

# 1. Оптическое излучение

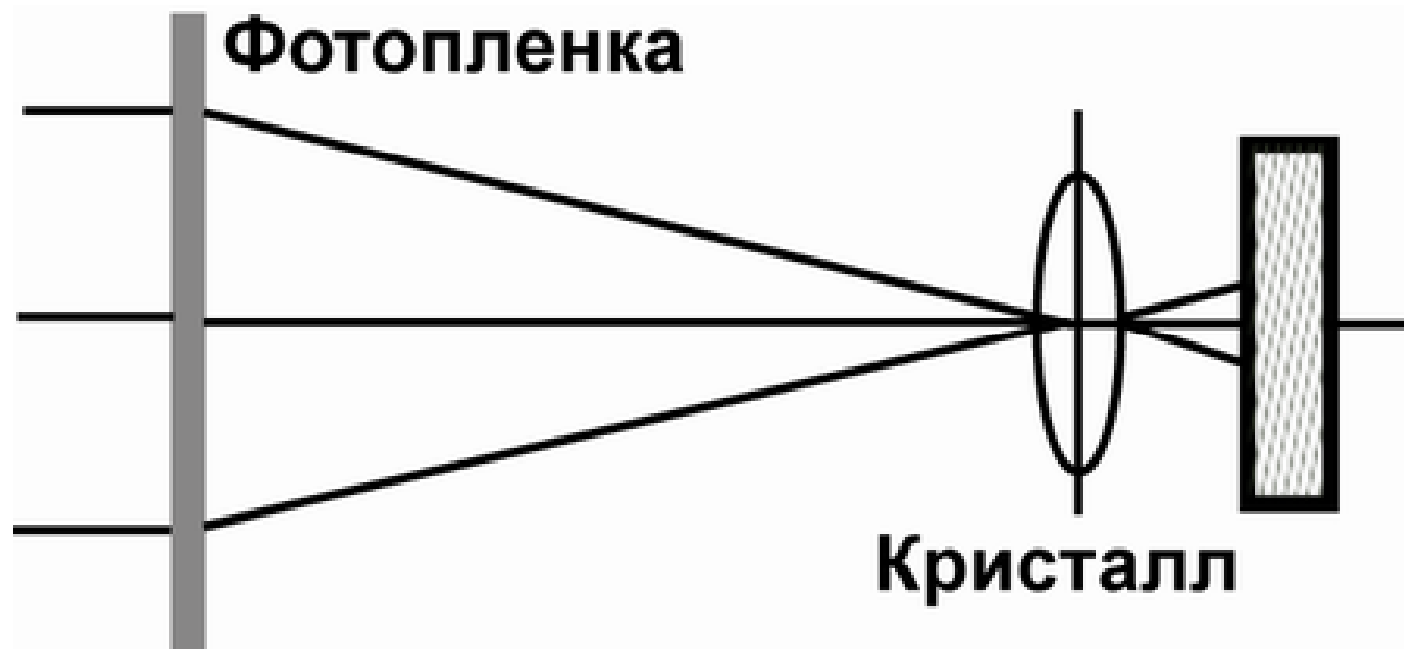
**Оптика** – (от греч. *optike* – наука о зрительных восприятиях) – **раздел физики, в котором изучаются оптическое излучение (свет), его распространение и явления, наблюдаемые при взаимодействии света и вещества.**

Оптическое излучение представляет собой электромагнитные волны, и поэтому оптика – **часть общего учения об электромагнитном поле.**

По традиции **оптику**  
**принято подразделять на**

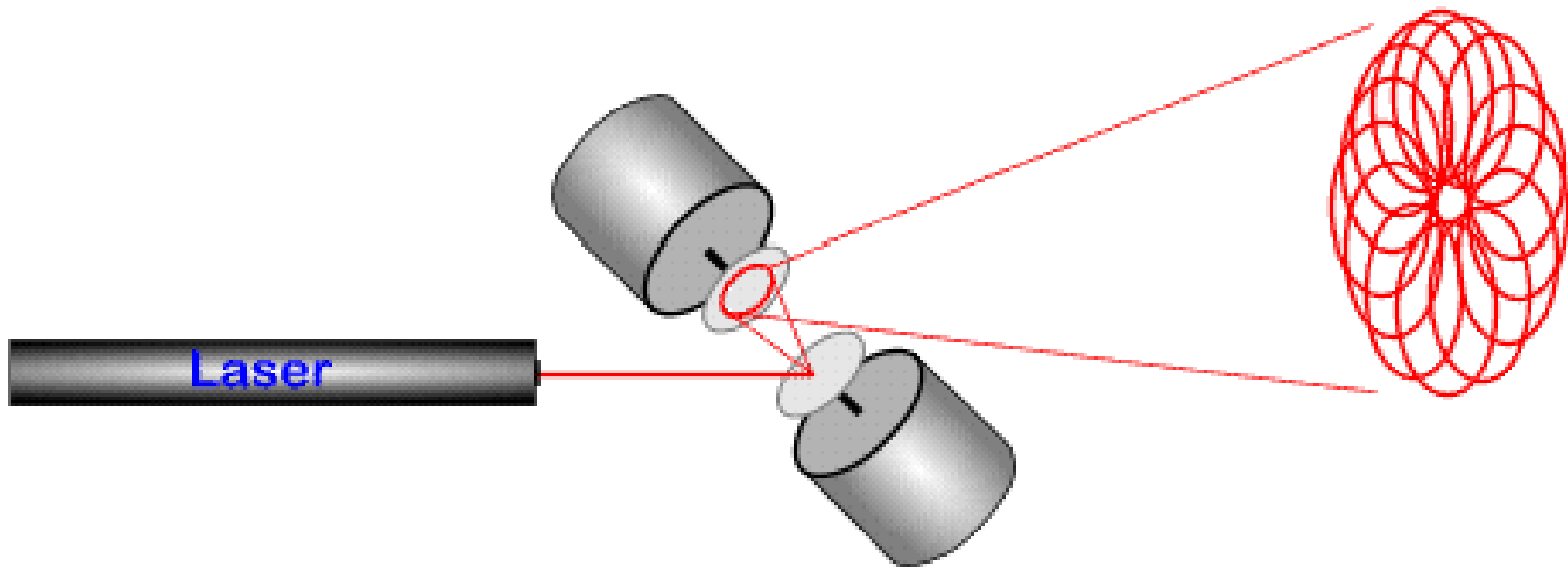
- **геометрическую,**
- **физическую и**
- **физиологическую.**

***Геометрическая оптика***, не рассматривая вопрос о природе света, исходит из **эмпирических** законов его распространения и использует представление о световых **лучах**, отражающихся и преломляющихся на границах сред с разными оптическими свойствами и прямолинейных в оптически однородной среде.

