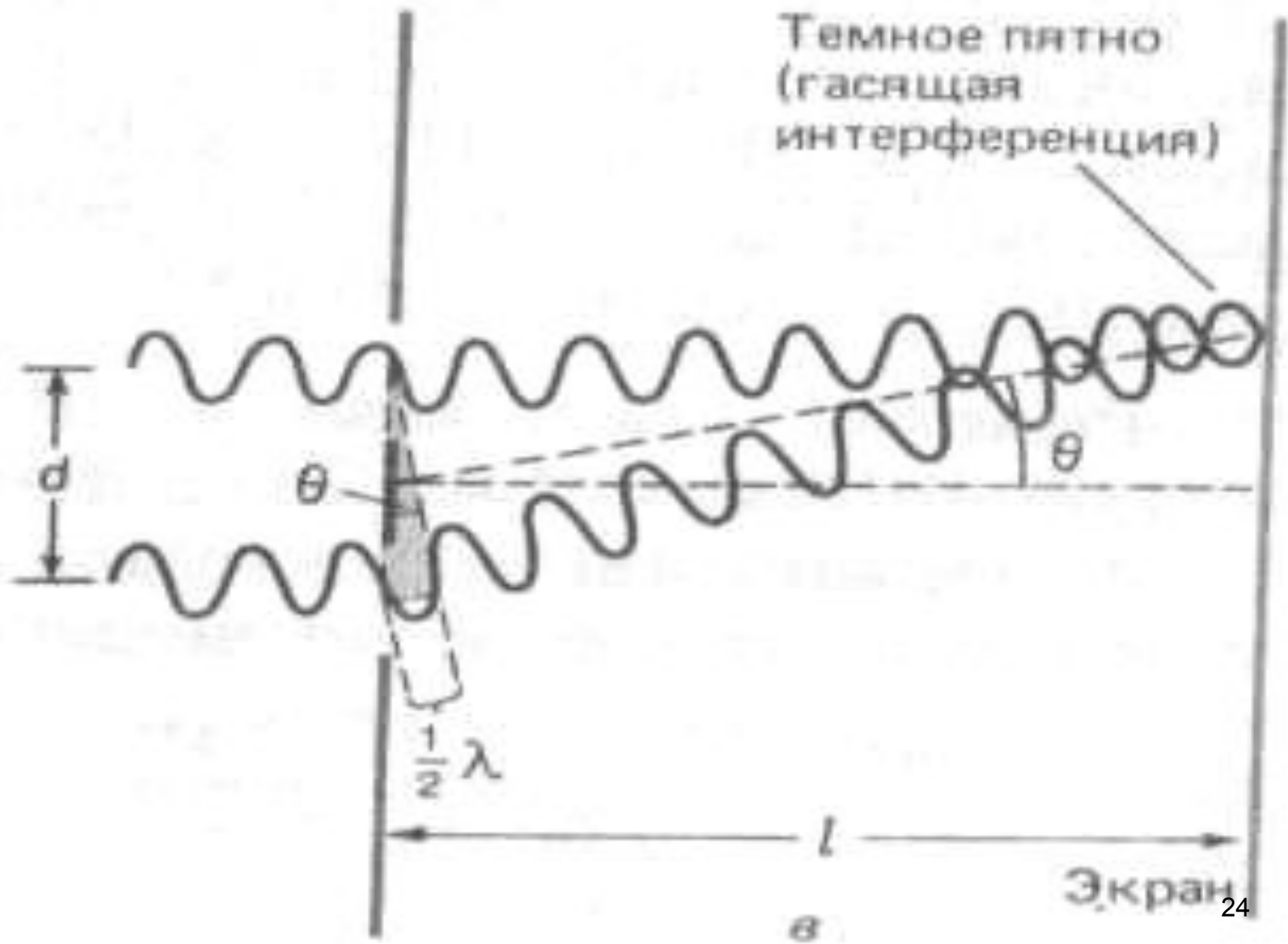
Показатель преломления среды –  $n$ .



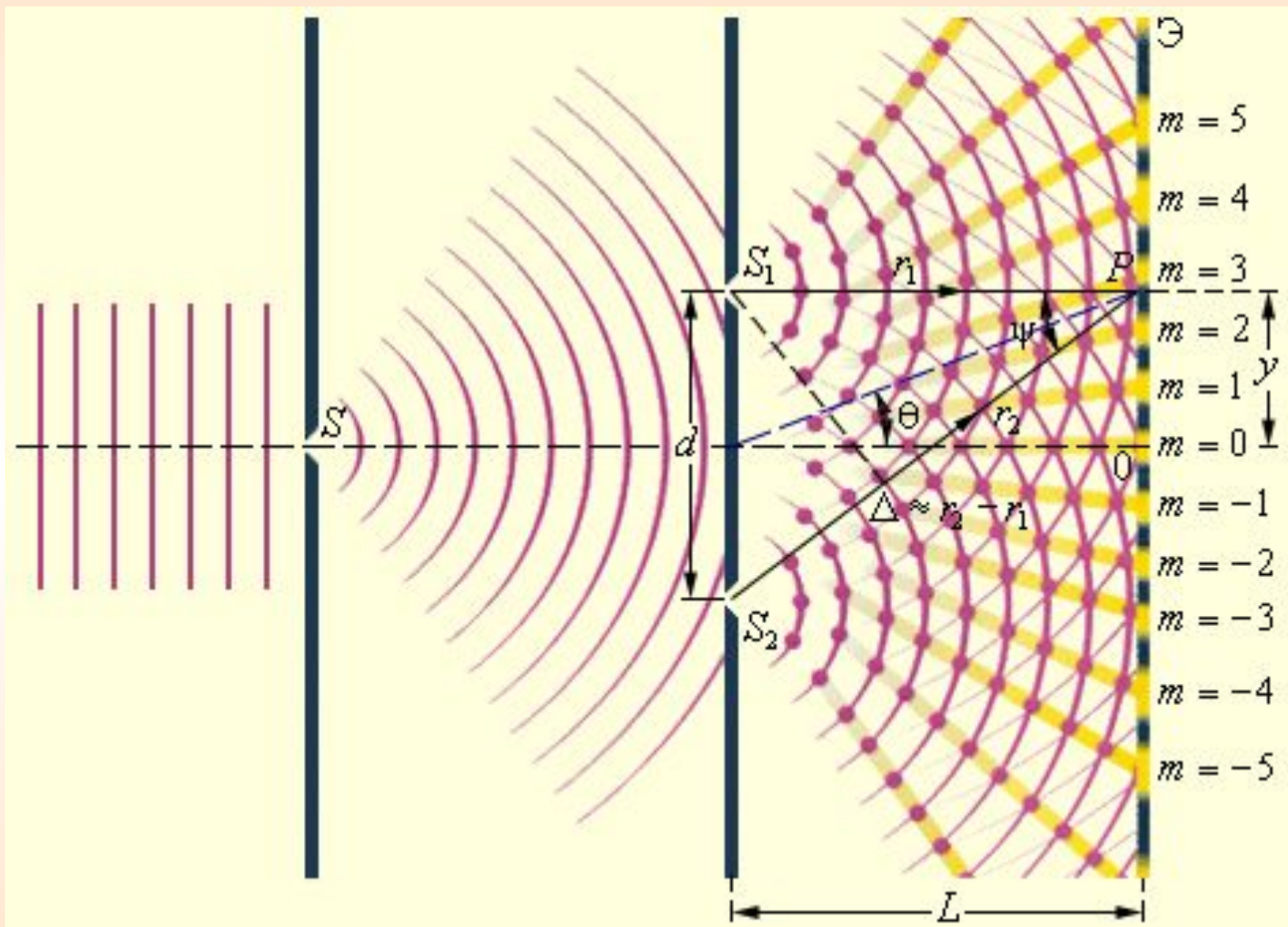
*Главный максимум, соответствующий  $m = 0$  проходит через точку  $O$ . Вверх и вниз от него располагаются максимумы (минимумы) первого ( $m = 1$ ), второго ( $m = 2$ ) порядков, и т. д.*











**Максимумы интенсивности** будут

наблюдаться **в координатах:**

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

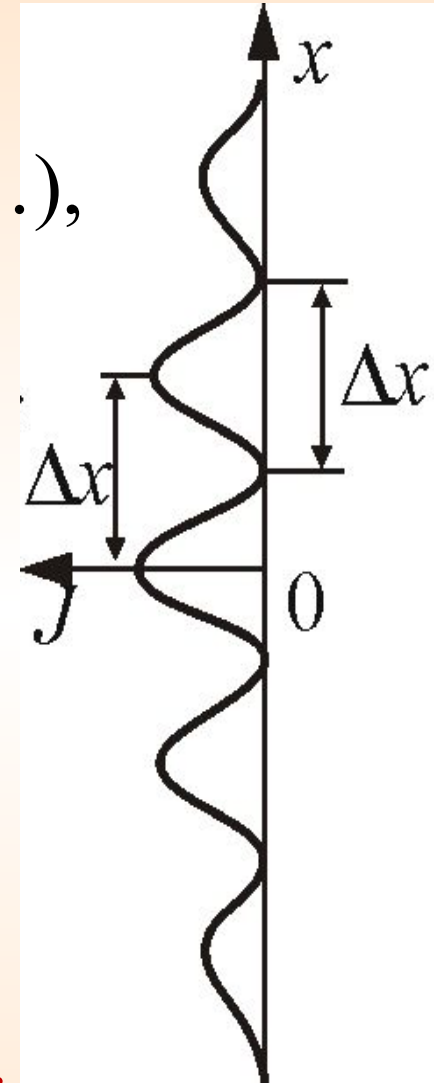
а **минимумы – в координатах:**

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

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

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

**- ширина интерференционной полосы.**



Измерив  $\Delta x$ , зная  $l$  и  $d$ , можно вычислить длину волны  $\lambda$ . Именно так вычисляют длины волн разных цветов в спектроскопии.

## 8.3 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

$$\Delta t \ll \tau_{\text{ког}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} \quad (7.4.1)$$

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

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

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

$$l_{\text{КОГ}} = \nu \tau_{\text{КОГ}} = \frac{\pi \nu}{\Delta \omega} \quad (7.4.2)$$

где  $l_{\text{КОГ}}$  – *длина когерентности* (длина гармонического цуга, образующегося в процессе излучения одного атома) – *расстояние между точками, разность фаз в которых  $\pi$ .*

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

Можно показать ,что

$$\tau_{\text{ког}} = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$$

*- чем шире интервал частот, представленных в данной волне, тем меньше время когерентности.*

### ***Предельный наблюдаемый порядок интерференции***

$$m_{\text{пред}} = \frac{\omega}{\Delta\omega} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

*- число наблюдаемых интерференционных полос возрастает при уменьшении спектрального интервала.*

# *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.*

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

$\rho_k$  – радиус пространственной когерентности;  
 $\lambda$  – длина волны;  
 $\theta$  – угловой размер источника.

## Критерий наблюдения интерференции при протяженном источнике:

$$b \leq b_{\max} = \frac{\lambda}{\Omega}$$

*- интерференционные схемы с большой апертурой требуют источников малых размеров.*

$b$  - допустимый размер источника;

$\lambda$  — длина волны;

$\Omega$  - *апертура интерференции* — угол между выходящими из источника интерферирующими лучами.



# 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.*

## 8.4 Методы наблюдения интерференции

### 1. Опыт Юнга

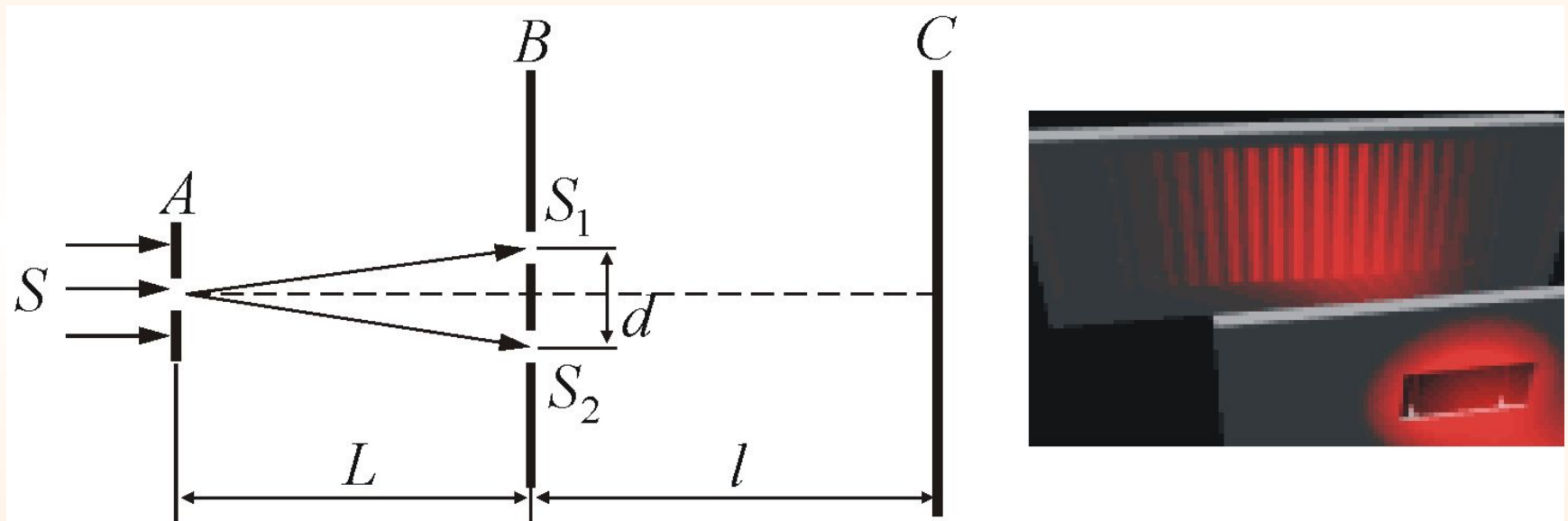
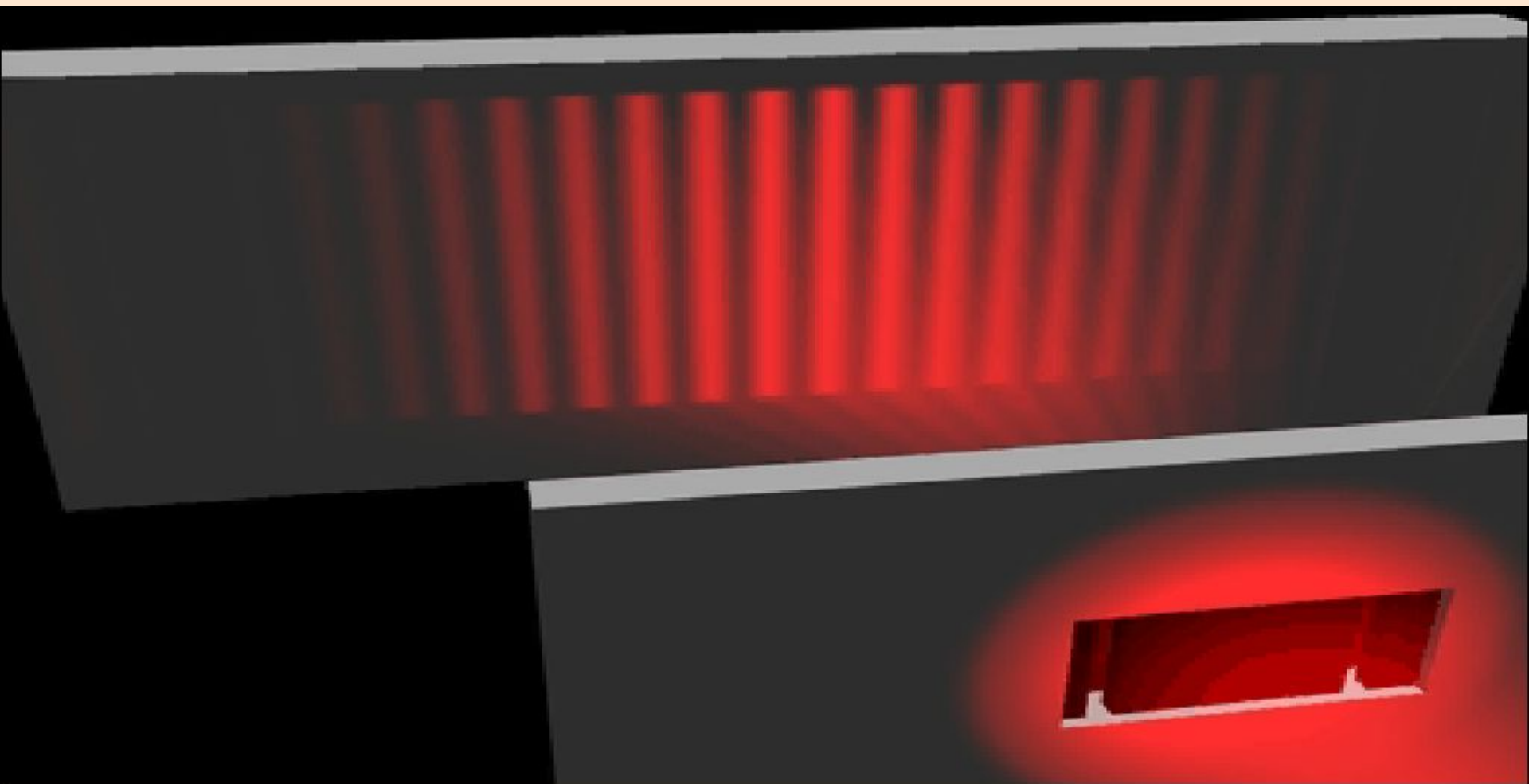


