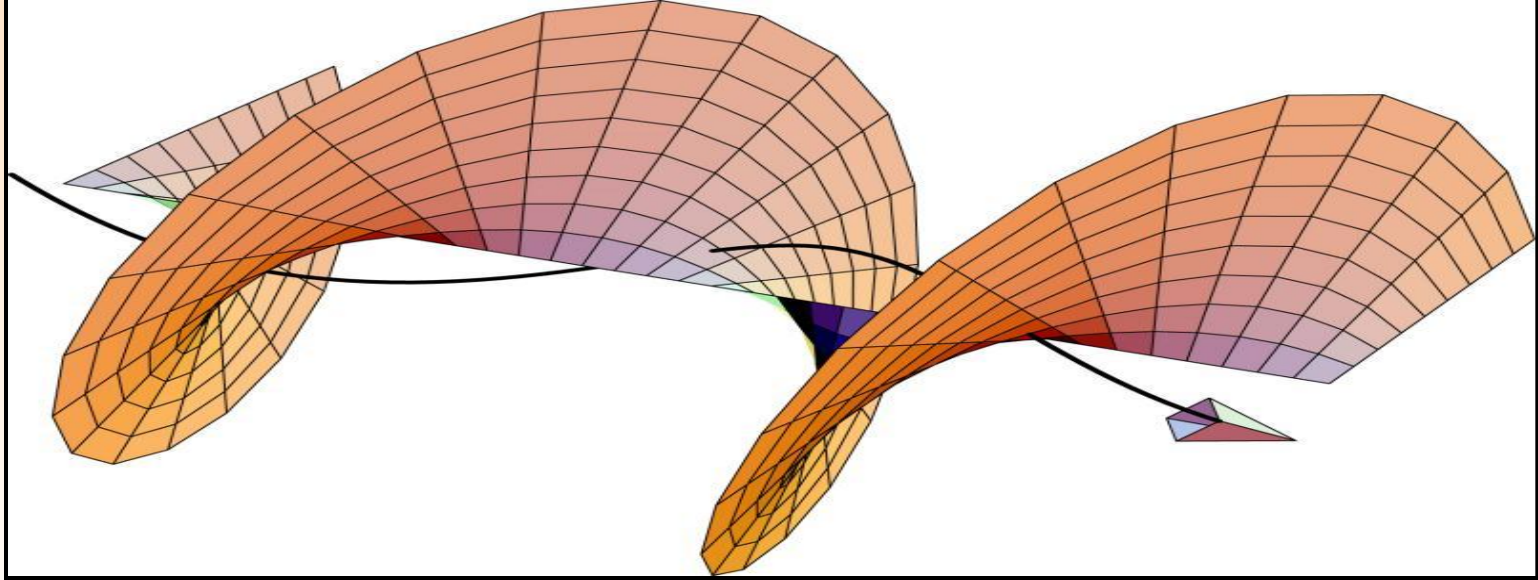




# Краткий курс лекций по физике

Кузнецов Сергей Иванович  
доцент к. ОФ ЕНМФ ТПУ





# Раздел V Колебания и волны

## **Тема 7 КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА. ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА**

**7.1 Развитие взглядов на природу света**

**7.2 Интерференция световых волн**

**7.3 Опыт Юнга**

**7.4 Когерентность и монохроматичность**

**7.5 Методы наблюдения интерференции**

**7.6 Интерференция в тонких пленках**

**7.7 Применение интерференции света**

## 7.1 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 Птоломей 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).

Из этих представлений он легко вывел законы отражения и преломления света (рисунок 7.1):

$\alpha = -\alpha$ ; (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  $c$ ).

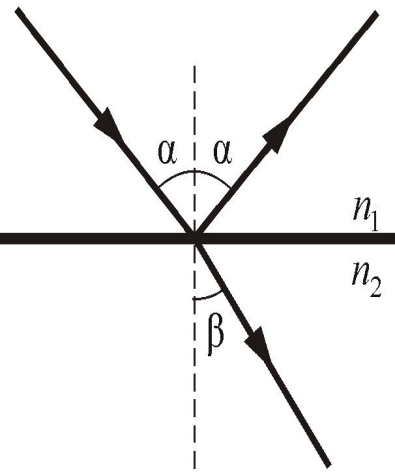


Рисунок 7.1

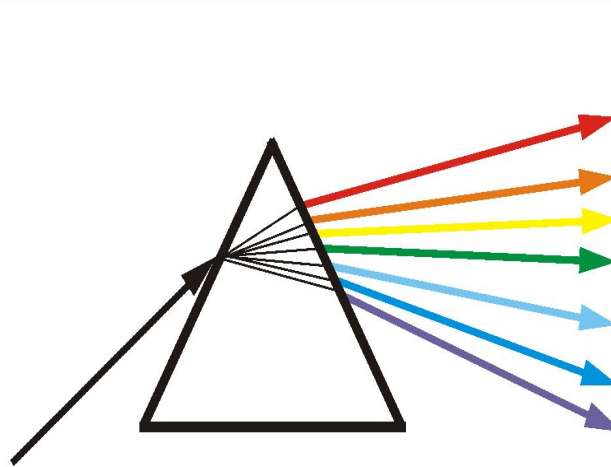


Рисунок 7.2

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

## *Принцип Гюйгенса*

*Каждая точка, до которой доходит световое возбуждение, 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.*



*Гюйгенс Христиан* (1629 – 1695), нидерландский ученый. В 1665 – 81 гг. работал в Париже. Изобрел (1657 г.) маятниковые часы со спусковым механизмом, дал их теорию, установил законы колебаний физического маятника. Опубликовал в 1690 г. созданную им в 1678 г. 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 (1657 г.).



*Ферма Пьер* (1601 – 1665) – французский математик и физик. Родился в Бомон-де-Ломань. Получил юридическое образование. С 1631 г. был советником парламента в Тулузе. Физические исследования относятся в

большинстве к оптике, где он установил (примерно в 1662 г.) 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.



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



Парижской академии наук (10.V.1788 - 14.VII.1827) - французский физик, член Парижской академии наук (с 1823 года). Научные работы посвящены физической оптике (10.V.1788 - 14.VII.1827) - французский физик, член Парижской

Гюйгенса Гюйгенса, наведя (с 1823 года) научные Френеля принцип физической Френеля). Разработал и изложил теорию дифракции света Гюйгенса, введя так называемые зоны Френеля (принцип Гюйгенса - Френеля). Разработал в 1818 году теорию дифракции света. Член Лондонского королевского общества (с 1825 года).



Мюнхенского университета. Научные работы относятся к физической оптике (6.III.1787- 7.VI.1826) - немецкий физик. С 1823 года - профессор Мюнхенского университета. Научные работы относятся к физической оптике. Внёс существенный

вклад в исследование дисперсии и дифракции света в параллельных лучах (так называемая дифракция Фраунгофера) сначала от одной щели, а потом от многих. Большой заслугой учёного является использование (с 1821 года) дифракционных решёток линз. Фраунгофер изучал дифракцию в параллельных лучах (так называемая дифракция Фраунгофера) сначала от одной щели, а потом от многих. Большой заслугой учёного является



Эдинбургского королевского общества (с 1855 года) и Лондонского королевского общества (13.VI.1831 - 5.XI.1879) - английский физик, член Эдинбургского королевского общества (с 1855 года) и Лондонского королевского общества (с 1861

лаборатория в Кембридже, которую и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены электродинамике лаборатория в Кембридже, которую и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены электродинамике, молекулярной физике лаборатория в Кембридже, которую и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены электродинамике, молекулярной физике, общей статистике лаборатория в Кембридже, которую и возглавлял до конца жизни.