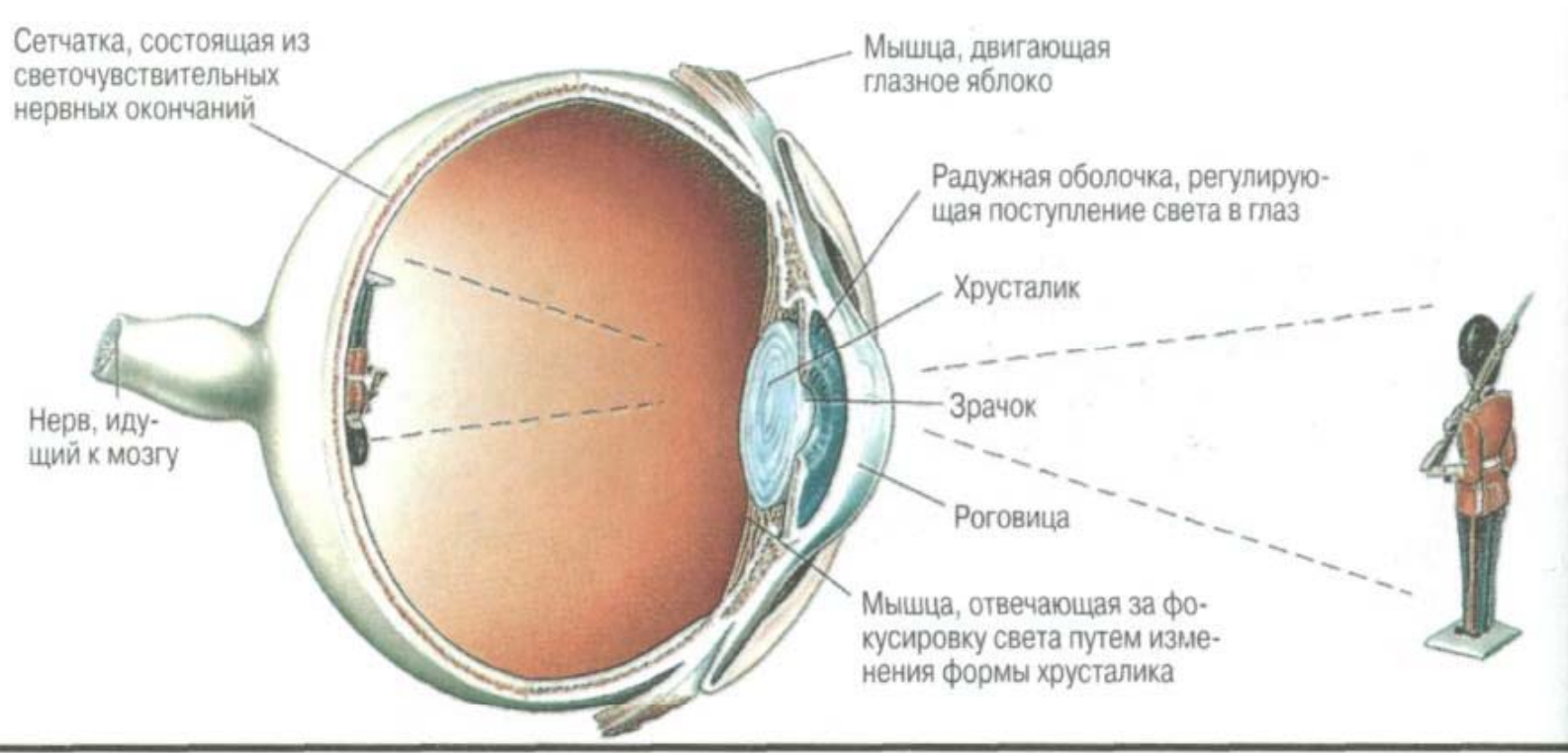


## *Физическая оптика*

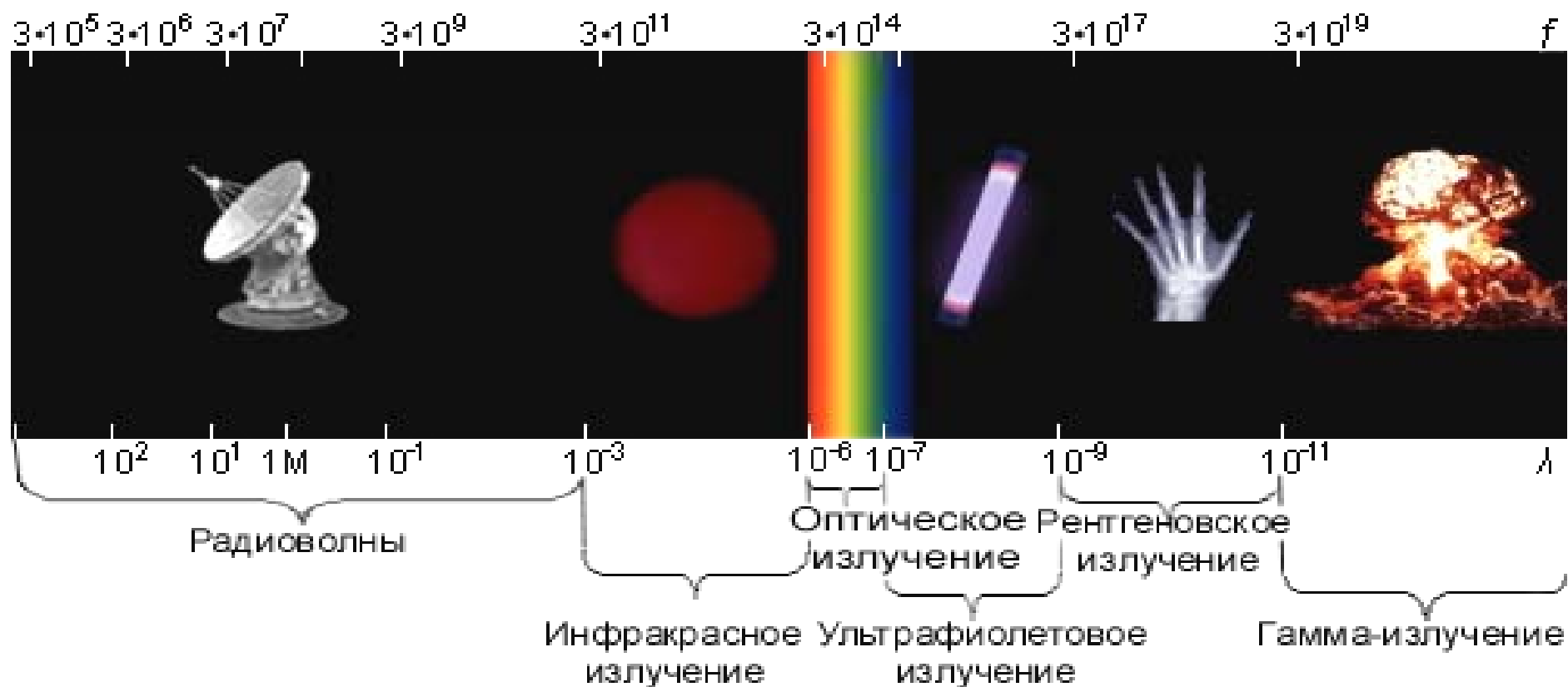
рассматривает проблемы, связанные с процессами испускания света, природой света и световых явлений.



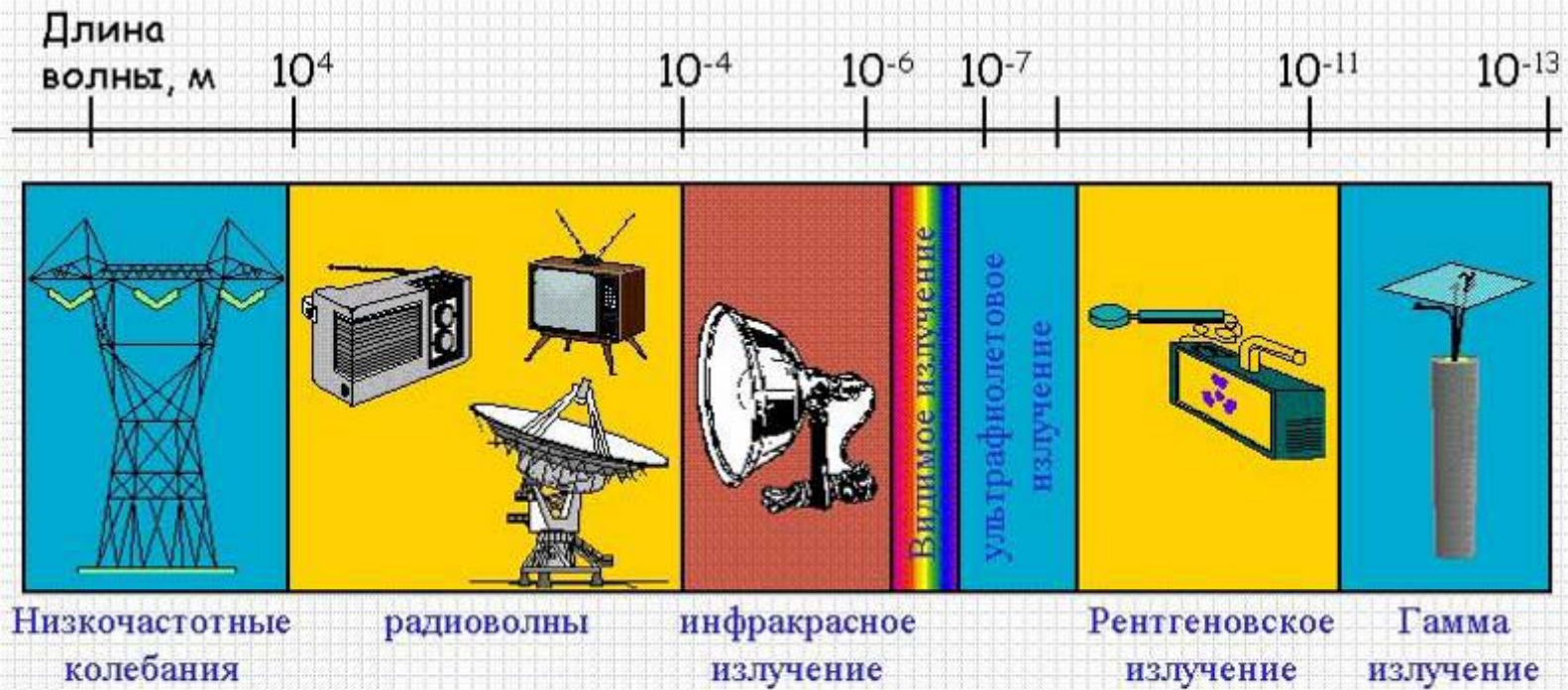
**Физиологическая оптика** изучает строение и функционирование всего аппарата зрения – от глаза до коры мозга; разрабатывается теория зрения, восприятия света и цвета.



Оптический диапазон длин волн  $\lambda$  ограничен с одной стороны ультрафиолетовым, а с другой – ИК диапазонами.



## Шкала электромагнитных волн.



# Геометрическая и волновая оптика



## Геометрическая оптика

**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.

## Геометрическая оптика

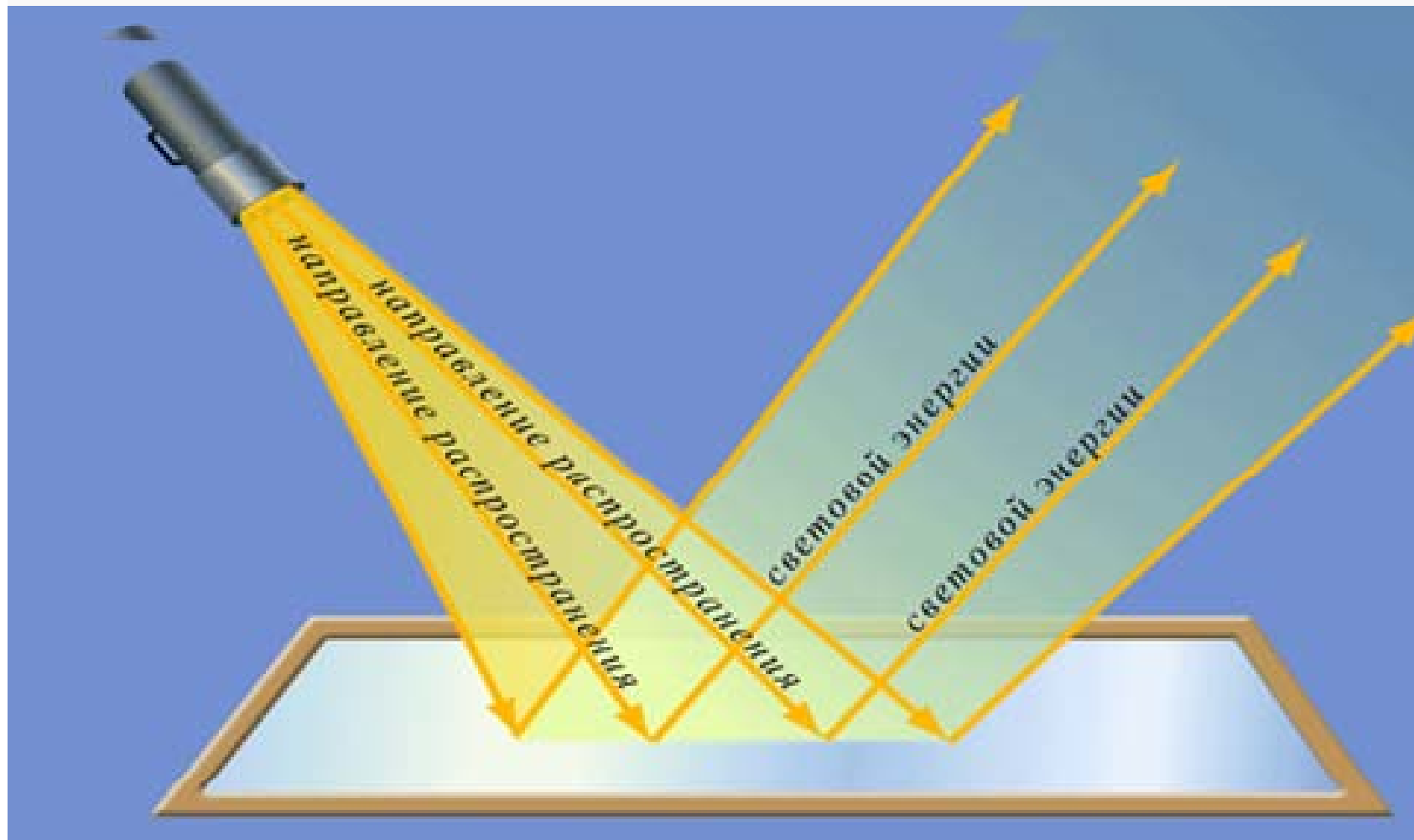
**Геометрическая оптика** – раздел оптики, в котором пренебрегают конечностью длин волн.