Рисунок 7.5

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



Дифракция Фраунгофера на двух щелях. Ширина щелей  $b$  остается постоянной, а расстояние  $d$  между щелями изменяется

## 2. Зеркала Френеля

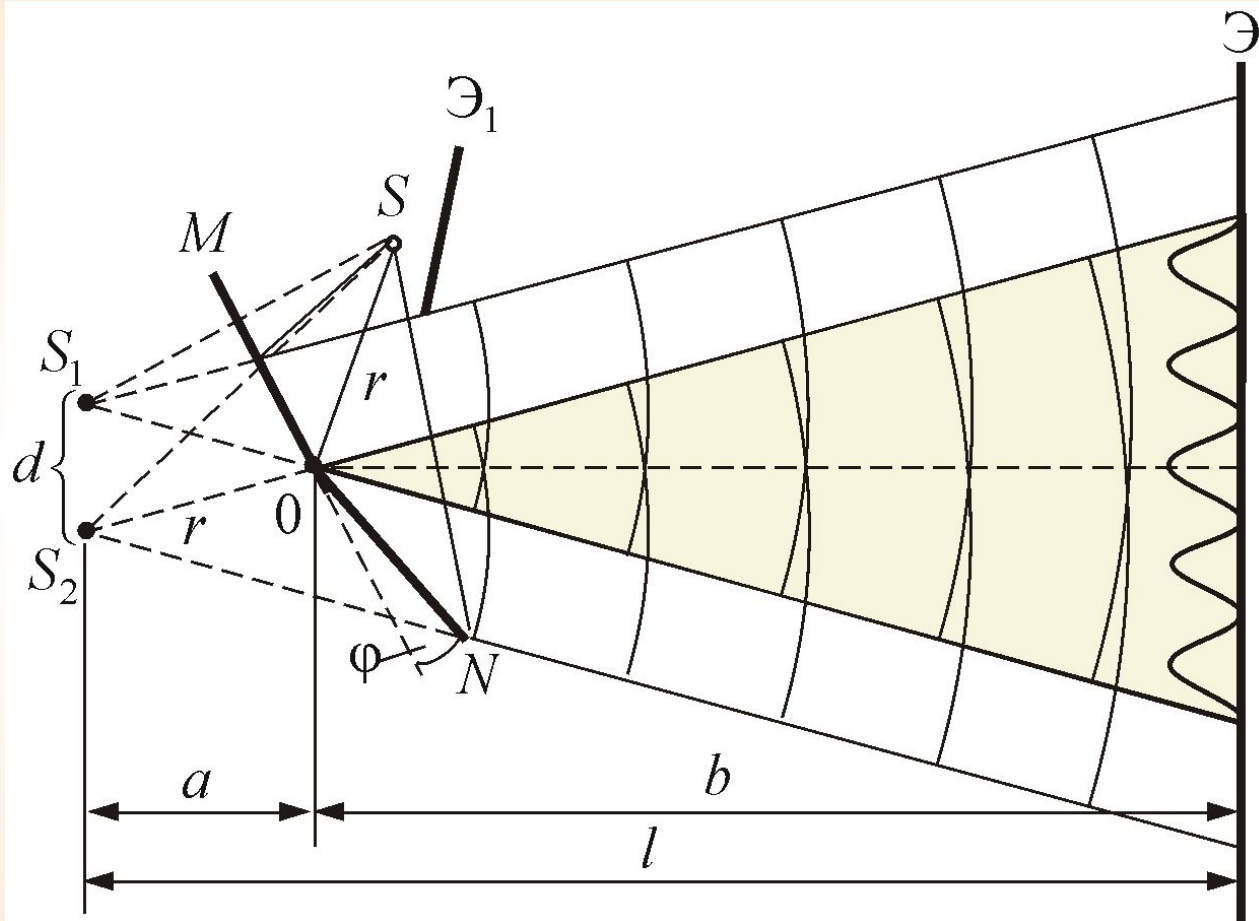


Рисунок 7.6

$$\Delta x \approx \frac{\lambda l}{d} = \frac{\lambda(a+b)}{2a^3 \varphi}$$

### 3. Бипризма Френеля

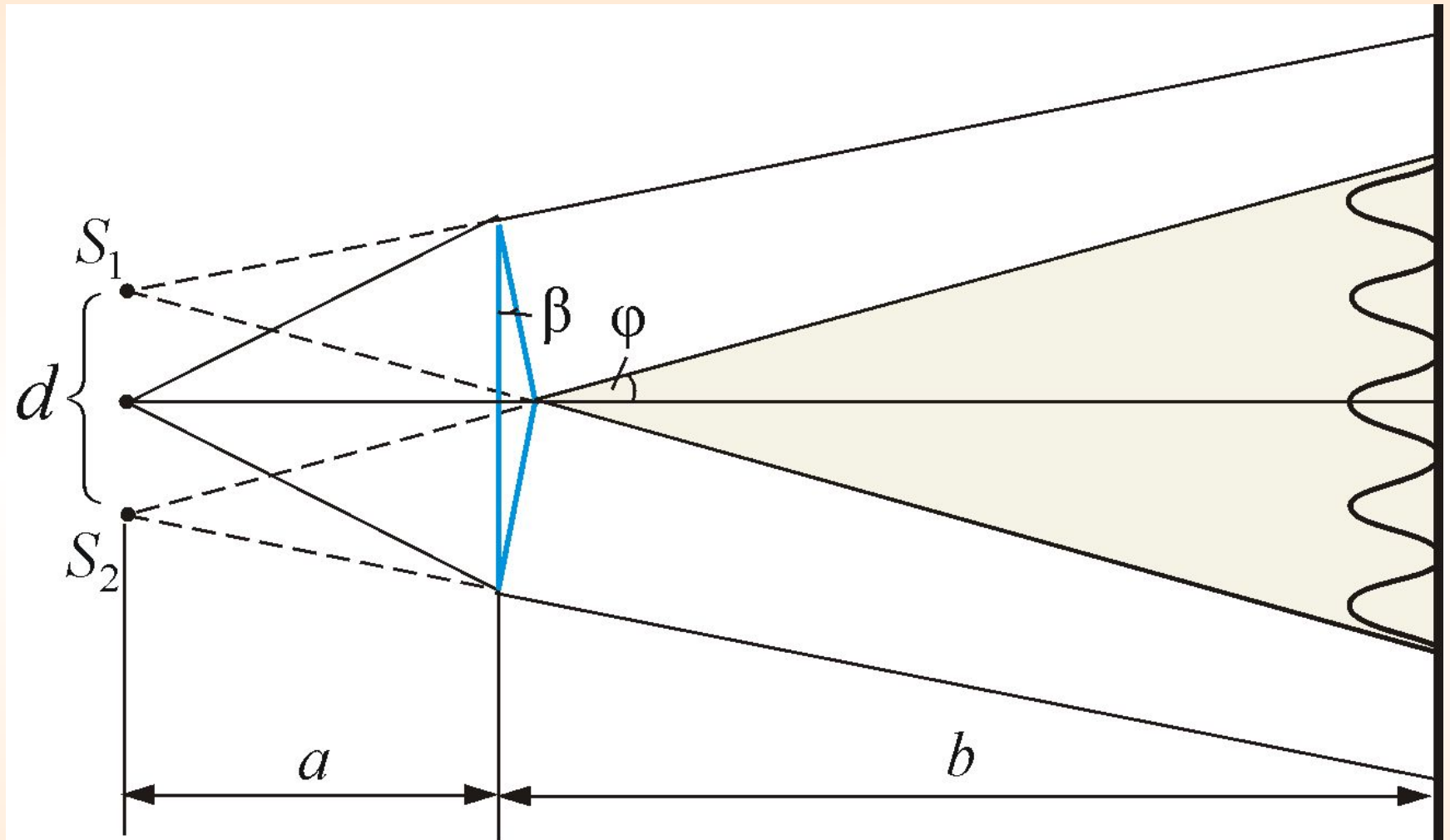


Рисунок 7.7

## 4. Билинза Бийе

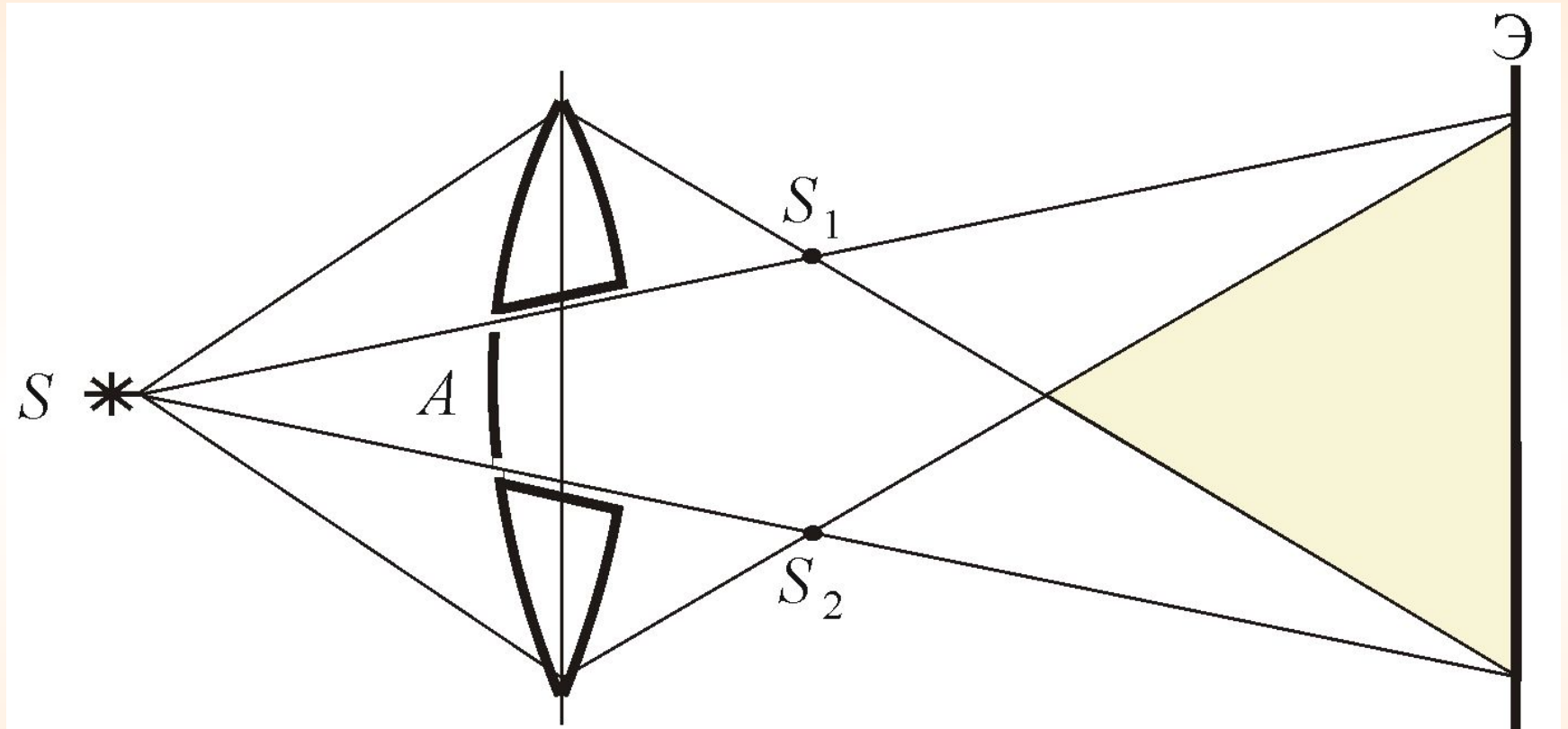
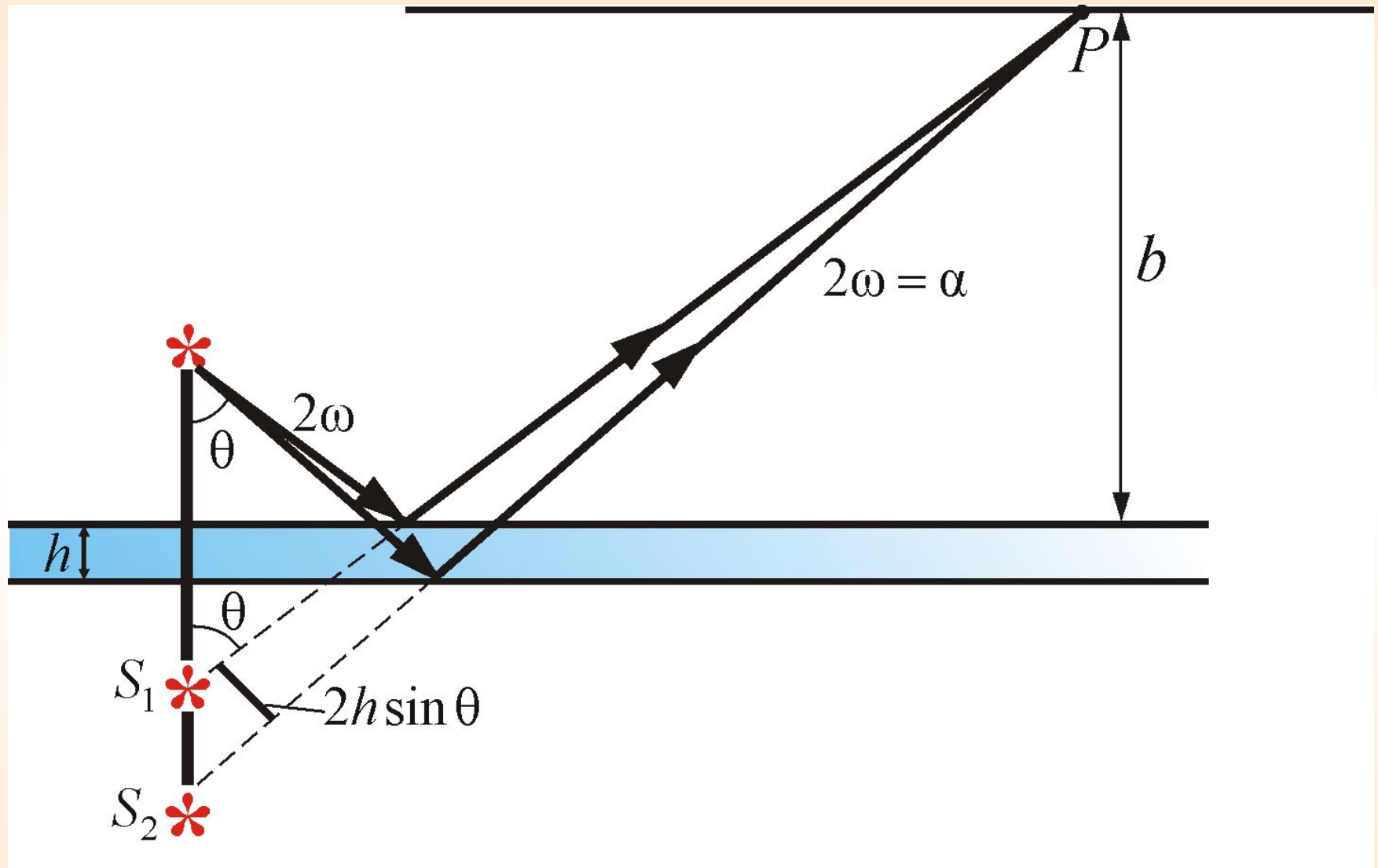


Рисунок 7.8

## 8.5 Интерференция в тонких пленках

Интерференцию света по *методу деления амплитуды* во многих отношениях наблюдать проще, чем в опытах с *делением волнового фронта*. Один из способов, использующих такой метод – *опыт Поля*.