*Араго Доминик Франсуа* (26.II.1786 - 2.X.1853) - французский учёный, член Парижской академии наук (с 1809 года), с 1830 года - неперемный секретарь Парижской АН и директор Парижской обсерватории. Научные работы относятся к астрономии, физике, математике, метеорологии. Автор многих открытий в области оптики и электромагнетизма. По указаниям Араго французские физики И.Физо астрономии, физике, математике, метеорологии. Автор многих открытий в области оптики и электромагнетизма. По указаниям Араго французские физики И.Физо и Ж.Фуко астрономии, физике, математике, метеорологии. Автор многих открытий в области



*Пуассон Симеон Дени* (21.VI.1781 - 25.IV.1840) - французский механик, математик, физик, член Парижской академии наук (с 1812 года). Физические

исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике, теории колебаний исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике, теории колебаний, теории света. Член Петербургской академии наук

Начало XIX в. характеризуется интенсивным развитием математической *теории колебаний и волн* и ее приложением 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 тонких 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;

1841 г. О. Френель строит теорию кристаллооптических колебаний;

1849 г. А. Физо измерил скорость света и рассчитал по волновой теории коэффициент преломления воды  $n = 1,33$ , что совпало с экспериментом;

1848 г. М. Фарадей открыл вращение плоскости поляризации света в магнитном поле (эффект Фарадея);

1860 г. Дж. Максвелл основываясь на открытии Фарадея пришел к выводу, что свет есть электромагнитные, а не упругие волны;



1888 г. Г. Герц экспериментально подтвердил, что электромагнитное поле распространяется со скоростью света  $c$ ;

1899 г. П.Н. Лебедев измерил давление света;

В 1900 г. Макс Планк показал, что излучение абсолютно черного тела можно объяснить, если предположить, что свет излучается не непрерывно, а порциями, квантами с энергией  $E_0 = h\nu$ , где  $\nu$  – частота,  $h$  – постоянная Планка.



*Макс Планк* (1858 – 1947). С 1874 г. он изучал физику у Густава Кирхгофа и Германа Гельмгольца в Мюнхенский университете. В 1930 г. Макс Планк возглавил Институт физики кайзера

Вильгельма (теперь Институт Макса Планка) и занимал этот пост до конца жизни. В 1900 г. в работе, посвященной равновесному тепловому излучению, Планк впервые ввел предположение о том, что энергия осциллятора принимает дискретные значения, пропорциональные частоте колебаний, чем положил начало квантовой физики. Также Макс Планк внес большой вклад в развитие термодинамики.

В 1905 г. Альберт Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта на основе представления о световых частицах – «квантах» света, «фотонах», масса которых

$$m_{\phi} = \frac{E_0}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$$

Это соотношение связывает *корпускулярные характеристики излучения – массу и энергию кванта – с волновыми – частотой и длиной волны.*

Работы Планка и Эйнштейна явились началом развития *квантовой физики.*

*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.

Наиболее важное событие в современной оптике — экспериментальное обнаружение методов генерации вынужденного излучения атомов и молекул — создание оптического квантового генератора (лазера) (А.М. Прохоров, Н.Г. Басов и Ч. Таунс 1954 г.).

В современной физической оптике квантовые представления не противоречат волновым, а сочетаются на основе квантовой механики и квантовой электродинамики.

## 7.2 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.

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

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

Амплитуда результирующего колебания при сложении колебаний направленных вдоль одной прямой

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (7.2.1)$$

*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  $\varphi_2 - \varphi_1$  непрерывно изменяется.*

*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  $J = 4J_1$ ), где  $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) < 0$ , интенсивность  $J < J_1 + J_2$

Некогерентность естественных источников света обусловлена тем, что излучение тела складывается из волн, испускаемыми многими атомами. Фазы каждого *цуга волны* 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 атома длится примерно  $10^{-8}$ . 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

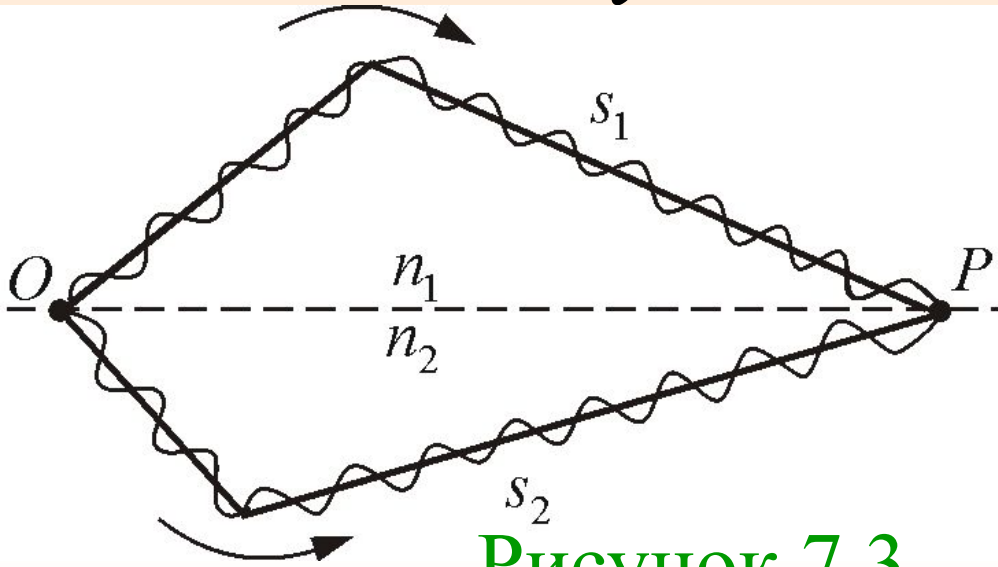


Рисунок 7.3

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

а вторая

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

разности фаз двух когерентных волн

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

$\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1 = L_2 - L_1$  оптическая разность хода

$L$  – оптическая длина пути.

