Сегодня: *

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

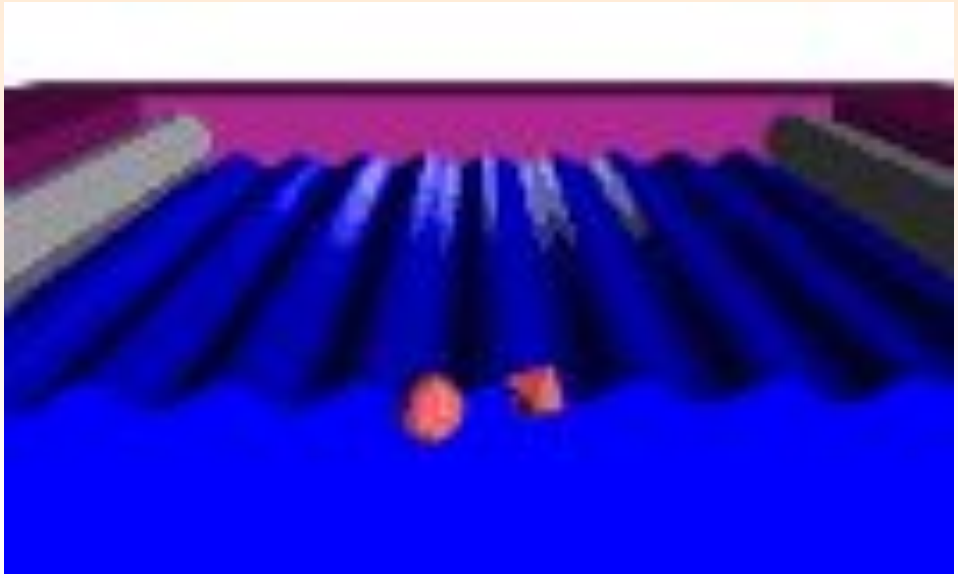
8.6 Применение интерференции света

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.

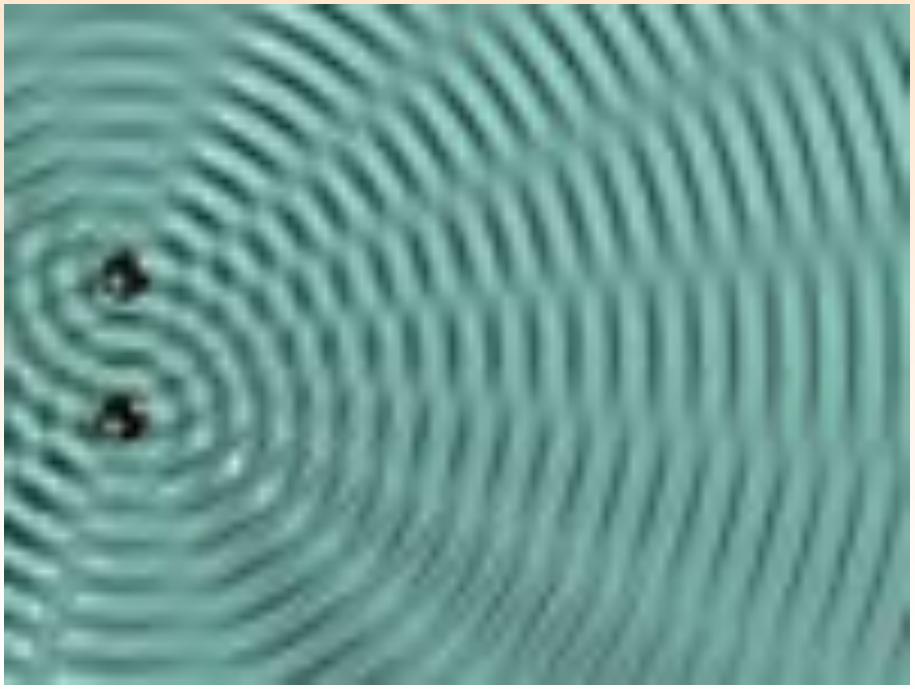
Интерференцией света объясняются окраска тонких масляных пленок на поверхности воды, металлический отлив в окраске крыльев насекомых и птиц, появление цветов побежалости на поверхности металлов, голубоватый цвет просветленных линз оптических приборов и пр.

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.



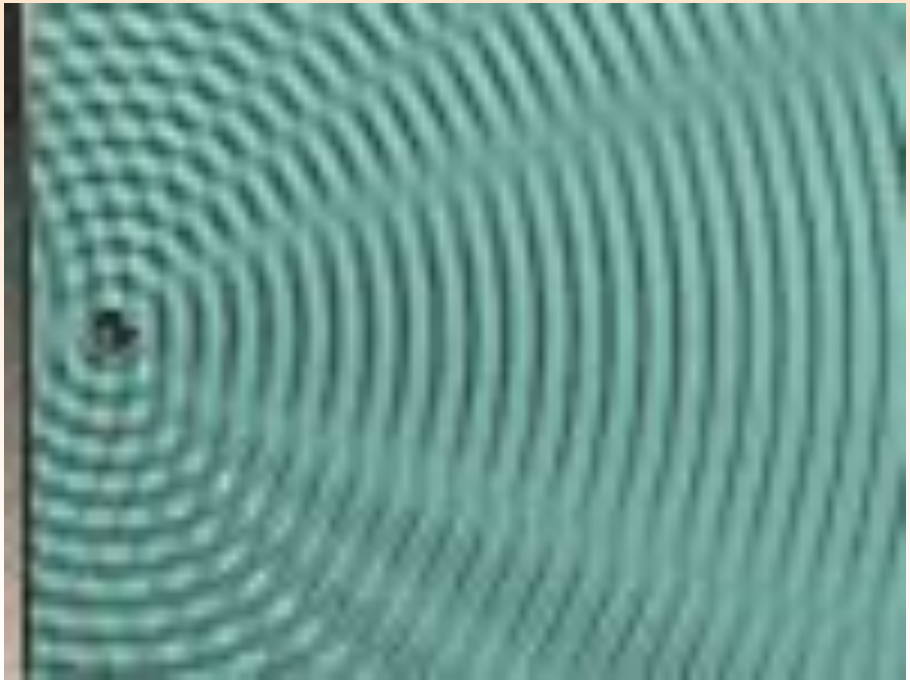
Интерференция двух волн на поверхности жидкости, возбуждаемых вибрирующими стержнями

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)



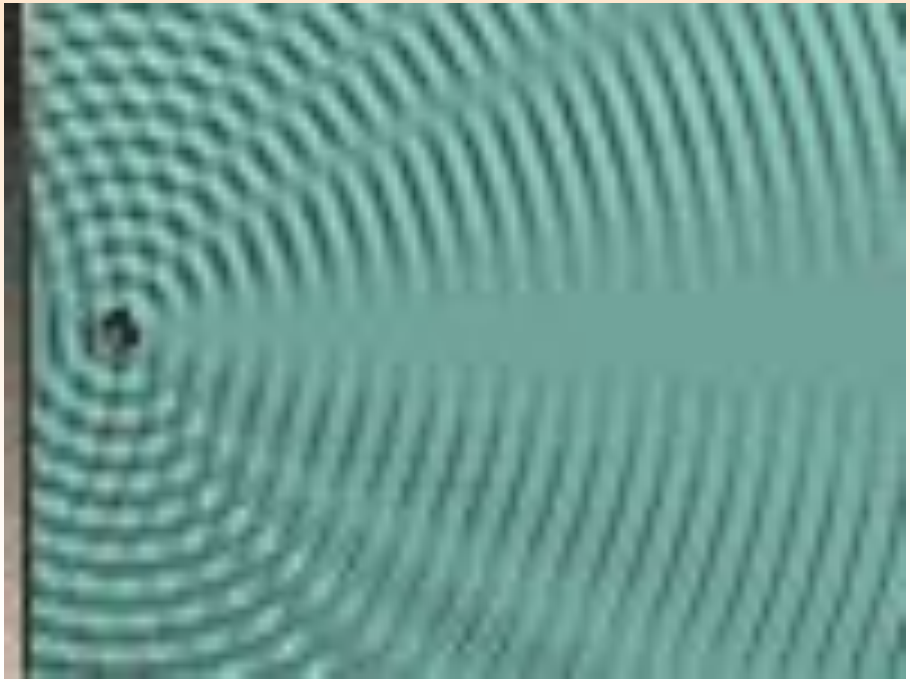
Интерференция поверхностных волн от двух точечных источников

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.***

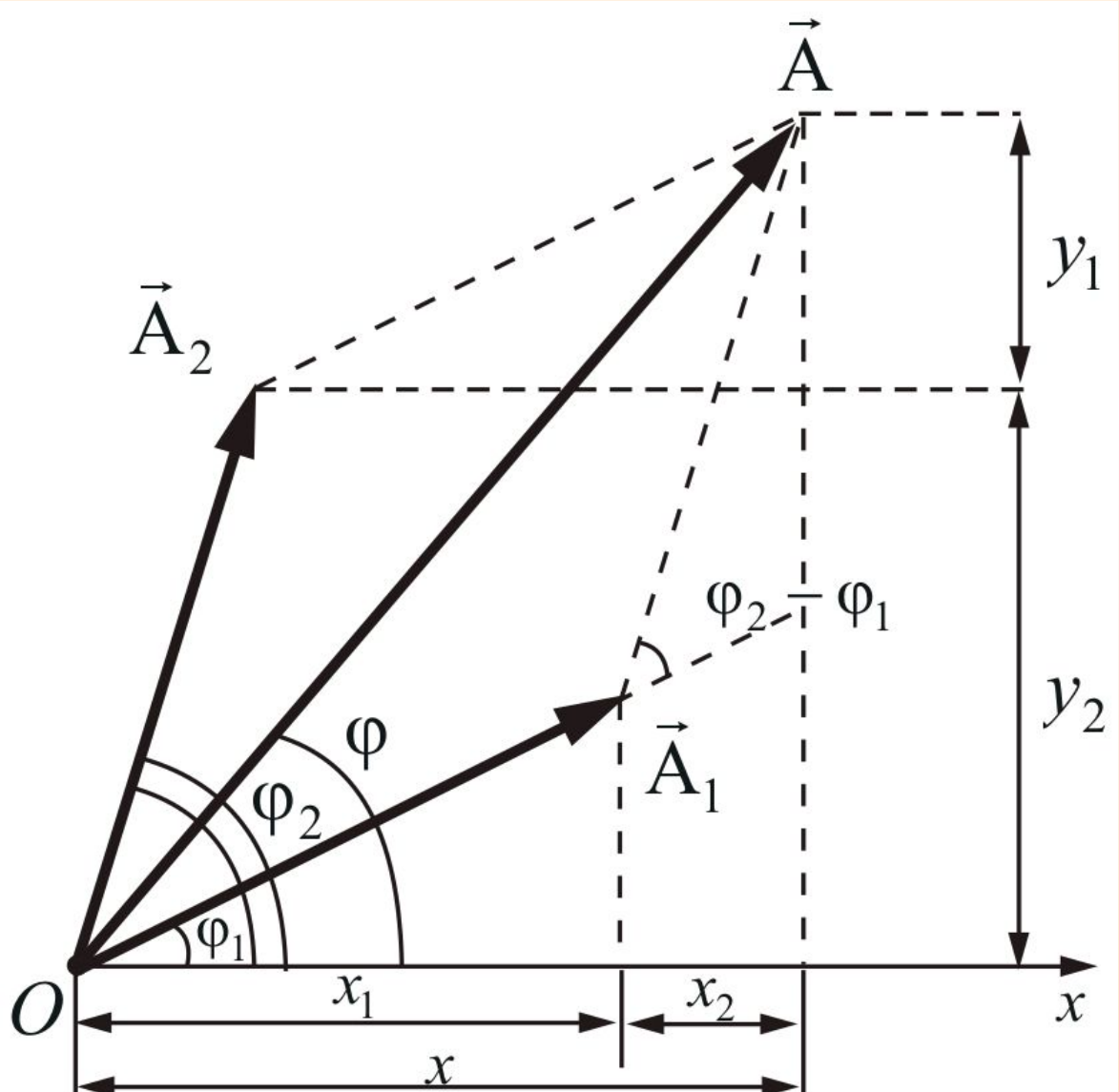
Пусть две волны одинаковой частоты, накладываясь друг на друга, возбуждают в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \phi_1) \qquad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \phi_2)$$

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \phi_2)$$

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_2 - \phi_1)$$ - амплитуда результирующего колебания при сложении колебаний направленных вдоль одной прямой



Ox – опорная прямая

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\tilde{n}os(\phi_2 - \phi_1)$$

Если разность фаз $\phi_2 - \phi_1$ ***колебаний возбужденных волнами в некоторой точке пространства остается постоянной во времени, то такие волны называются*** ***когерентными.***

В случае некогерентных волн разность фаз $\phi_2 - \phi_1$ ***непрерывно изменяется.***

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

$$J = J_1 + J_2 + 2\sqrt{J_1 J_2}\cos(\phi_2 - \phi_1) \qquad (7.2.2)$$

Последнее слагаемое в этом выражении

$2\sqrt{J_1 J_2}\cos(\phi_2 - \phi_1)$ ***-интерференционный член.***

В случае когерентных волн $\cos(\phi_2 - \phi_1) = \text{const}$

$\cos(\phi_2 - \phi_1) > 0 \qquad J > J_1 + J_2$

в максимуме $\boxed{J = 4J_1}$

где $\cos(\phi_2 - \phi_1) < 0$, интенсивность

$J < J_1 + J_2$; ***в минимуме*** $\boxed{J = 0}$

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 слагается из волн, хаотически испускаемых многими атомами.

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

И так суть интерференции света :

Знаем

Интерференцией света называется…

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (10)$$

(11)

Условие мах

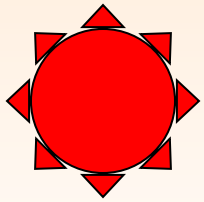
$$\Delta_{12} = m\,\lambda \quad (12)$$

Условие min

$$\Delta_{12} = (m \pm 1/2)\,\lambda \quad (13)$$

$m = 0,1,2,3,\ldots$

В обычном «естественном» свете вектор **E** направлен равновероятно во все стороны.



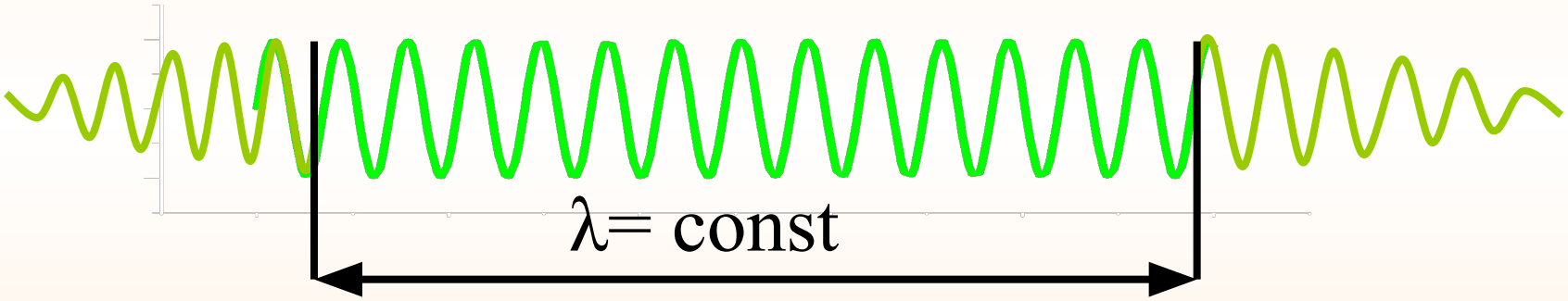
- «Ёжик» векторов (фото за Δt)

Каждый вектор **E** – это суперпозиция волн от отдельного атома

За 10^{-8} с. атом «вспыхнул» и «погас» , испустив некоторую $\sum$ квантов $h\nu$ ($\lambda\nu = c$), т.е. определённый набор длин волн – ***цуг волн***.

Этот набор обусловлен соответствующими переходами электронов из возбуждённого состояния в нормальное.

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 $10^{-8}\,c.$

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

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:

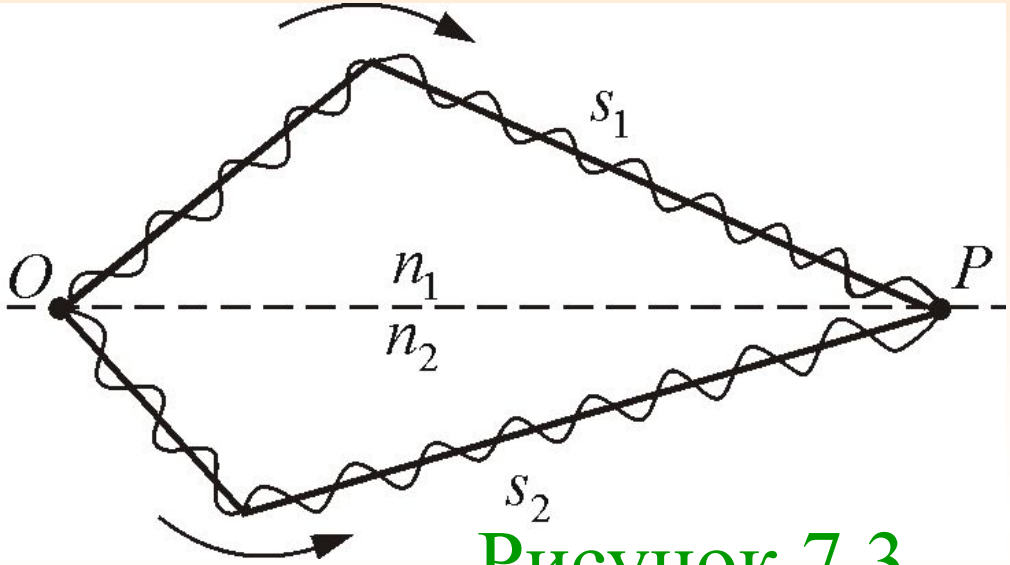


Рисунок 7.3

Первая волна

$$x_1 = A_1 \cos\omega\left(t - \frac{s_1}{\upsilon_1}\right)$$

вторая

$$x_2 = A_2 \cos\omega\left(t - \frac{s_2}{\upsilon_2}\right)$$

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***

$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \ldots) \tag{7.2.3}$$

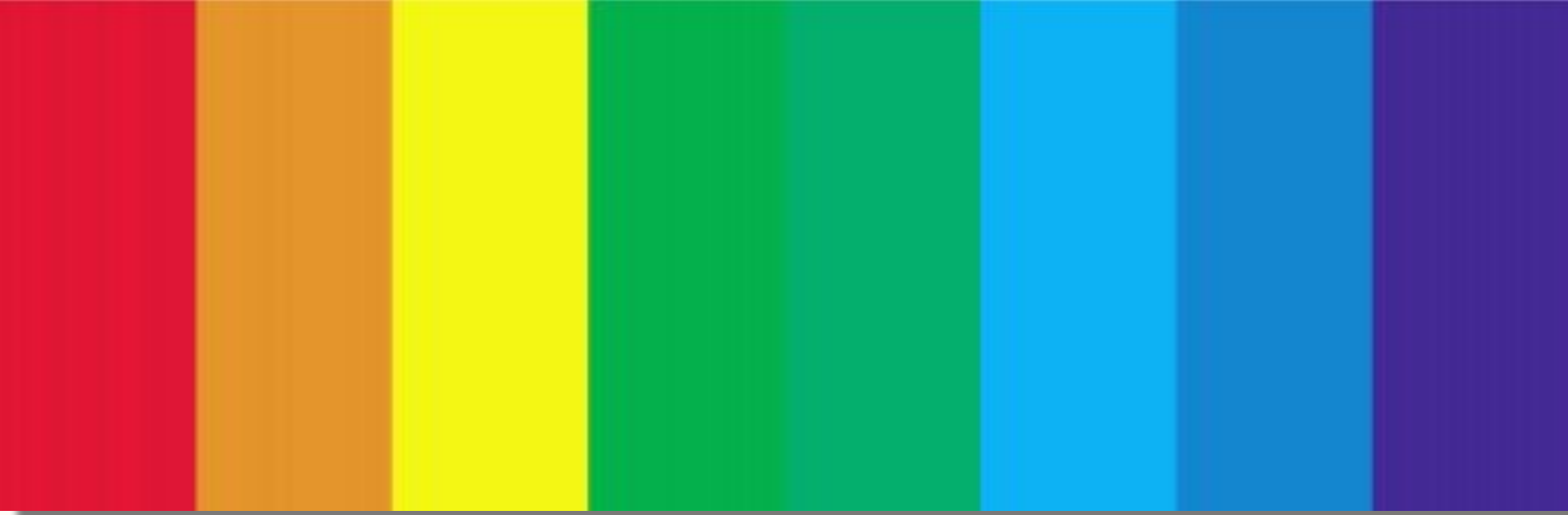
- условие ***интерференционного максимума.***

- ***Если оптическая разность хода равна полу-целому числу длин волн***

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

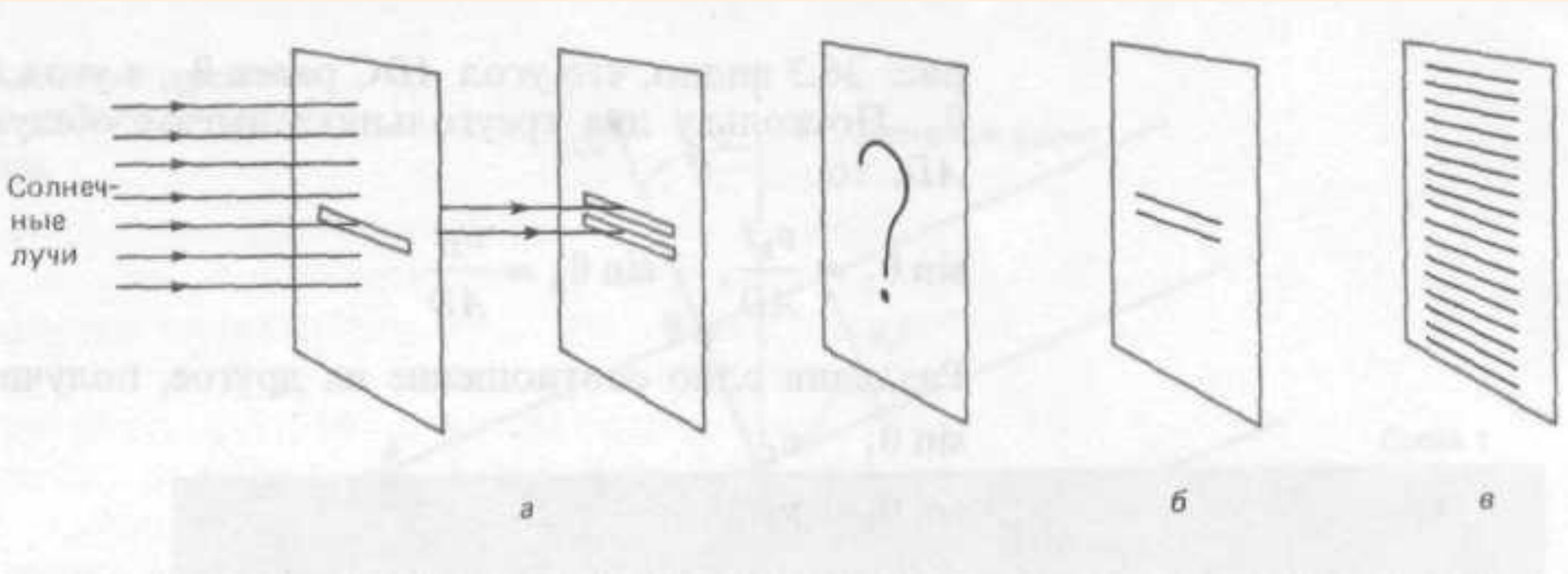
- условие ***интерференционного минимума.***