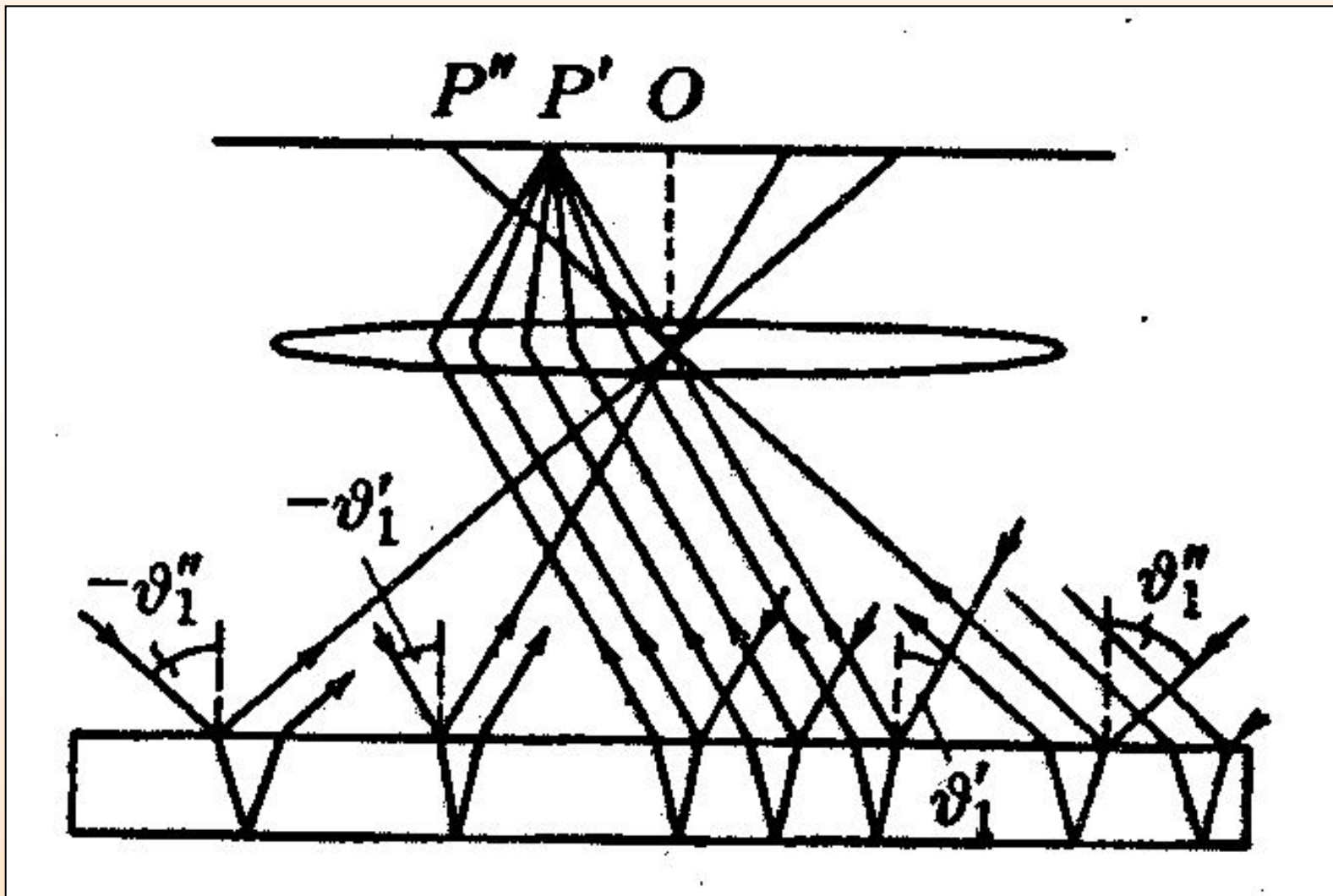
# Опыт Поля





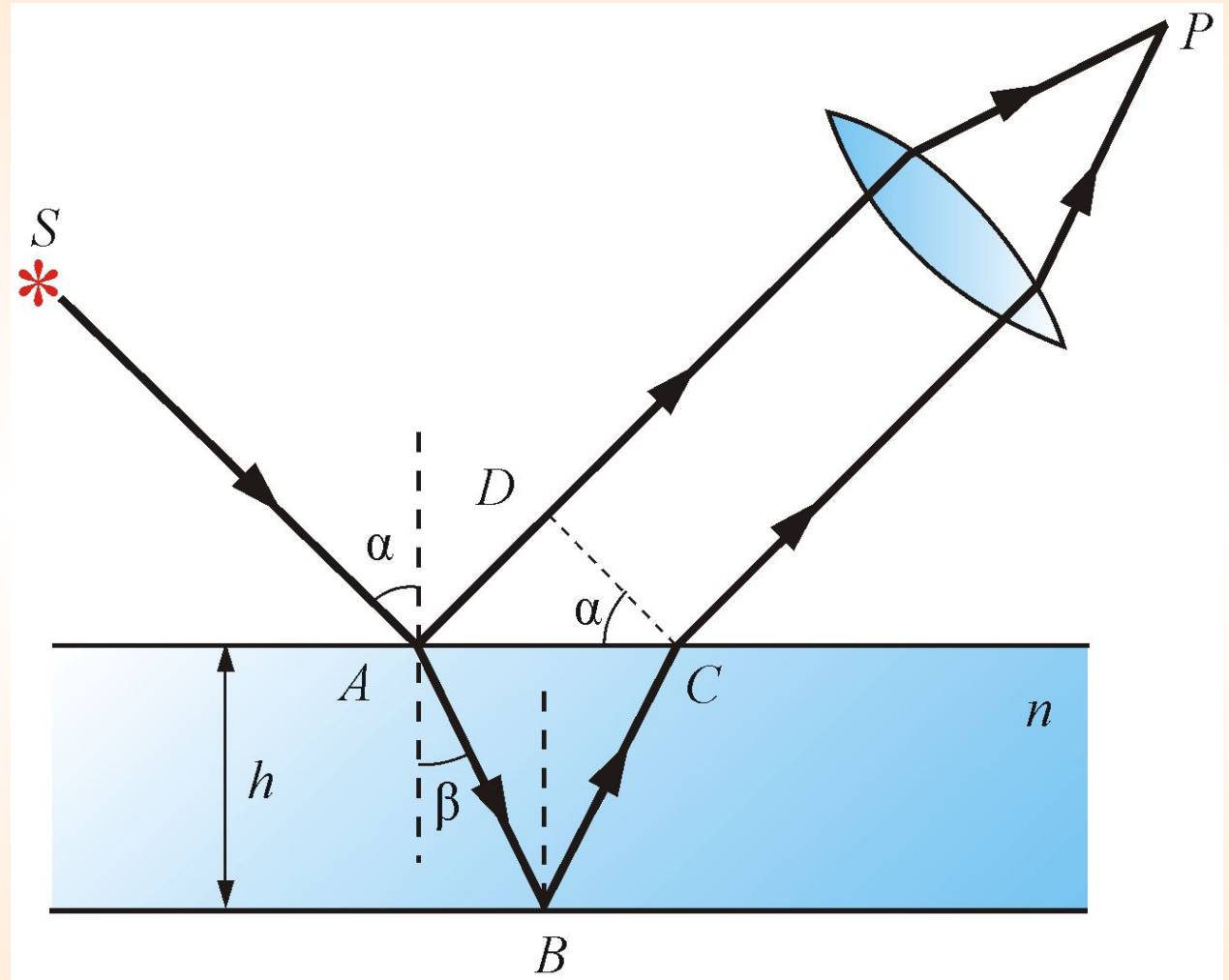
# Интерференция в тонких пленках

## Интерференционные *полосы равного наклона*



# Интерференция в тонких пленках

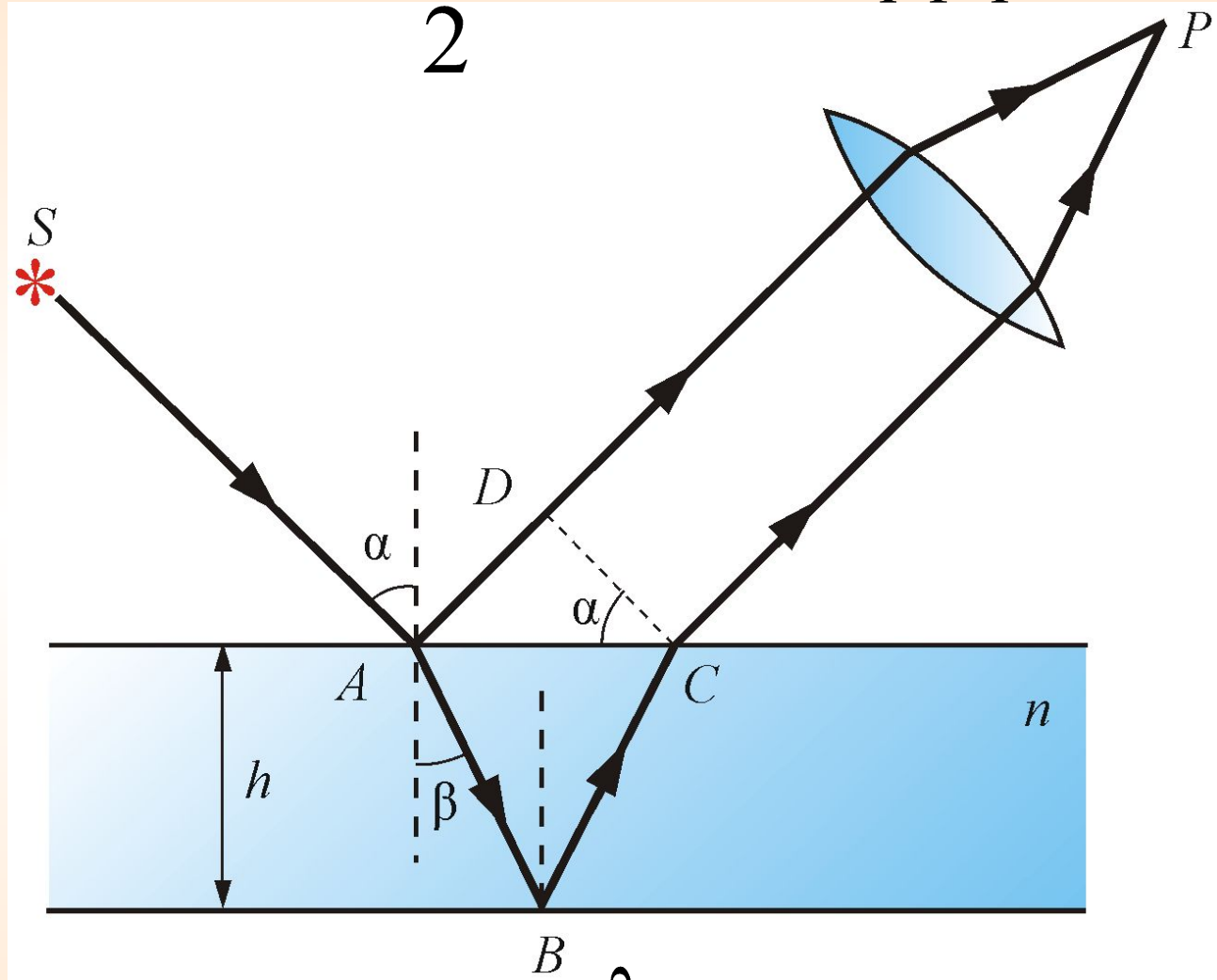
## Интерференционные *полосы* *равного наклона*



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

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

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



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

Для наблюдения *интерференционных полос* *равного наклона* вместо плоскопараллельной пластинки можно использовать *интерферометр Майкельсона* :

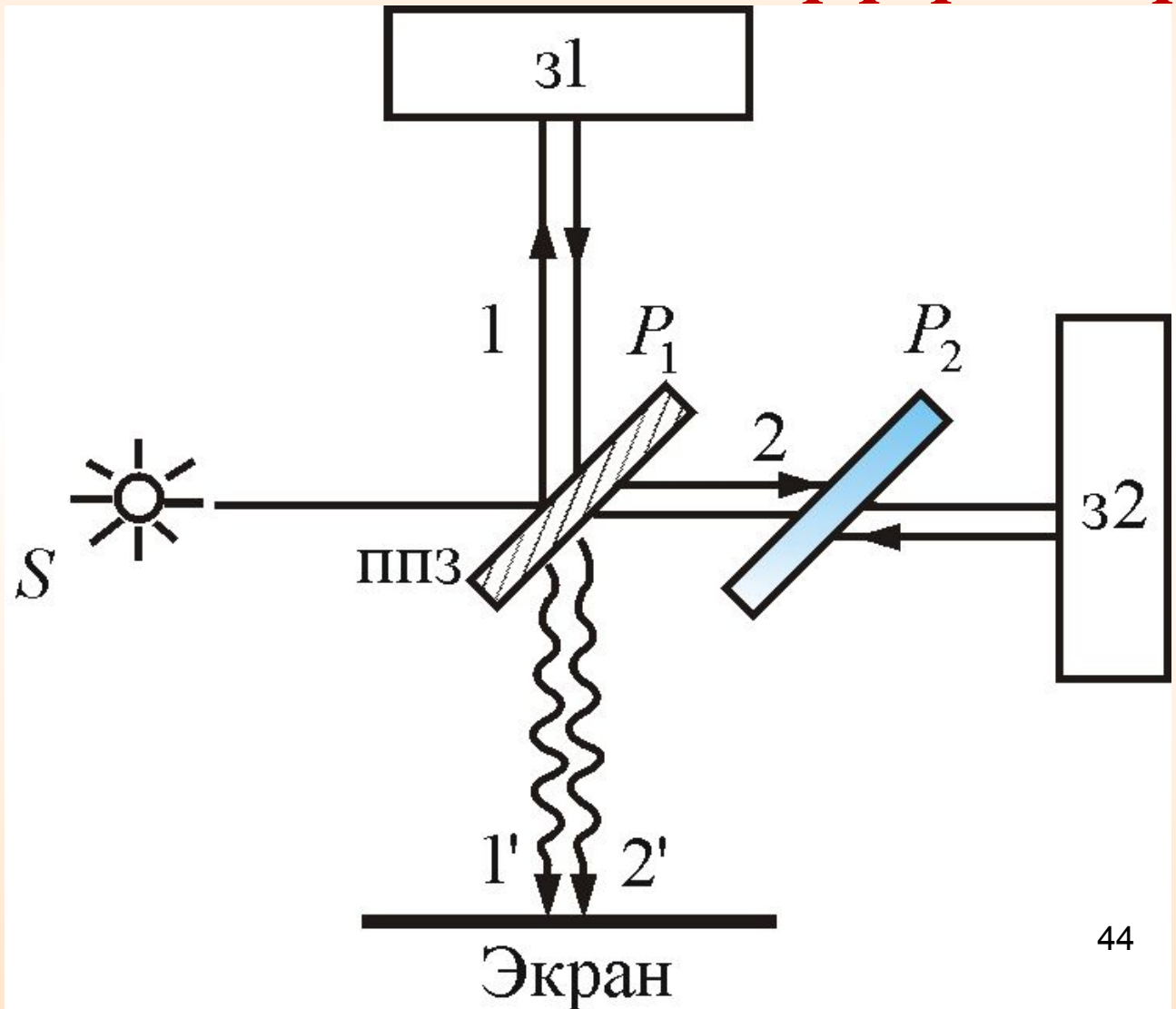
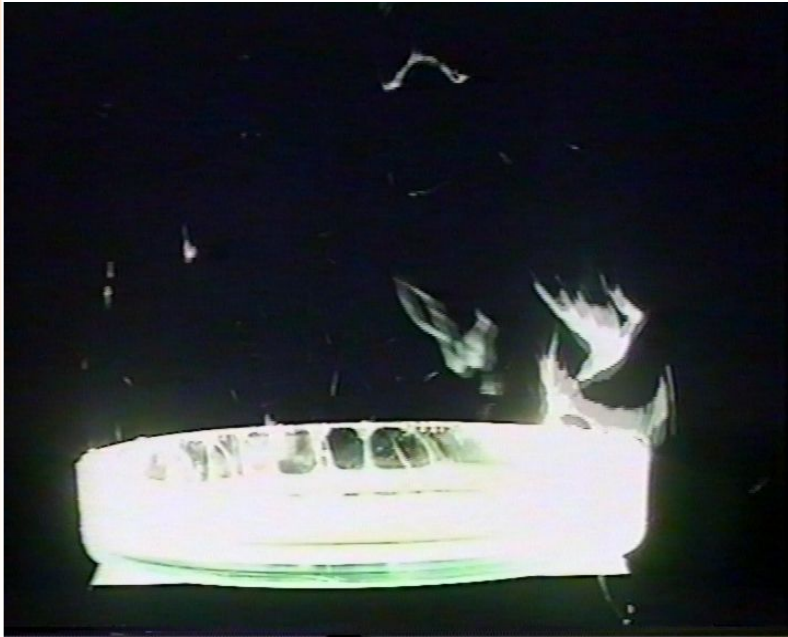