Если разность хода равна целому числу длин волн в вакууме

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

*условие интерференционного максимума.*

Если оптическая разность хода

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

то  $\delta = \pm(2m + 1)\pi$

*(7.2.4) условие интерференционного минимума.*

## 7.3 Опыт Юнга

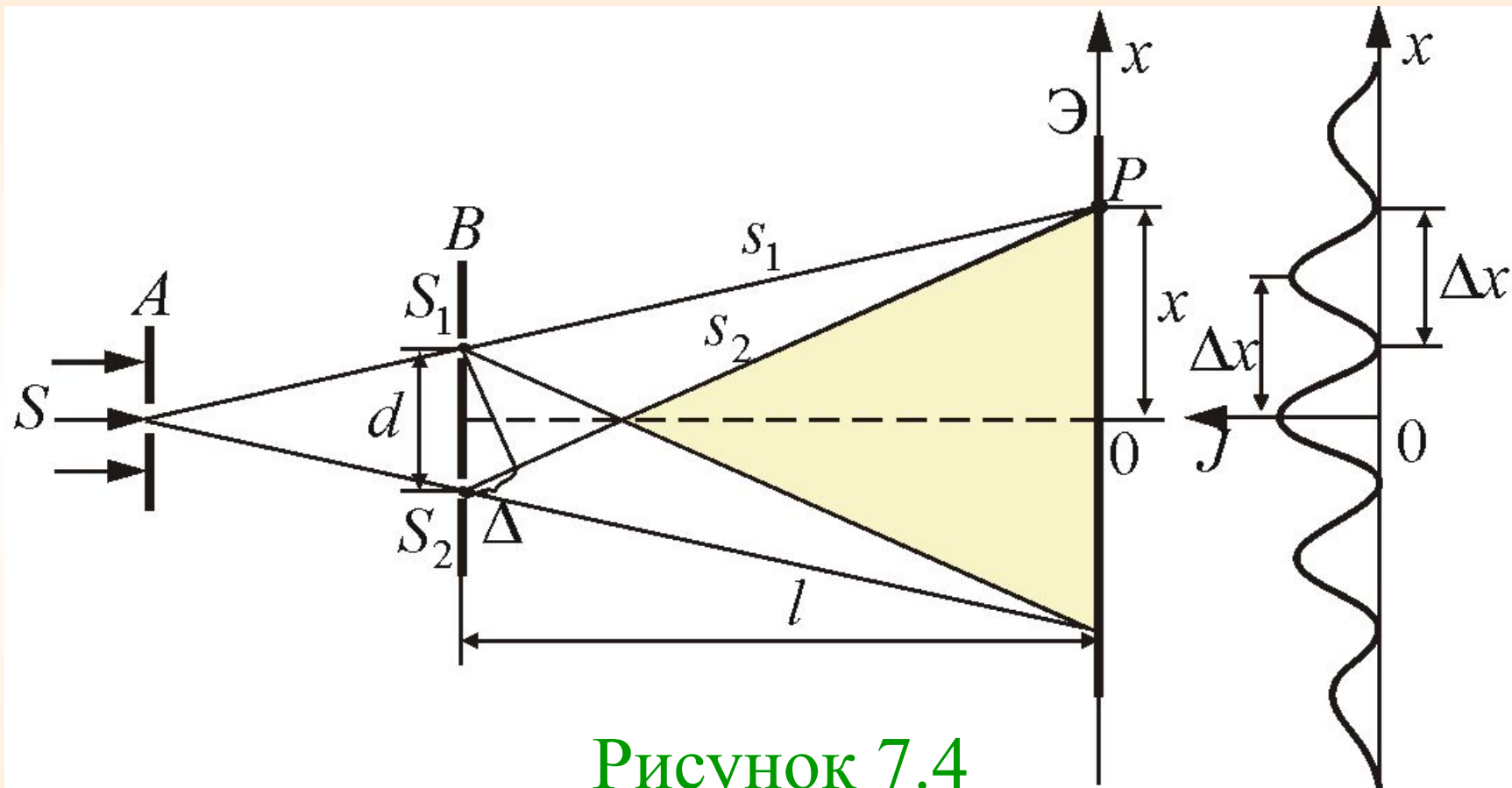


Рисунок 7.4

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

Показатель преломления среды –  $n$ .

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

$$x_{\max} = \pm \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots), \quad (7.3.2)$$

а **минимумы** – в случае, если

$$x_{\min} = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (7.3.3)$$

Расстояние между двумя соседними максимумами (или минимумами) равно

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda_0 \quad (7.3.4)$$

**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.*



## 7.4 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* – неограниченные в пространстве 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*  
немонохроматической волны.

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.*

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.