(в силу малости длин волн видимого диапазона можно отвлечься от волновой природы света, и распространение света рассматривать с точки зрения геометрии)

Иными словами **геометрическая оптика**, не рассматривая вопрос о природе света, исходит из эмпирических законов его распространения и использует понятие о световых **ЛУЧАХ**, отражающихся и преломляющихся на границах сред с разными оптическими свойствами и прямолинейных в оптически однородной среде.

## 1. Что такое световой луч?

Линию, вдоль которой распространяется световая энергия, называют световым лучом.



## Геометрическая оптика

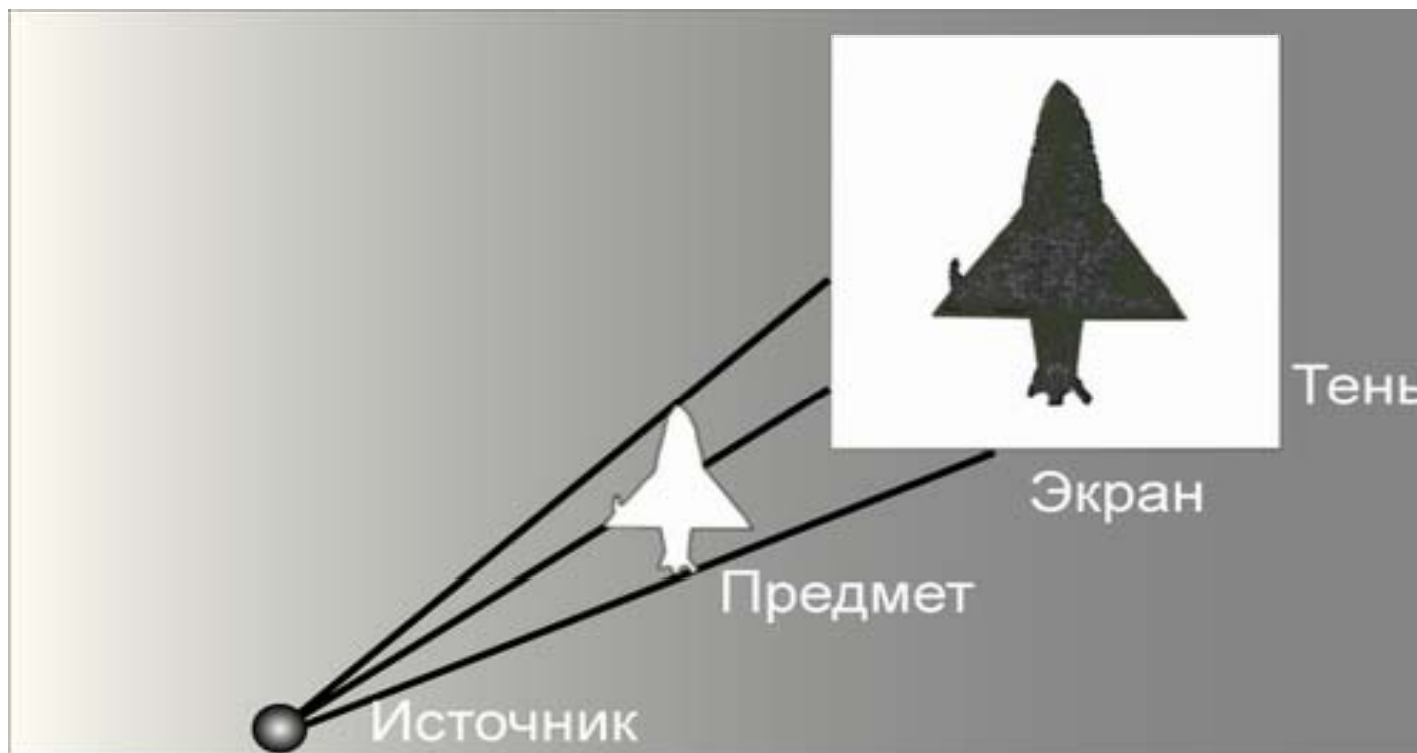
**В основе геометрической оптики лежат 4 закона,**  
установленные опытным путем:

- 1. закон прямолинейного распространения света;***
- 2. закон независимости световых лучей;***
- 3. закон отражения;***
- 4. закон преломления света.***

## Геометрическая оптика

**1. Закон прямолинейного распространения света:** в прозрачной однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Проявлением этого закона является, например, наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их источниками малых размеров.

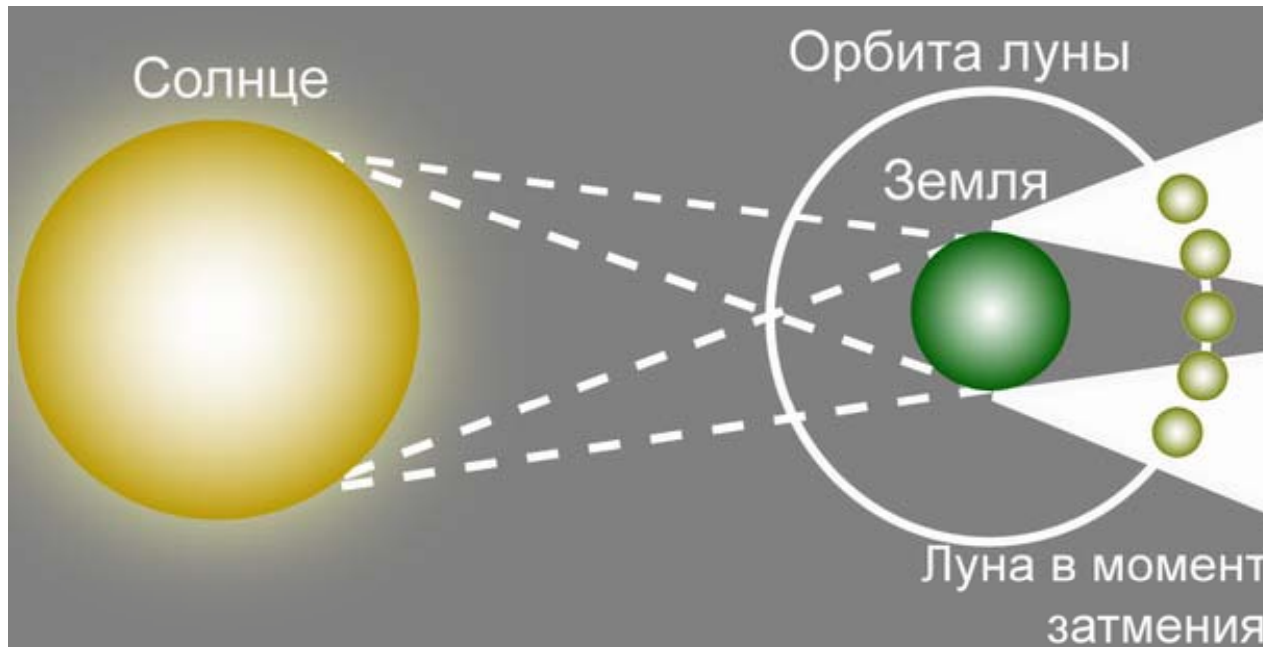


Тень, отбрасываемая предметом, обусловлена *прямолинейностью распространения световых лучей* в оптически однородных средах

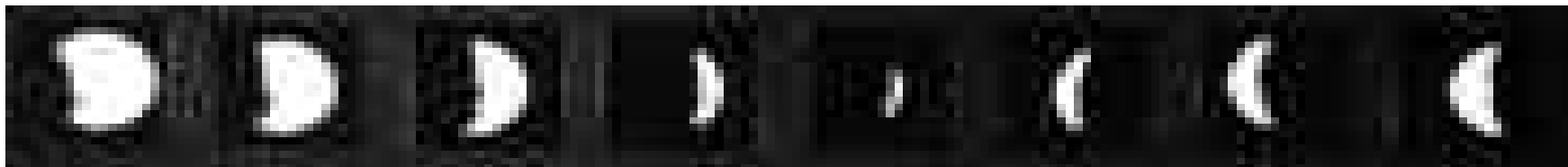


Если размеры препятствия много больше длины волны, то волны за него не проникают, создается область тени

Астрономической иллюстрацией **прямолинейного распространения света** и, в частности, образования тени и полутени может служить затенение одних планет другими, например **затмение Луны**, когда Луна попадает в тень Земли.

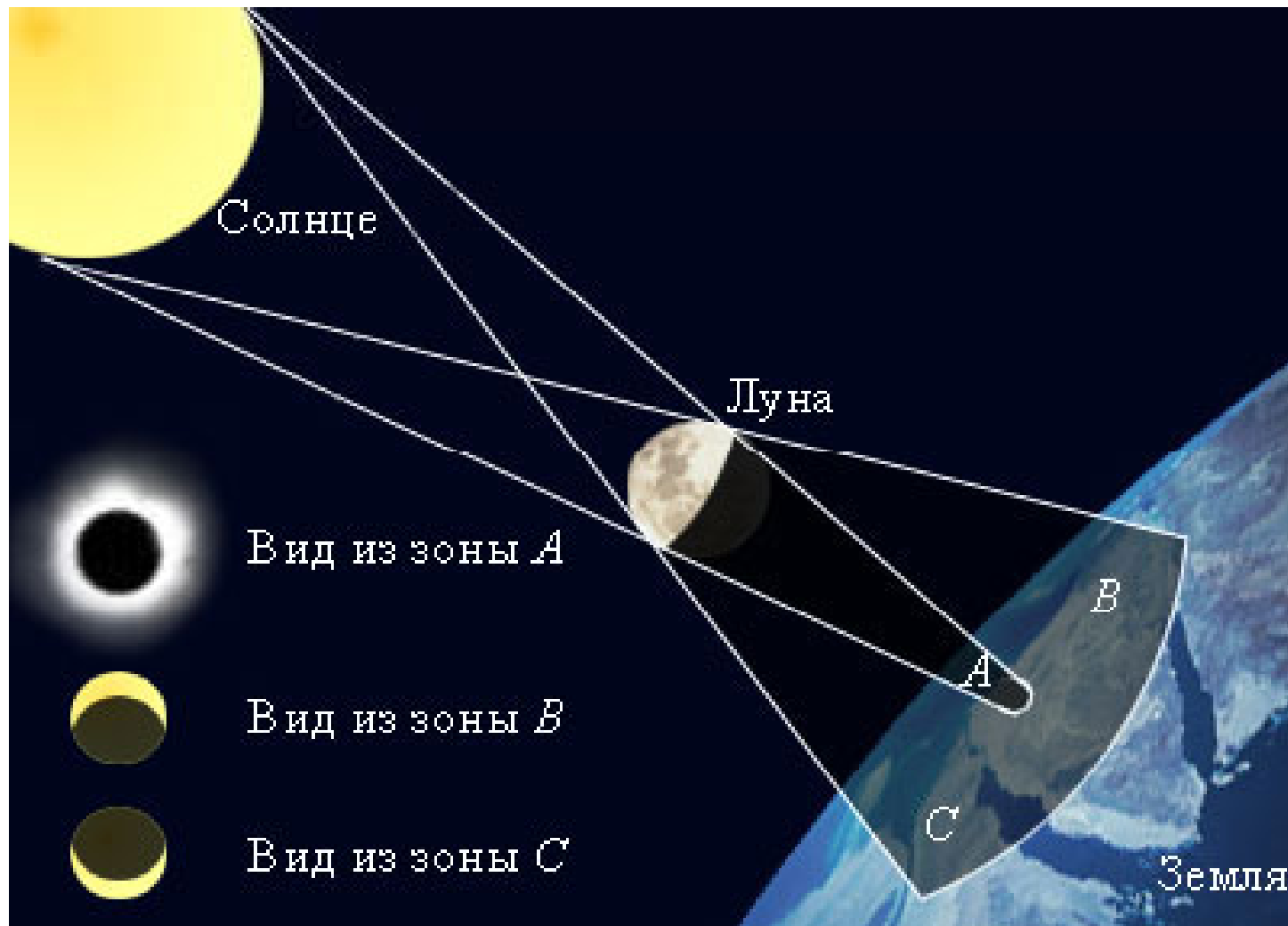


Вследствие взаимного движения Луны и Земли тень Земли перемещается по поверхности Луны, и лунное затмение проходит через несколько фаз:



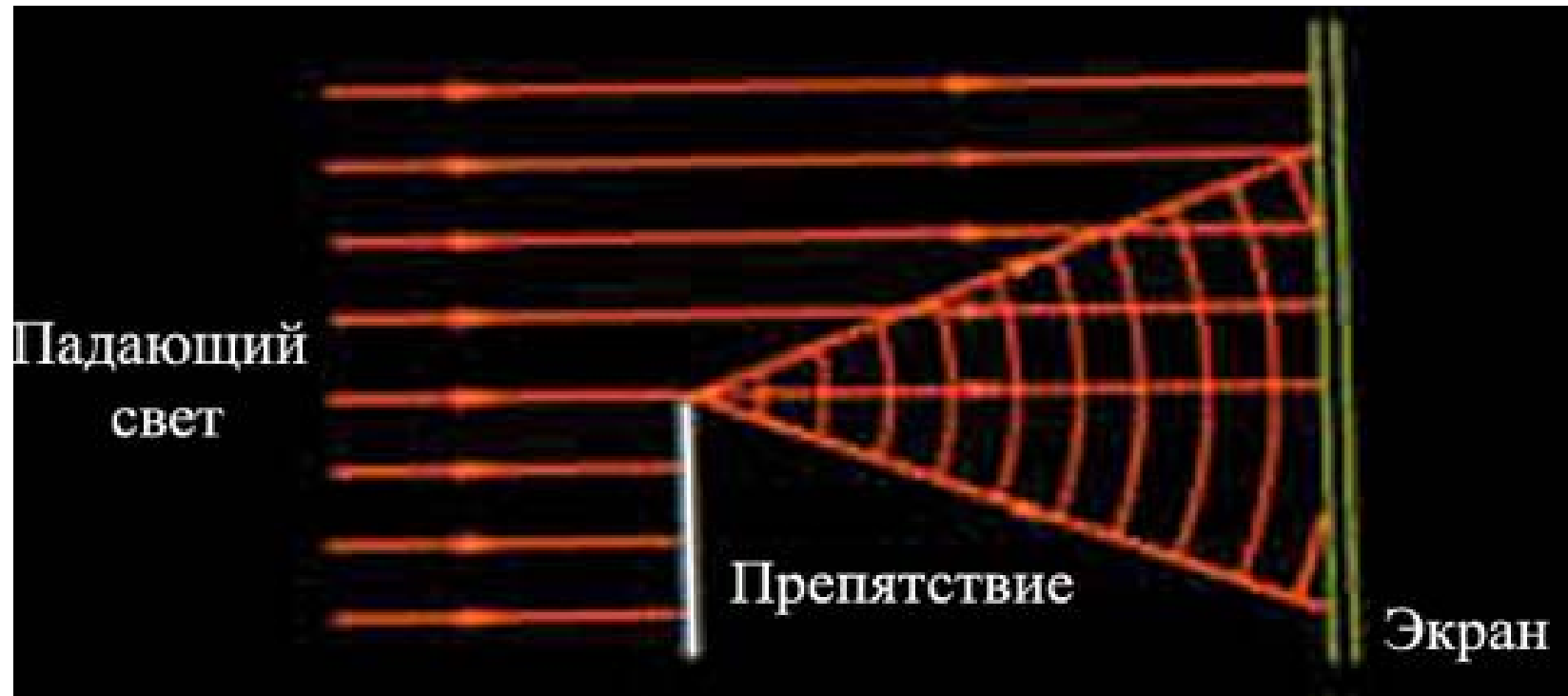
Частные фазы лунного затмения

Проявление прямолинейного распространения света – образование тени. Солнечное затмение.





Тщательные эксперименты показали, однако, что этот **закон нарушается**, если свет проходит через очень малые отверстия, причем *отклонение от прямолинейности распространения тем больше, чем меньше отверстия (дифракция)*.

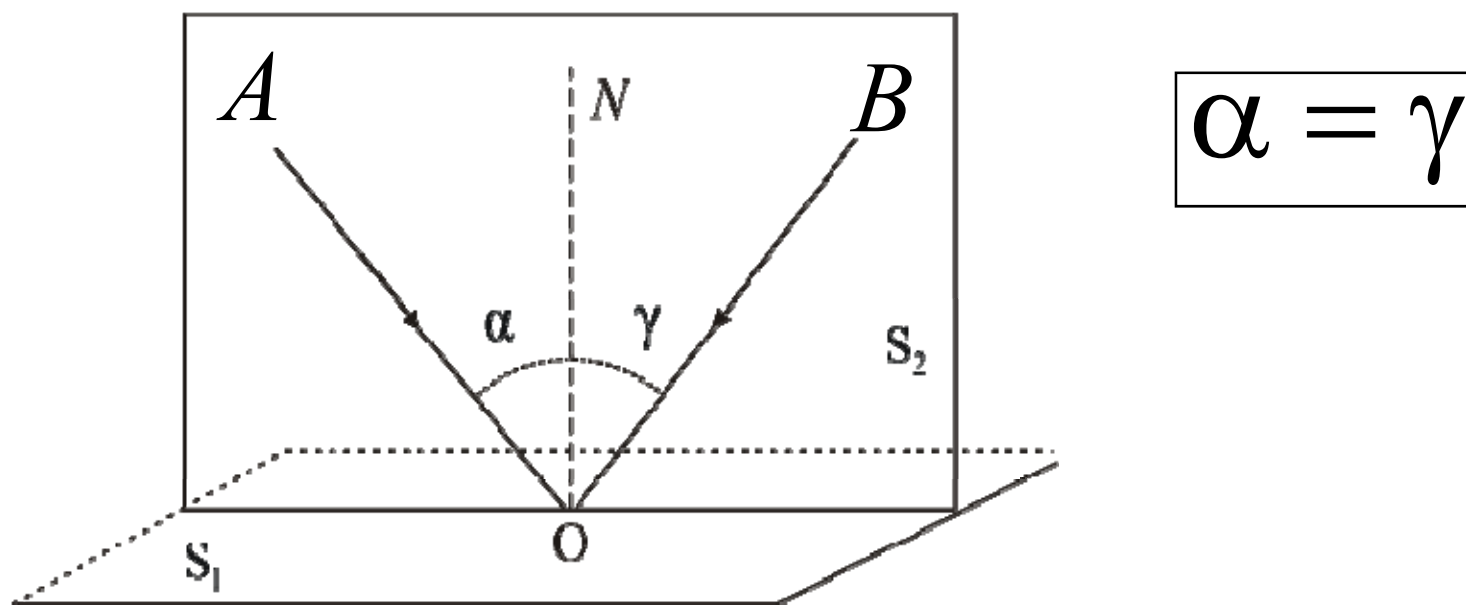


Огибание электромагнитными волнами препятствий и проникновение их в область геометрической тени наиболее отчетливо обнаруживается в тех случаях, **когда размер огибаемых препятствий соизмерим с длиной волны**

**2. Закон независимости световых лучей:**  
*лучи при пересечении не возмущают друг друга (справедлив при небольших интенсивностях света)*



**3. Закон отражения света:** отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью, восстановленной в точке падения (плоскость называется **плоскостью падения**); угол падения равен углу отражения.



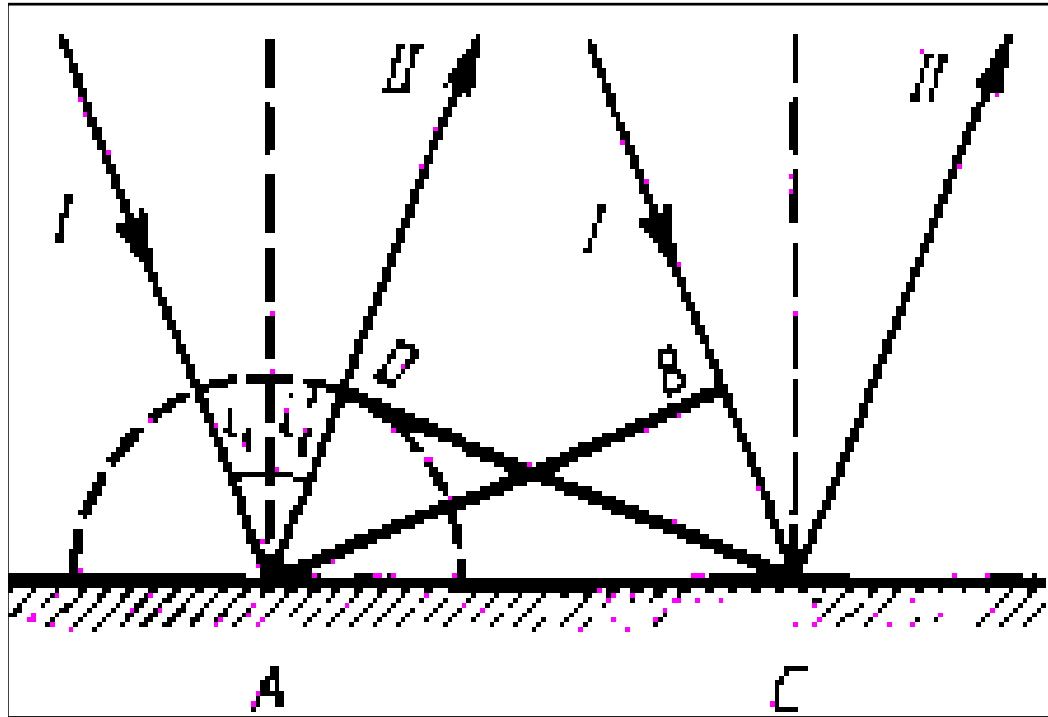
$S_1$  - отражающая поверхность;  $S_2$  - плоскость падения;  $AO$  - падающий луч;  $OB$  - отраженный луч;  $ON$  - нормаль к отражающей поверхности.