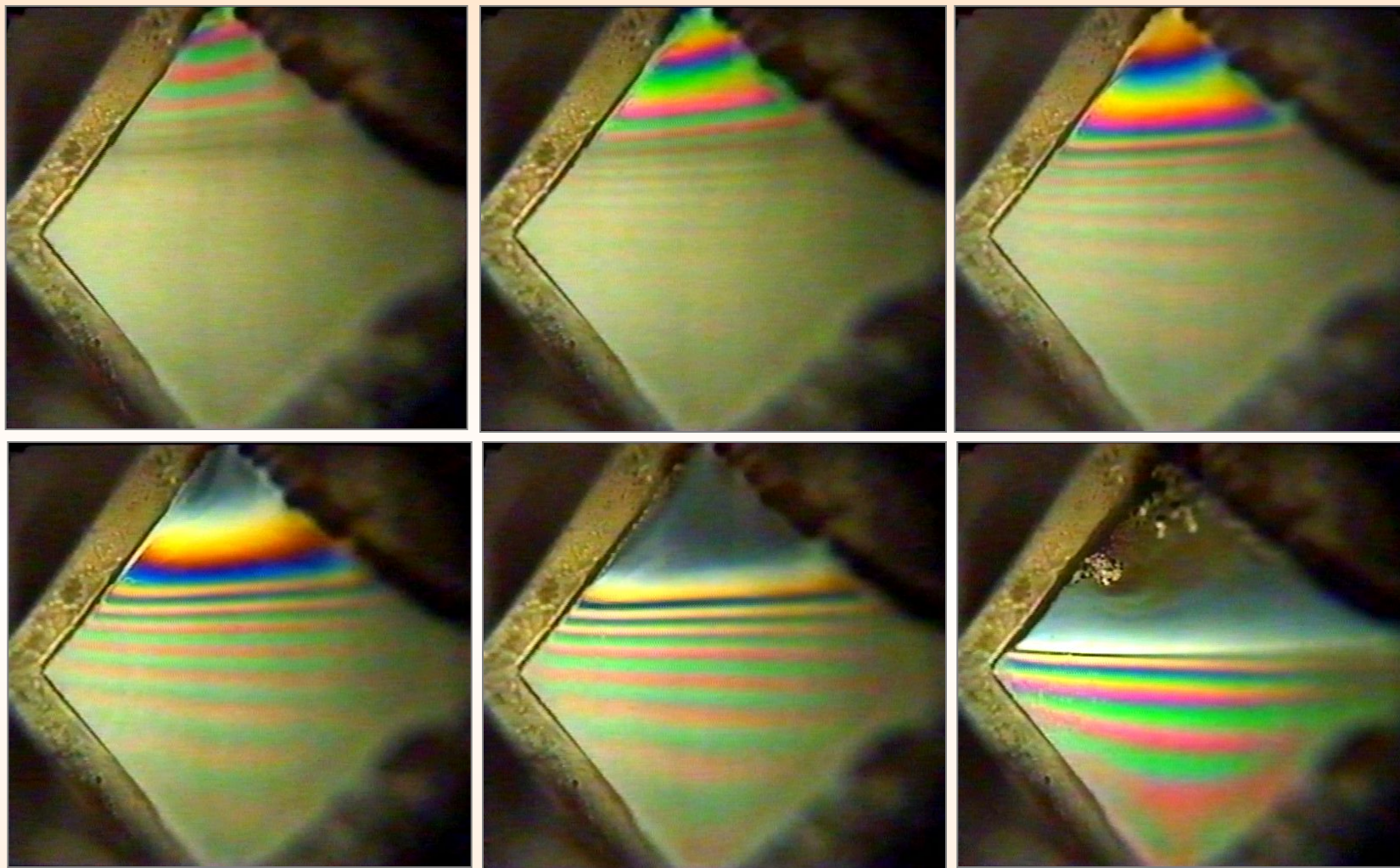
Рисунок 7.11

# *Интерференция от клина.*

## *Полосы равной толщины*

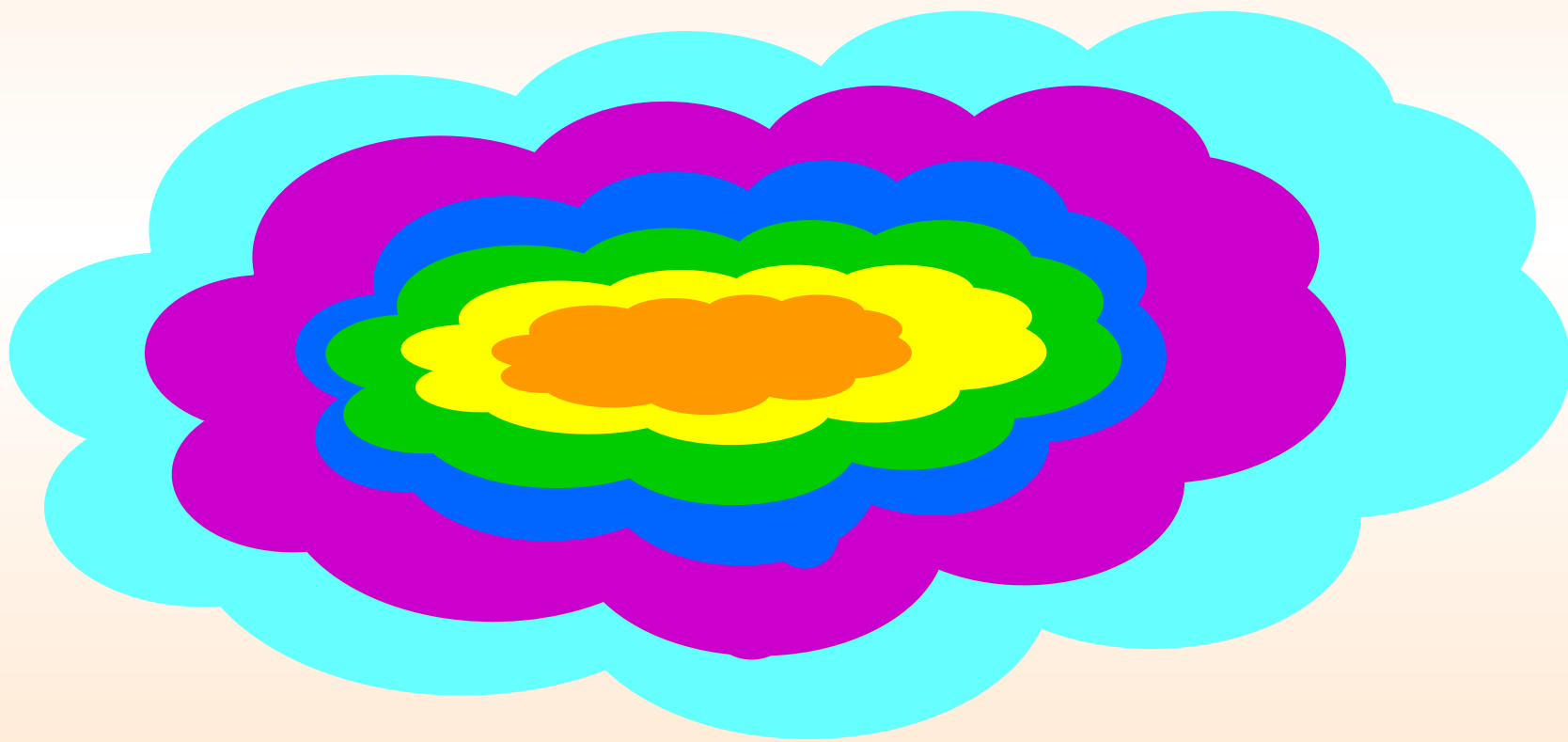
В белом свете интерференционные полосы, при отражении от тонких пленок - окрашены. Поэтому такое явление называют ***цвета тонких пленок.*** Его легко наблюдать на мыльных пузырях, на тонких пленках масла или бензина, плавающих на поверхности воды, на пленках окислов, возникающих на поверхности металлов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





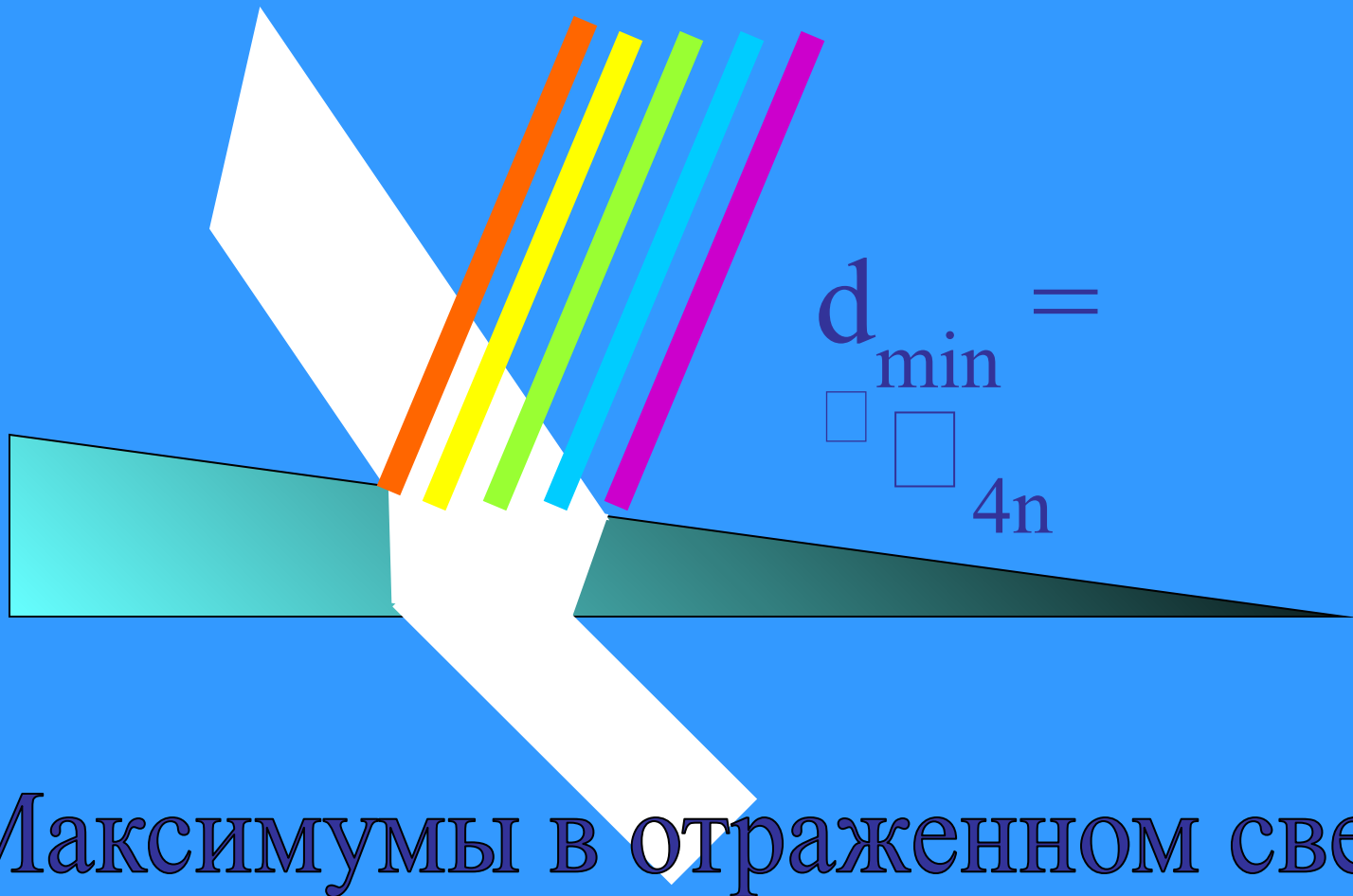
Изменение картины интерференции  
по мере уменьшения  
толщины мыльной пленки