## 7.5 Методы наблюдения интерференции

### Опыт Юнга

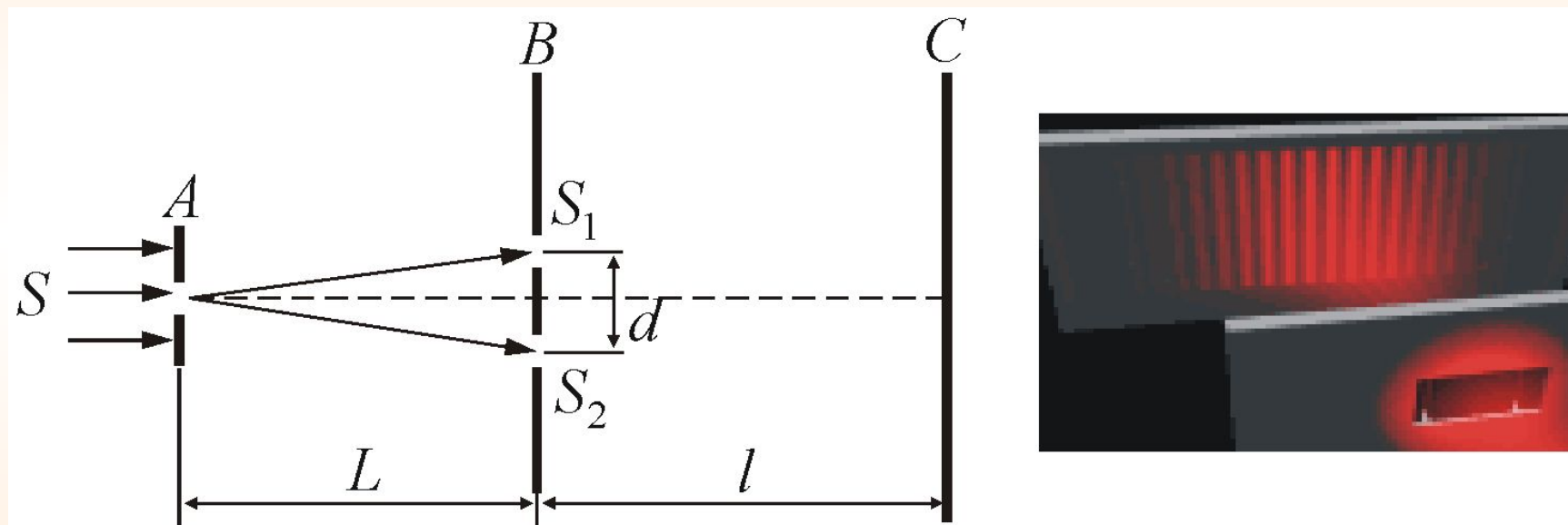


Рисунок 7.5

# Зеркала Френеля

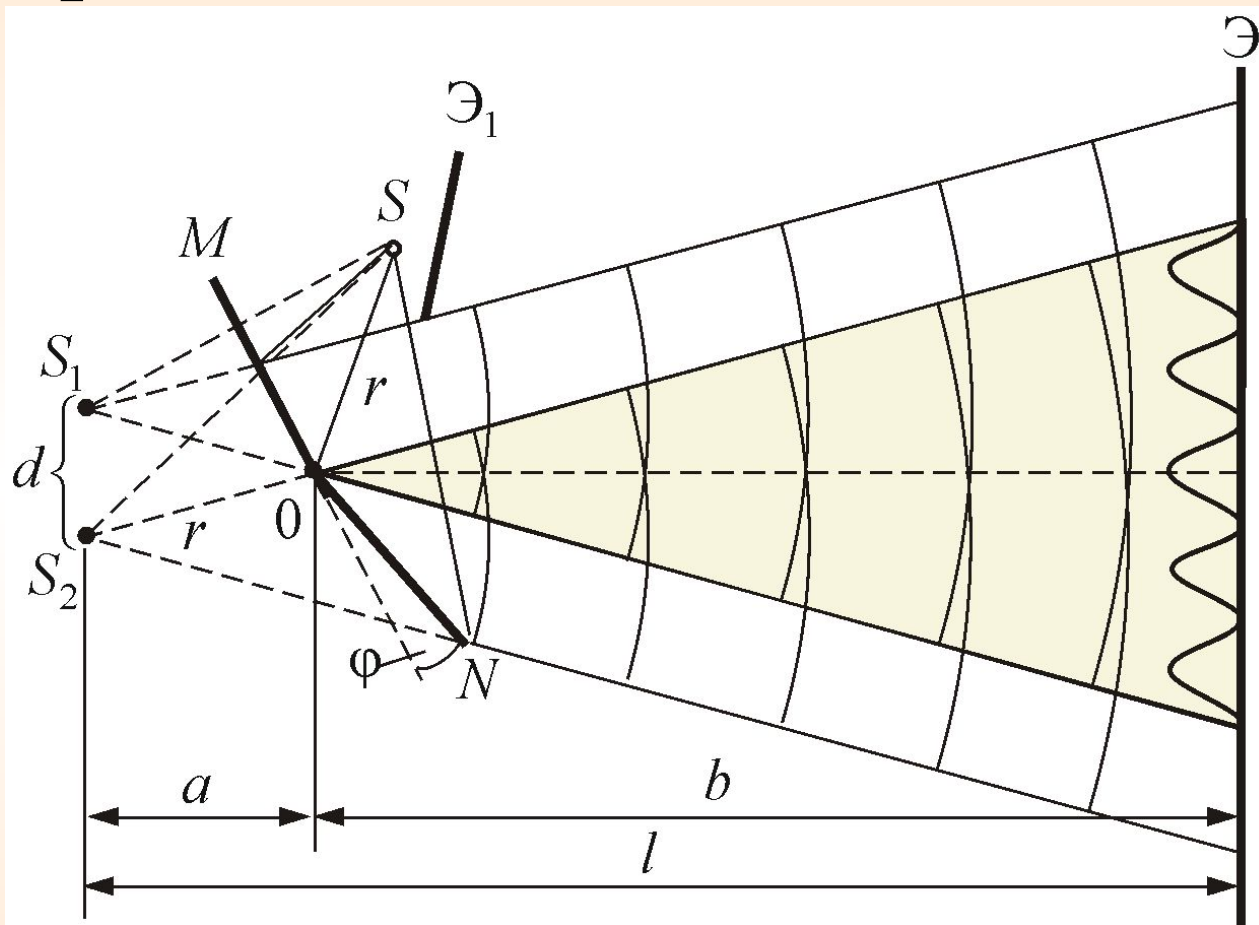


Рисунок 7.6