8.2 Опыт Юнга

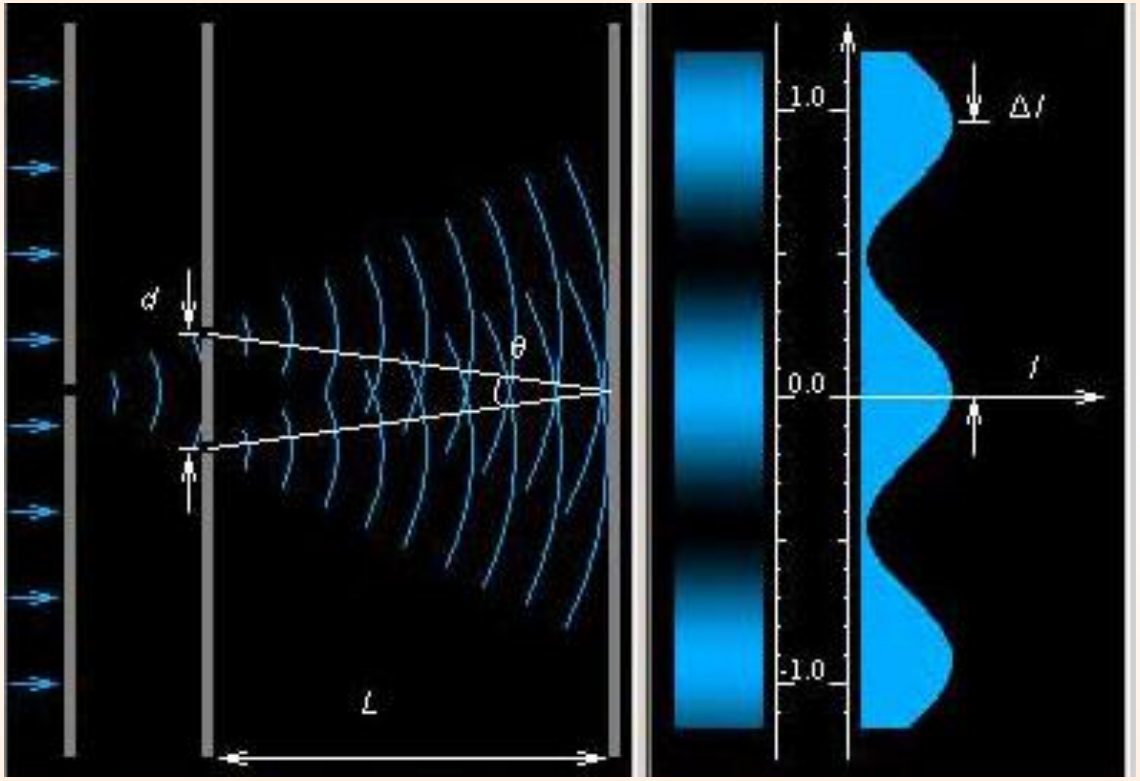


620-780 нм	585-620 нм	575-585 нм	550-575 нм	510-550 нм	480-510 нм	450-480 нм	380-450 нм

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

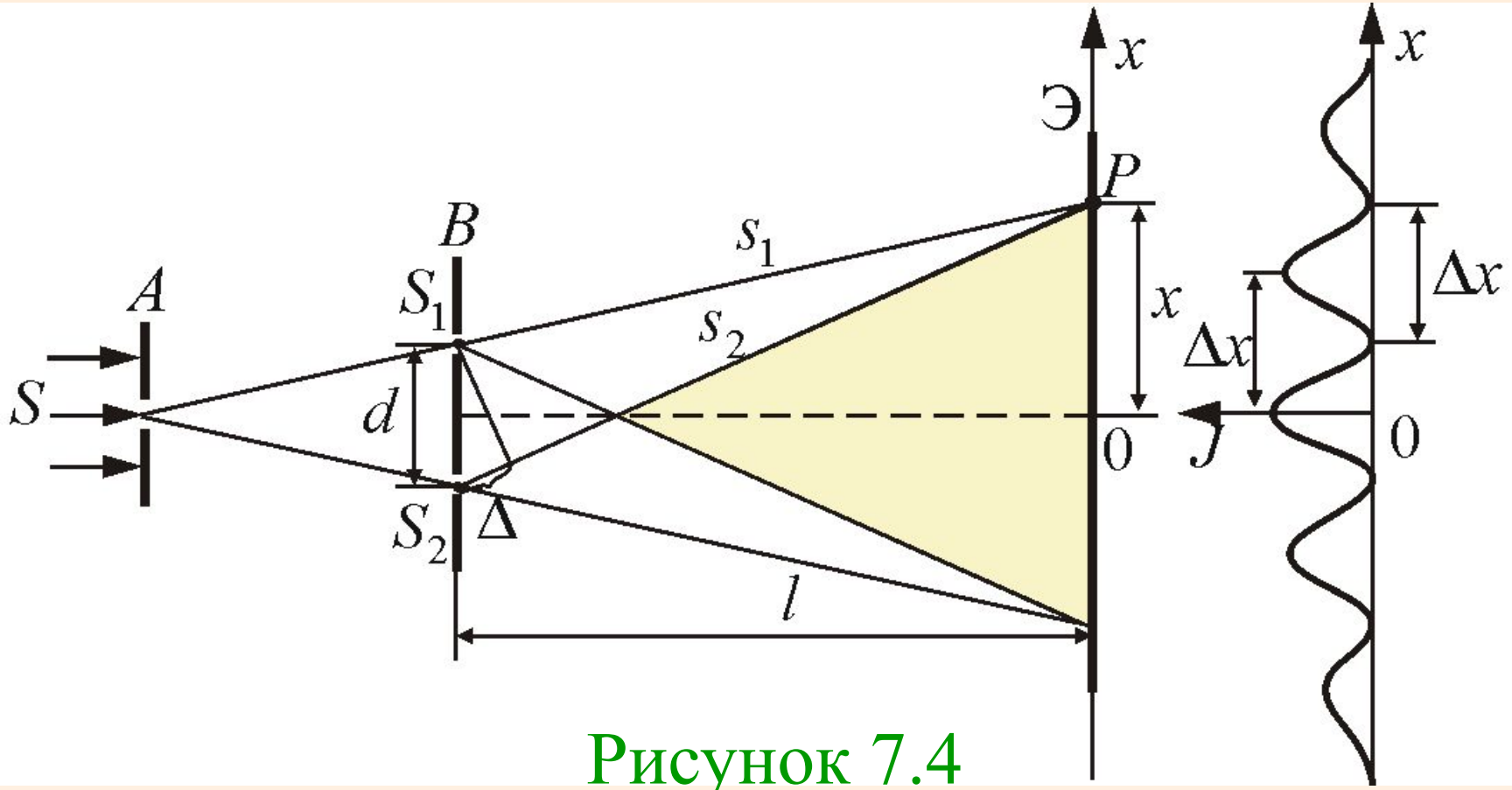
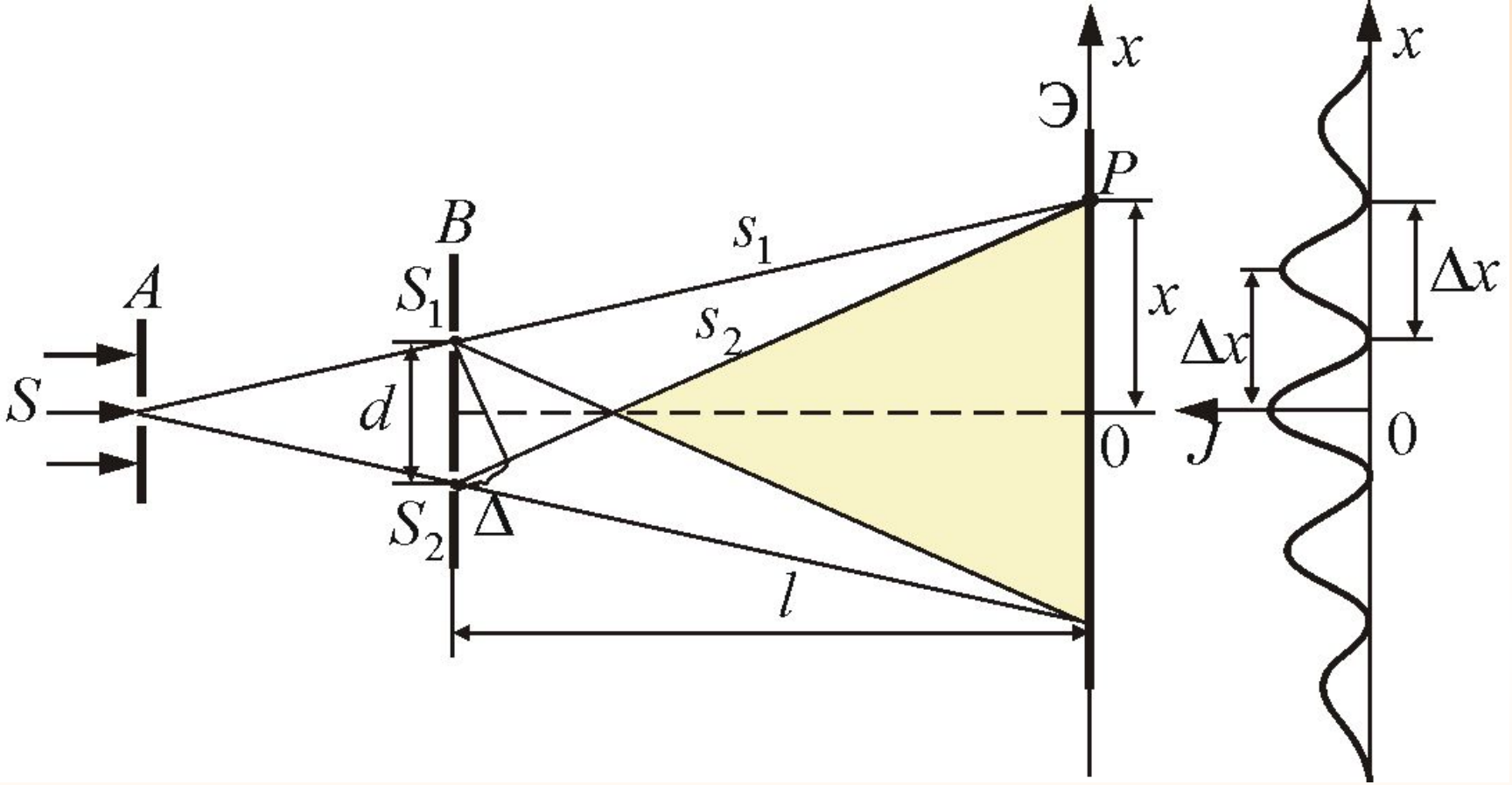


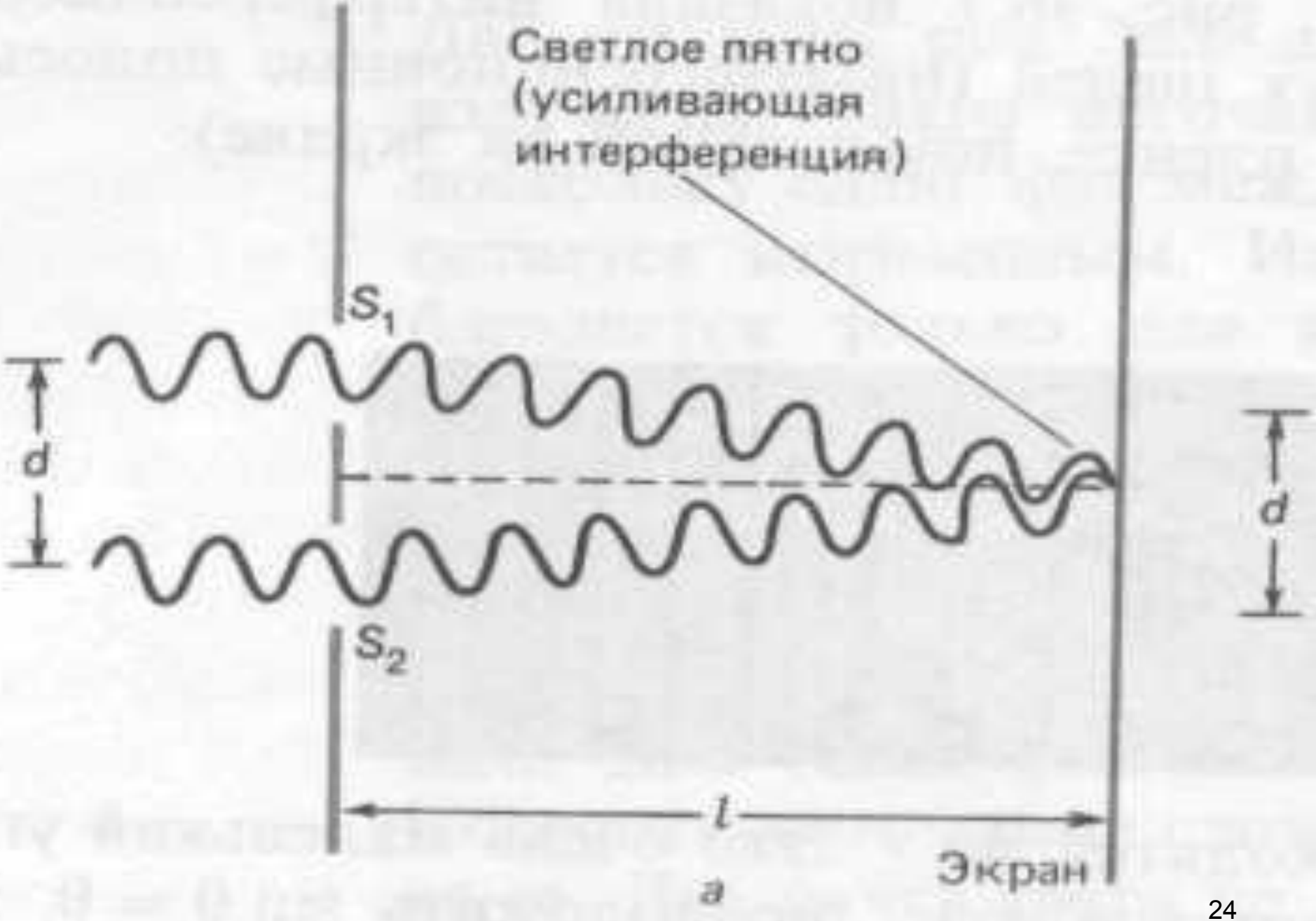
Рисунок 7.4

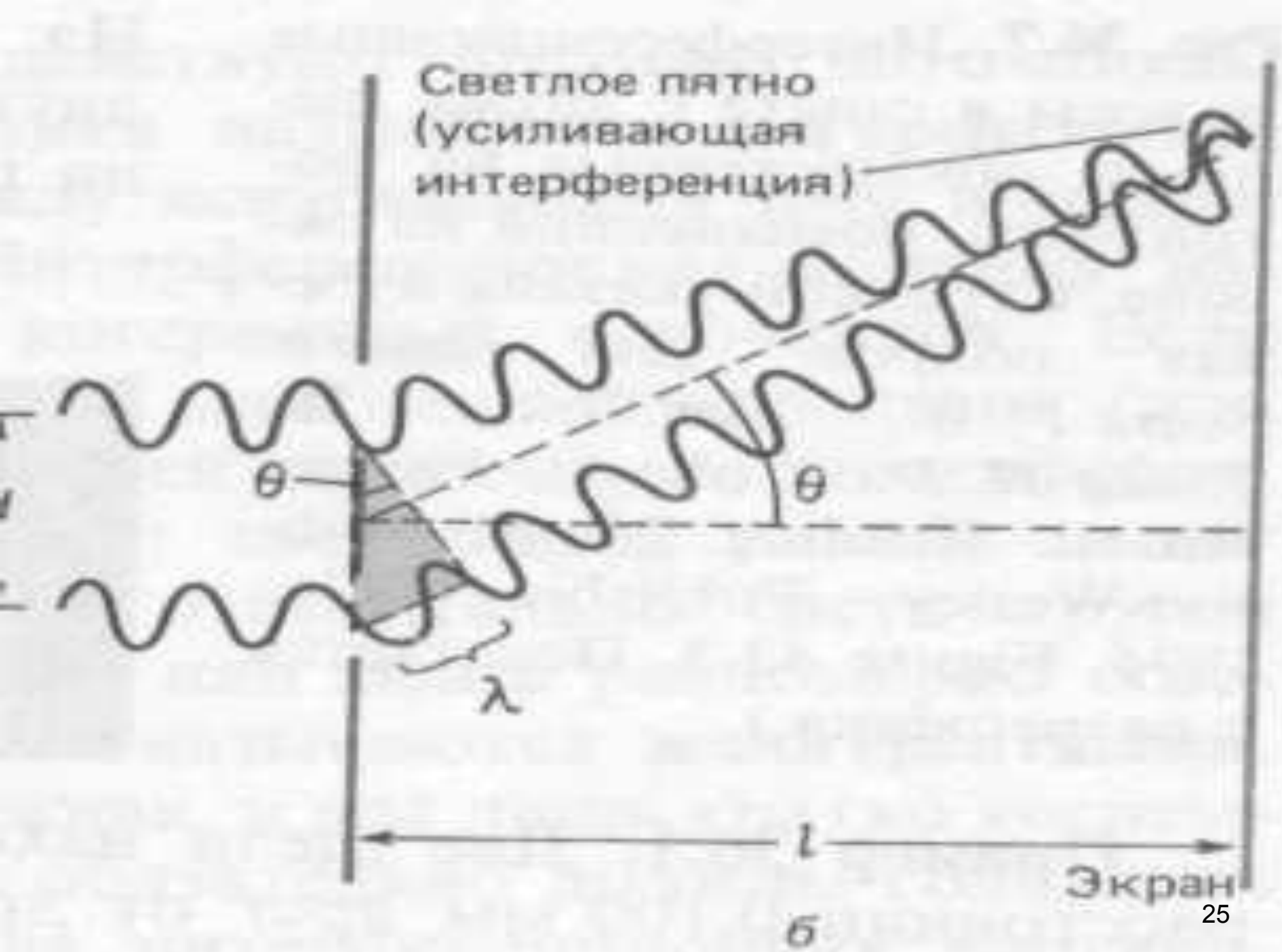
Расстояние ***l*** от щелей, причем $l >> d$

Показатель преломления среды – n.

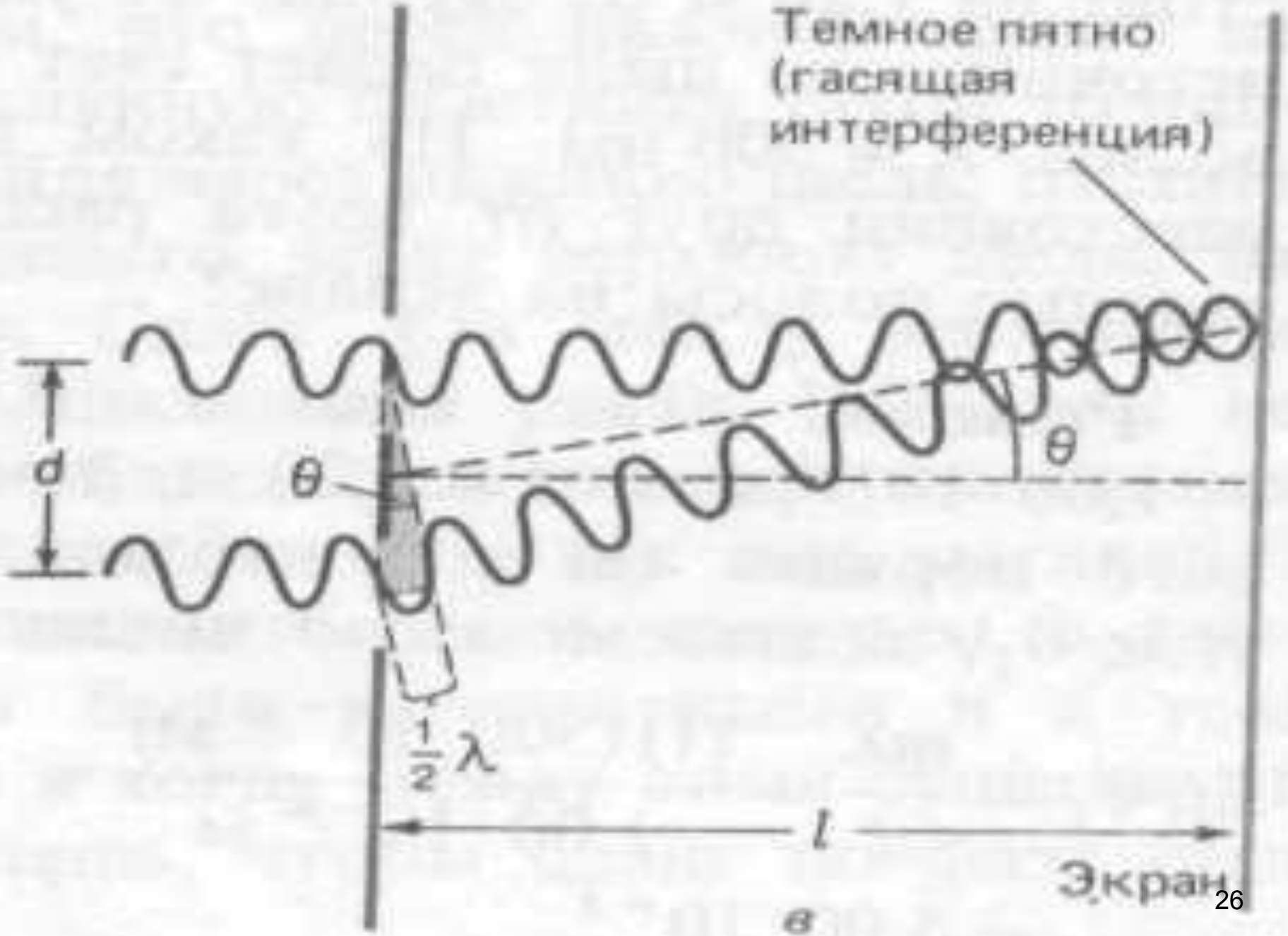


Главный максимум, соответствующий $m = 0$ проходит через точку ***O***. Вверх и вниз от него рас*полагаются* ***максимумы*** (*минимумы*) ***первого*** $(m = 1)$, ***второго*** $(m = 2)$ ***порядков***, и т. д.