# НЕФТЬ НА ВОДЕ



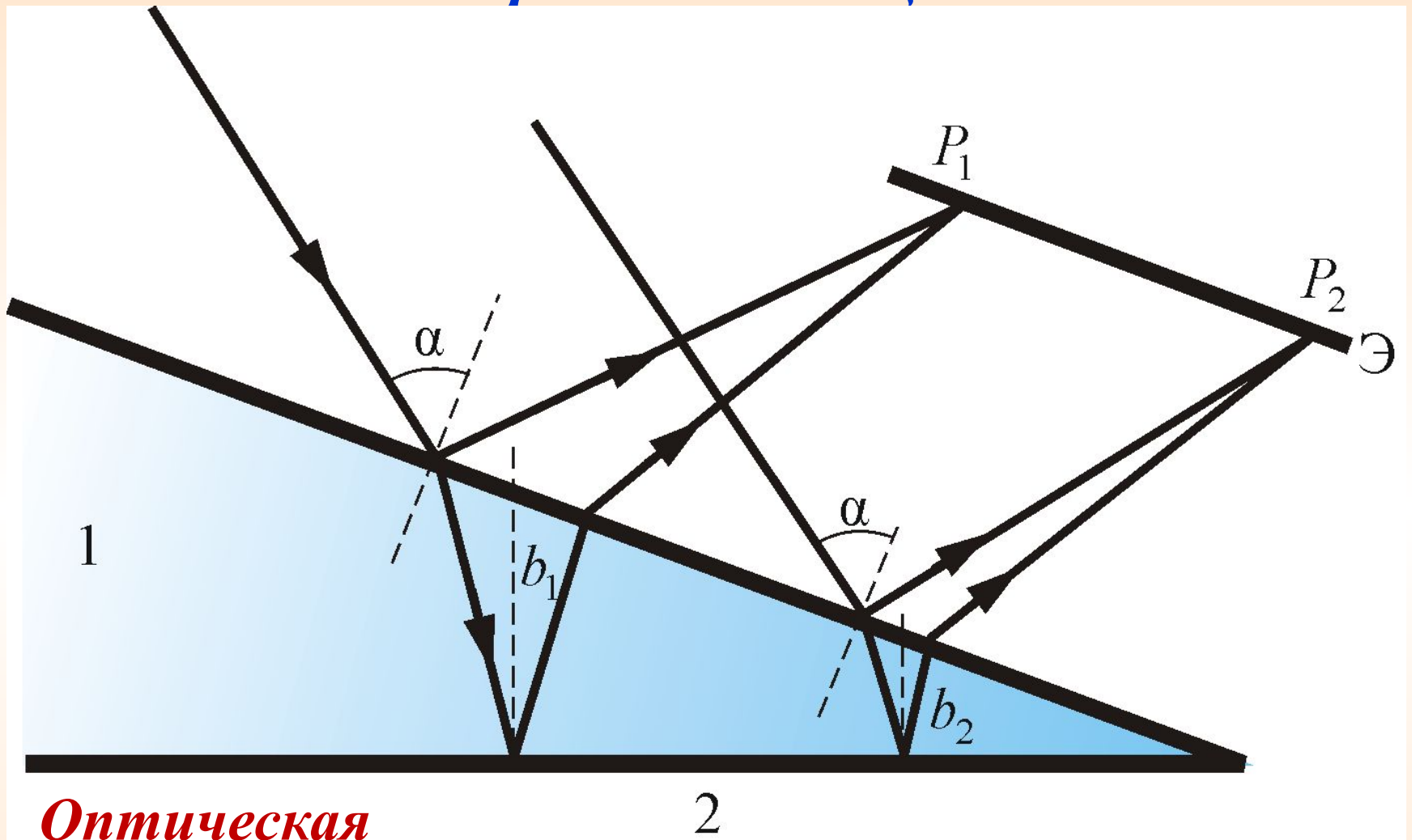


# Интерференция на клине



Максимумы в отраженном свете

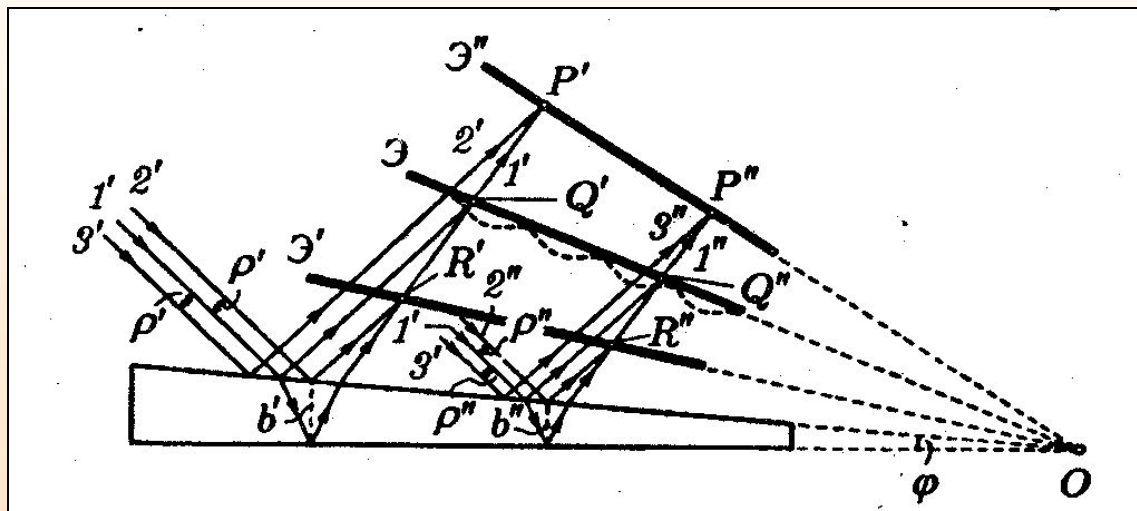
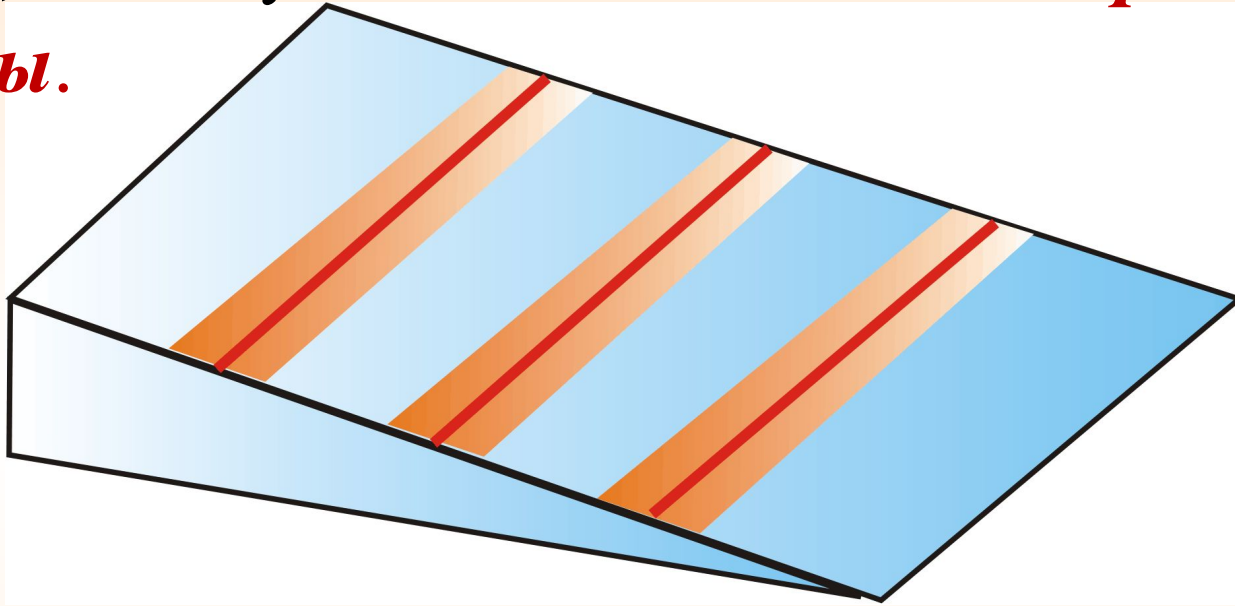
# Полосы равной толщины



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

$$\Delta = 2b \sqrt{n^2 - \sin^2(\alpha)} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

Каждая из интерференционных полос возникает в результате отражения от участков клина с одинаковой толщиной, поэтому их называют ***полосами равной толщины***.



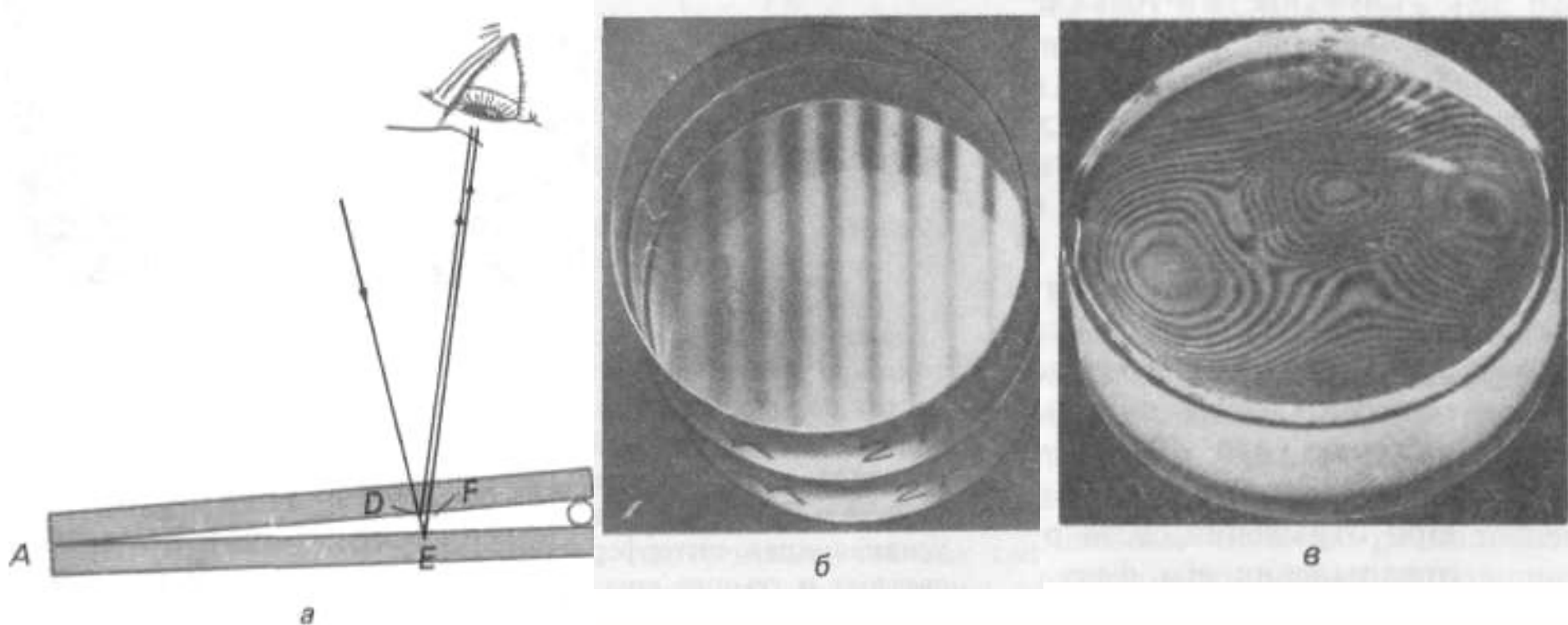


Рис. *а* - световые лучи, отражаясь от верхней и нижней поверхностей тонкого воздушного клина, интерферируют и образуют светлые и темные полосы:

*б* - интерференционная картина, наблюдаемая в случае оптически плоских стеклянных пластин;

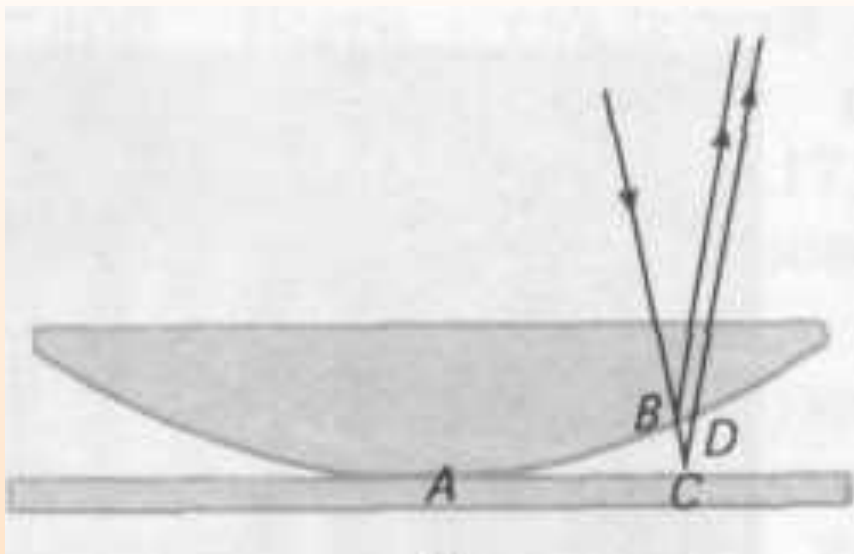
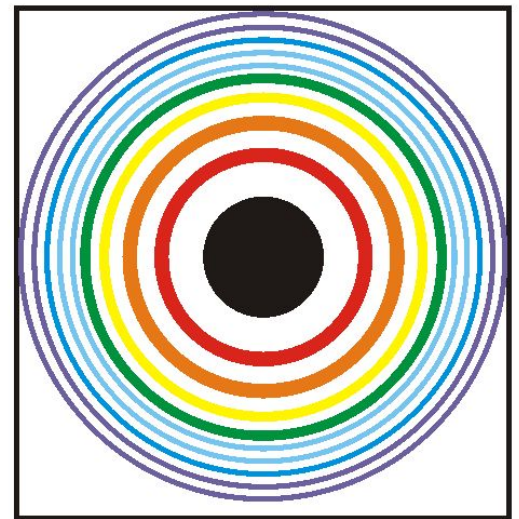
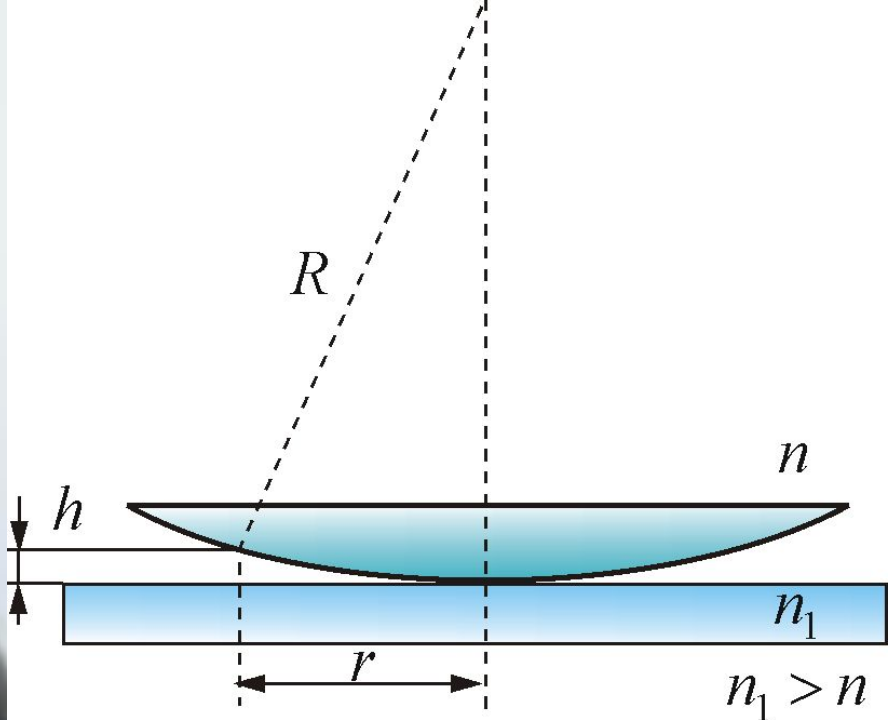
*в* - интерференционная картина, наблюдаемая в случае неплоских пластин.



## *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**.*



# Кольца Ньютона

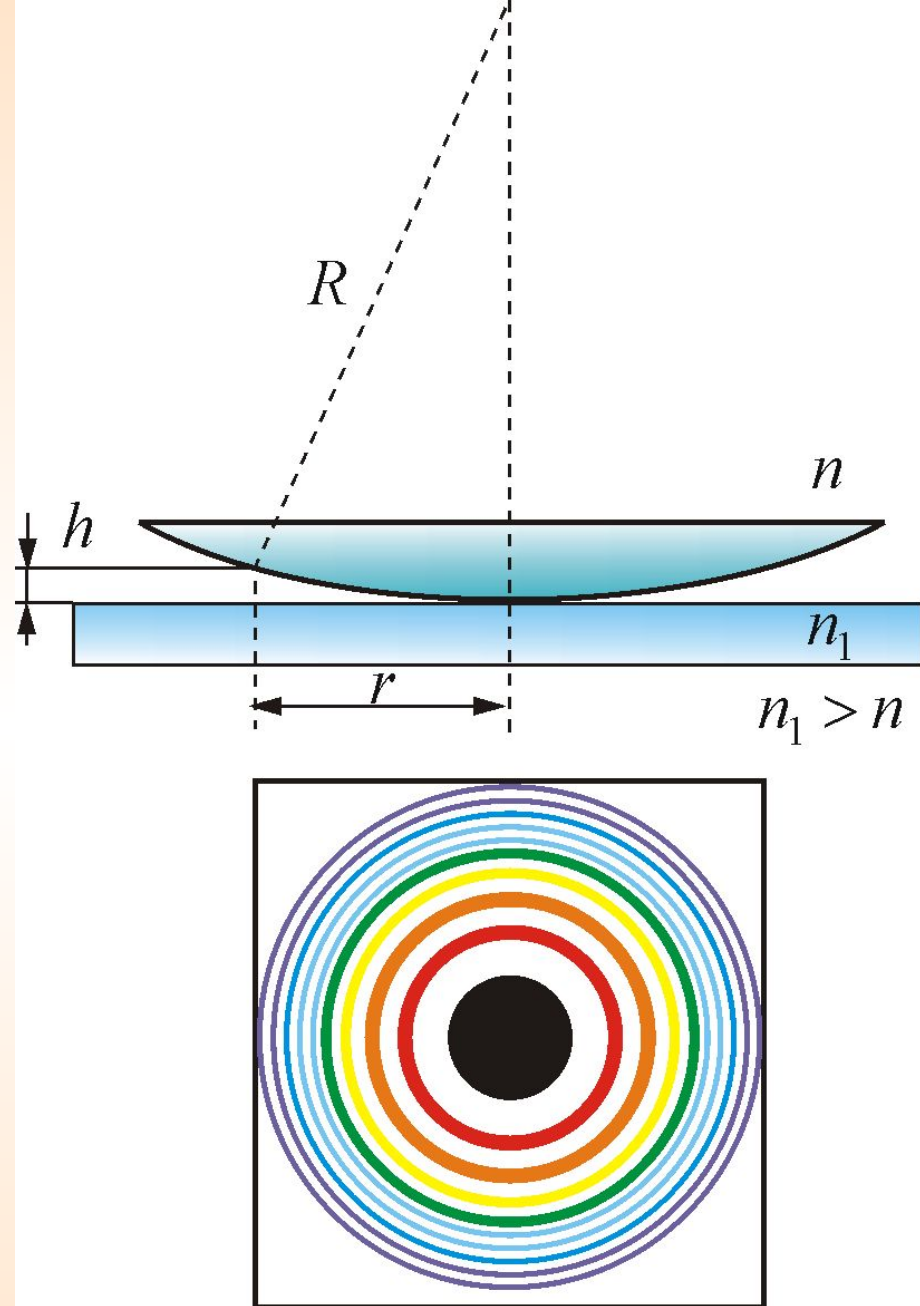
$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R}$$