# Бипризма Френеля

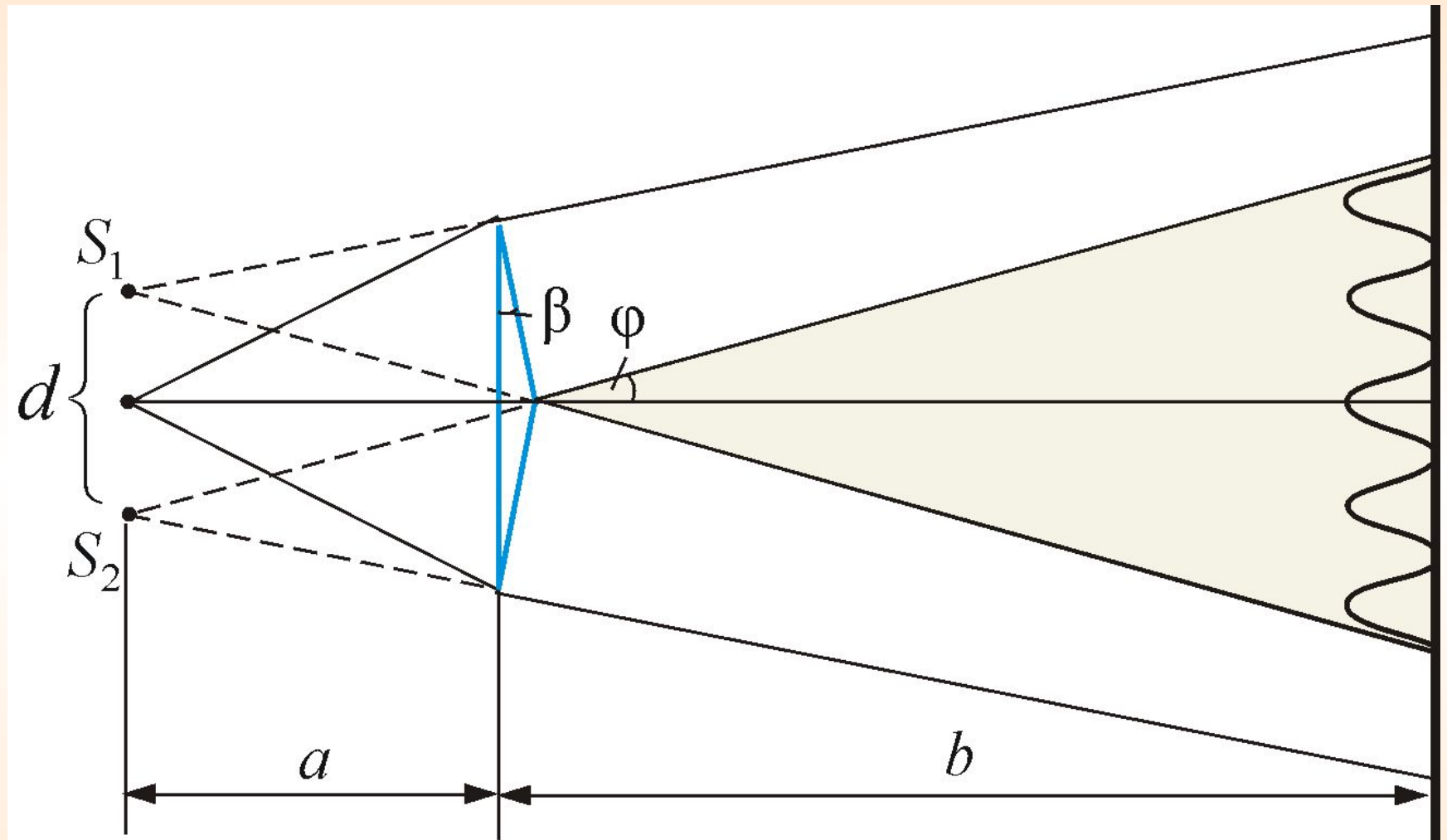


Рисунок 7.7

# *Билинза Бийе*

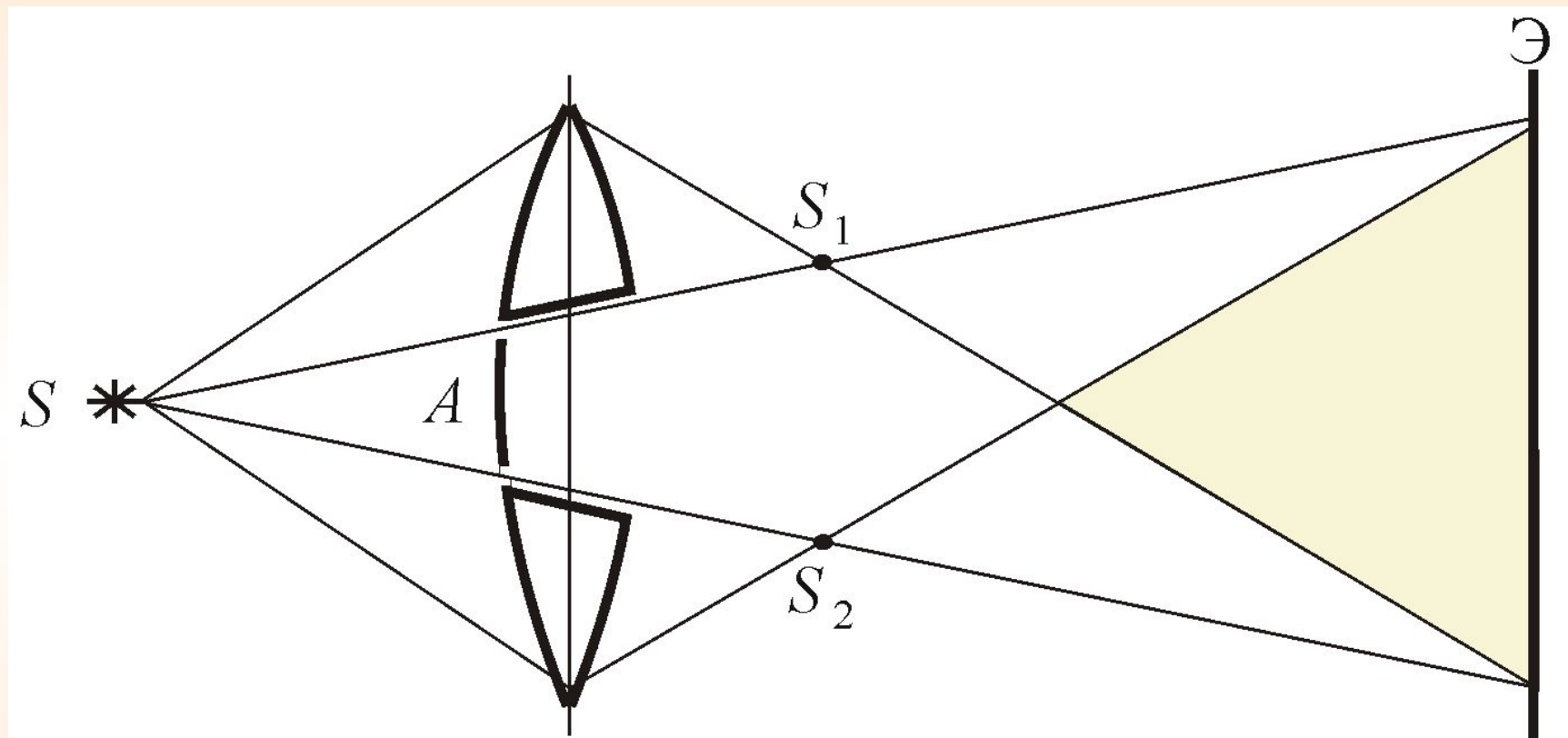


Рисунок 7.8



## 7.6 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*.