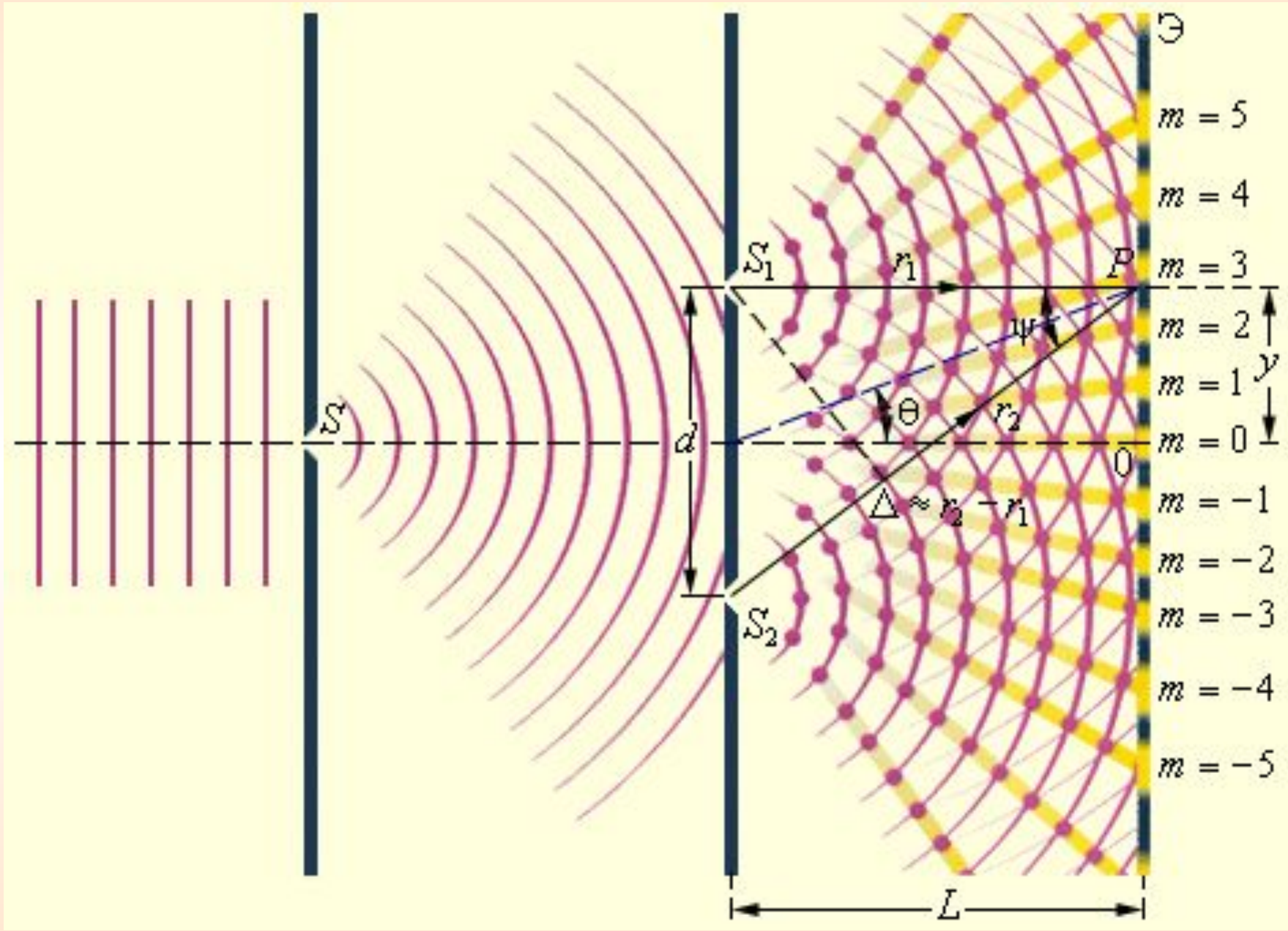

Светлое пятно
(усиливающая
интерференция)
S_1
S_2
d
d
l
Экран
а



б



в

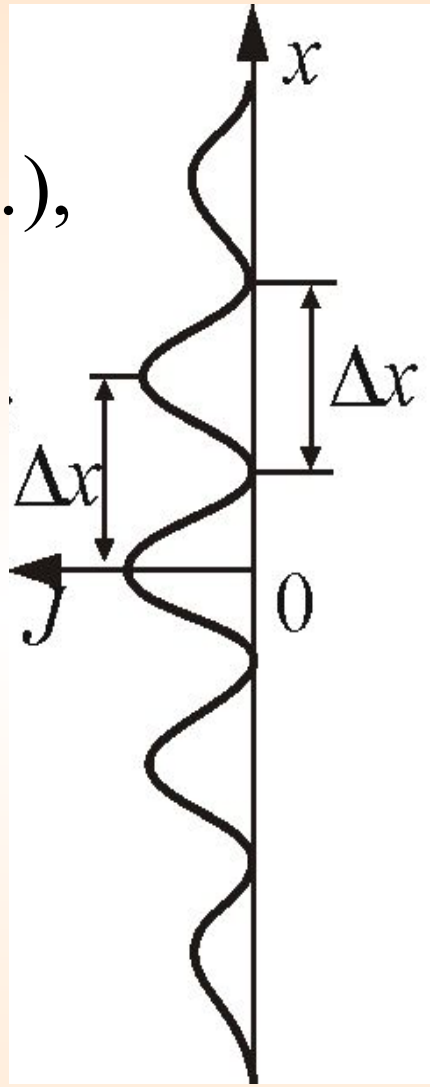

Э
m = 5
m = 4
m = 3
m = 2
m = 1
m = 0
m = −1
m = −2
m = −3
m = −4
m = −5
S
S1
S2
r1
r2
P
O
ψ
θ
d
y
L
Δ ≈ r2 − r1

Максимумы интенсивности будут наблюдаться ***в координатах***:

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

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.

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

$$\Delta t << \tau_{\text{êîã}} = \frac{\pi}{\Delta\omega} \qquad (7.4.1)$$

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

За промежуток времени $\tau_{\text{êîã}}$ 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.

$$l_{\text{ког}} = \upsilon \tau_{\text{ког}} = \frac{\pi \upsilon}{\Delta \omega} \qquad (7.4.2)$$

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

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

Можно показать ,что

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

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

Предельный наблюдаемый порядок интерференции

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

- 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.*

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

$\rho_к$ – радиус пространственной когерентности;
λ – длина волны;
θ – угловой размер источника.

Критерий наблюдения интерференции при протяженном источнике:

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

- интерференционные схемы с большой апертурой требуют источников малых размеров.

b - допустимый размер источника;
λ – длина волны;
Ω - ***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

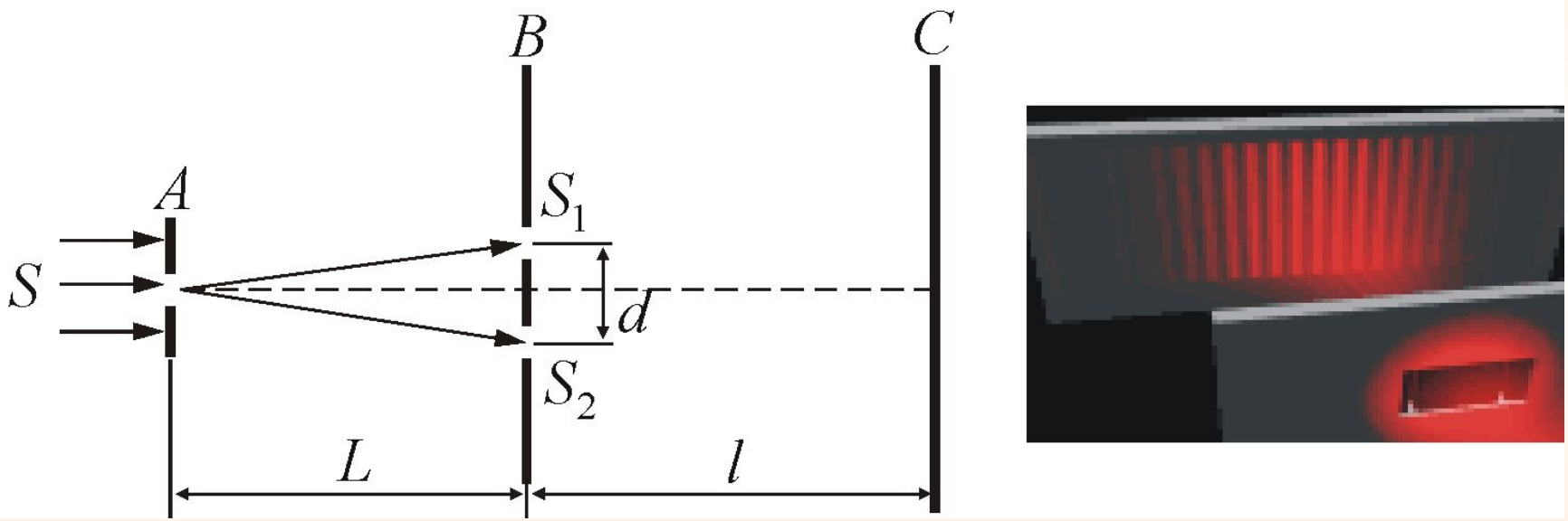
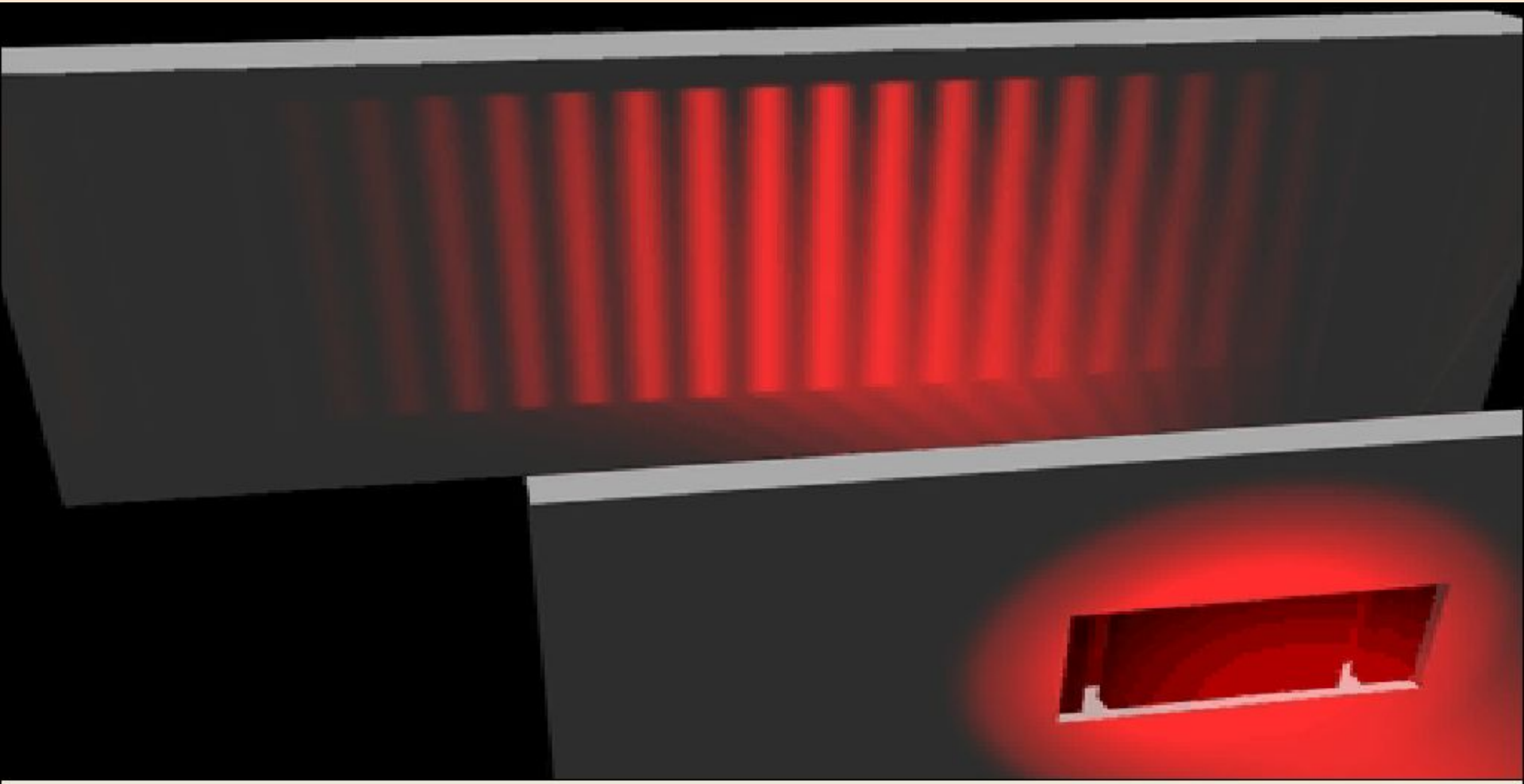


Рисунок 7.5

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



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

2. Зеркала Френеля

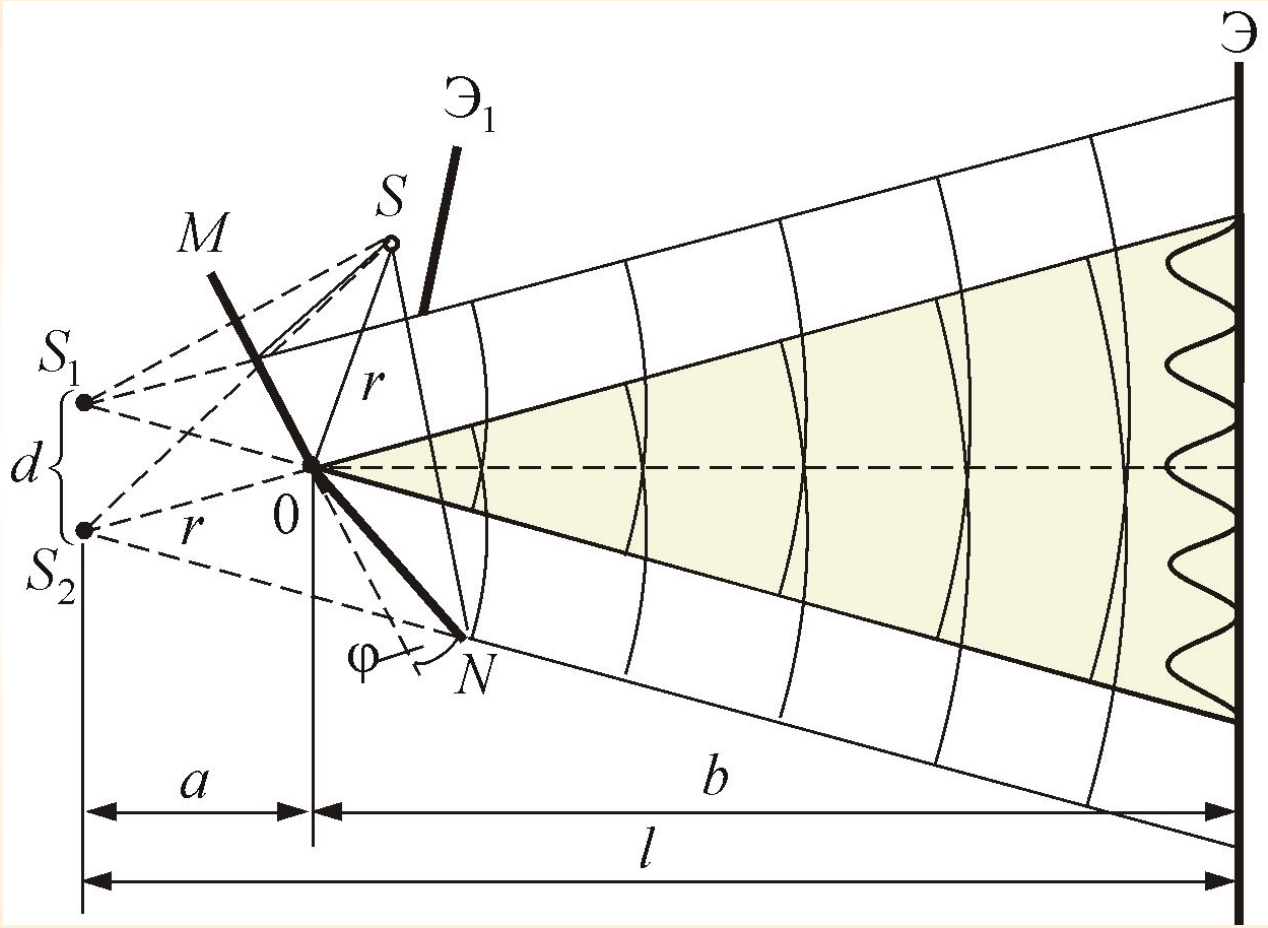


Рисунок 7.6

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

3. Бипризма Френеля

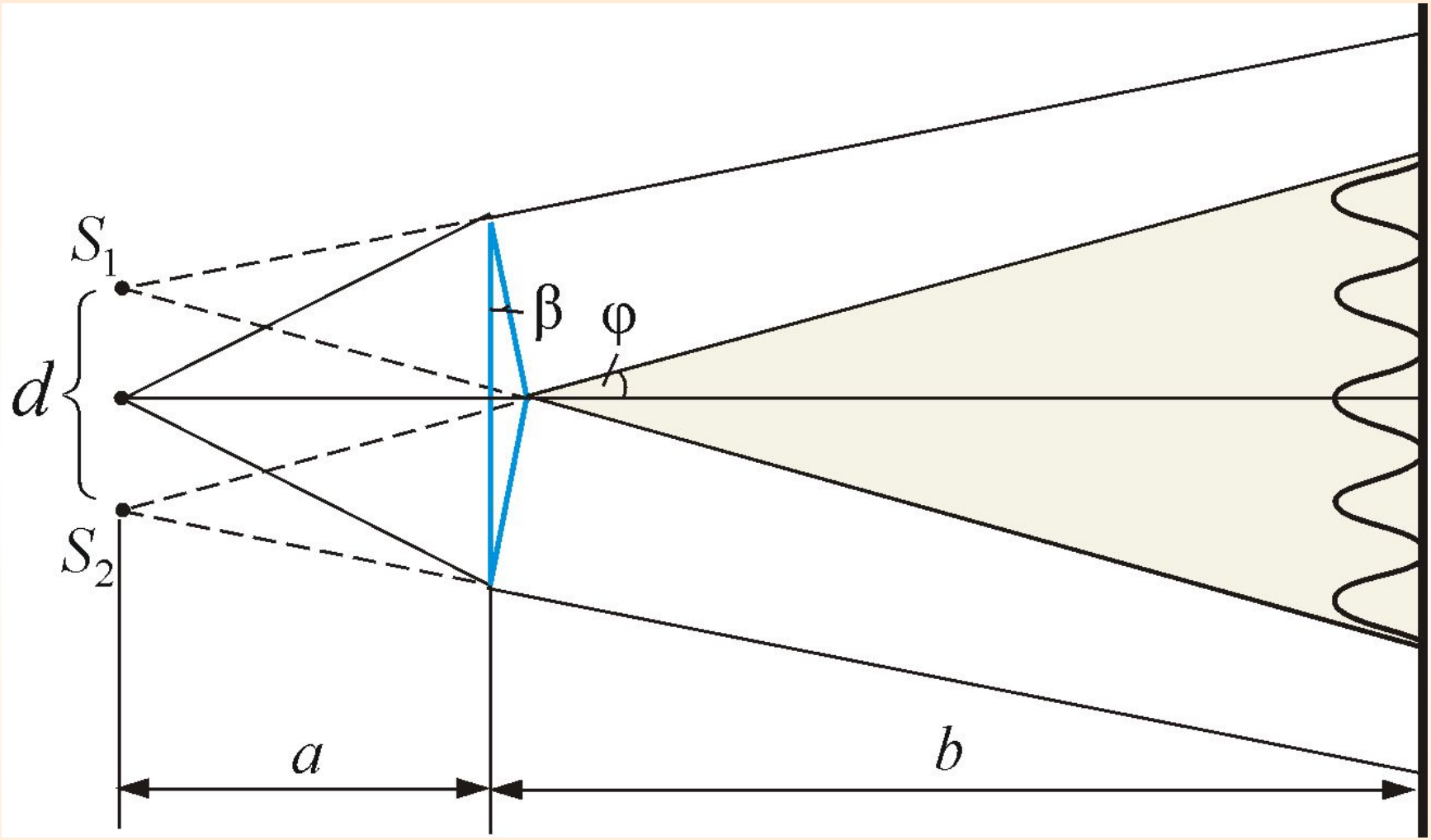


Рисунок 7.7

4. Билинза Бийе

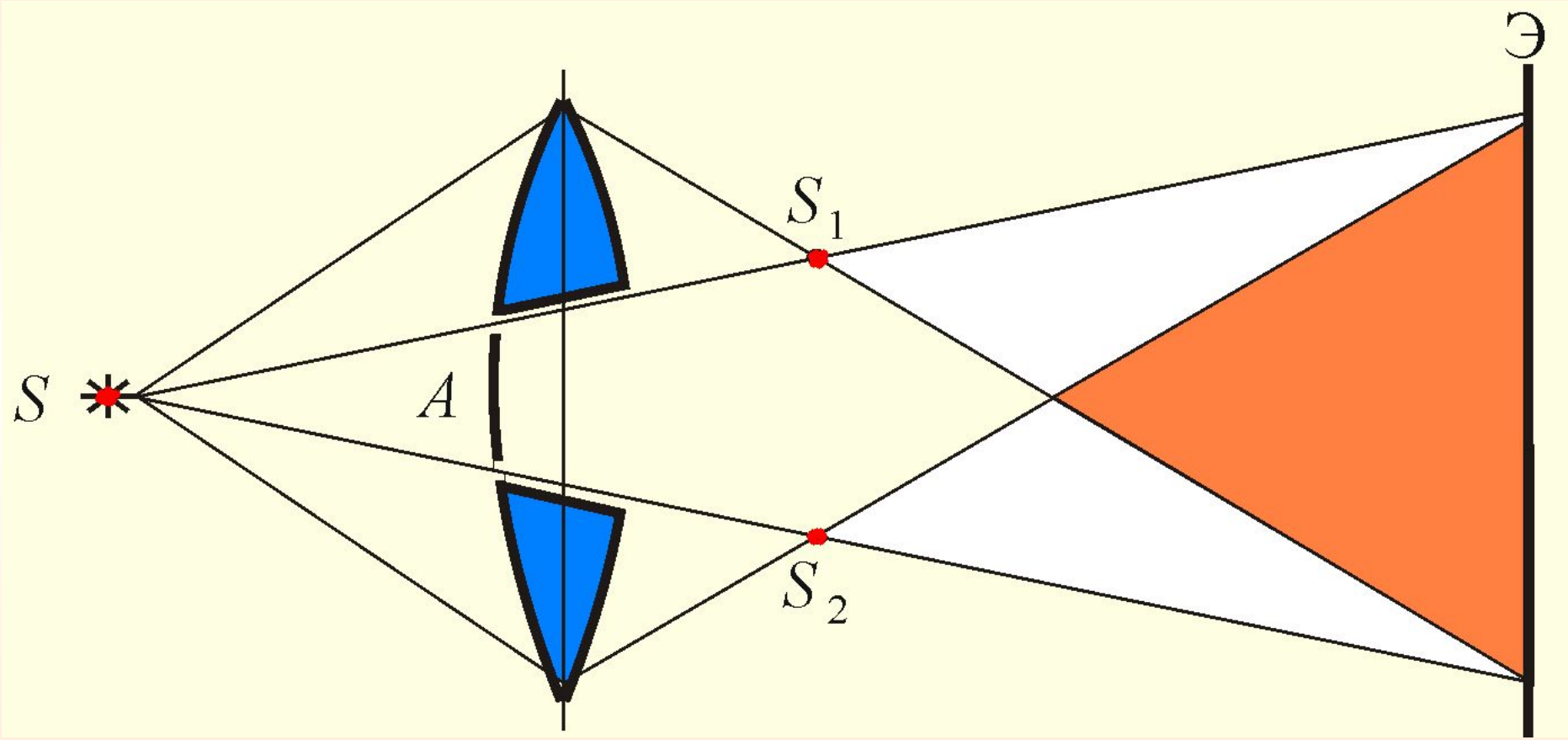
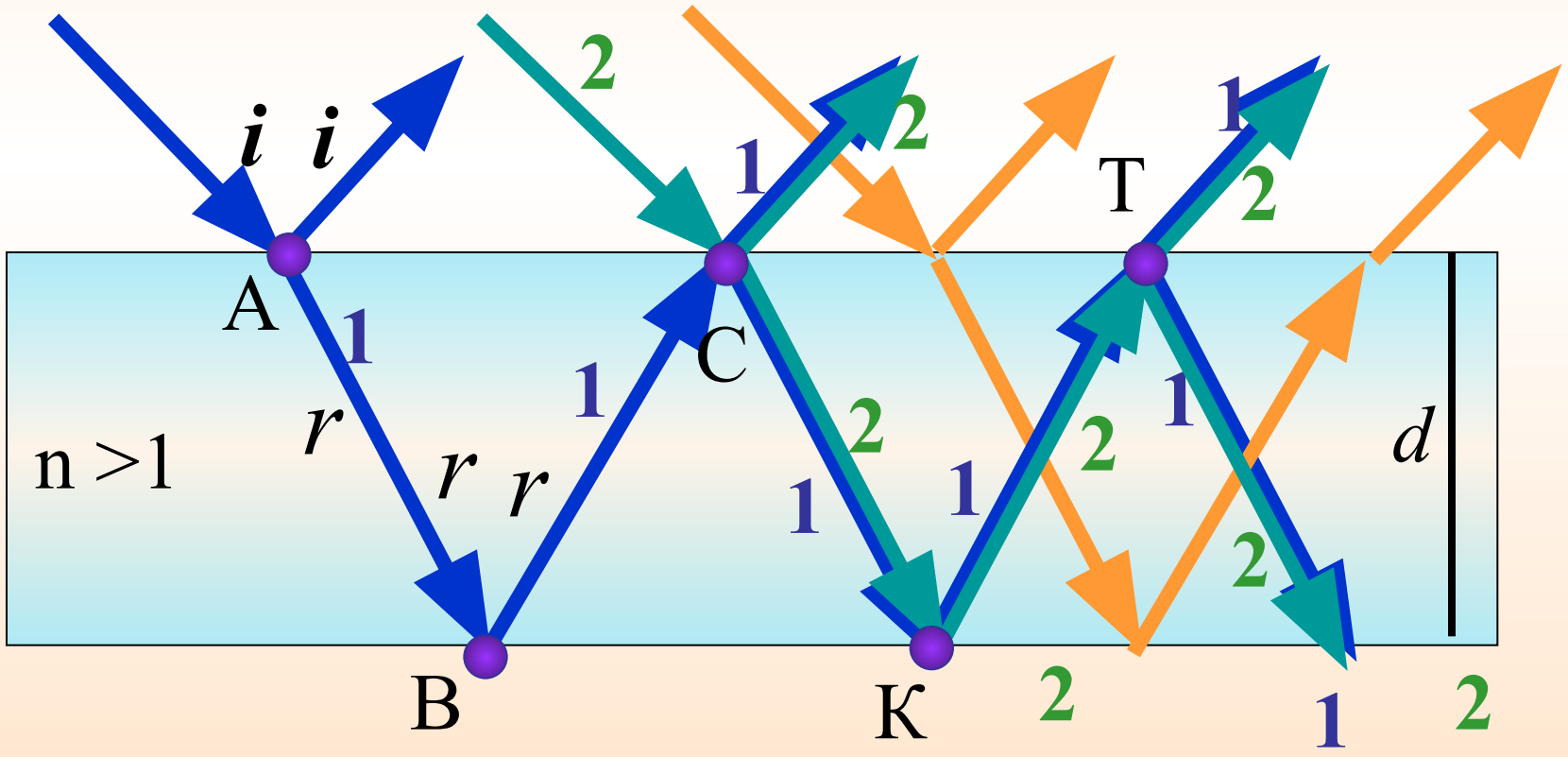