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

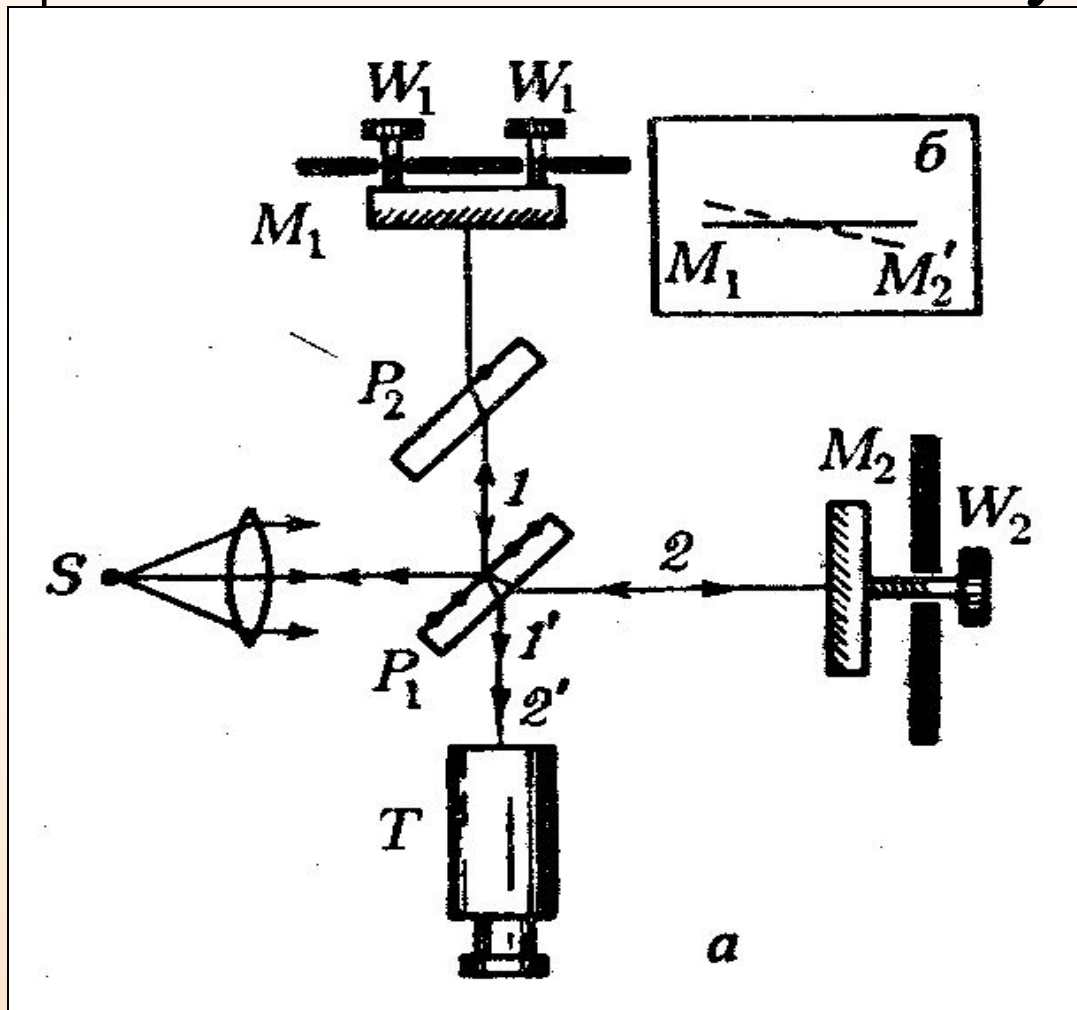
$$r_m = \sqrt{\left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda_0 R}$$

*- Радиус  $m$ -го  
светлого кольца*

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



**Полосы равной толщины** можно наблюдать и с помощью разных интерферометров, например **интерферометра Майкельсона**, если одно из зеркал  $M_1$  отклонить на небольшой угол:





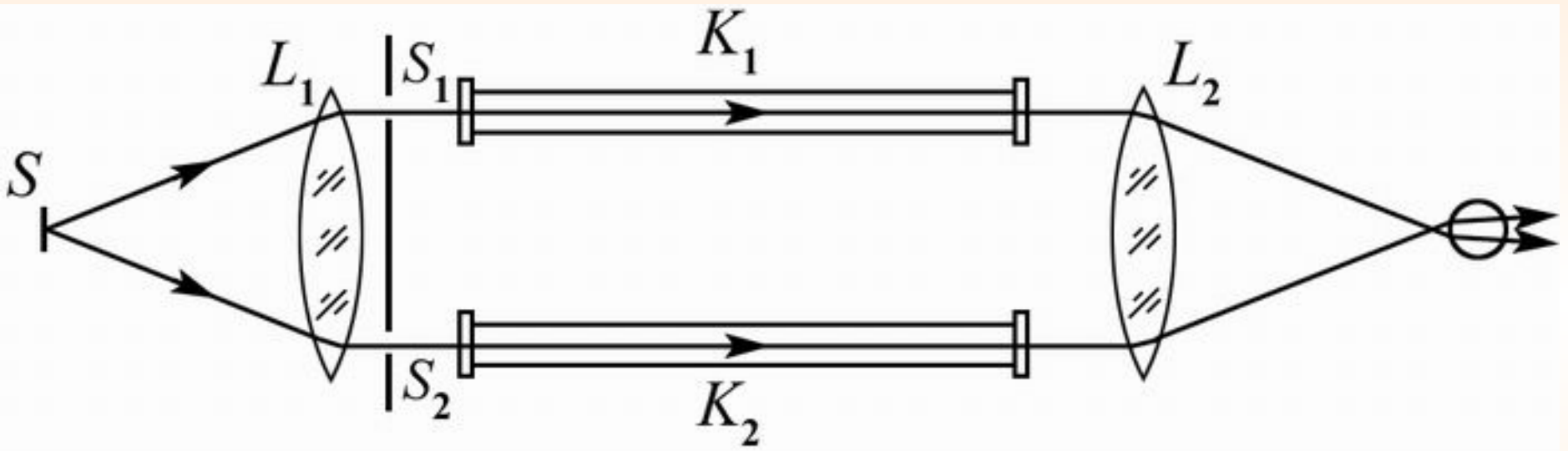


Схема интерферометра Рэлея

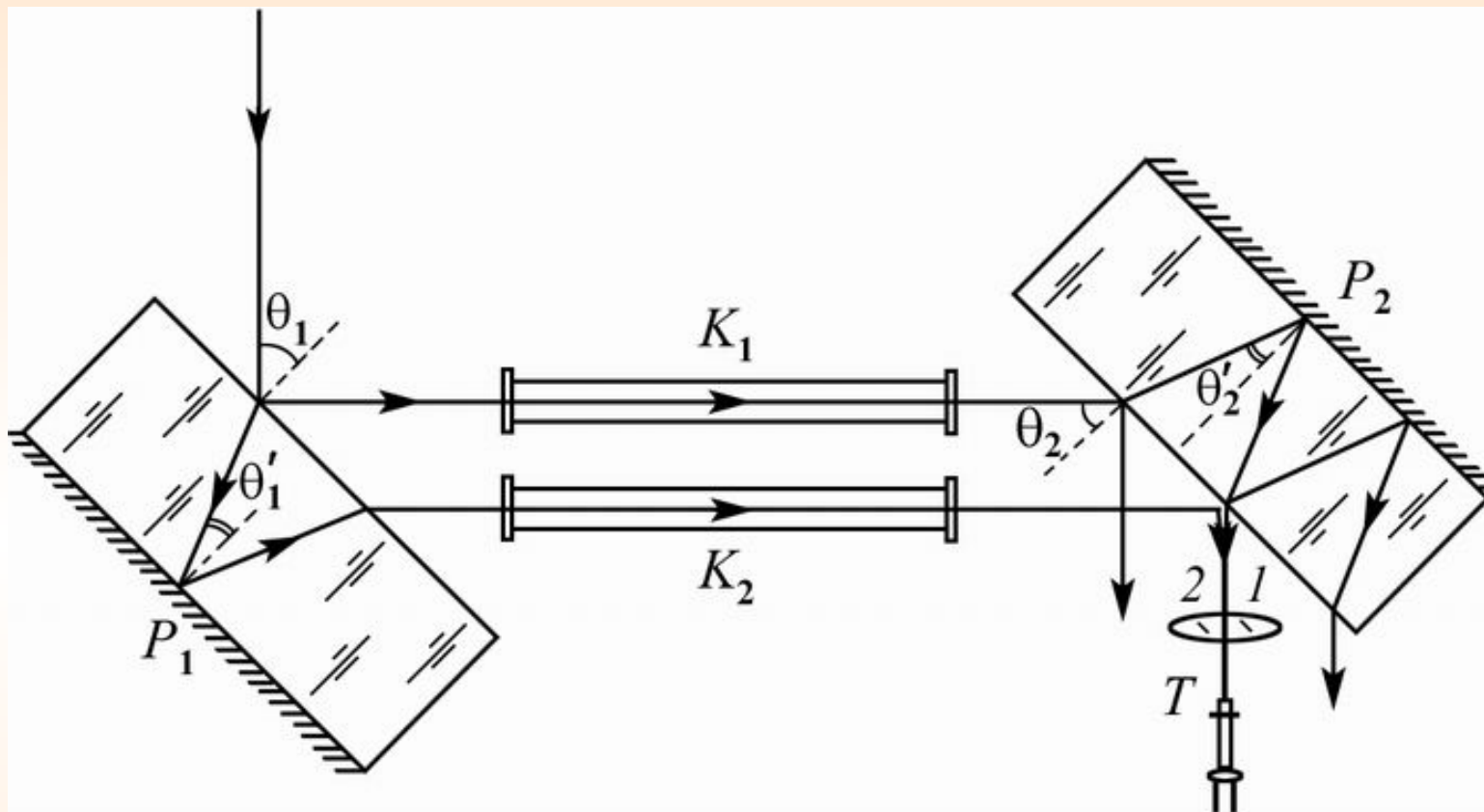


Схема интерферометра Жамена

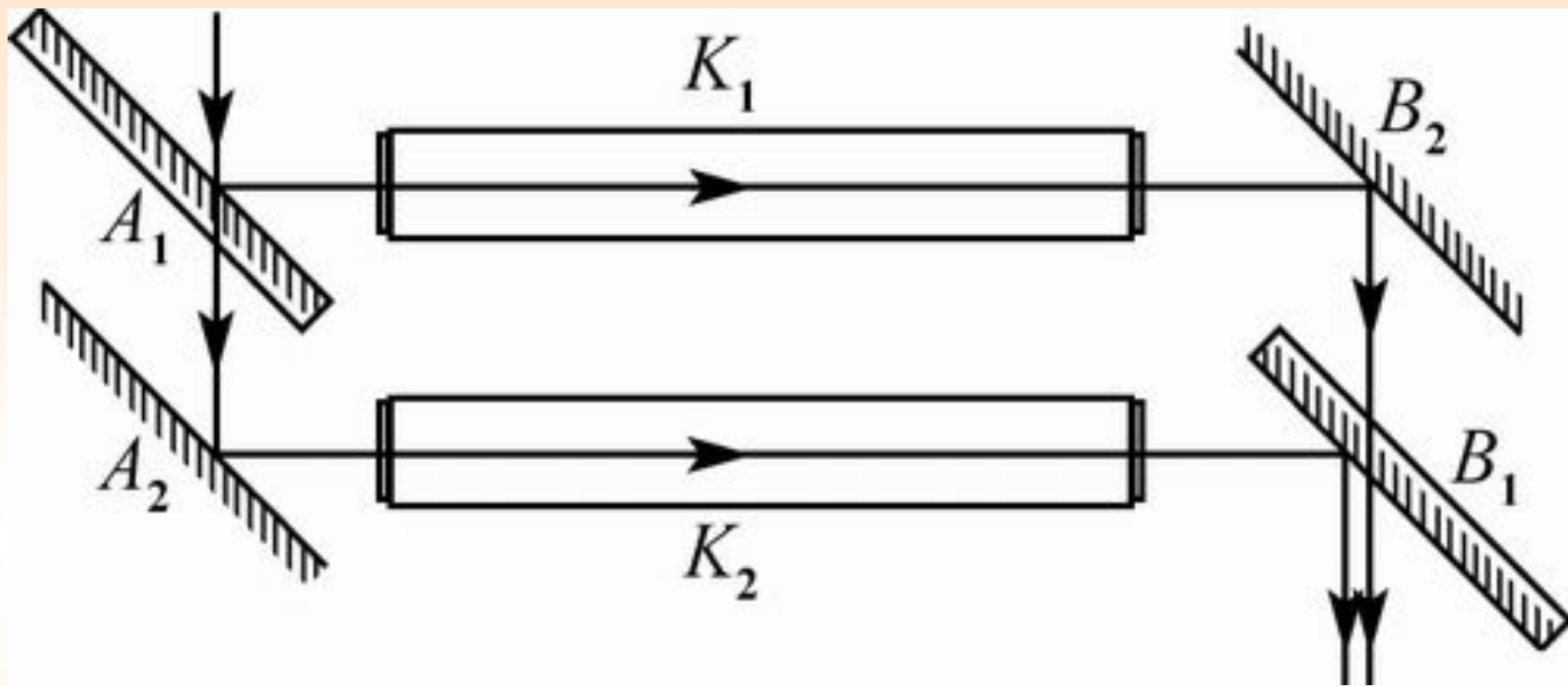
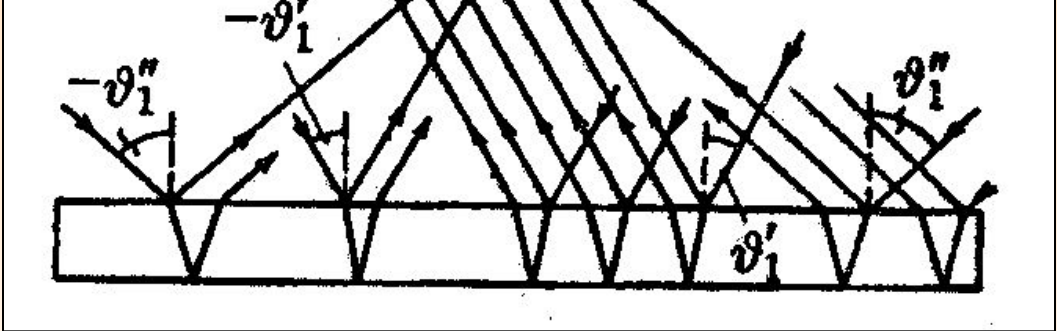


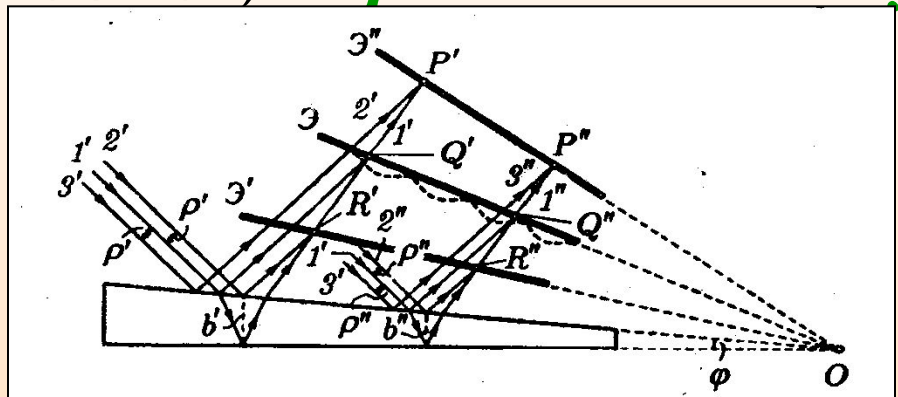
Схема интерферометра Рождественского



Итак:

- **полосы равного наклона** получаются при освещении **пластинки постоянной толщины** ( $b = \text{const}$ ) **рассеянным светом** в котором содержатся лучи разных направлений.

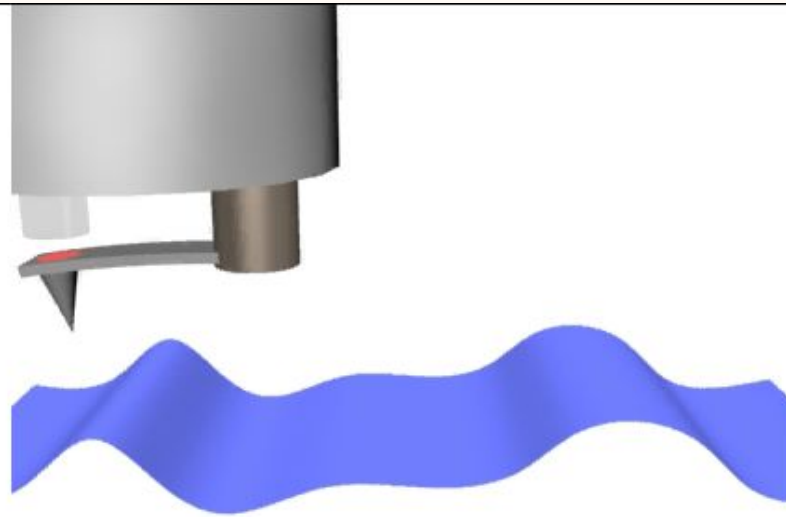
- **полосы равной толщины** наблюдаются при освещении **пластинки переменной толщины** (клина) ( $b \neq \text{const}$ ) **параллельным пучком света**.