**Доказательство этого закона вытекает из принципа 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.**



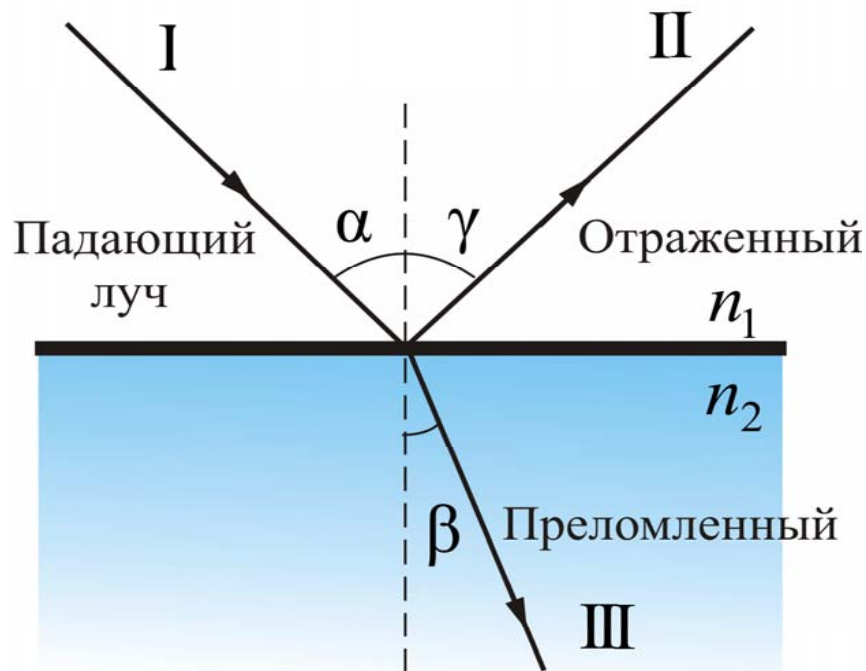
Когда фронт волны ( $A B$ ) достигнет отражающей поверхности в точке  $A$ , эта точка **начнет излучать вторичную волну**.



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

отраженной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью  $DC$ , а направление распространения этой волны — лучом  $II$ . Из равенства треугольников  $ABC$  и  $ADC$  вытекает **закон отражения: угол отражения  $i'_1$  равен углу падения  $i_1$** .

**4. Закон преломления света:** преломленный луч лежит в плоскости падения; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для рассматриваемых сред зависит **только от длины световой волны**, но не зависит от угла падения.

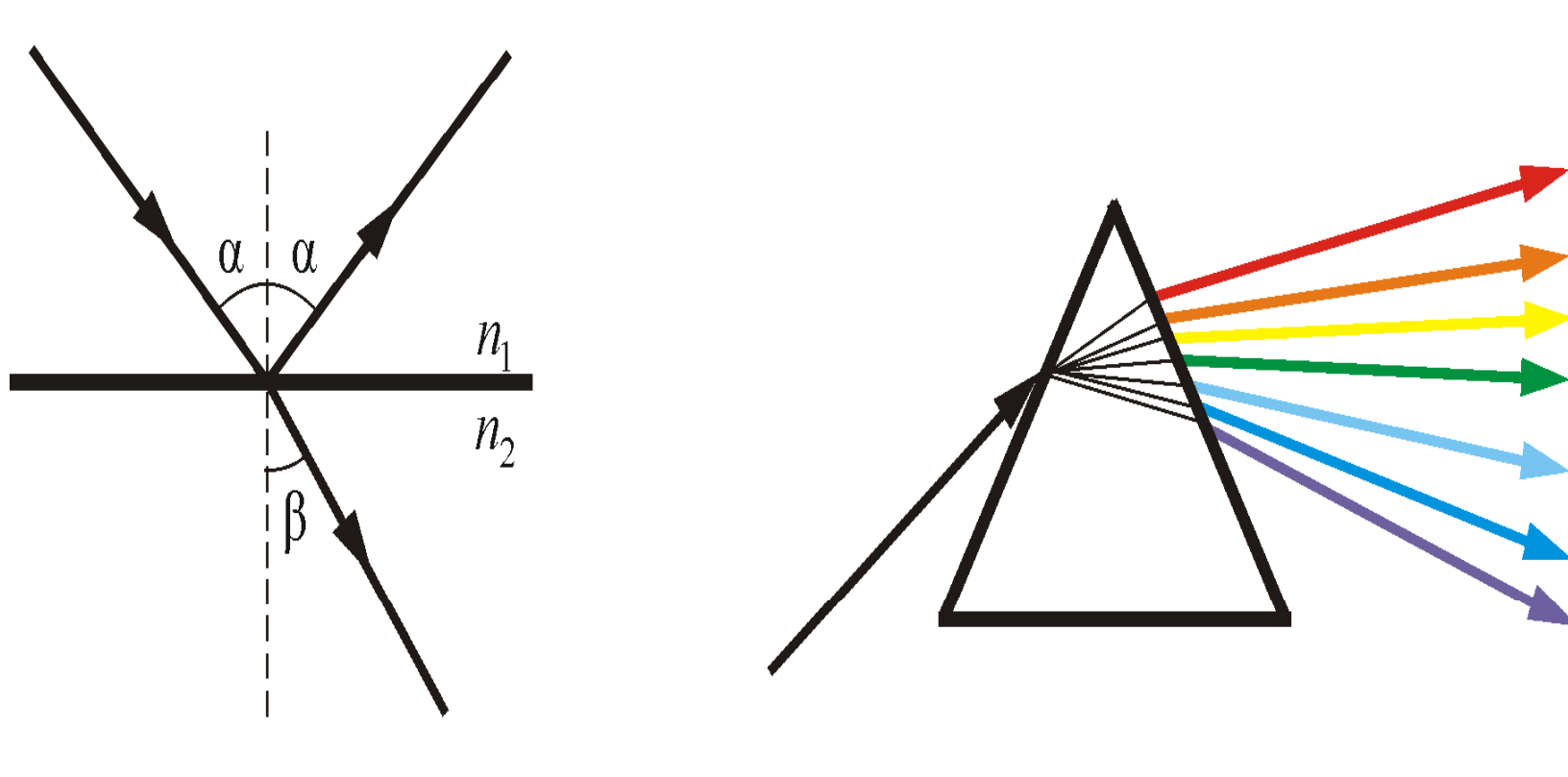


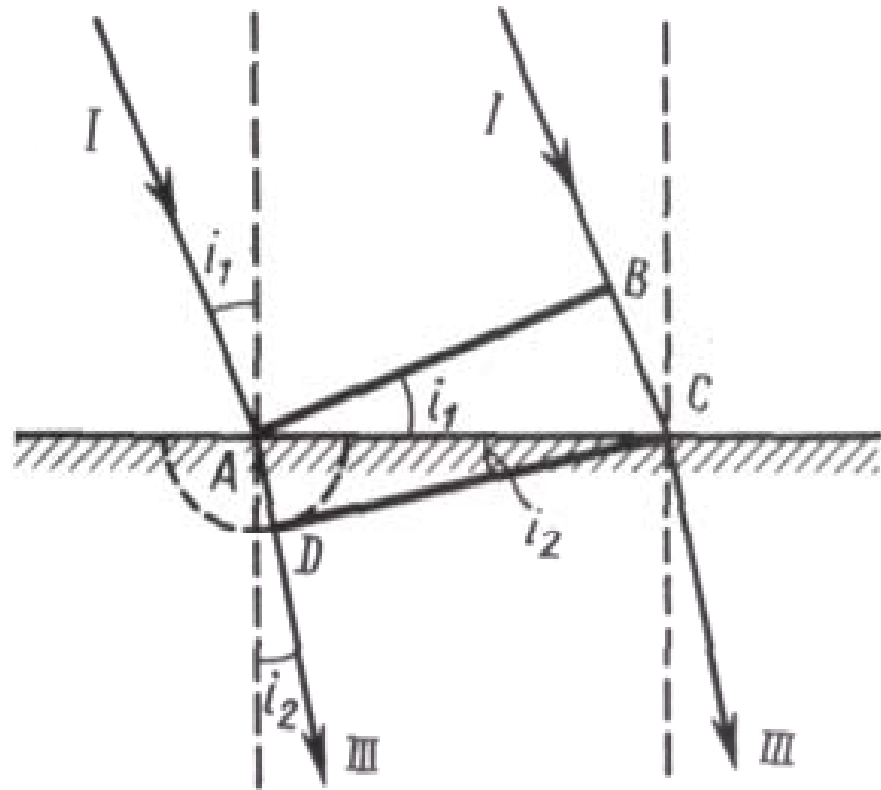
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12}$$

$n_{12}$  = **относительный показатель преломления** второй среды относительно первой, равный отношению их абсолютных показателей преломления:

$$n_{12} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$$

**4. Закон преломления света:** преломленный луч лежит в плоскости падения; отношение синуса угла падения к синусу угла преломления для рассматриваемых сред зависит **только от длины световой волны**, но не зависит от угла падения.