Рисунок 7.8

8.5 Интерференция в тонких пленках

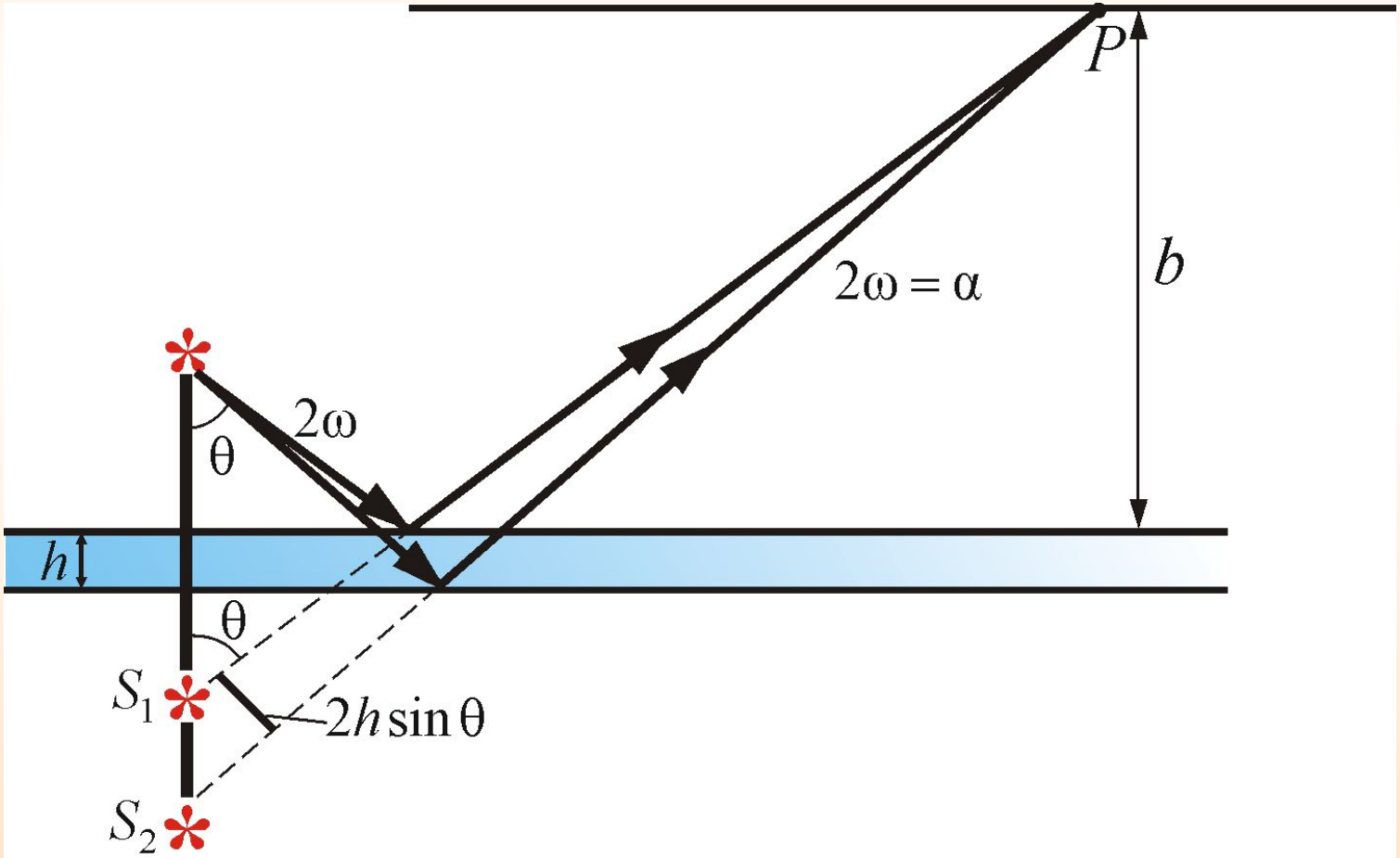
$d = (350 \div 760)\ 10^{-9}$ м.

Каждый луч, падающий на границу раздела 2-х сред многократно отражается и преломляется.



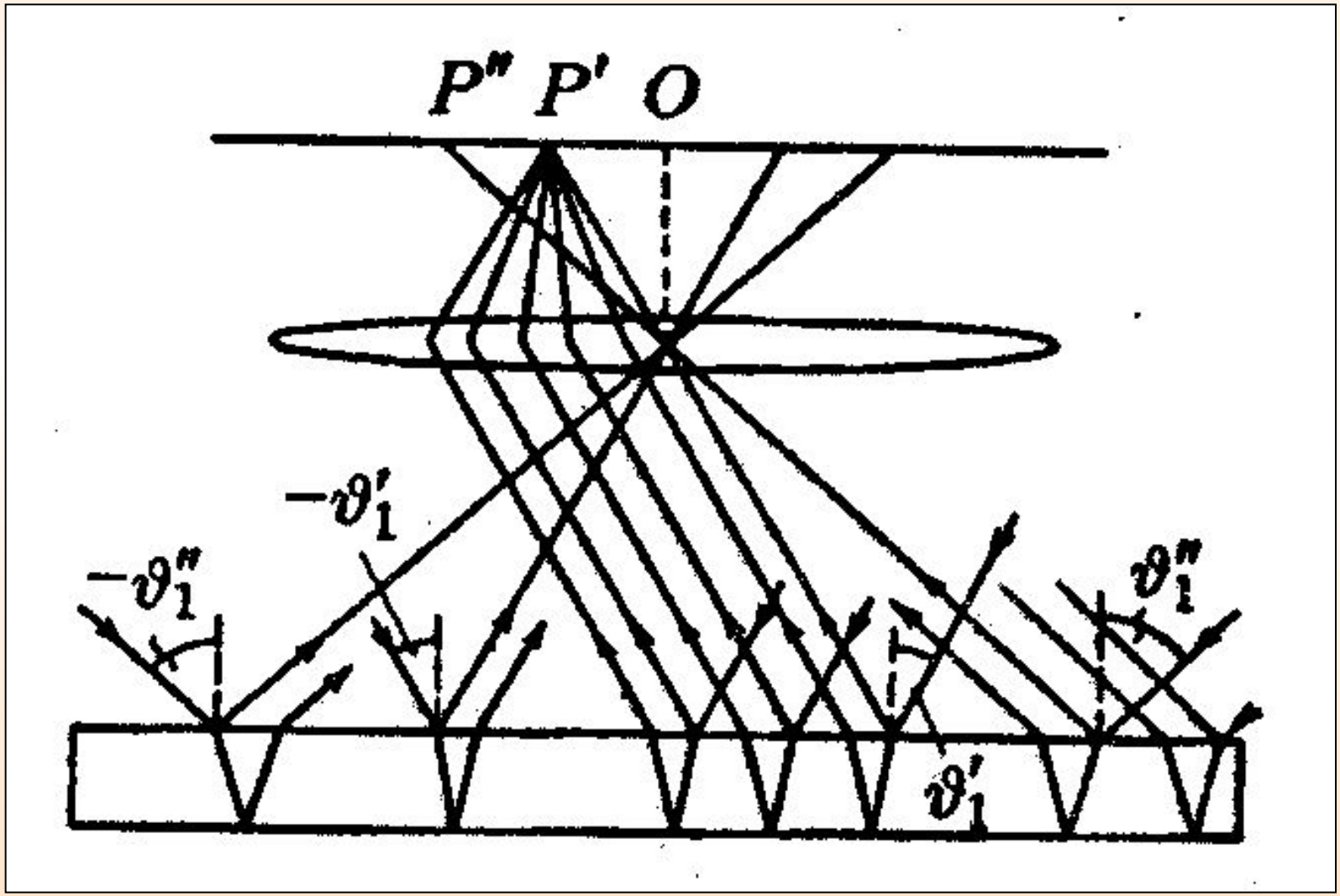
Опыт Поля

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***.



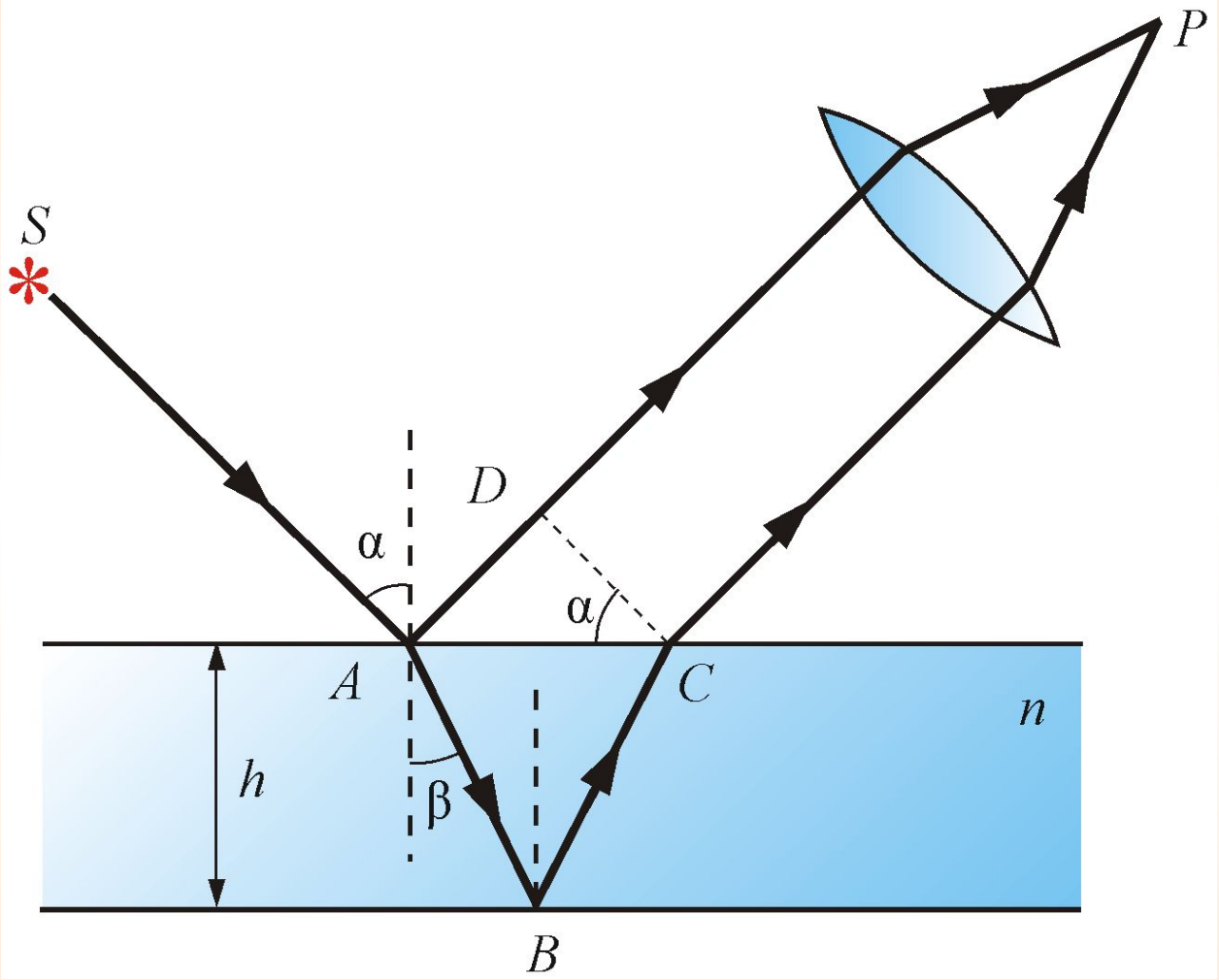
Интерференция в тонких пленках

Интерференционные полосы равного наклона



Интерференция в тонких пленках

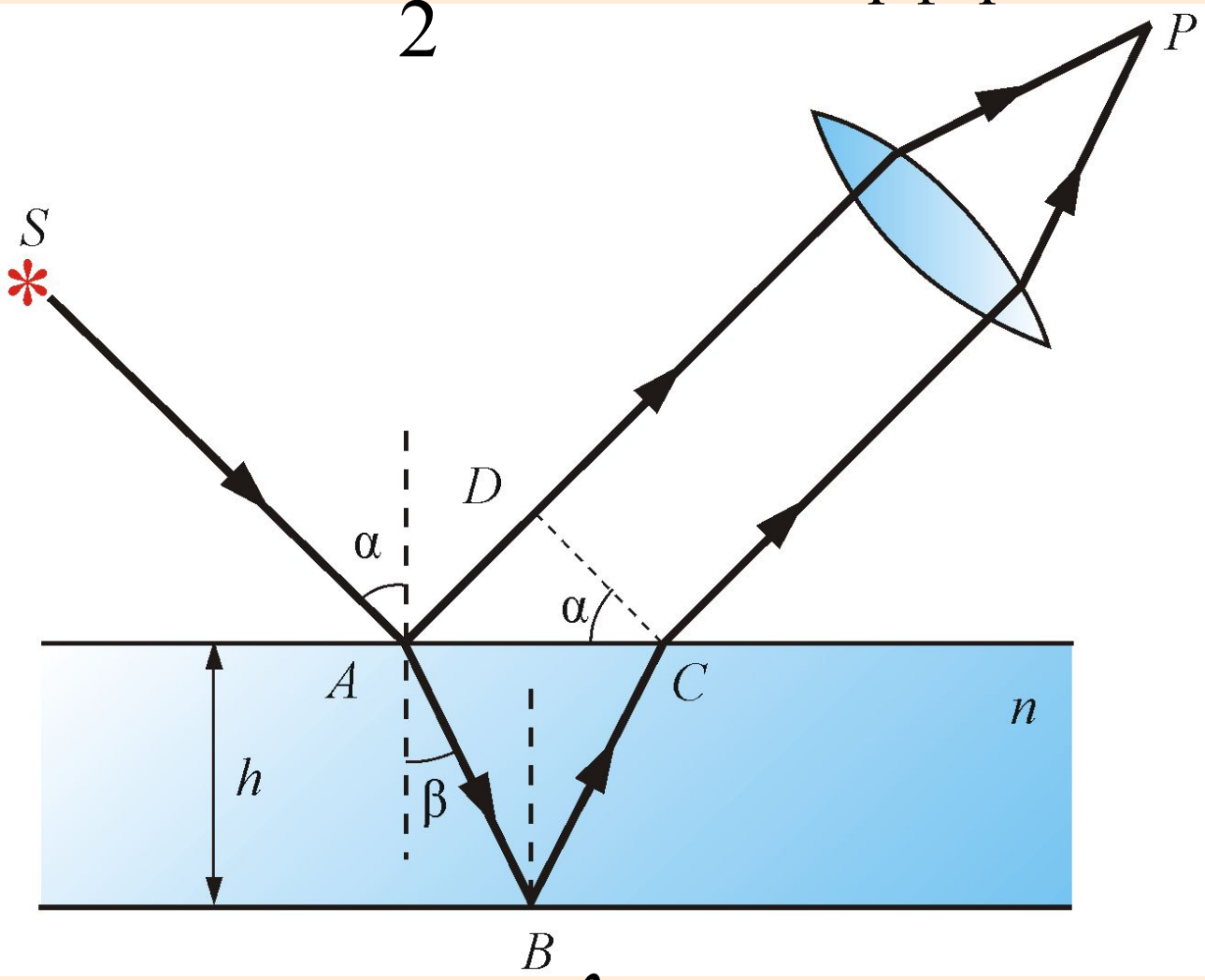
Интерференционные полосы равного наклона



Оптическая разность хода с учетом потери полуволны:

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

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



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

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

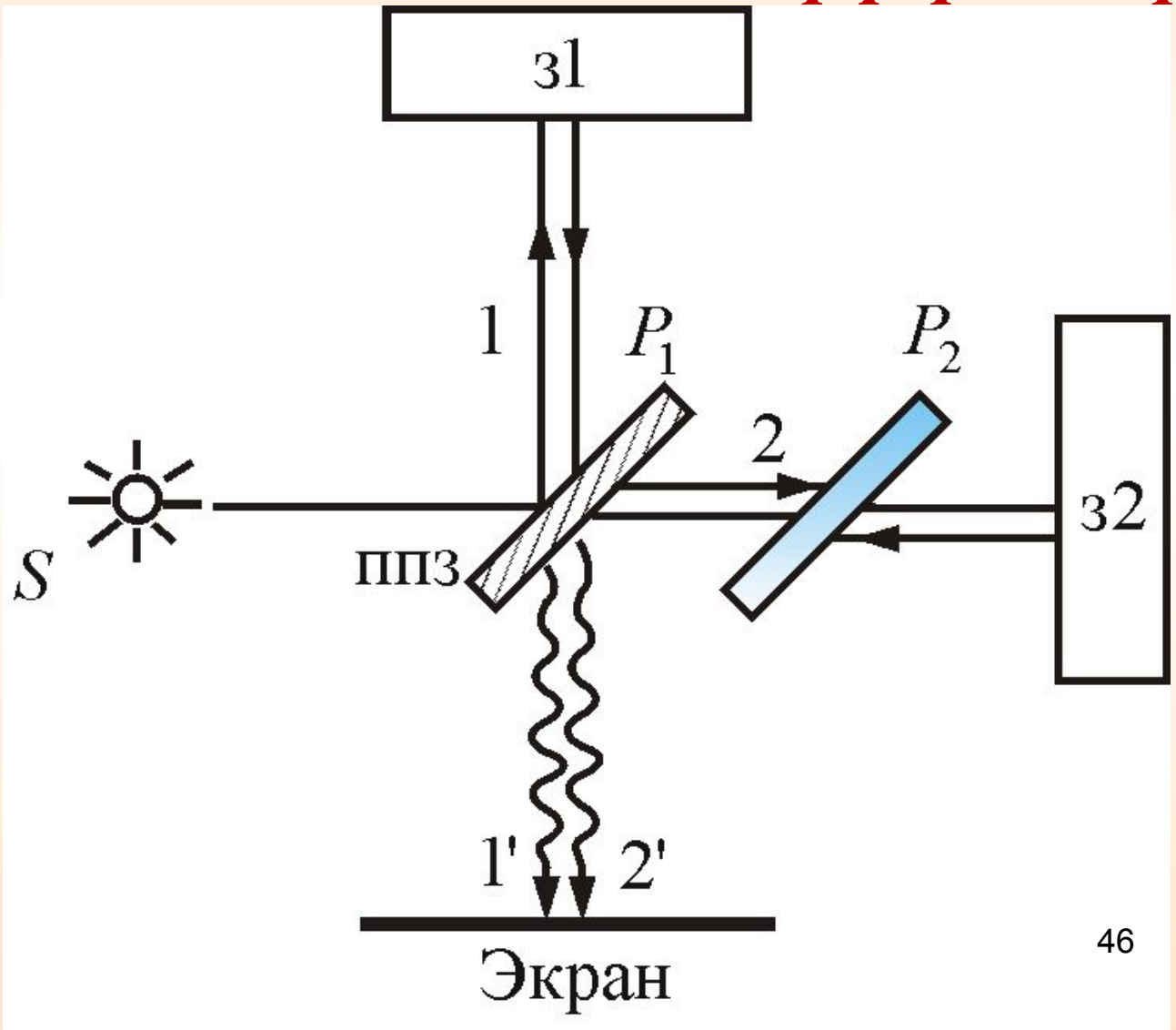
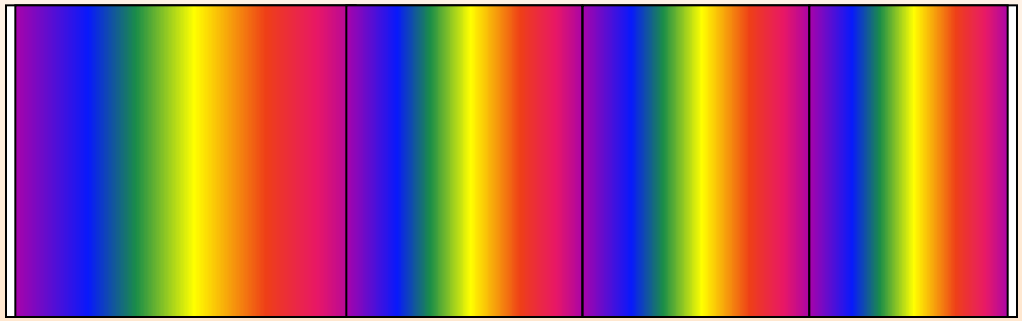
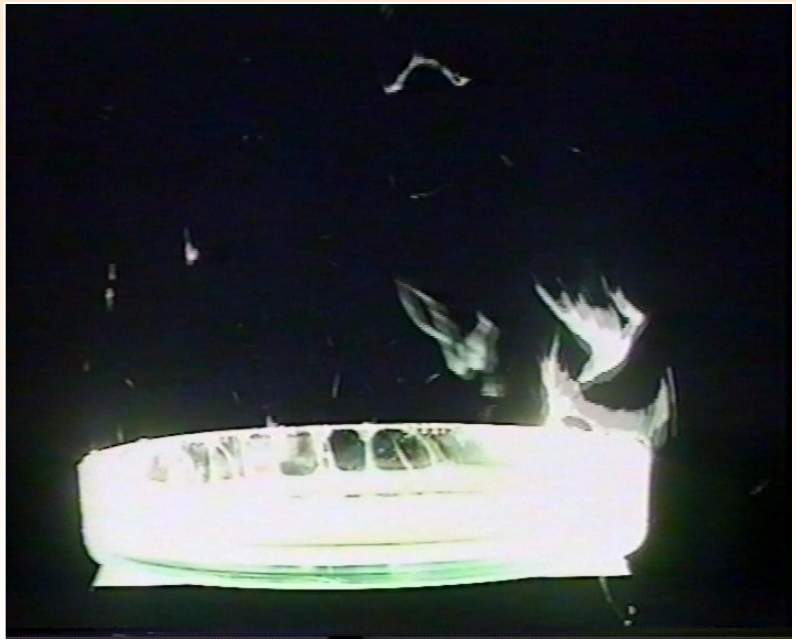