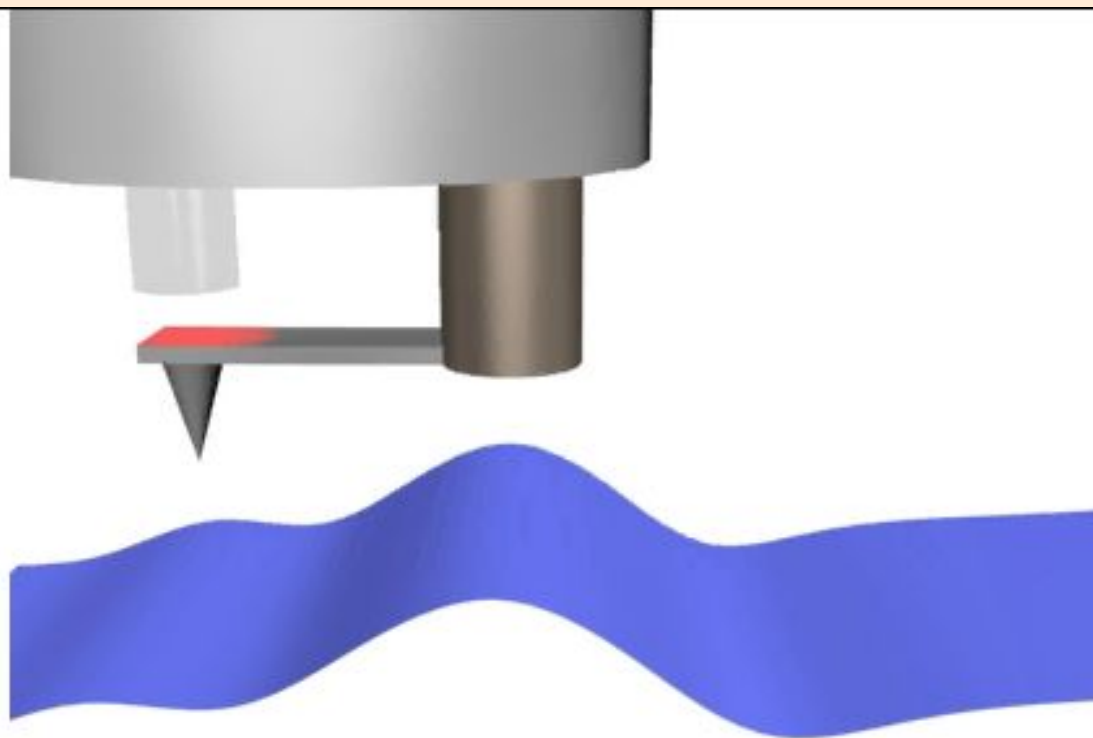
## 8.6 Применение интерференции света

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).*

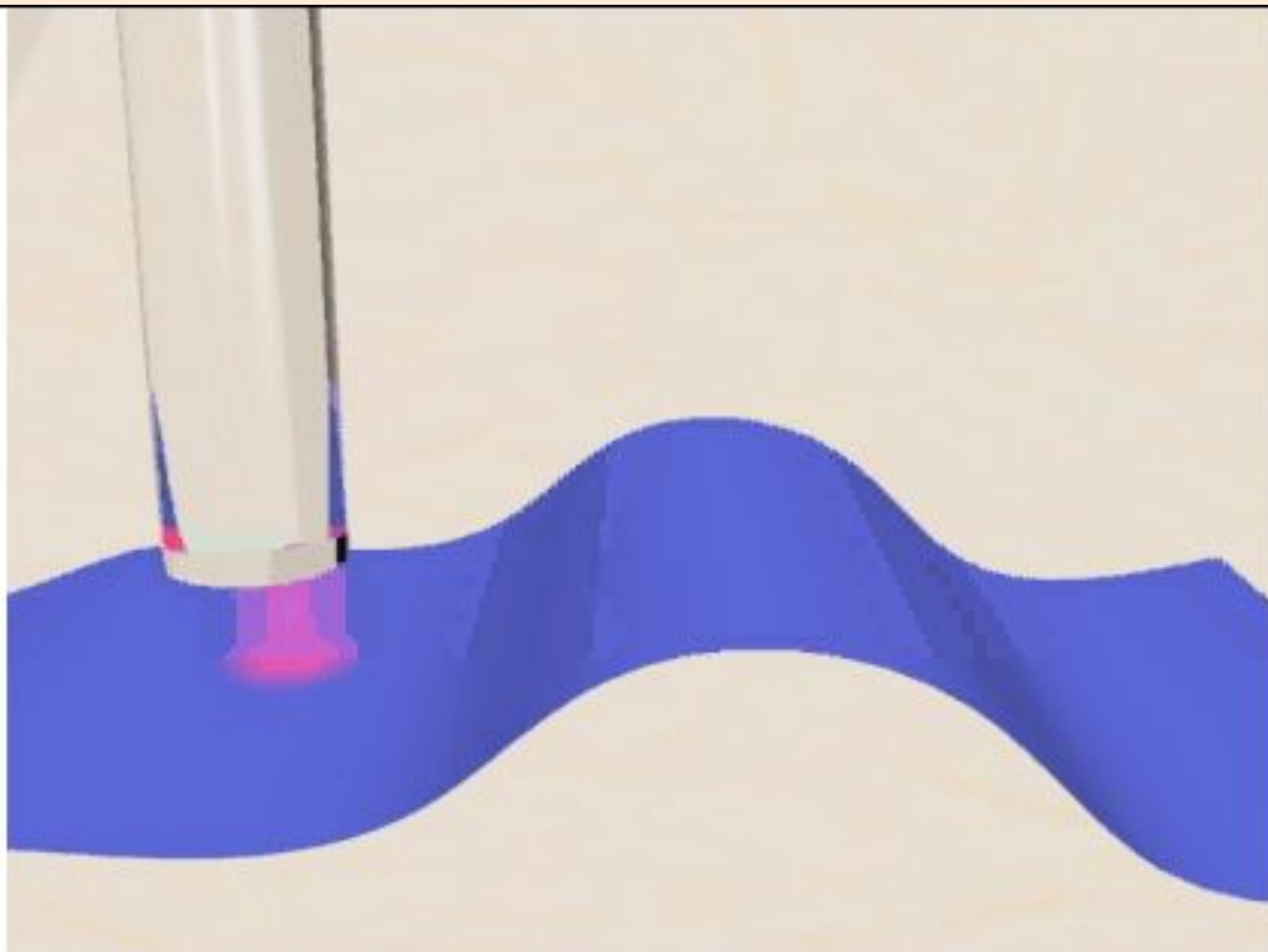
**2. По интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды (в т.ч. фазовые), в которой распространяются волны, или отклонения формы поверхности от заданной.**



Волоконно-оптический атомный силовой микроскоп BOACM в котором регистрация смещения чувствительной иглы производится по смещению рабочей точки волоконно-оптического интерферометра

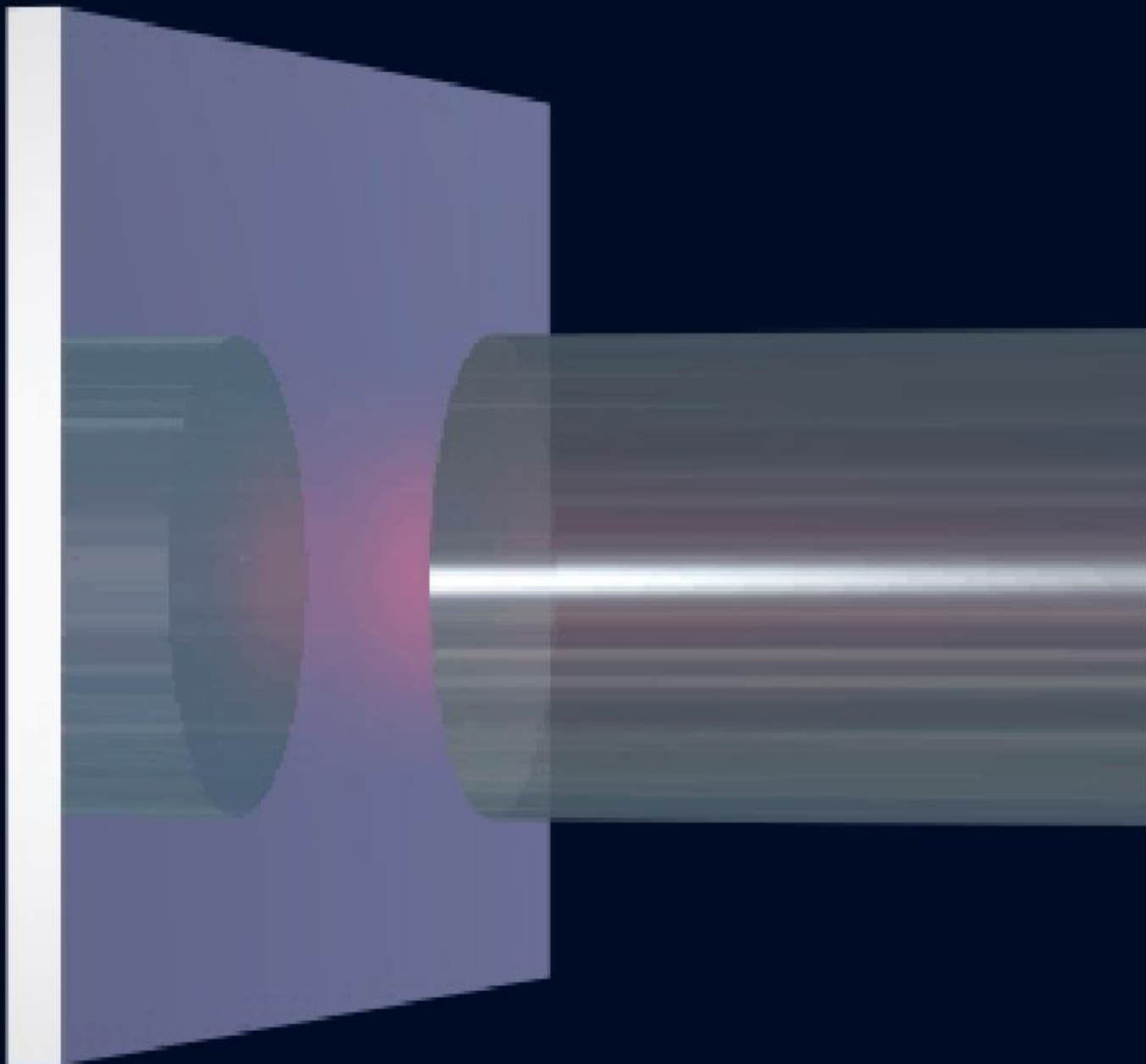


BOA-CM резонансного типа, в котором воздействие на иглу со стороны атомов определяется по смещению частоты её собственных колебаний

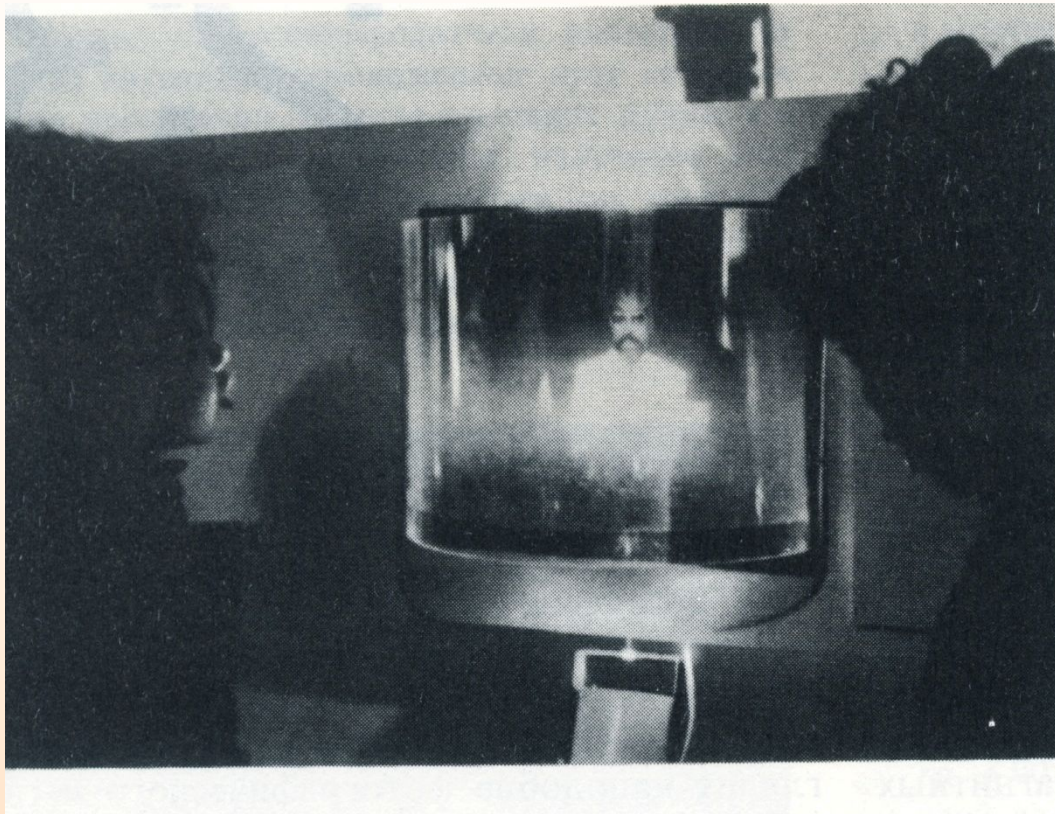


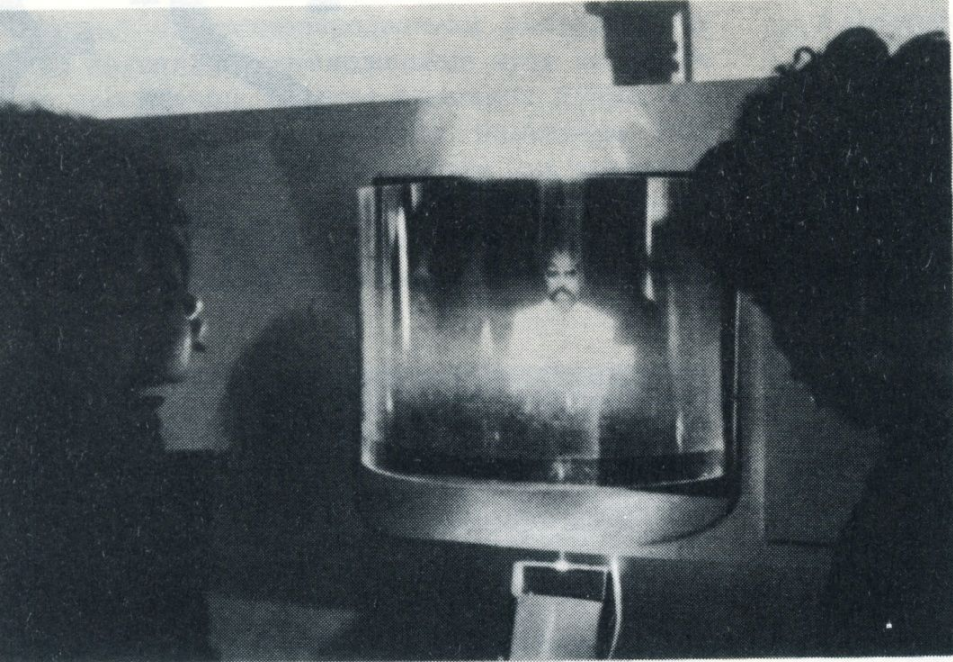
Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо - ещё один метод для исследования отражающих поверхностей



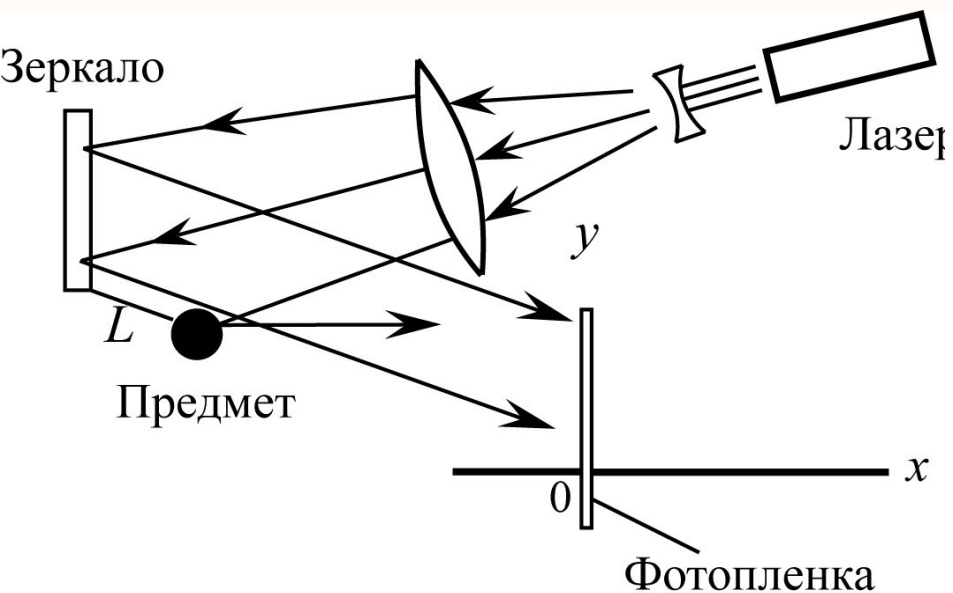


3. *Явление интерференции волн*, рассеянных от некоторого объекта (или прошедших через него), с *«опорной» волной* лежит в основе *голографии* (в т.ч. оптической, акустической или СВЧ-голографии).