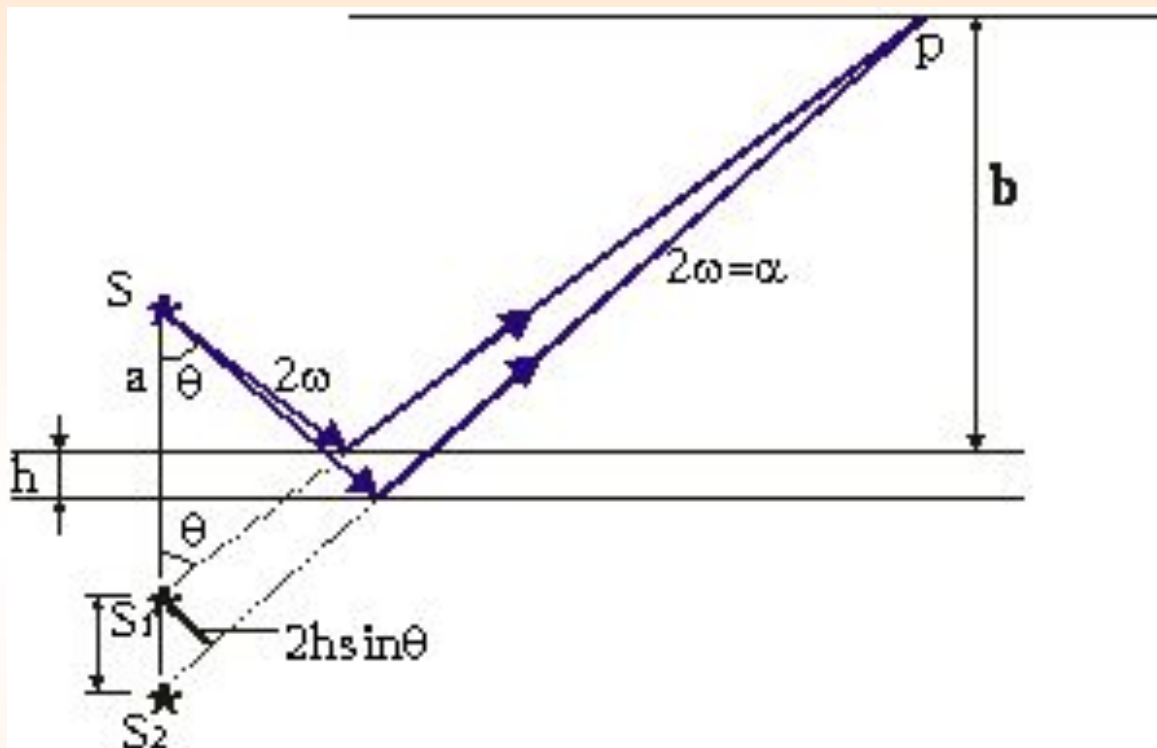


Рисунок 7.9

# *Полосы равного наклона*

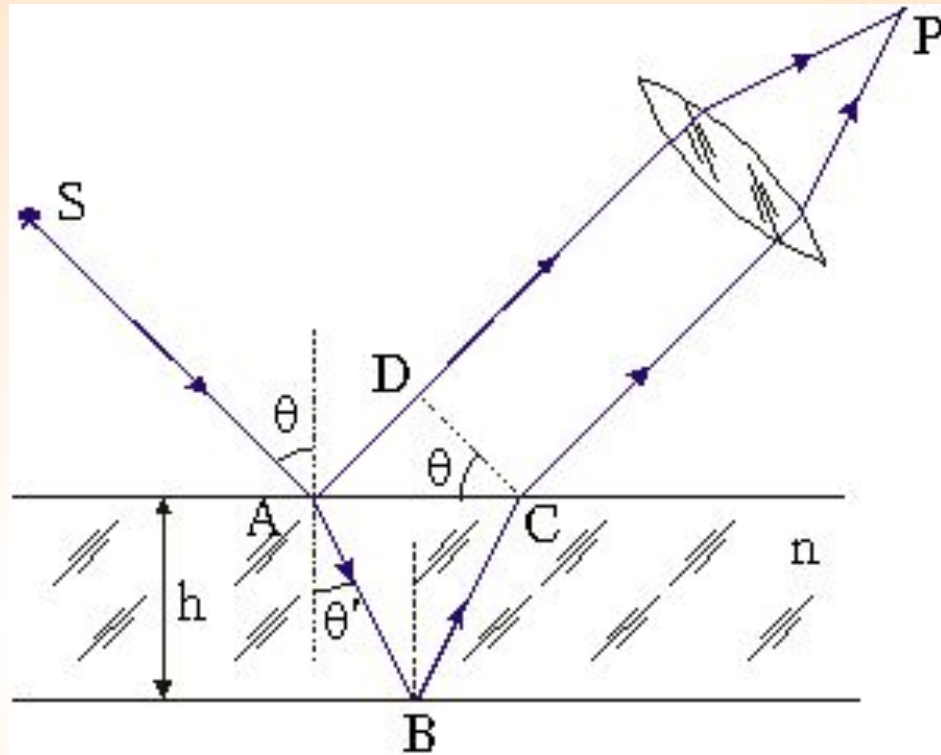
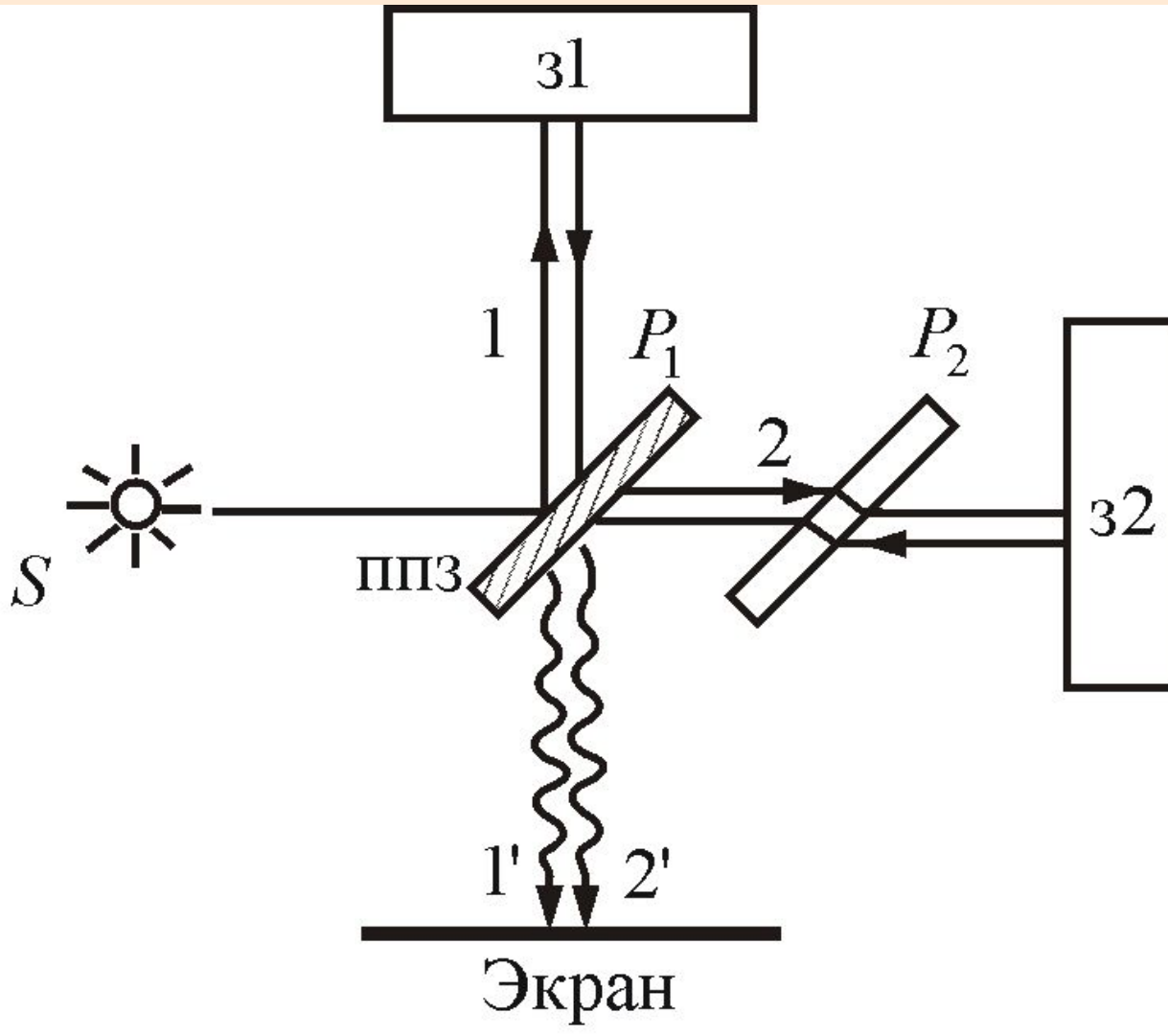