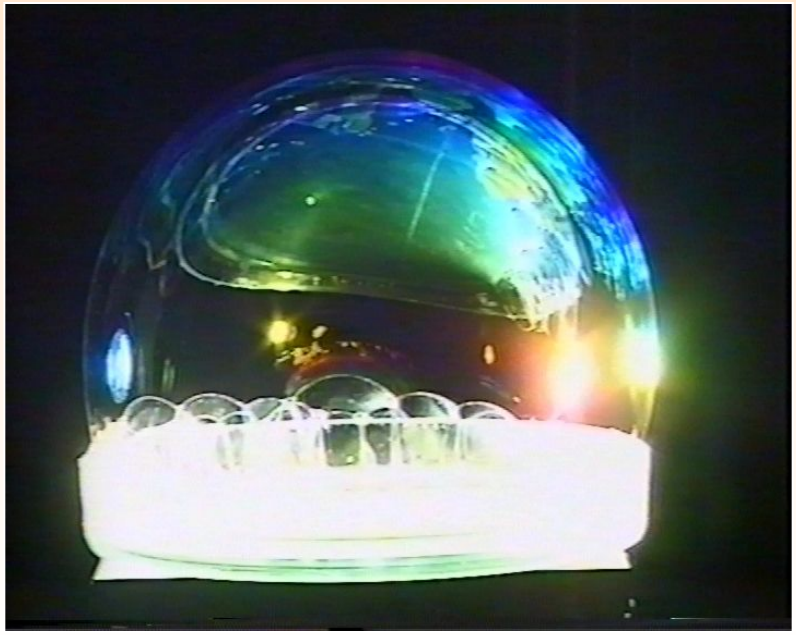
Рисунок 7.11

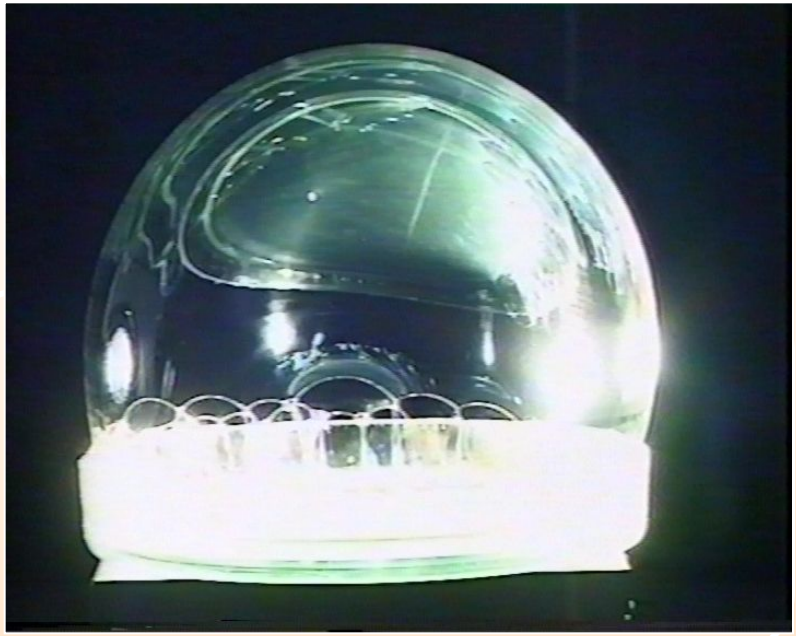
Цвета тонких пленок

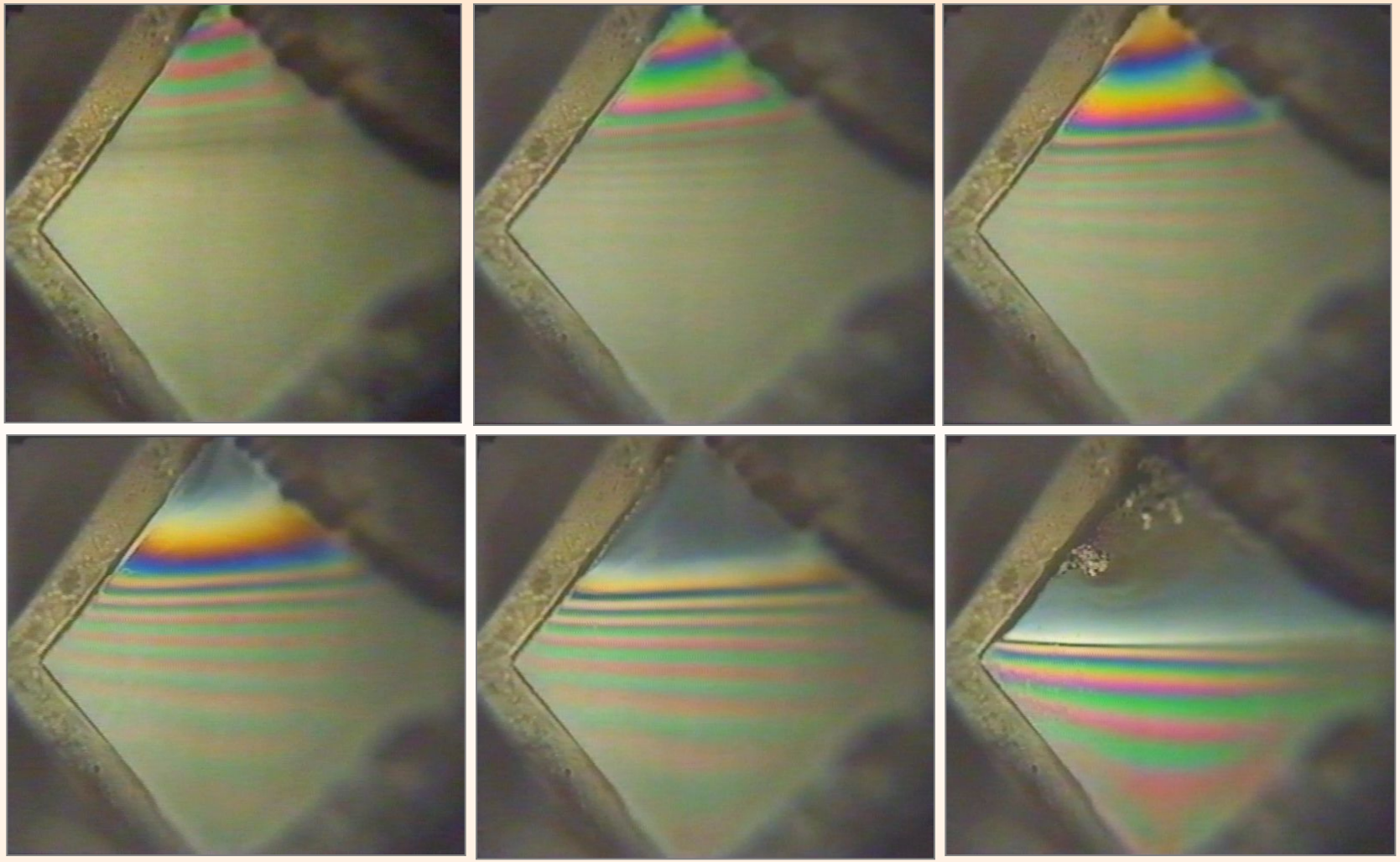
В белом свете интерференционные полосы, при отражении от тонких пленок - окрашены. Поэтому такое явление называют ***цвета тонких пленок.*** Его легко наблюдать на мыльных пузырях, на тонких пленках масла или бензина, плавающих на поверхности воды, на пленках окислов, возникающих на поверхности металлов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





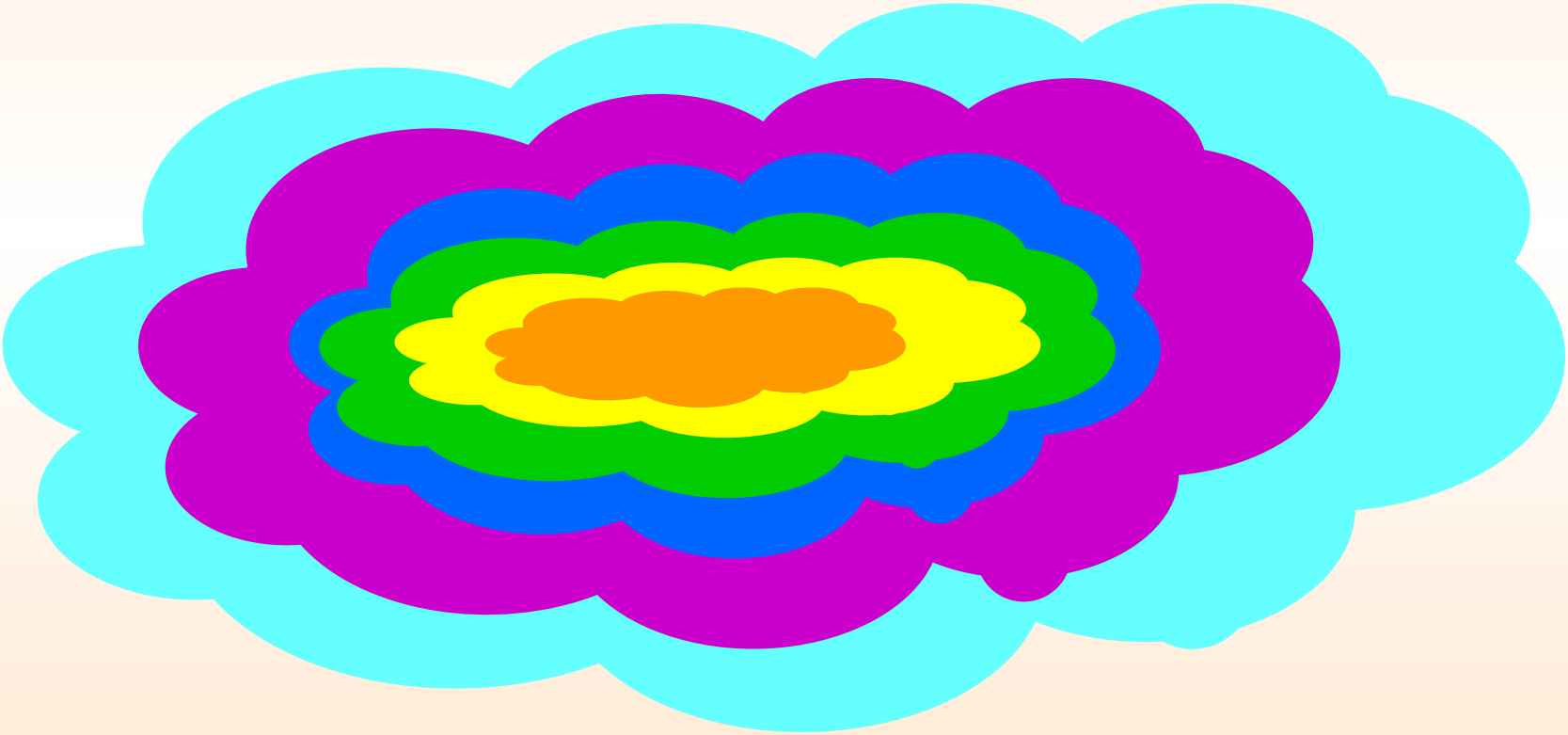




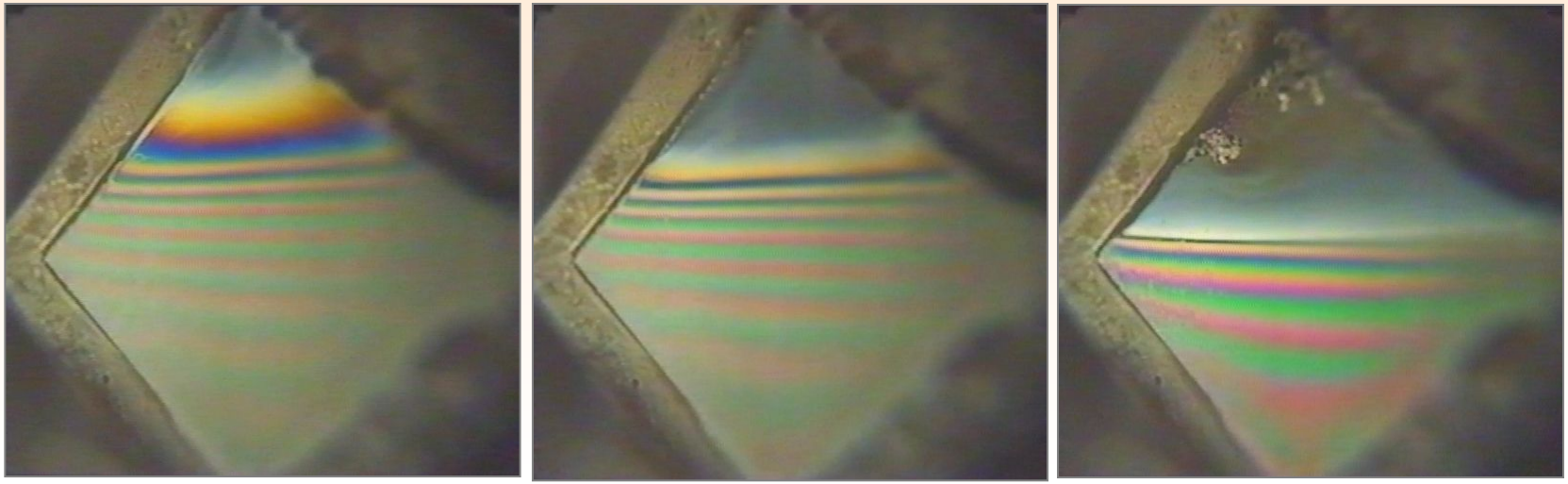


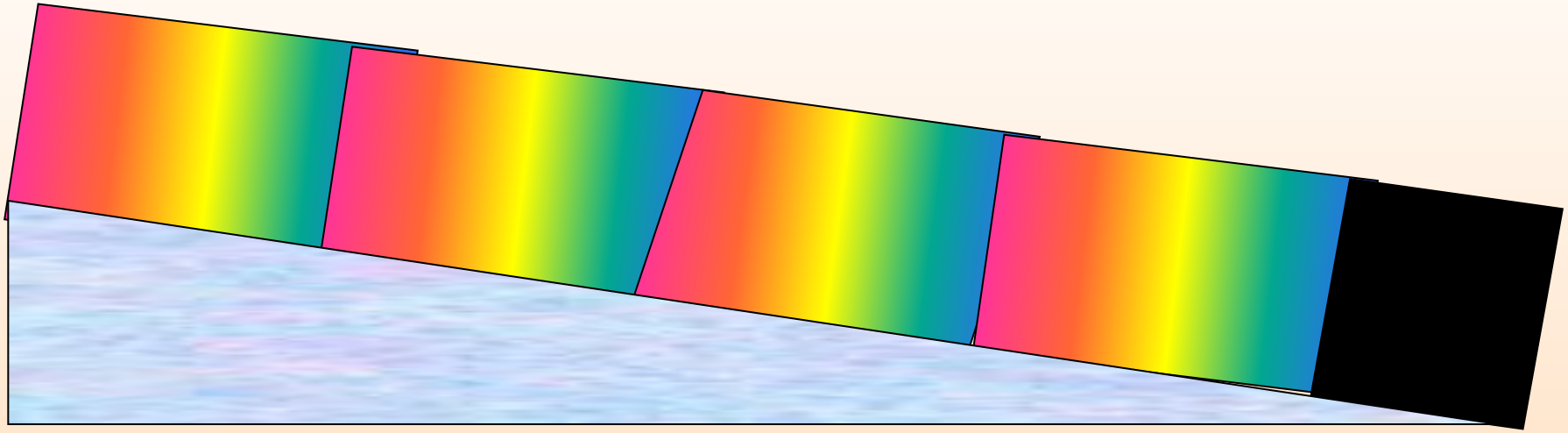
Изменение картины интерференции по мере уменьшения толщины мыльной пленки

нефть на воде

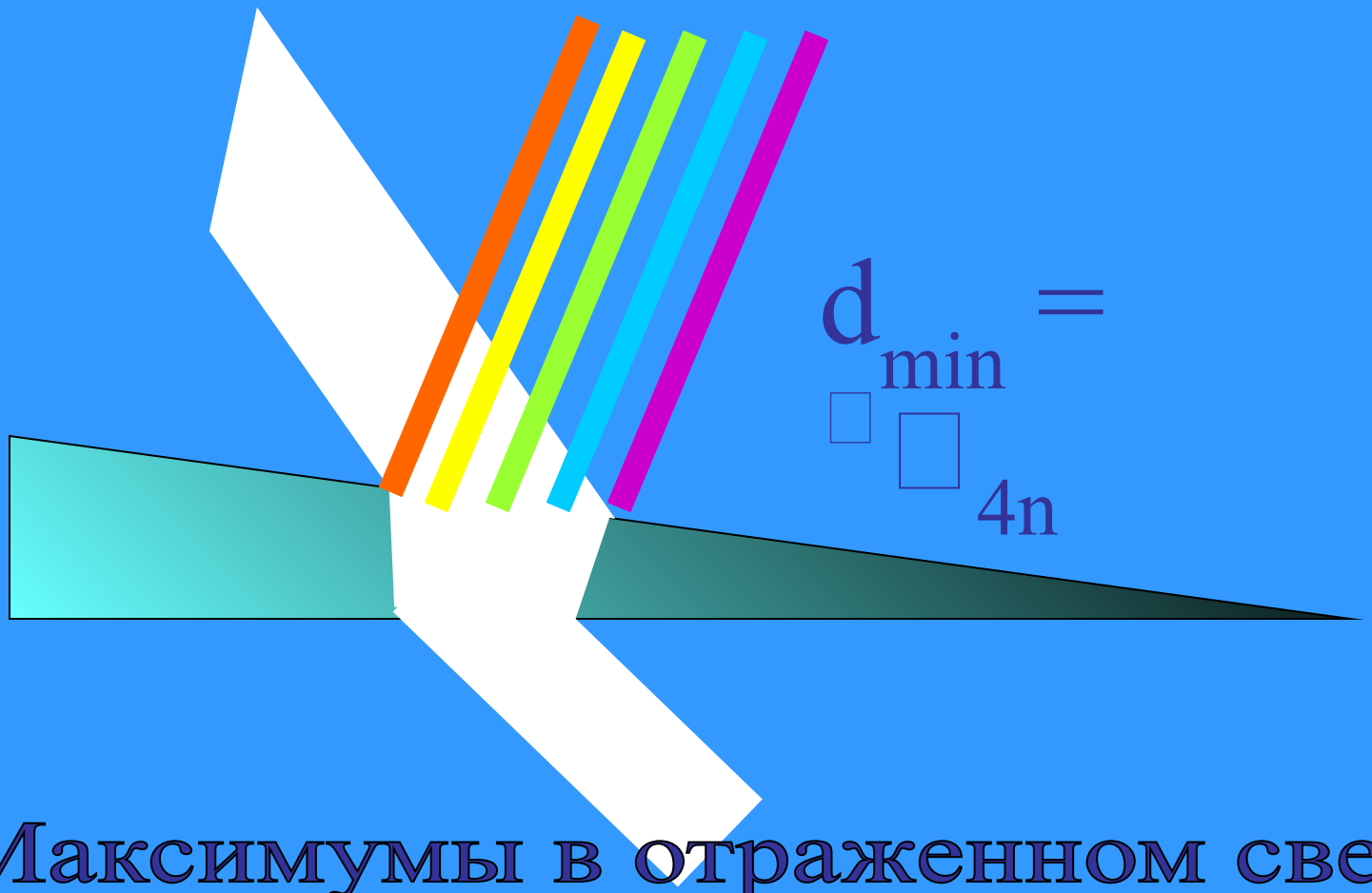


Интерференция от клина.