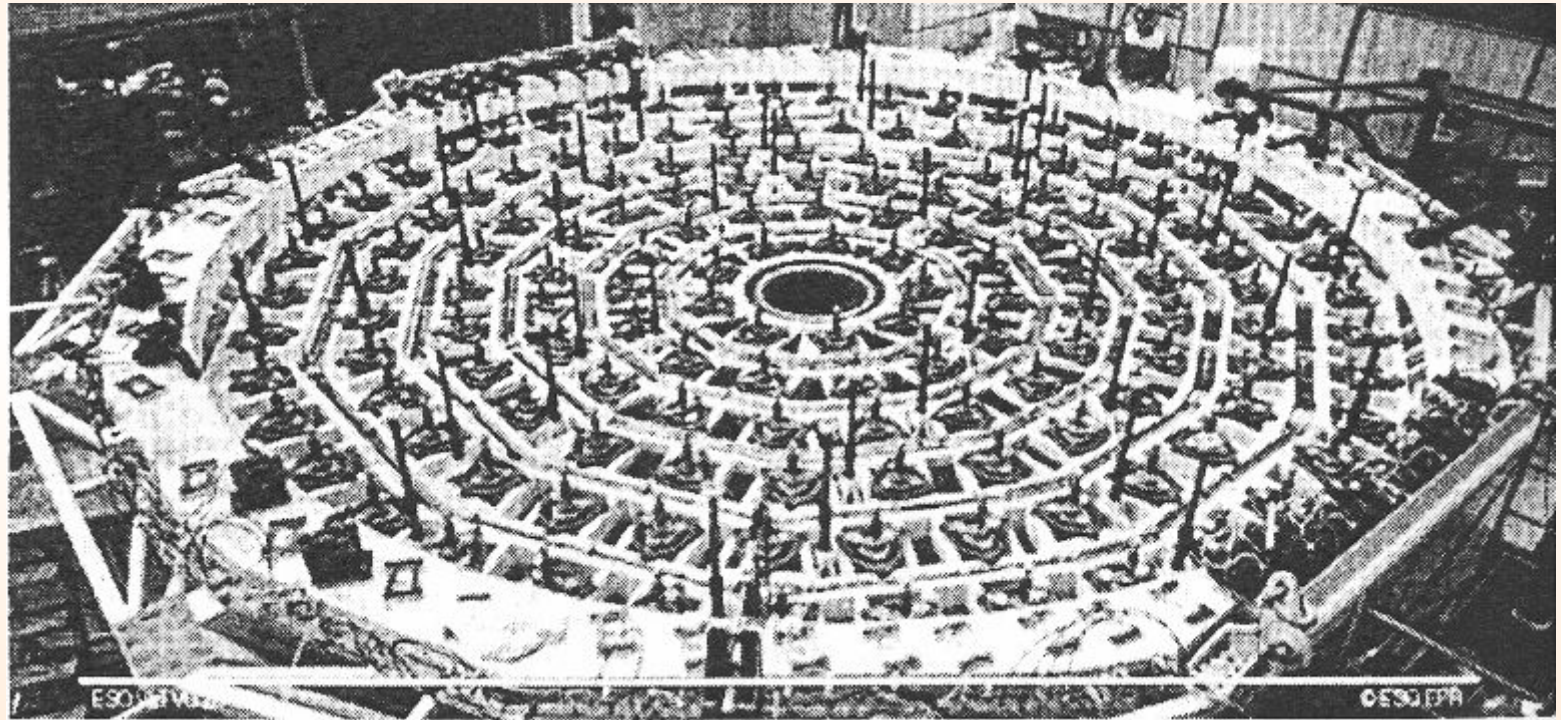
Голографический негатив, освещенный монохроматическим светом, дает полное трехмерное изображение, парящее в пространстве



Способ получения голограммы.

На фотопленку попадают как отраженный от предмета лазерный свет, так и опорный пучок от зеркала<sup>67</sup>

4. Интерференционные волны от отдельных «элементарных» излучателей *используется при создании сложных излучающих систем* (антенн) для электромагнитных и акустических волн.



Оправа 8,2-метрового главного зеркала очень большого телескопа (VLT) Европейской южной обсерватории. В нижнюю поверхность зеркала упираются 150 управляемых «домкратов», которые по командам компьютера поддерживают форму зеркала в идеальном состоянии

В 1963 г. начал работать 300-метровый радиотелескоп со сферической антенной в Аресибо на острове Пуэрто-Рико, установленный в огромном естественном котловане, в горах. В 1976 г. на Северном Кавказе в России начал работать 600-метровый радиотелескоп РАТАН-600. Угловое разрешение радиотелескопа на волне 3 см составляет  $10''$



## 5. *Просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров.*

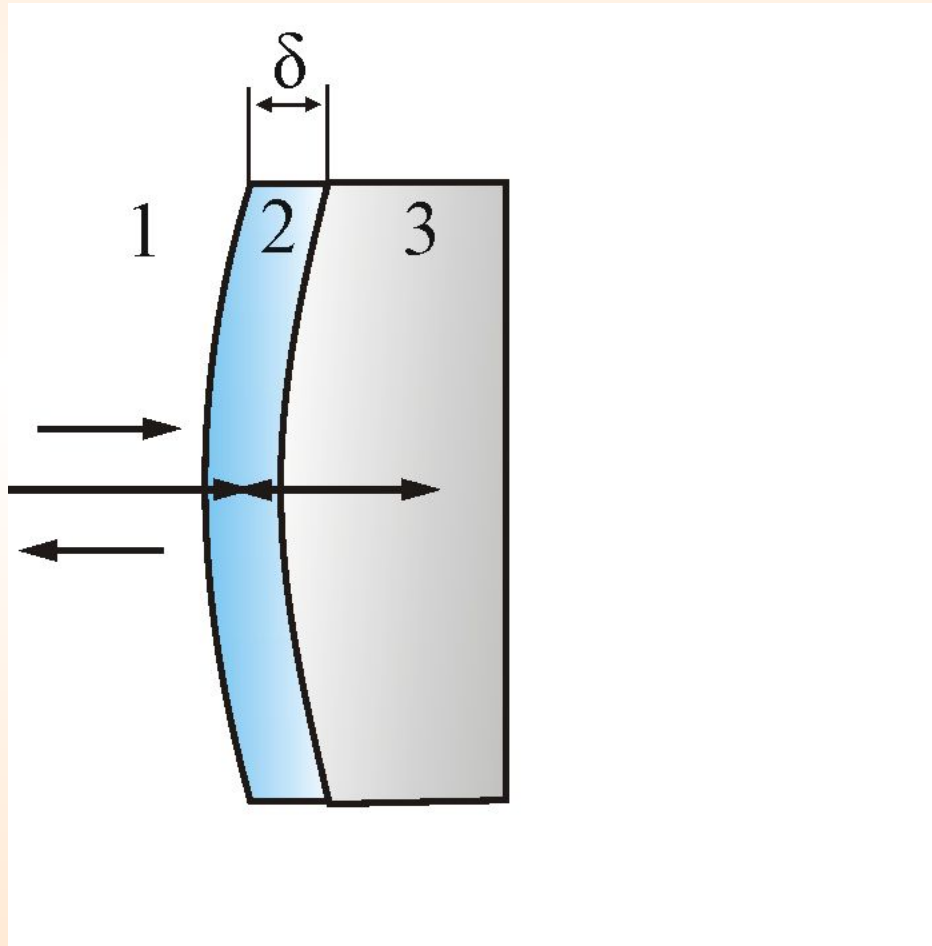
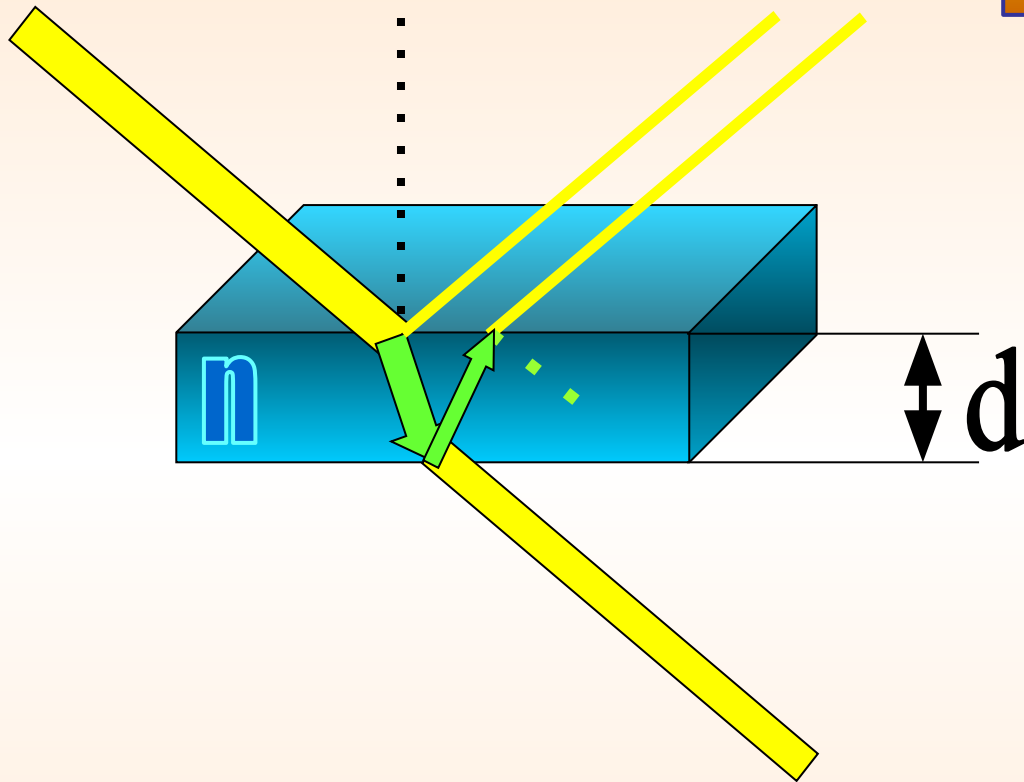


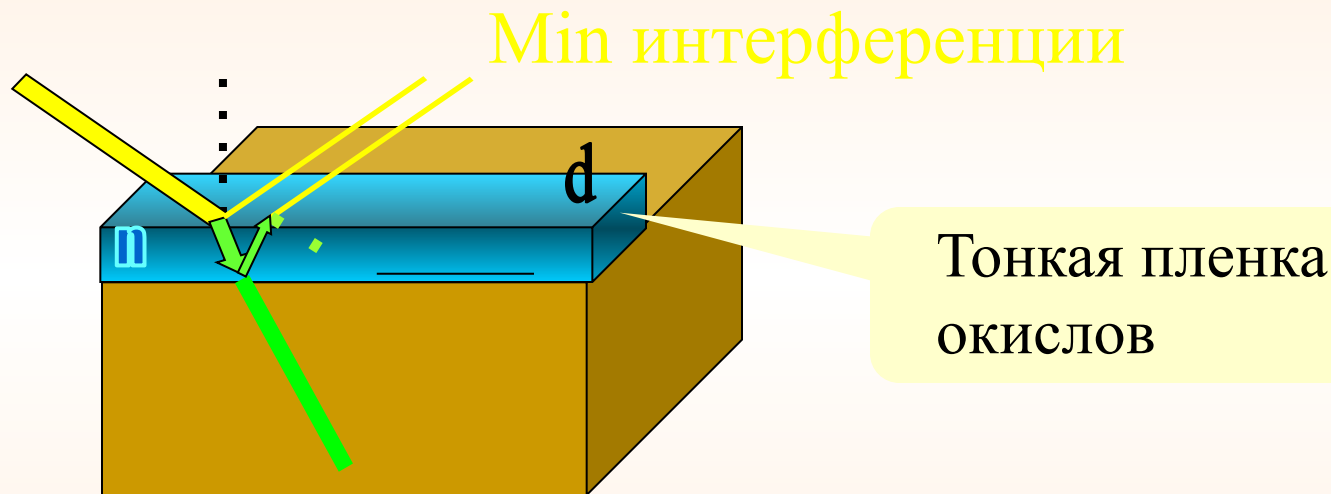
Рисунок 7.15

**min отражения**



**тах пропускания!**

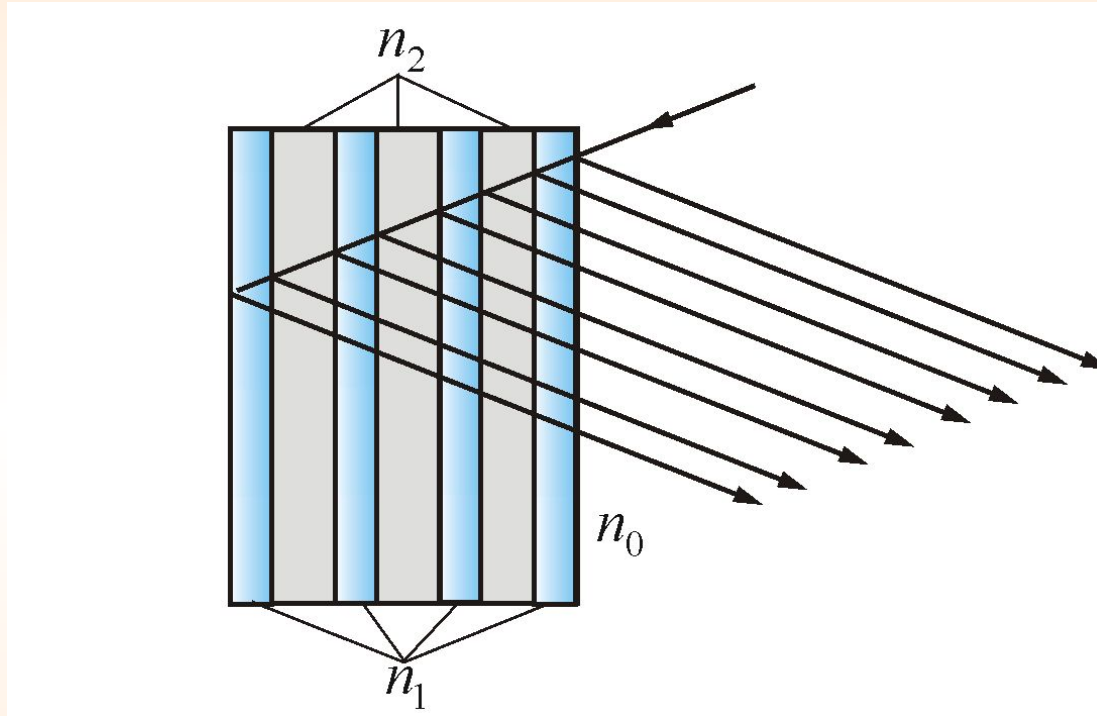
# Просветление линз и солнечных батарей



**тах пропускания света  
в рабочий объем**



## 6. *Получение высокоотражающих электрических зеркал*



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

# ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА!