**Для вывода закона преломления** предположим, что плоская волна (фронт волны-*AB*), распространяющаяся в вакууме вдоль направления *I* со скоростью *c*, падает на границу раздела со средой, в которой скорость ее распространения равна *v*. 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*, а направление ее распространения - лучом *III*. Из рис. следует, что

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{c}{v} = n$$

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

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



Отношение скорости световой волны в вакууме к фазовой скорости в некоторой среде называется **абсолютным показателем преломления среды**:

$$n = \frac{c}{v}$$

Поскольку  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}$

Получаем

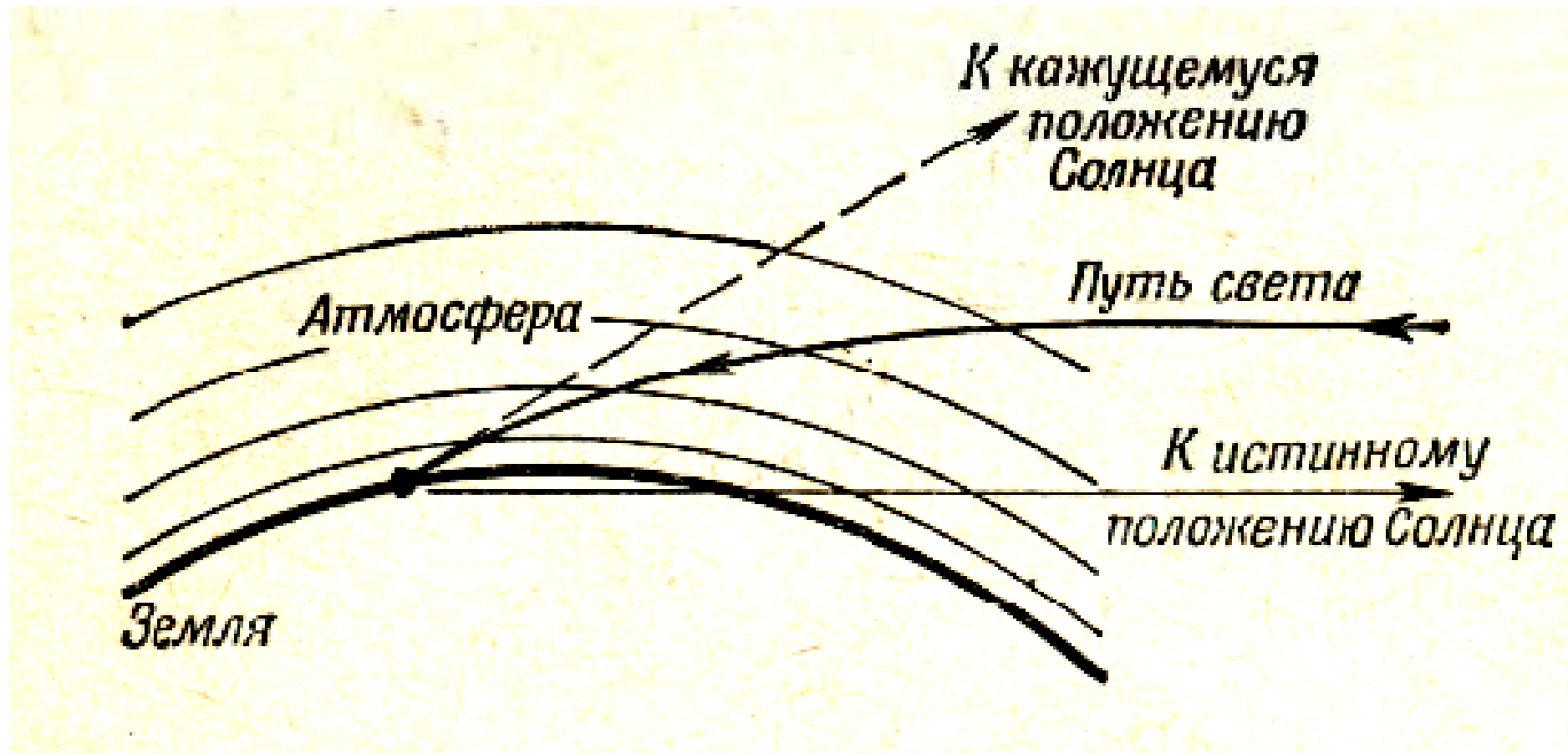
$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \approx \sqrt{\epsilon}$$

- для большинства прозрачных сред ( $\mu \approx 1$ )

Значение  $n$  определяет **оптическую плотность среды**:

**оптически более плотная среда – среда с бóльшим  $n$ ;**  
**оптически менее плотная среда – среда с меньшим  $n$ .**

У горизонта Солнце кажется на 1–2 градуса выше, чем на самом деле

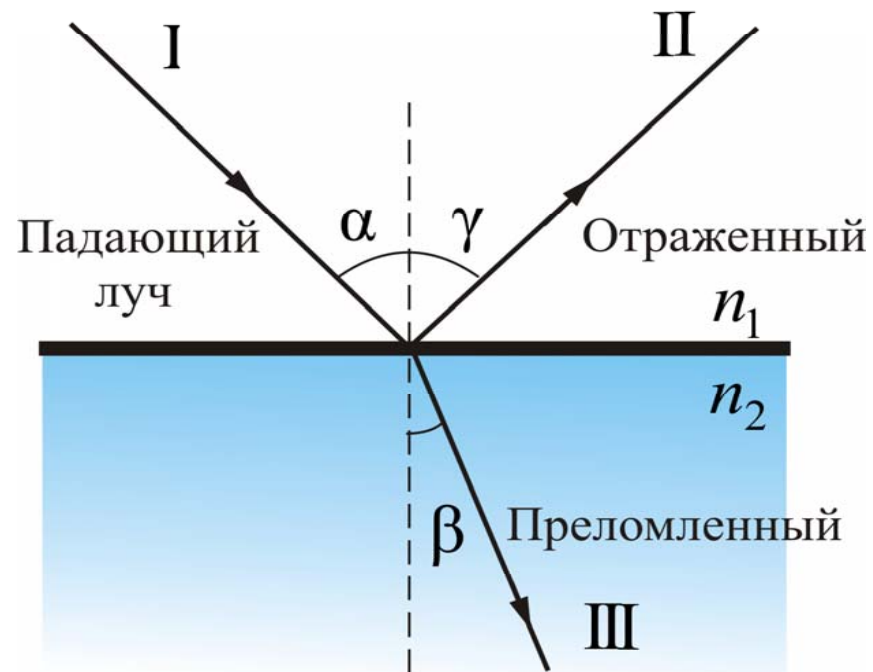


# Обратимость световых лучей

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{12} = \frac{n_2}{n_1}$$

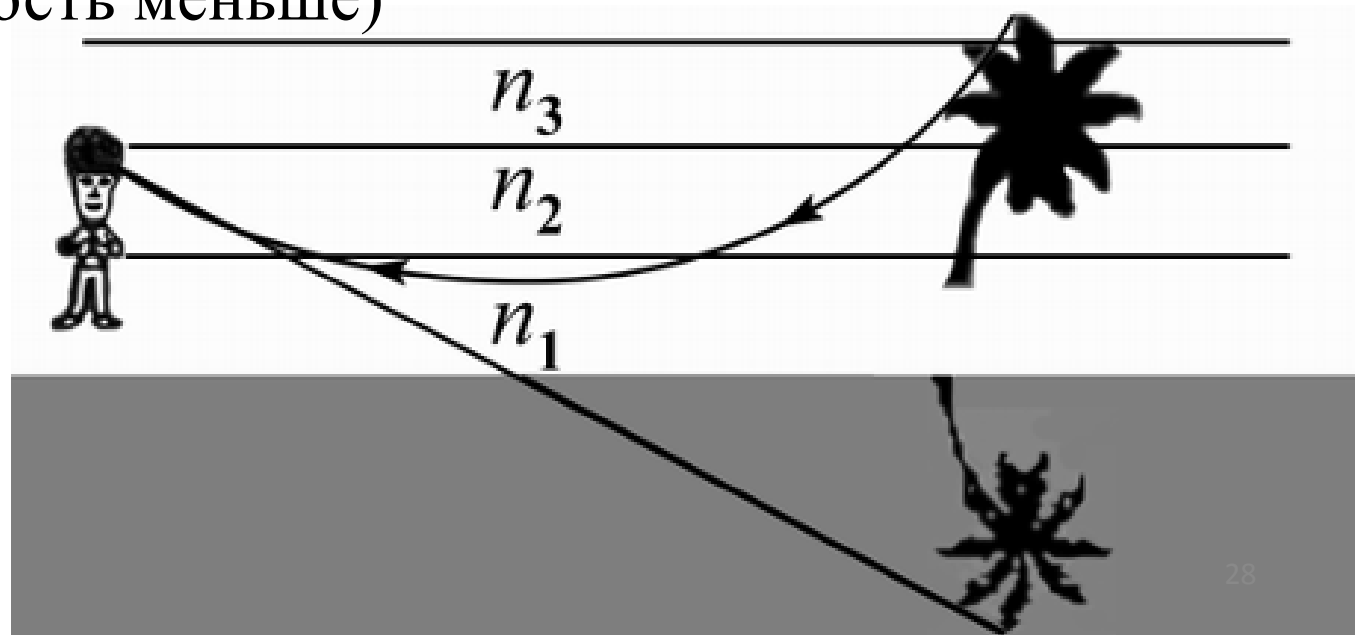


$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$



Из симметрии этого выражения вытекает  
*обратимость световых лучей*

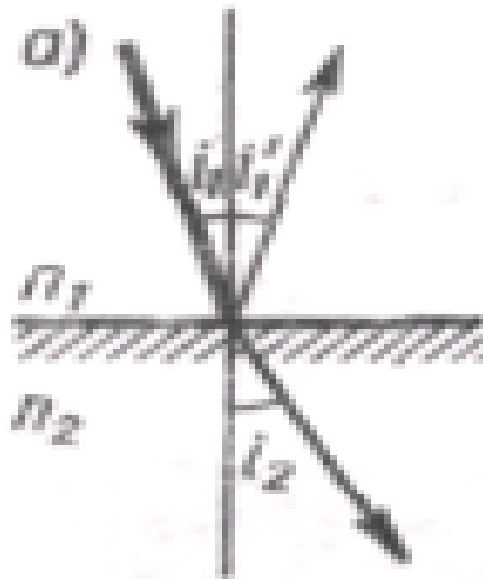
**Мираж**, который часто наблюдают путешественники на раскаленных солнцем дорогах. Они видят впереди оазис, а когда подходят туда, то кругом оказывается песок. Сущность явления в следующем. То, что мы видим в этом случае, это прошедший над песком свет. На рис. показано, как падающий на дорогу луч света попадает нам в глаз. Воздух сильно раскален над самой дорогой, а в верхних слоях холоднее. Горячий воздух, расширяясь, становится более разреженным (оптическая плотность меньше)



## *Явление полного отражения.*

Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления  $n_1$  (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления  $n_2$  ( $n_1 > n_2$ ), например из стекла в воду, то, согласно закону преломления, *преломленный луч удаляется от нормали* и угол преломления  $i_2$  больше, чем угол падения  $i_1$  (рис. а).