Рисунок 7.10

$$\Delta = 2nh \cos \beta$$

*интерференционные полосы равного наклона.*



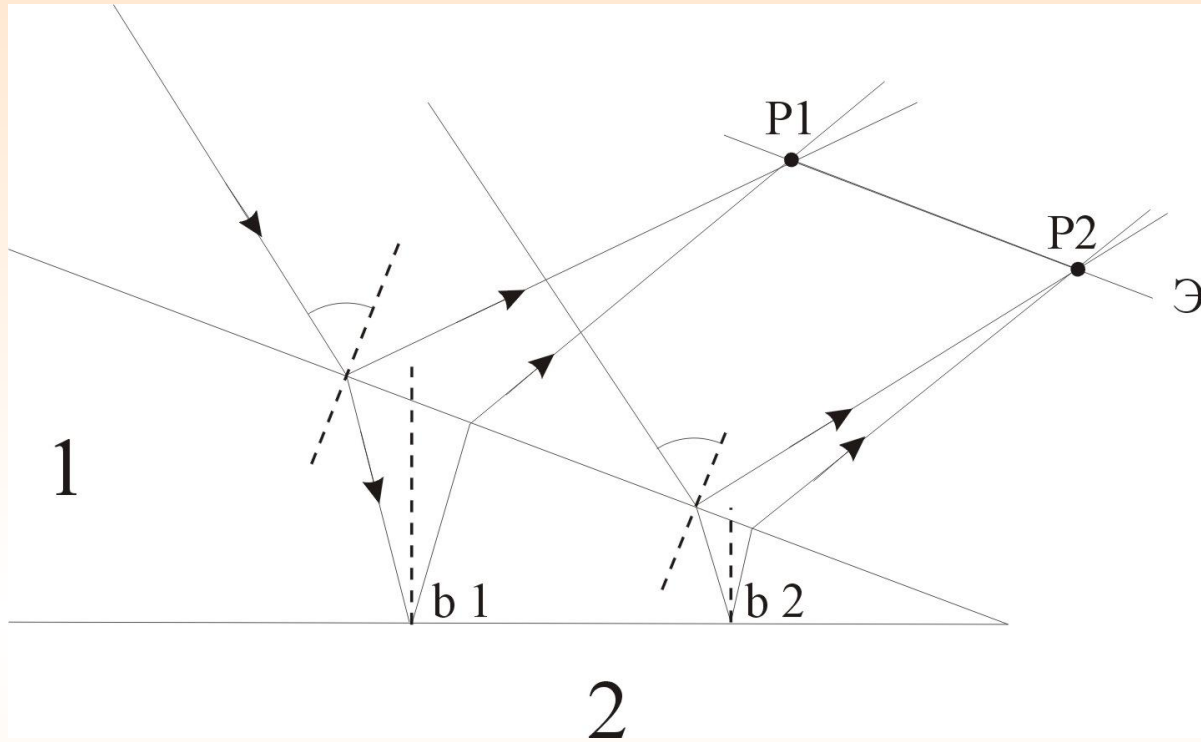
Для наблюдения  
полос равного  
наклона вместо  
плоскопараллель-  
ной пластинки  
удобно  
использовать  
*интерферометр  
Майкельсона*

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*





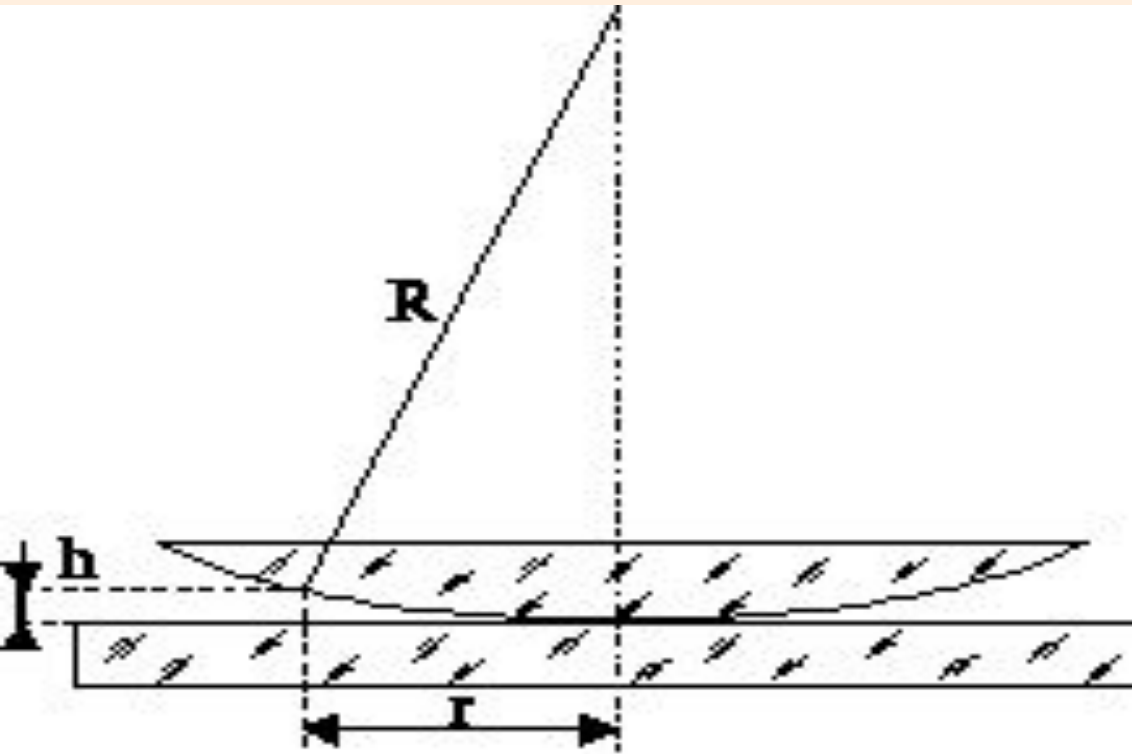
## *Кольца Ньютона*

*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



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



Полосы равной толщины можно наблюдать и с помощью интерферометра Майкельсона, если одно из зеркал  $З1$  или  $З2$  (рисунок 7.11) отклонить на