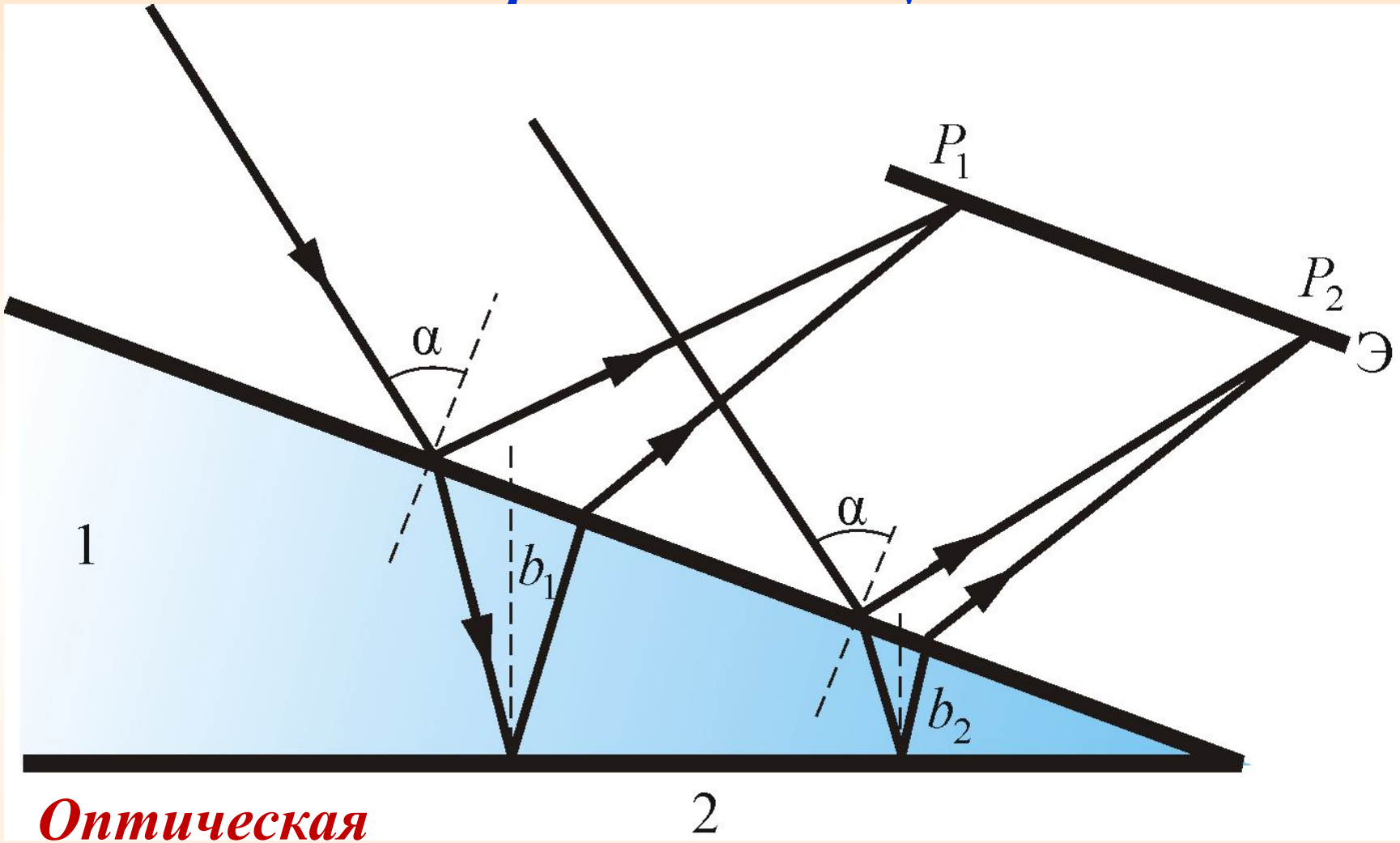


Интерференция на клине



Максимумы в отраженном свете

Полосы равной толщины

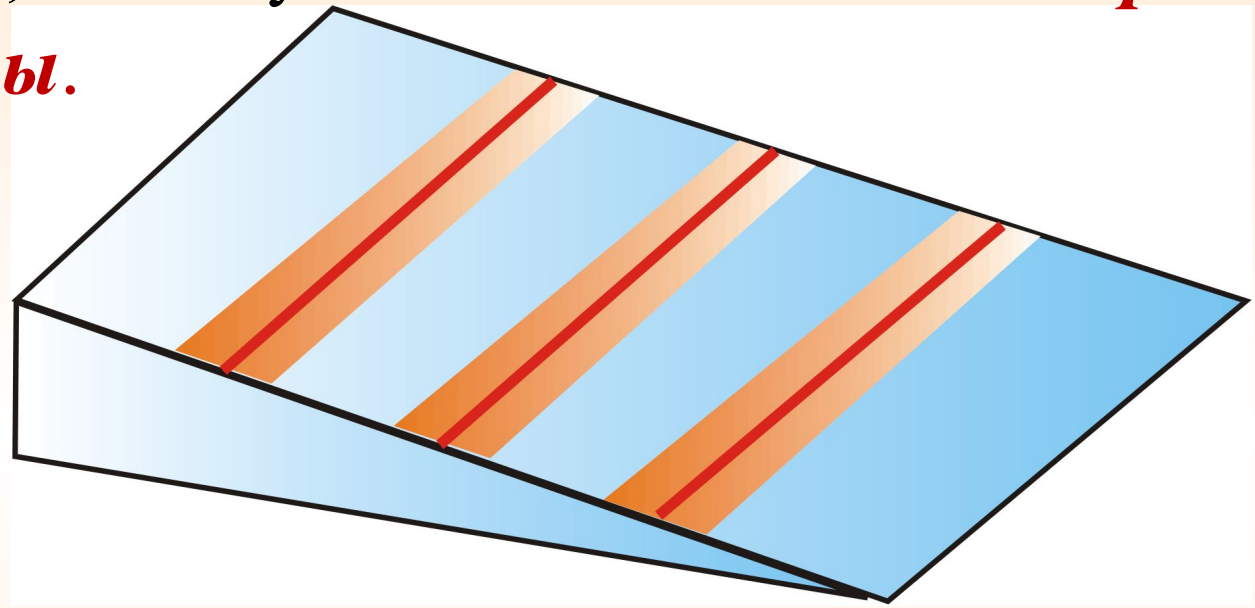


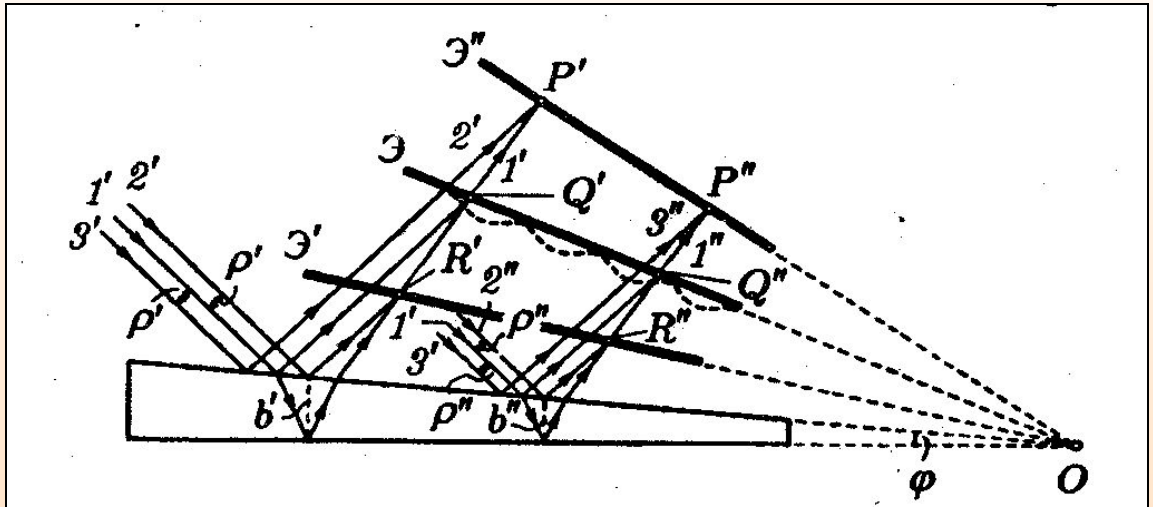
Оптическая разность хода

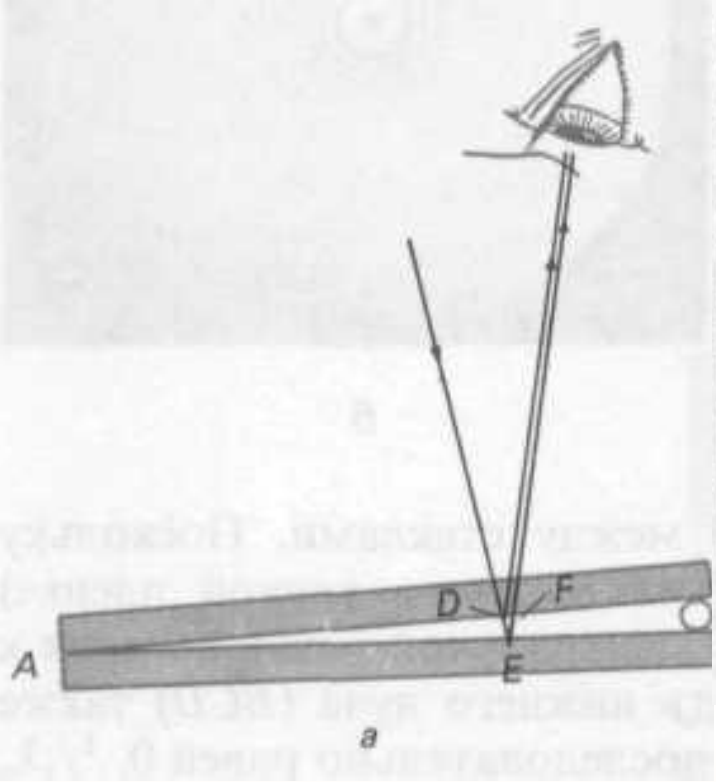
с учетом потери полуволны:

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

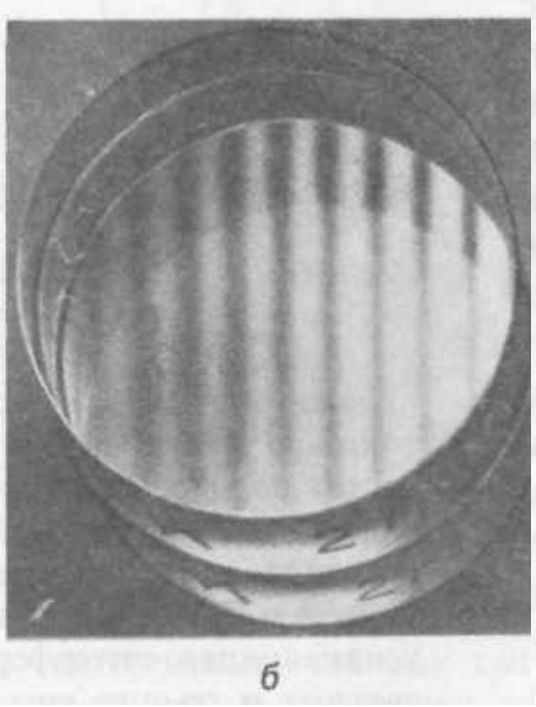
Каждая из интерференционных полос возникает в результате отражении от участков клина с одинаковой толщиной, поэтому их называют ***полосами равной толщины***.







а



б

в

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

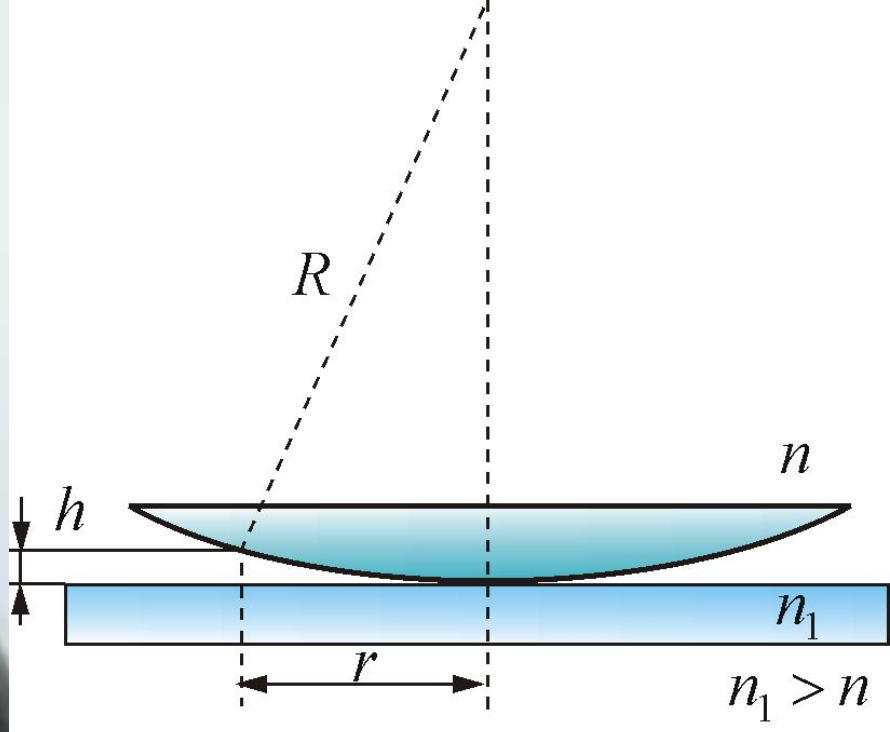
б - интерференционная картина, наблюдаемая в случае оптически плоских стеклянных пластин;

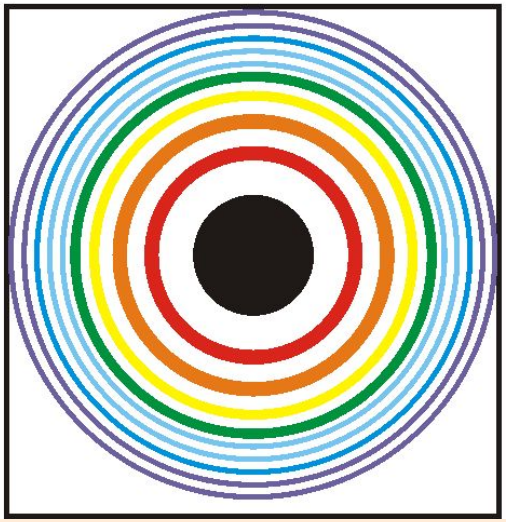
в - интерференционная картина, наблюдаемая в случае неплоских пластин.

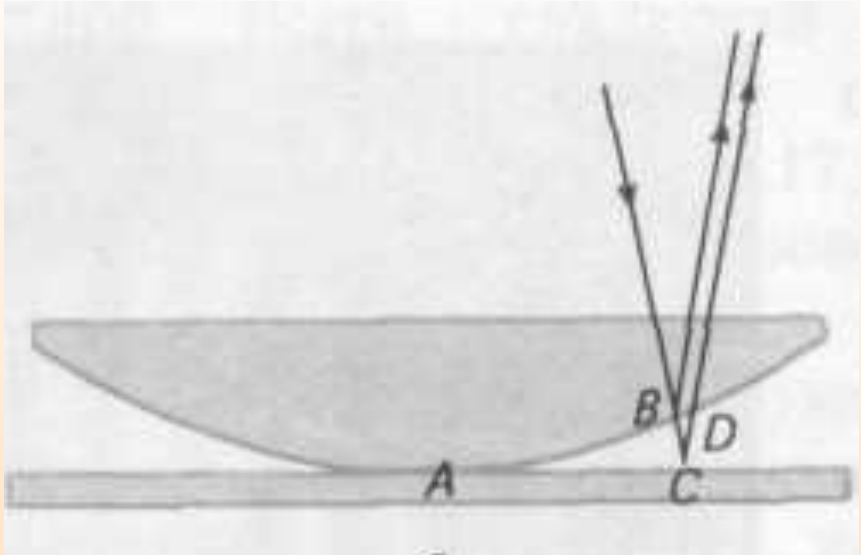
Кольца Ньютона

Кольцевые ***полосы равной толщины****, наблюдаемые в воздушном зазоре между соприкасающимися выпуклой сферической поверхностью линзы малой кривизны и плоской поверхностью стекла, называют* ***кольцами Ньютона****.*

Ньютон объяснил это явление на основе корпускулярной теории света.


R
n
h
n_1
r
$n_1 > n$




B
D
A
C

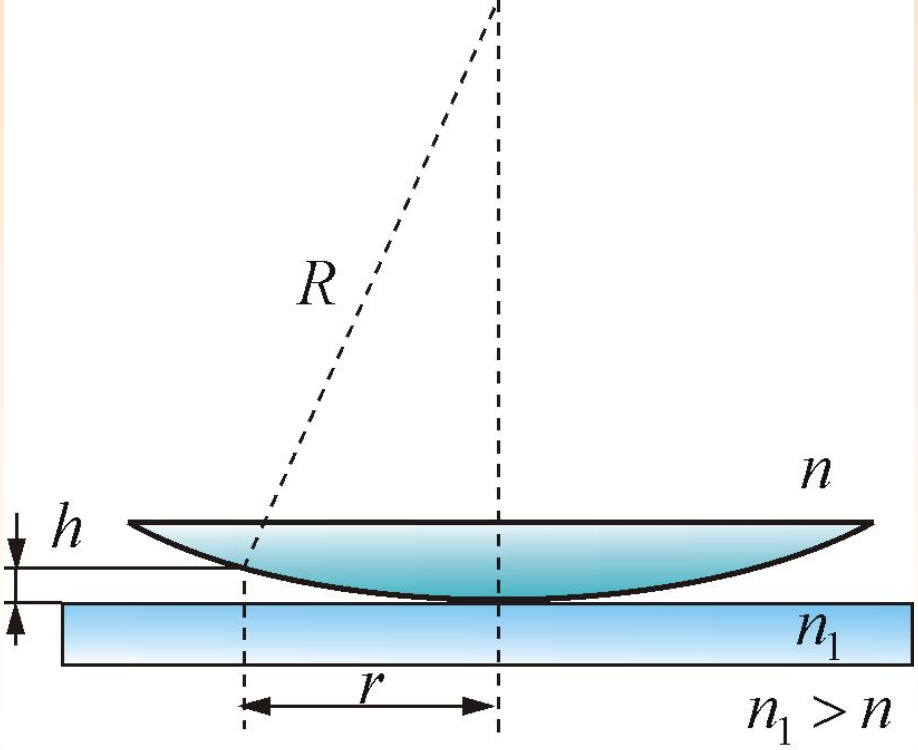
Кольца Ньютона

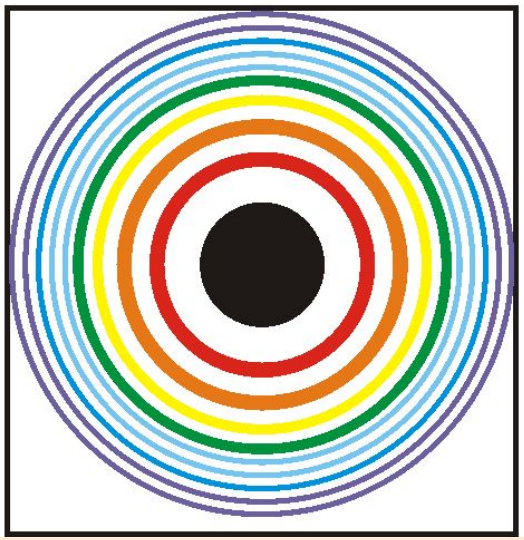
$$h = R - \sqrt{R^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2R}$$

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

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

- Радиус m-го светлого кольца





$$r_m = \sqrt{mR\lambda_0}$$ ***- Радиус m-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:

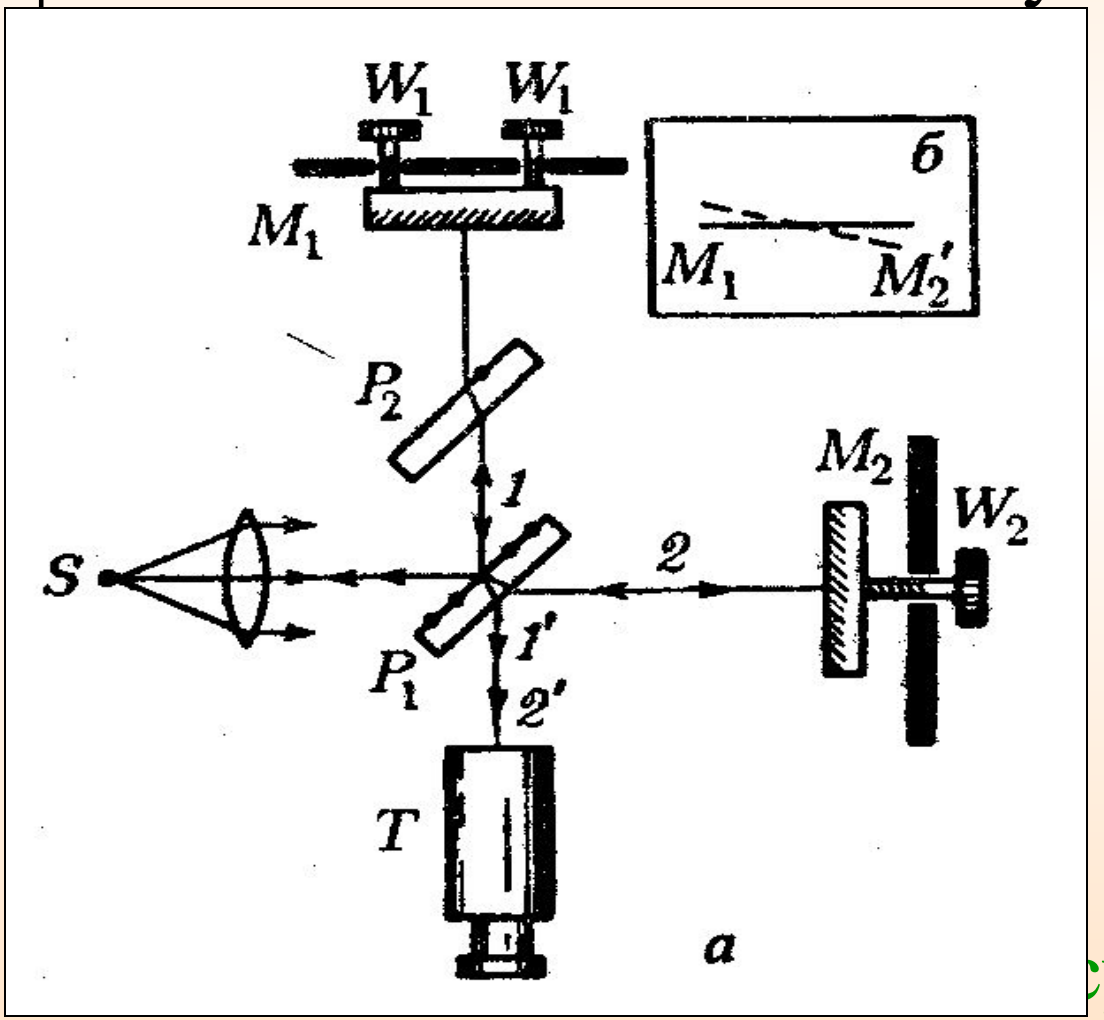


Рисунок 7.11

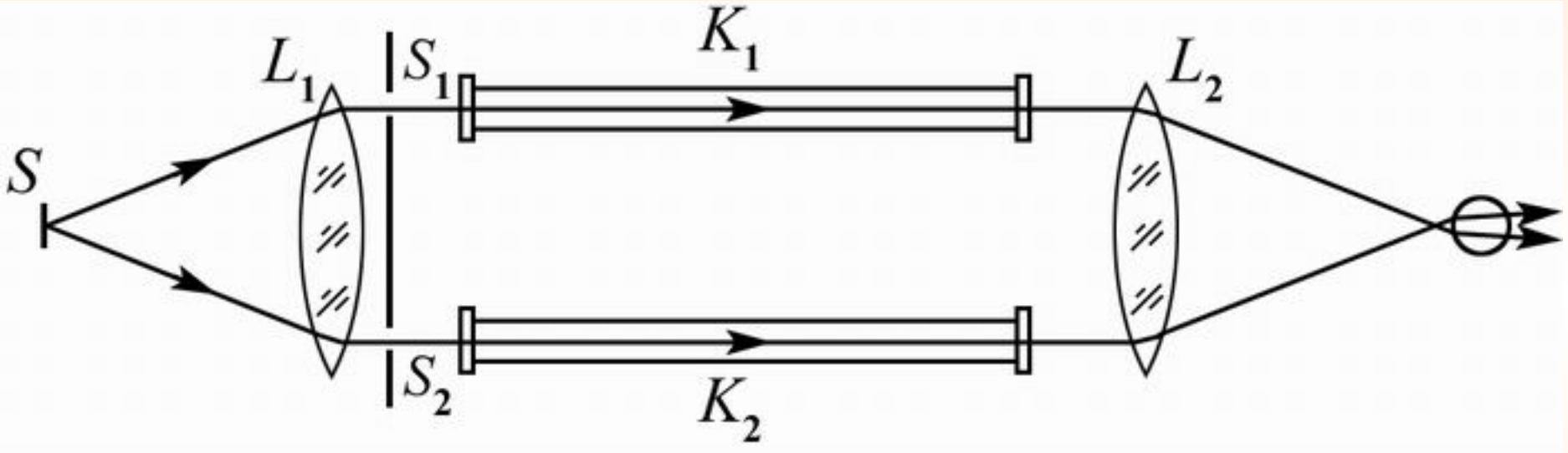


Схема интерферометра Рэлея

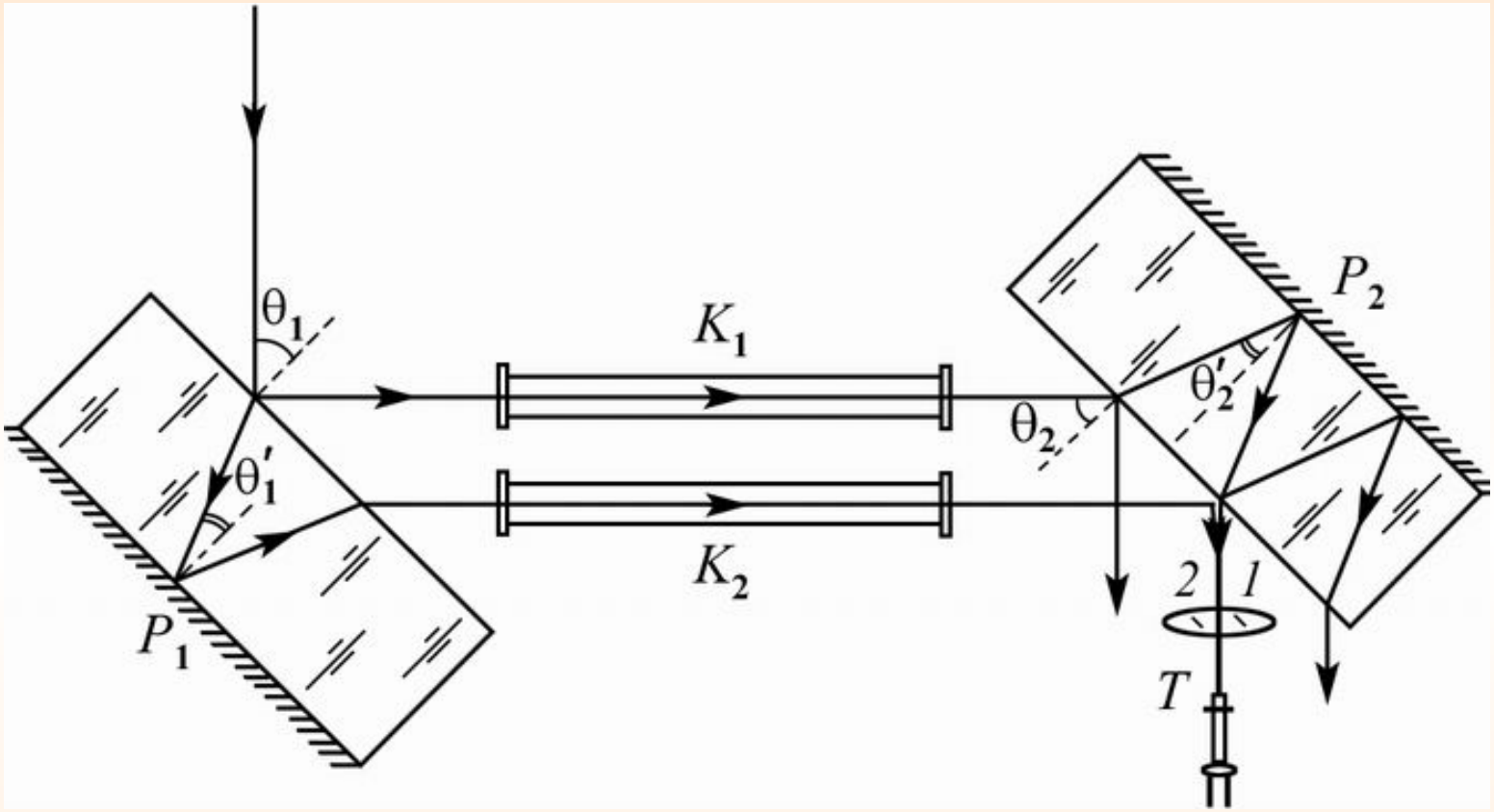


Схема интерферометра Жамена

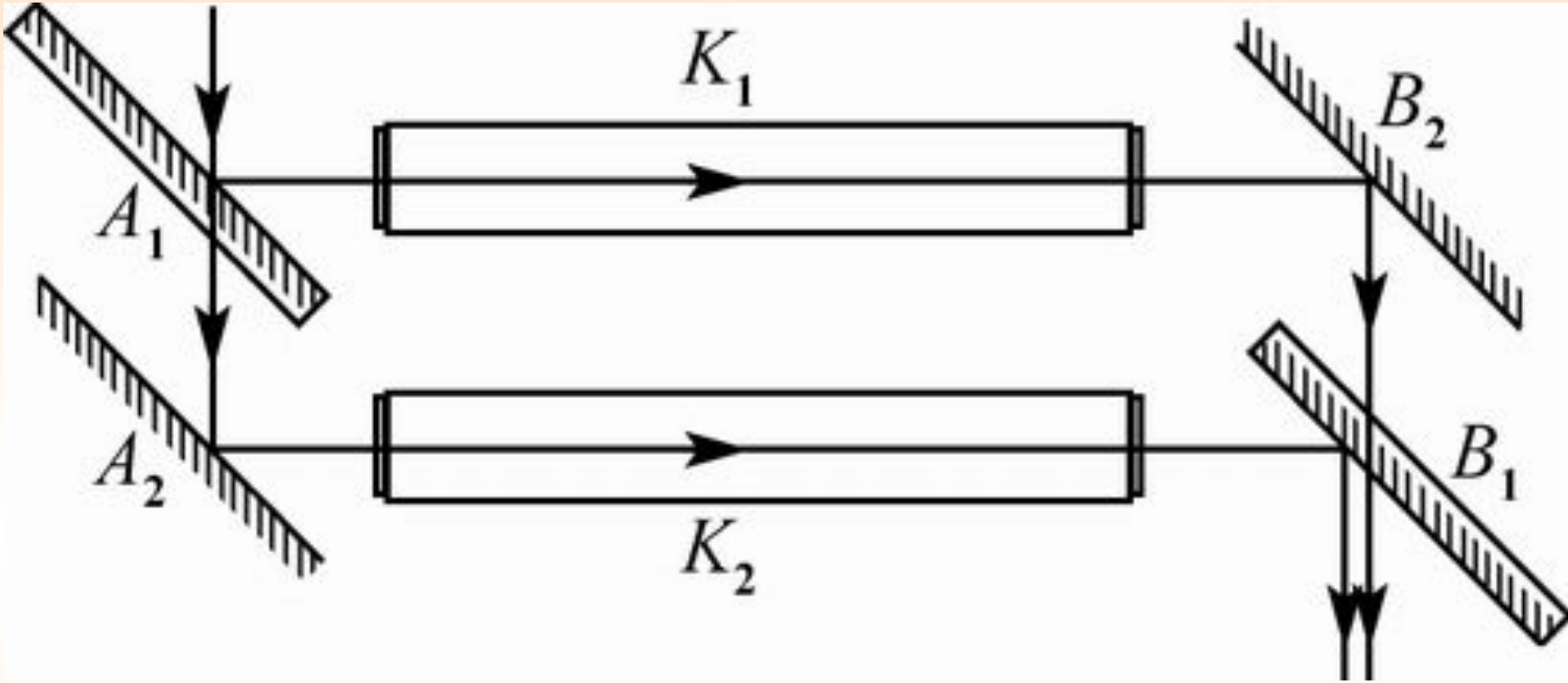
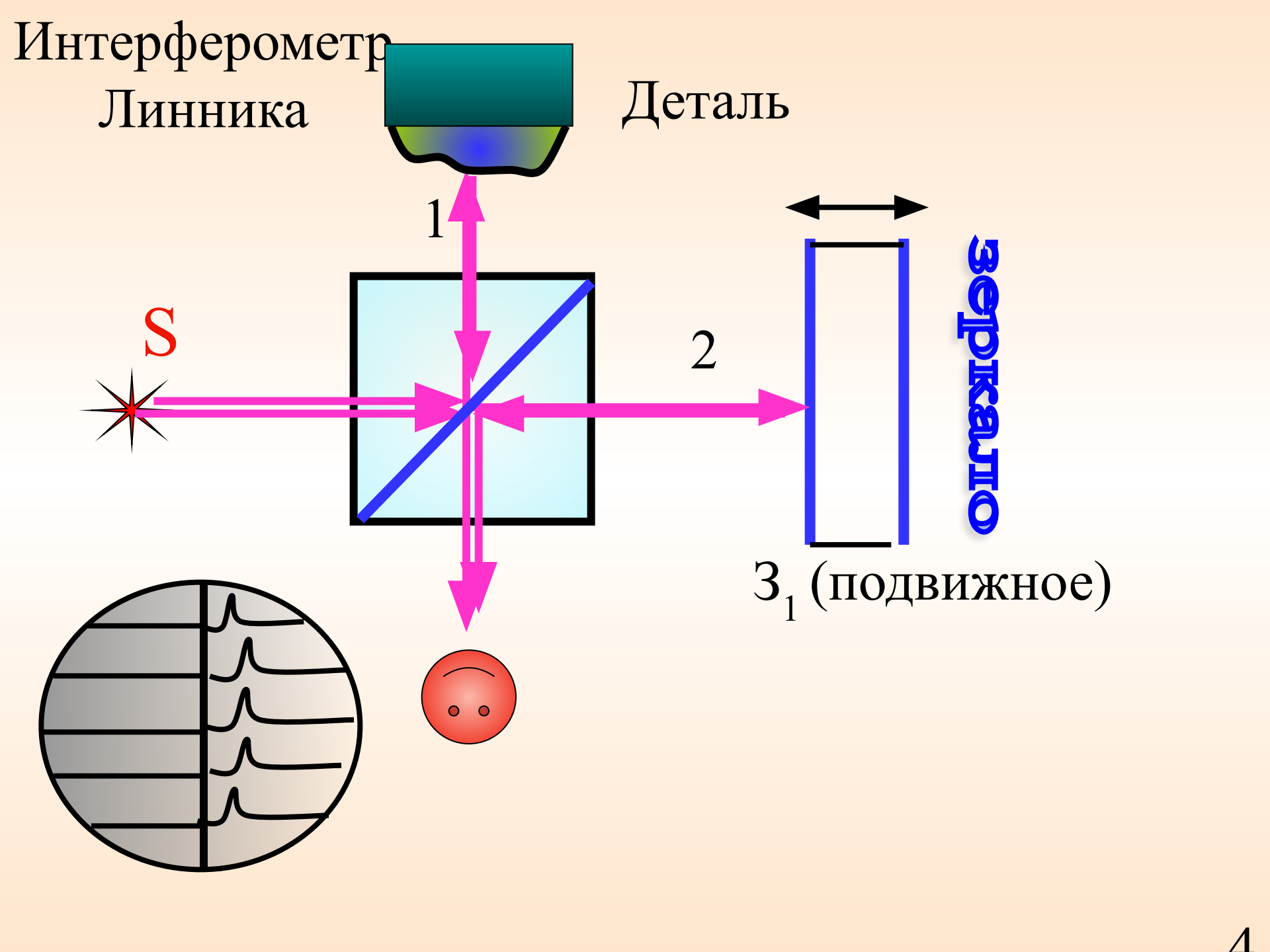
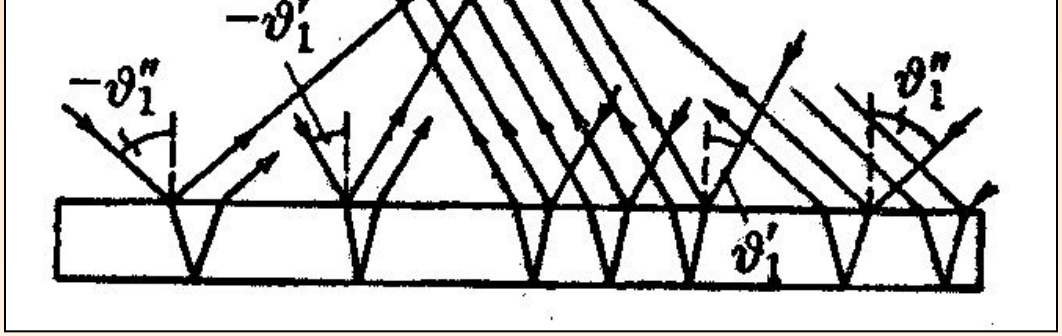


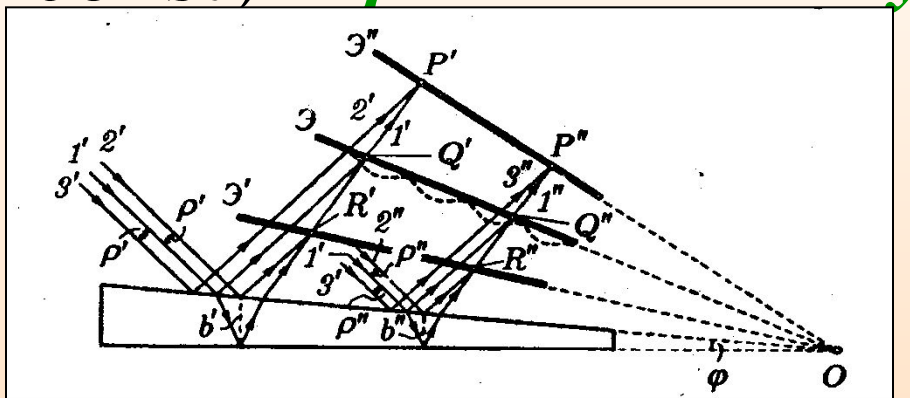
Схема интерферометра Рождественского


Интерферометр
Линника
Деталь
1
S
2
зеркало
З1 (подвижное)



Итак:

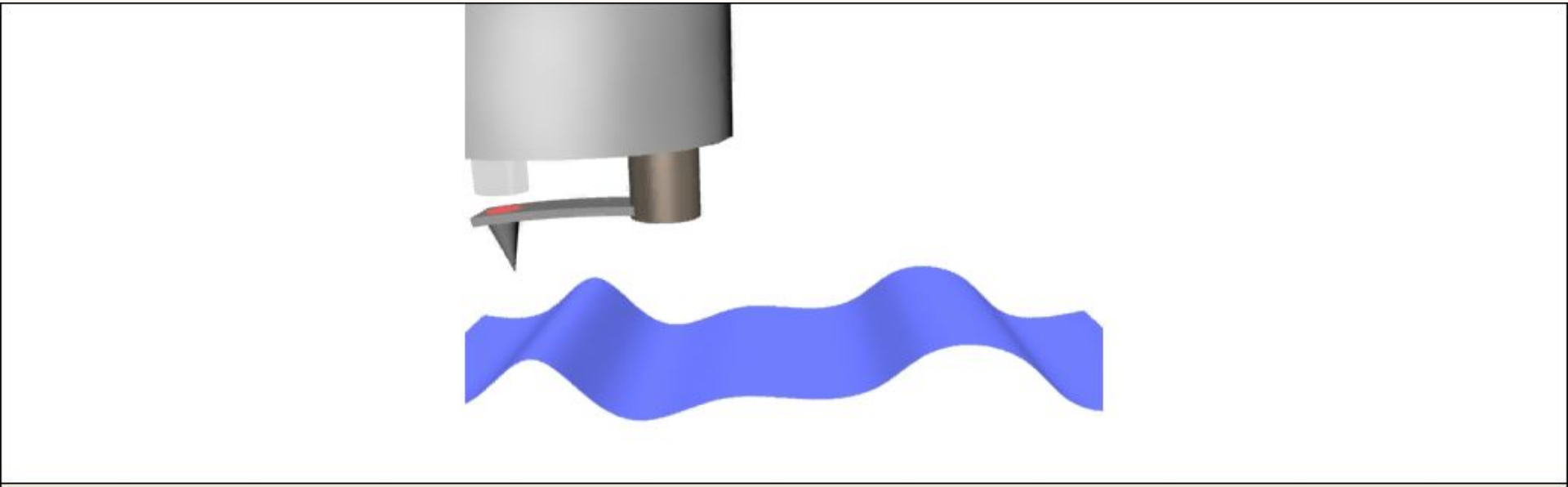
- ***полосы равного наклона*** получаются при освещении пластинки постоянной толщины ($b = \text{const}$) ***рассеянным светом*** в котором содержаться лучи разных направлений.
- ***полосы равной толщины*** наблюдаются при освещении пластинки переменной толщины (клина) ($b \neq \text{const}$) ***параллельным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



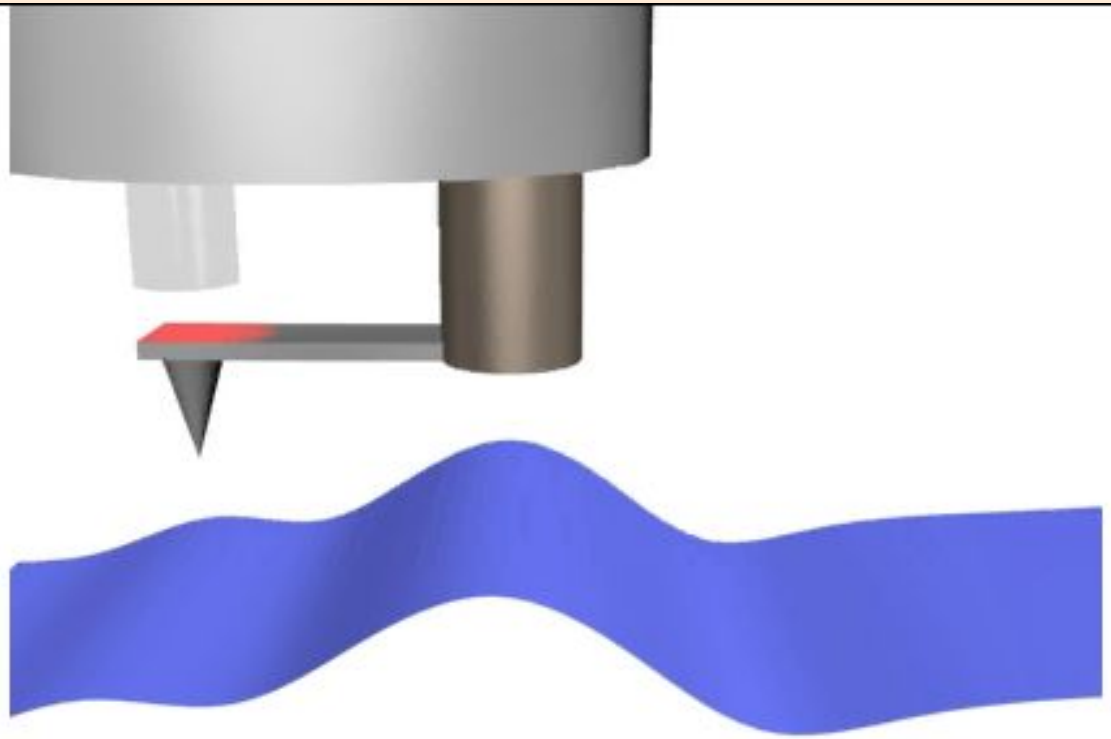
8.6 Применение интерференции света

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***).

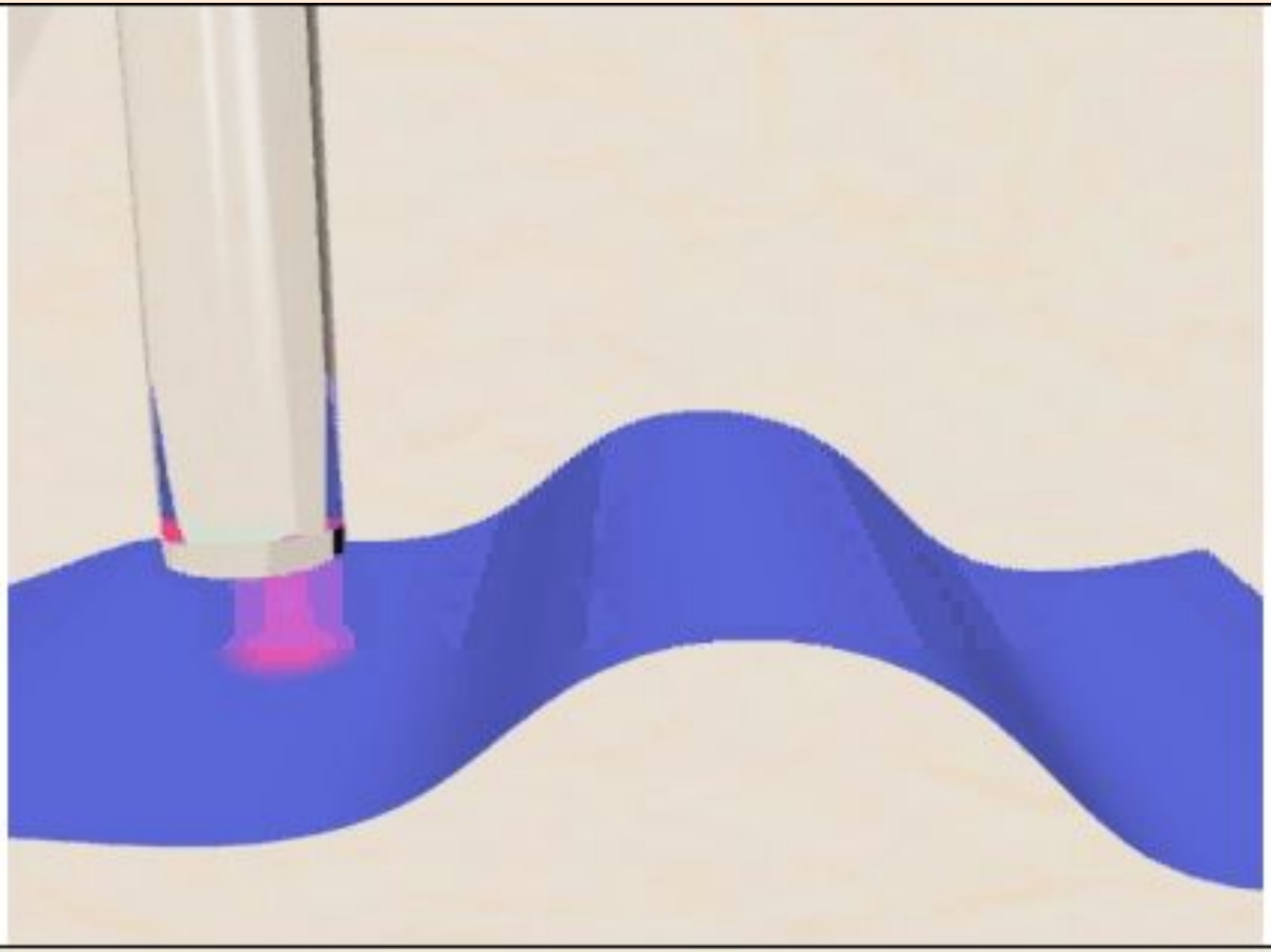
2. П***о интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды*** (в т.ч. фазовые), в которой распространяются волны, ***или отклонения формы поверхности от заданной.***



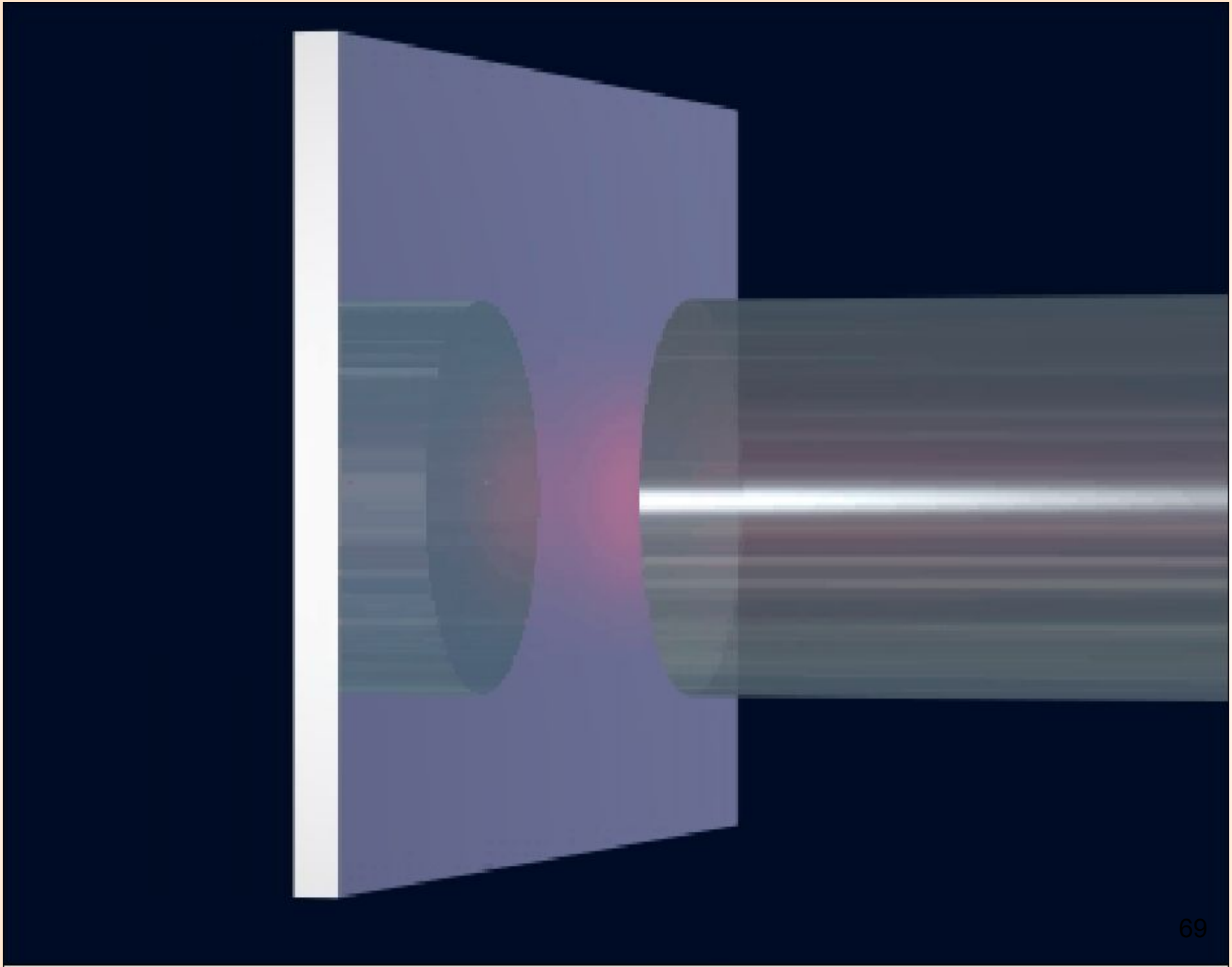
Волоконно-оптический атомный силовой микроскоп ВОАСМ в котором регистрация смещения чувствительной иглы производится по смещению рабочей точки волоконно-оптического интерферометра