$$n_1 > n_2$$

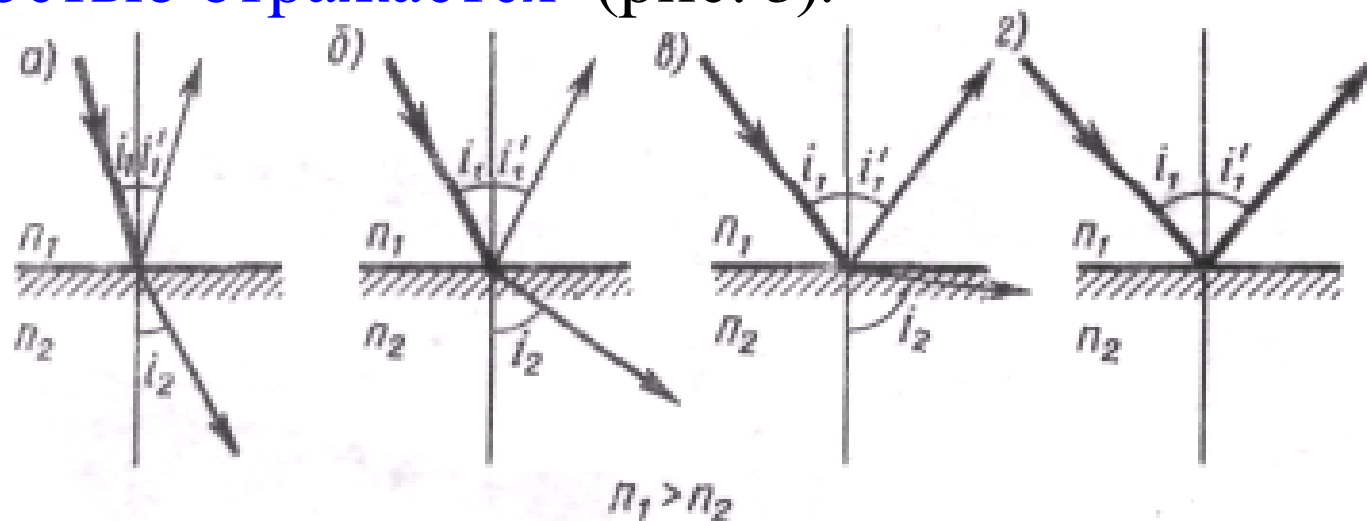


• С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. б, в), до тех пор пока при некотором угле падения ( $i_1 = i_{\text{пр}}$ ) **угол преломления не окажется равным  $\pi/2$ .**

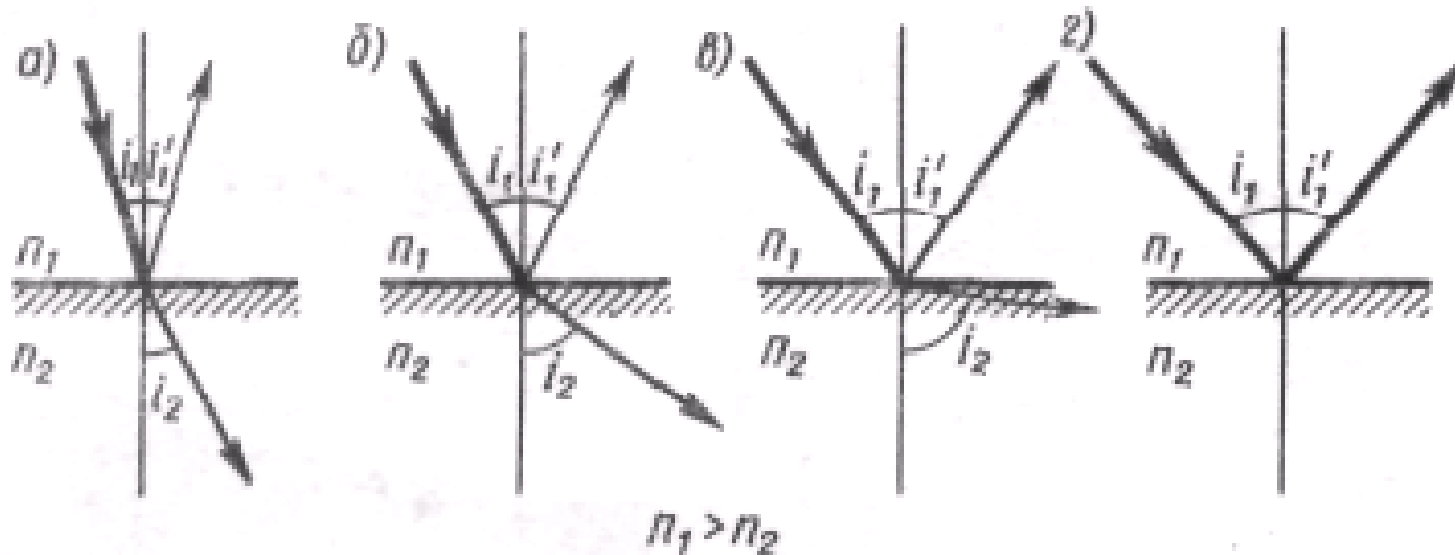
• **Угол  $i_{\text{пр}}$  называется *предельным углом.***

• Если  $i_1 = i_{\text{пр}}$ , то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего (рис. з).

При углах падения  $i > i_{\text{пр}}$  **весь падающий свет полностью отражается** (рис. з).



- *Таким образом, при углах падения в пределах от  $i_{пр}$  до  $\pi/2$  луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы.*
- По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного - растет.
- *Это явление называется полным отражением.*



Предельный угол  $i_{np}$  определяется из формулы

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

при подстановке в нее  $i_2 = \pi / 2$ .

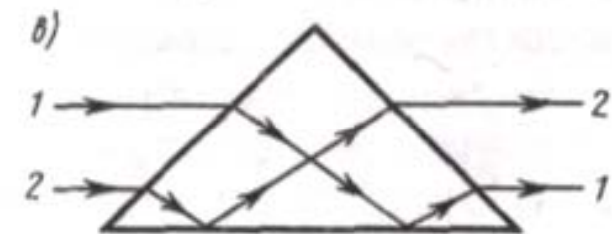
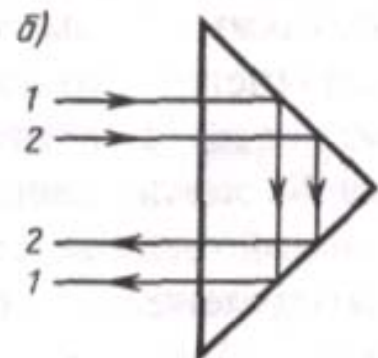
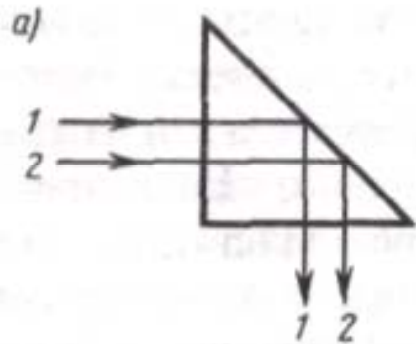
Следовательно

$$\sin i_{np} = n_2/n_1 = n_{21}.$$

Это уравнение удовлетворяет значениям угла  $i_{np}$  при  $n_2 < n_1$  Следовательно,

**явление полного отражения имеет место только при падении света из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную.**





**Явление полного отражения используется в призмах полного отражения.**

Показатель преломления стекла равен  $n \approx 1,5$ , поэтому предельный угол для границы стекло – воздух

$$i_{np} = \arcsin (1/1,5) = 42^\circ.$$

При падении света на границу стекло — воздух при  $i > 42^\circ$  всегда будет иметь место полное отражение.

На рис. а — в показаны призмы полного отражения, позволяющие:

- а) повернуть луч на  $90^\circ$ ;
- б) повернуть изображение;
- в) обернуть лучи.

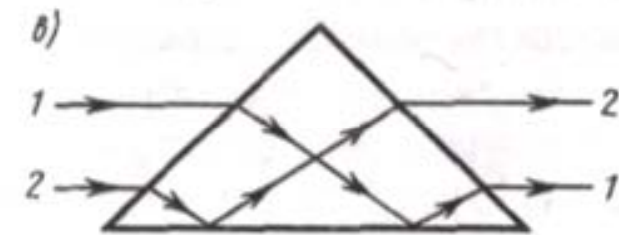
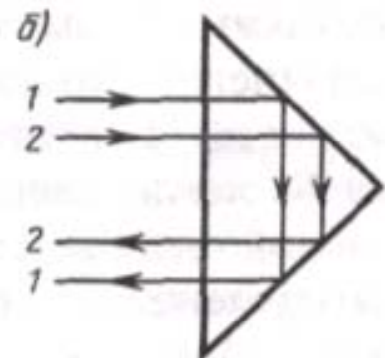
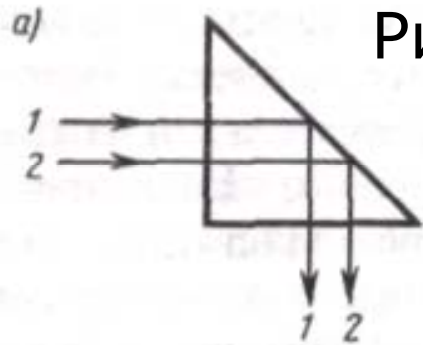
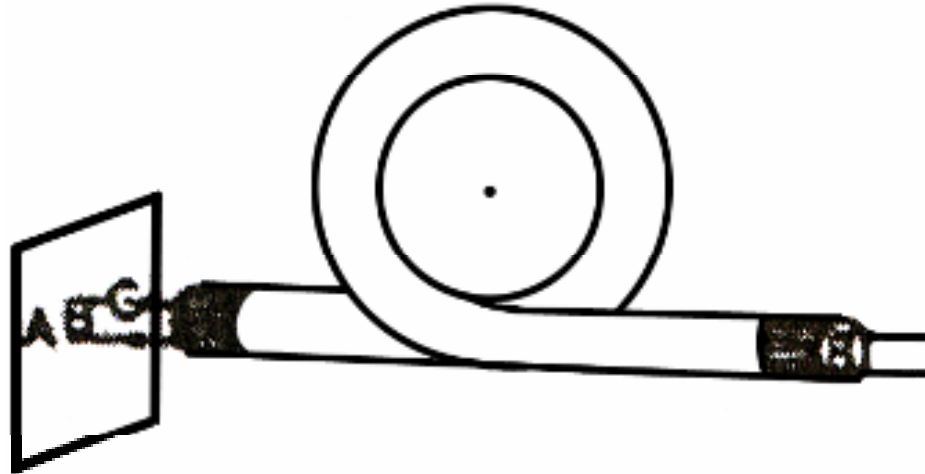


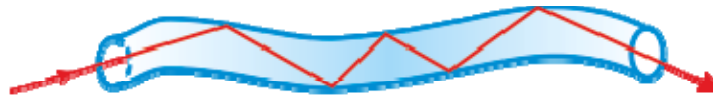
Рис.9.3

**Такие призмы применяются в оптических приборах** (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел (по закону преломления, измеряя  $i_{\text{пр}}$ , можно определить относительный показатель преломления двух сред, а также абсолютный показатель преломления одной из сред, если показатель преломления второй среды известен).

Явление полного отражения используется также в **световодах** представляющих собой тонкий, произвольным образом изогнутые нити (волокна) из оптически прозрачного материала.