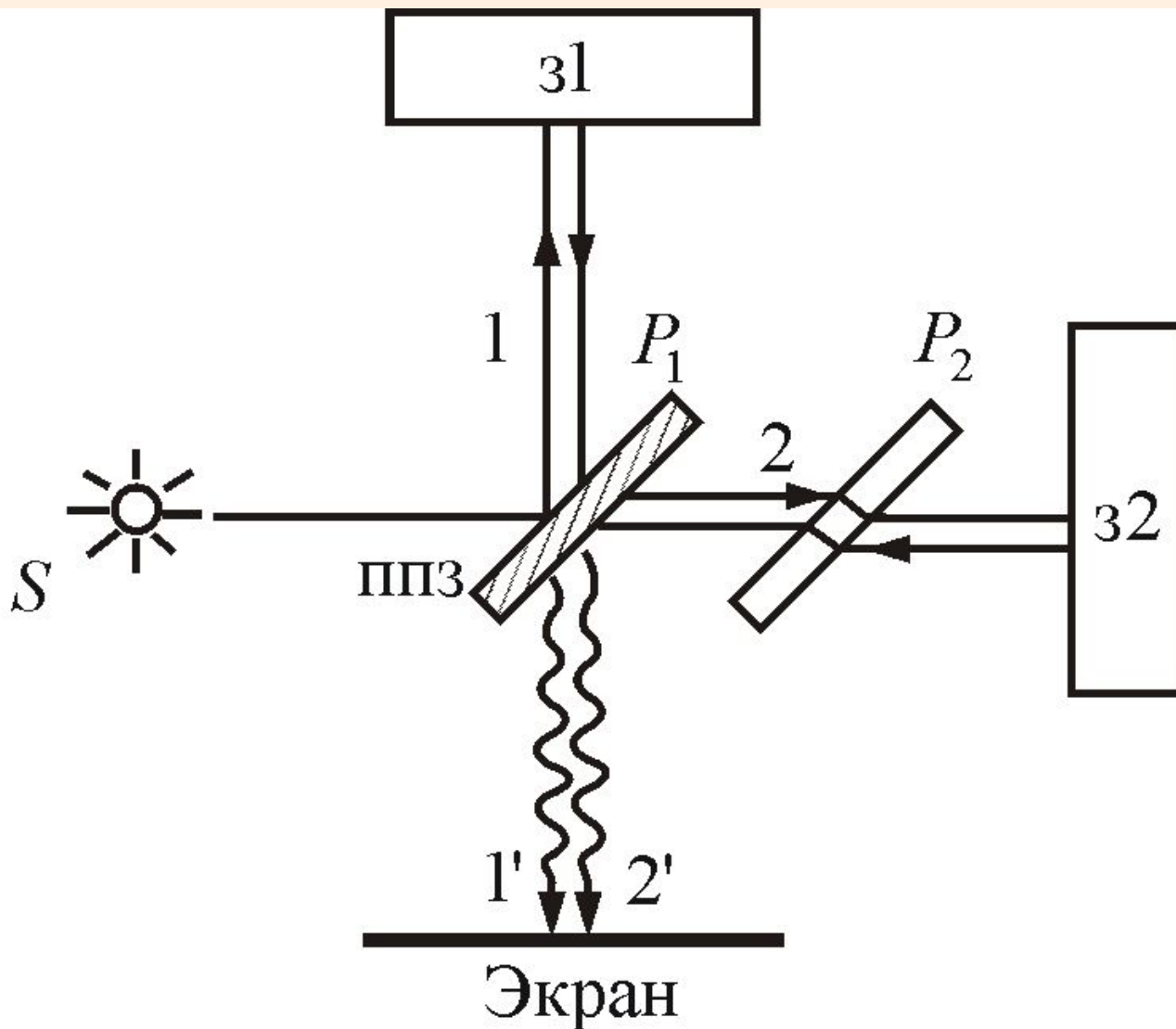


Рисунок 7.11

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*.

## 7.7 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.*

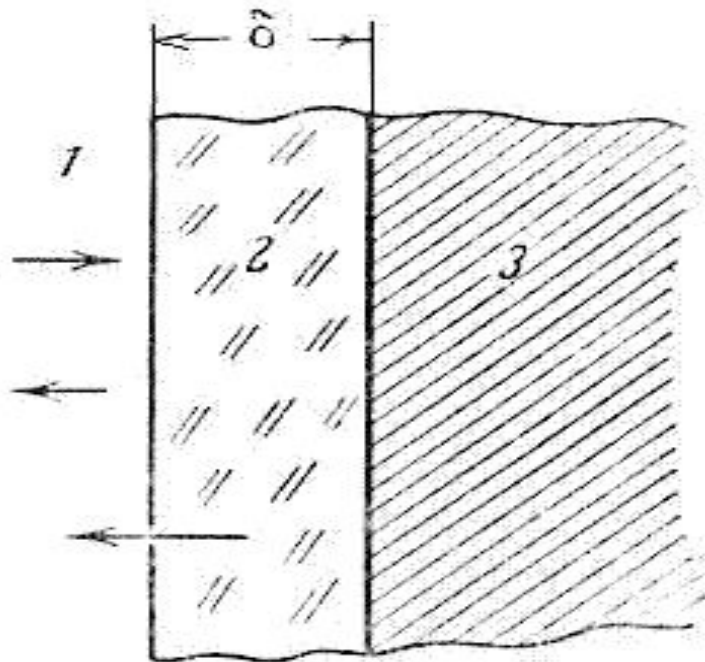
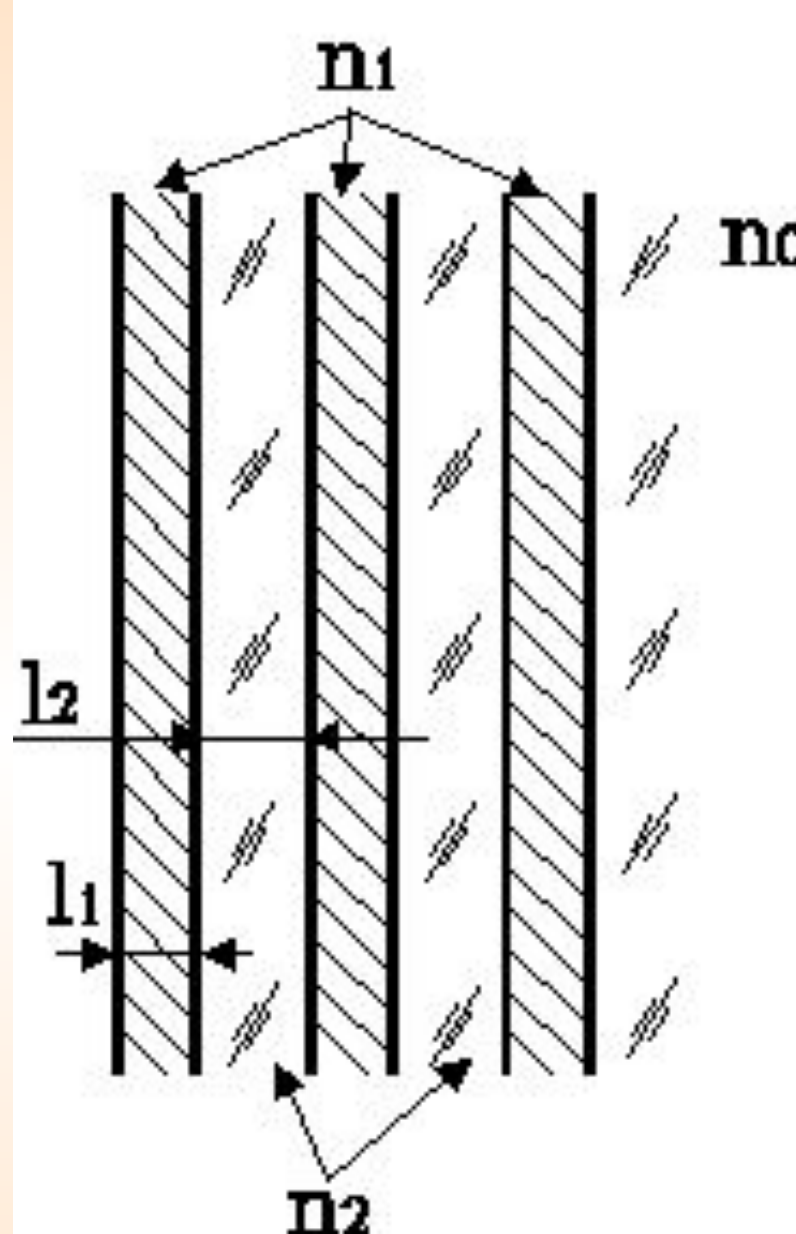


Рисунок 7.15

Рисунок 7.16



$$\delta = (2m + 1)\lambda / 4 \quad (7.7.1)$$

- *Получение высокоотражающих электрических зеркал*

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

# КОНЕЦ ЛЕКЦИИ

ЕЩЕ НЕ БЛИЗОК!!!



НЕ ТОРМОЗИ, ФИЗИКОЙ ЗАРЯЖАЙ МОЗГИ!!!