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

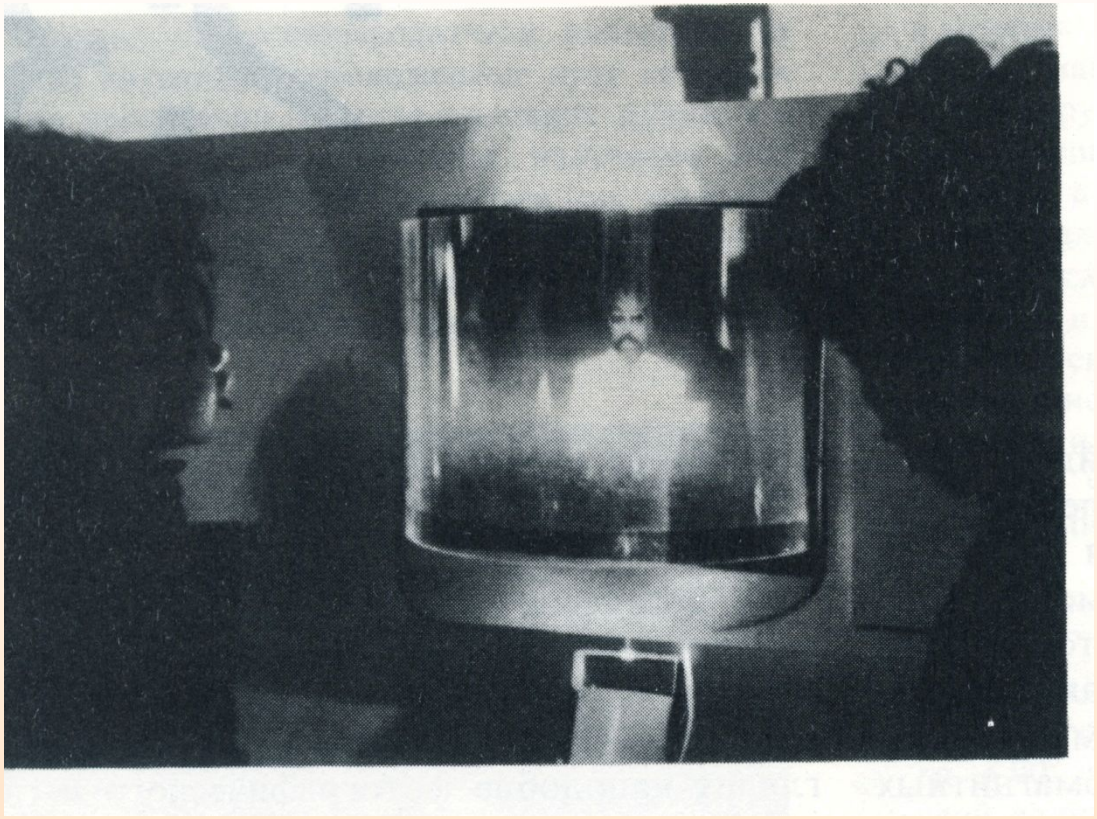


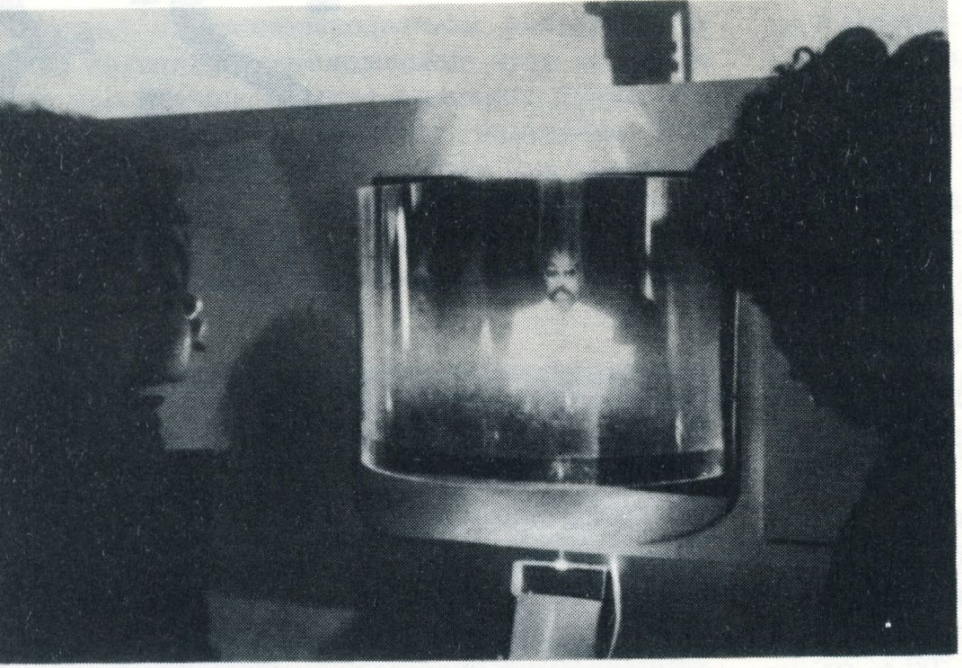
Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо - ещё один метод для исследования отражающих поверхностей



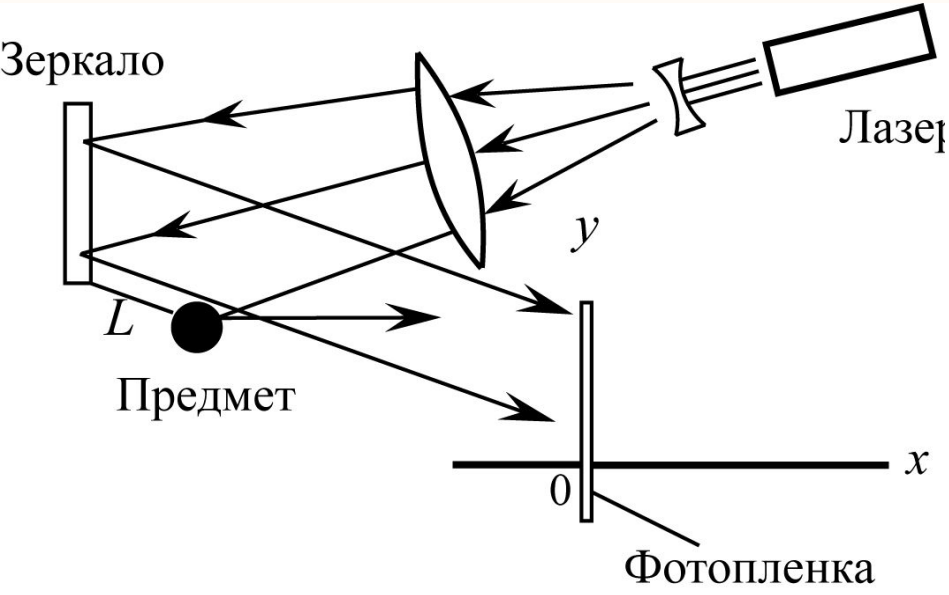
Волоконно-оптический интерферометр Фабри-Перо

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).





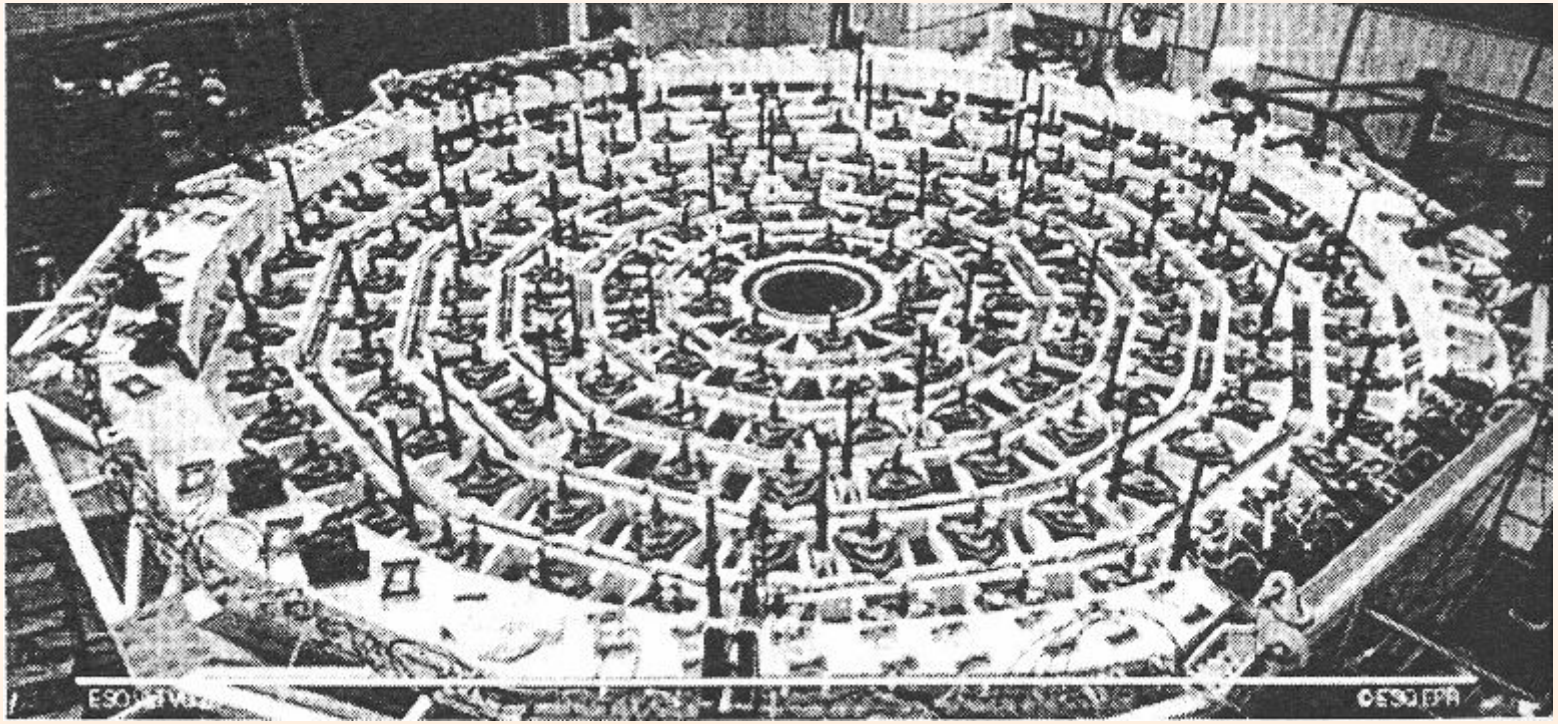
Голографический негатив, освещенный монохроматическим светом, дает полное трехмерное изображение, парящее в пространстве



Способ получения голограммы.

На фотопленку попадают как отраженный от предмета лазерный свет, так и опорный пучок от зеркала

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.

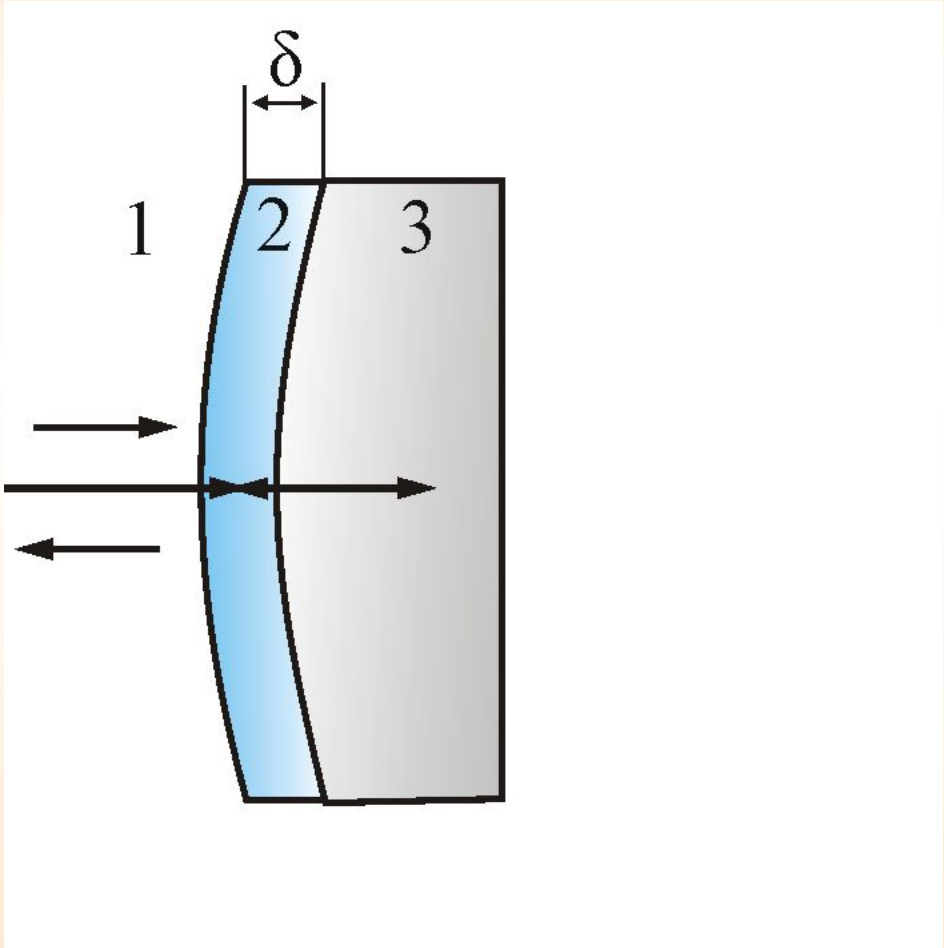
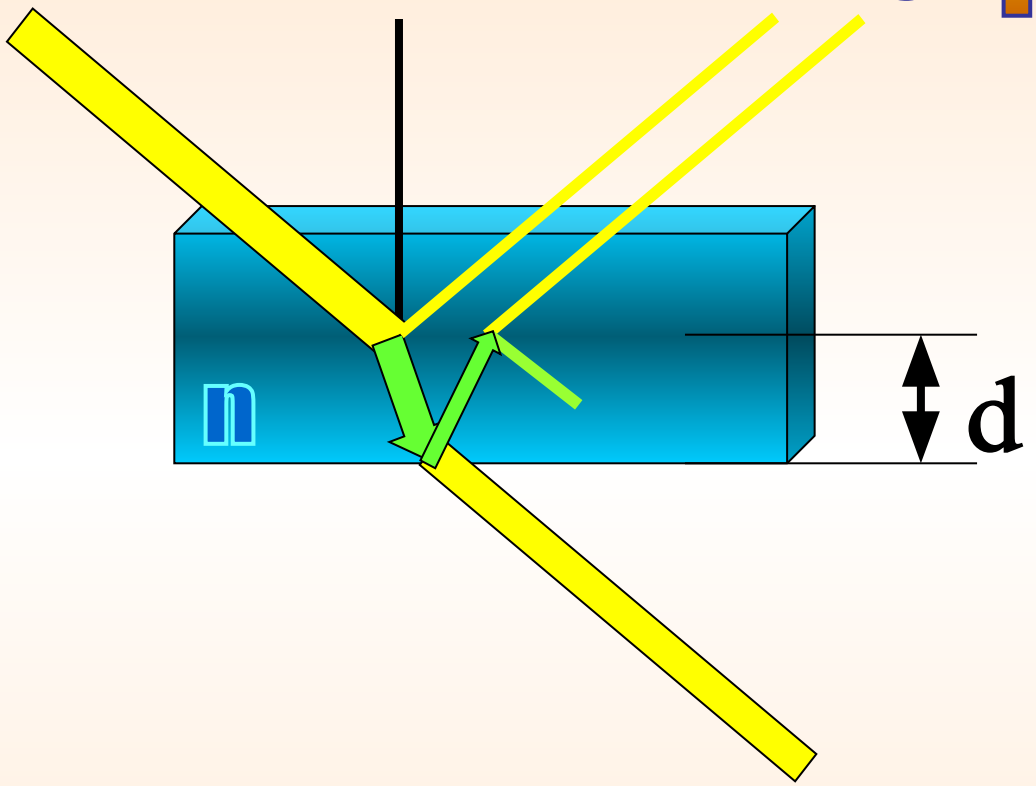


Рисунок 7.15

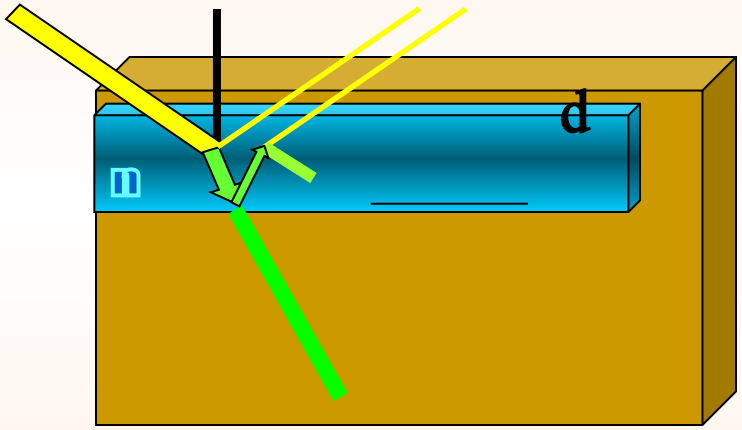
min отражения



max пропускания!

Просветление линз и солнечных батарей

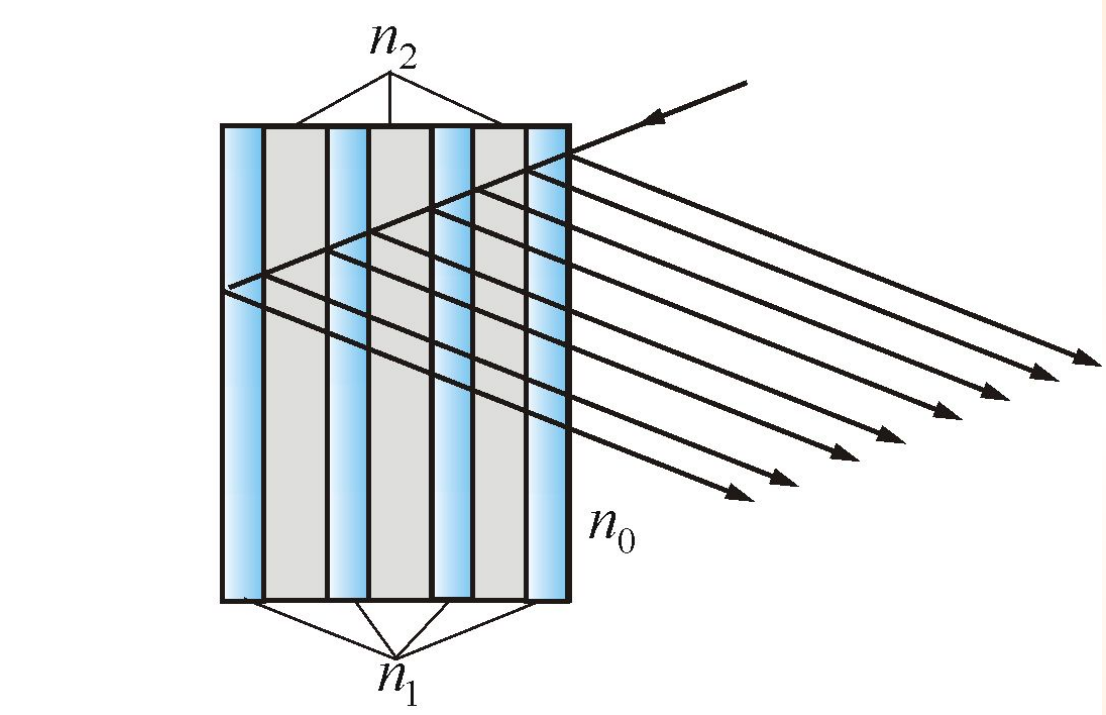
Min интерференции



Тонкая пленка окислов

max 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.

Знать:

1. Законы геометрической оптики.
2. Какими параметрами описывается световая волна?
3. Что такое цуг волн и волновой пакет?
4. Суть интерференции света, условия наблюдения интерференции.
5. Понятие временной и пространственной интерференции.
6. Способы получения когерентных световых источников.

7. Как записываются условия max и min в тонких пленках в отраженном и проходящем свете для полос равного наклона и равной толщины.

8. Применение интерференции.

Уметь:

1. Строить ход лучей в пластинках, линзах, зеркалах, призмах.

2. Построить ход интерферирующих лучей в зеркалах Френеля, бипризмах Френеля и Бийе.

3. Рассчитать интерференционную картину по методу Юнга.

4. Получить аналитическое выражение для условий max и min при интерференции в тонких пленках в отраженном и проходящем свете для полос равного наклона и равной толщины.

5. Изображать на рис. схему установки для получения колец Ньютона.

6 Построить ход лучей в интерферометрах Майкельсона, Линника, Жамена.

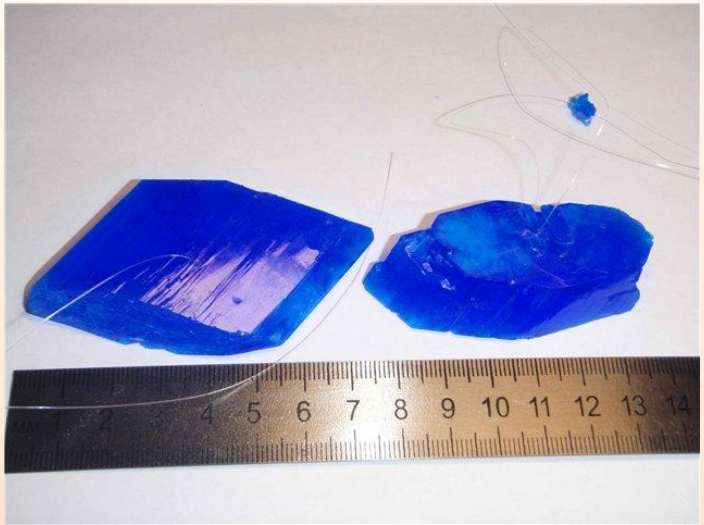
620-780 нм | 585-620 нм | 575-585 нм | 550-575 нм | 510-550 нм | 480-510 нм | 450-480 нм | 380-450 нм

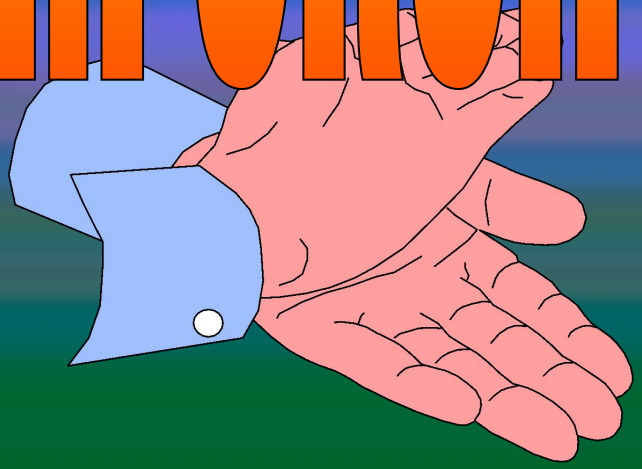
Радиус иона: **(+2e)**

Радиус иона

Выводы:

1. Изучена скорость охлаждения насыщенного раствора сернокислого никеля и медного купороса,
2. Определены оптимальные условия выращивания кристаллов сернокислого никеля и медного купороса,
3. Выращены кристаллы сернокислого никеля и медного купороса,
4. Определена зависимость изменения светопроводимости кристаллов от толщины.
5. Определена зависимость изменения светопроводимости раствора от толщины слоя раствора.



Спасибо за внимание.

Лекция окончена!