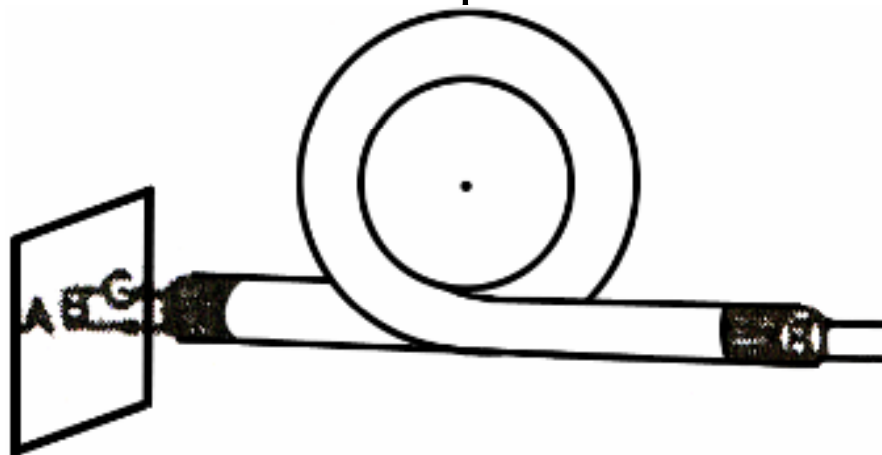


В волоконных деталях применяют стеклянное волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления.



Свет, падающий на торец световода **под углами, большими предельного**, претерпевает на поверхности раздела сердцевины и оболочки **полное отражение** и распространяется только по световедущей жиле.

Таким образом, с помощью световодов можно как угодно искривлять путь светового пучка. За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому прямому или изогнутому пути



Диаметр световедущих жил лежит в пределах от нескольких микрометров до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды.



Этот телефонный провод содержит 144 оптические нити

Вопросы передачи световых волн и изображений изучаются в специальном разделе оптики — *волоконной оптике*, возникшей в 50-е годы XX столетия.

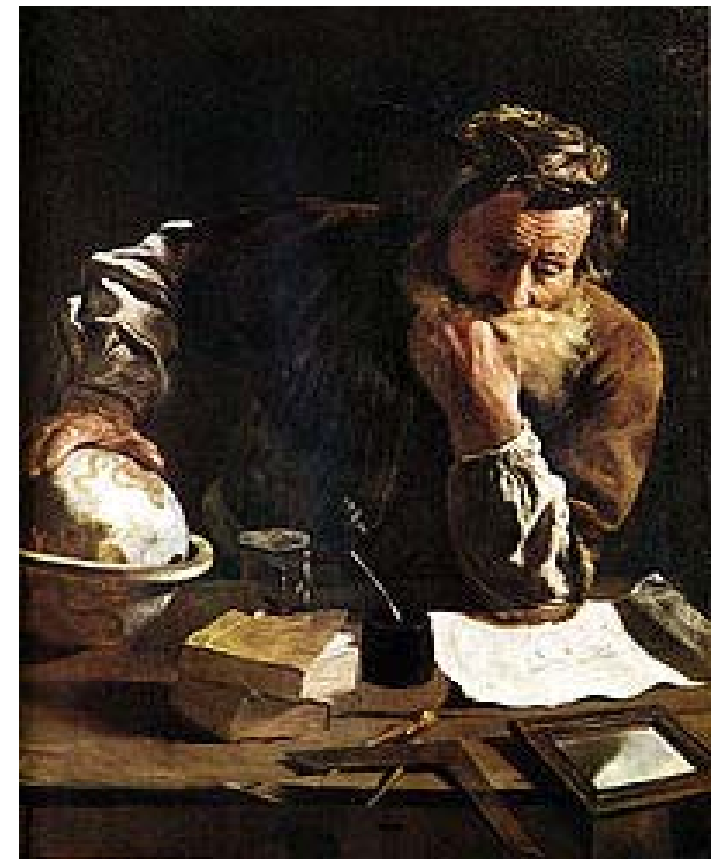
Световоды используются при создании *телеграфно-телефонных кабелей большой емкости*. Кабель состоит из сотен и тысяч оптических волокон, тонких, как человеческий волос. По такому кабелю, толщиной в обычный карандаш, можно одновременно передавать до восьмидесяти тысяч телефонных разговоров.

Световоды используются также в электронно-лучевых трубках, в электронно-счетных машинах, для кодирования информации, в медицине (например, диагностика желудка), для целей интегральной оптики

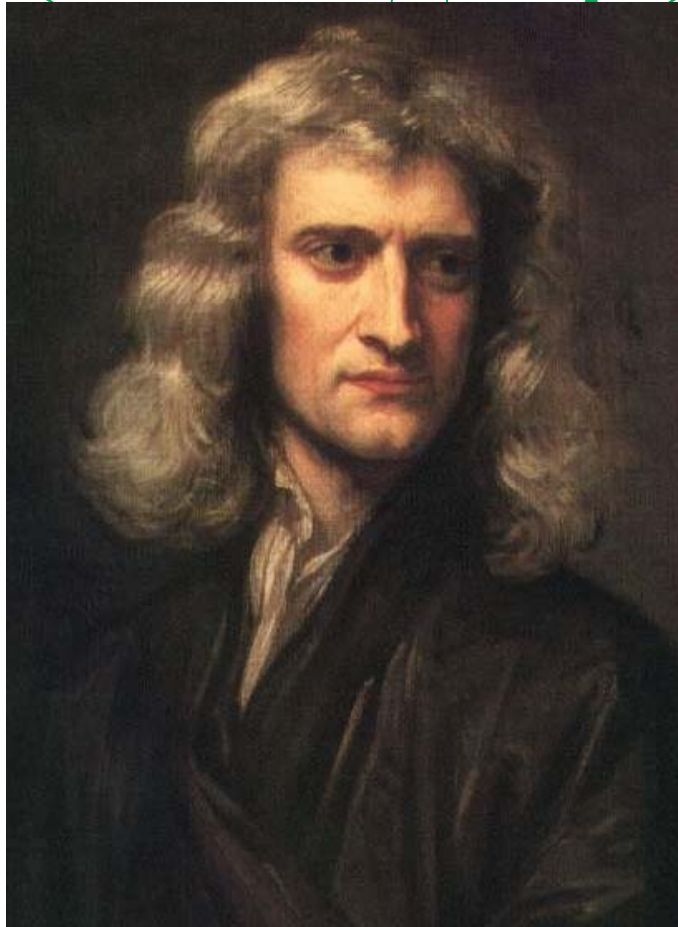
## Развитие взглядов на природу света

**Основные законы геометрической оптики** известны ещё с древних времен. Но ни Платон ни Евклид ни Аристотель и Птолемей не смогли дать точных формулировок этих законов.

Архимед (Ἀρχιμήδης; 287 до н. э. — 212 до н. э.) — древнегреческий математик, физик, механик и инженер из Сиракуз. Сделал множество открытий в геометрии. Заложил основы механики, гидростатики, автор ряда важных изобретений



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)*.





# ТЕОРИЯ СВЕТА

***Корпускулярная***

Ньютон – Декарт

***Волновая***

Гук – Гюйгенс

***Свет*** представляет собой сложное явление. В одних случаях он ведет как ***электромагнитная волна***, в других как ***поток частиц (фотонов)***



# Исаак Ньютон

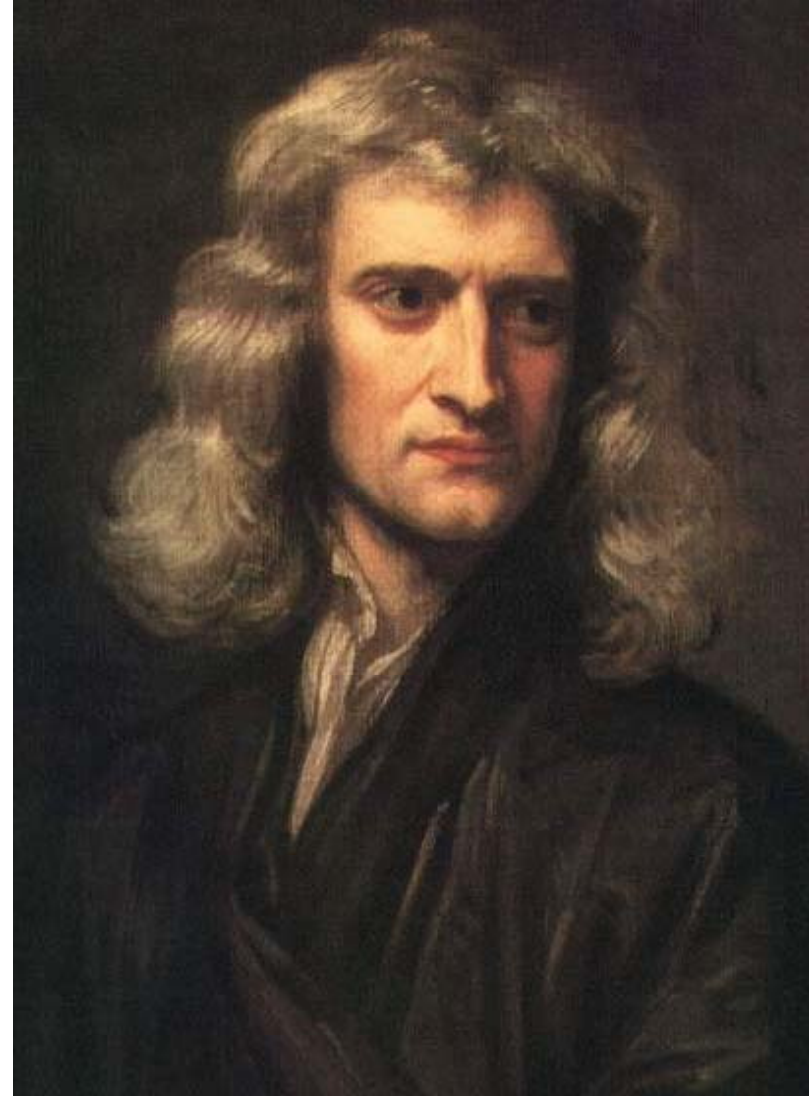
(Isaac Newton)

*4 января 1643*  
Родился *Вулсторп (Woolsthorpe)*  
*Англия*  
*31 марта 1727*  
Умер *Лондон (London)*  
*Англия*

**физик, математик, астроном,  
алхимик и философ**

***Важнейшие работы***

**закон всемирного тяготения  
дифференциальное и  
интегральное исчисления  
изобрел зеркальный телескоп  
развил корпускулярную теорию света**



Из представлений корпускулярной теории **НЬЮТОН**  
**вывел законы отражения и преломления:**

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

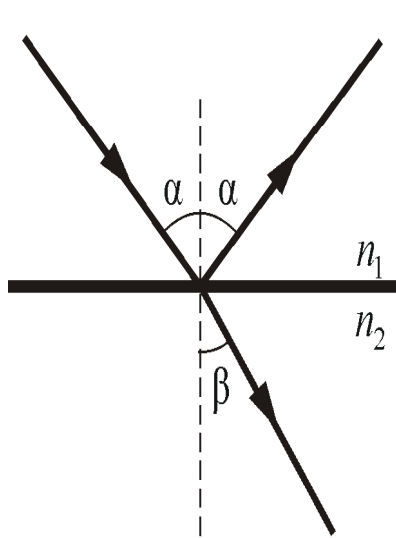


Рисунок 7.1

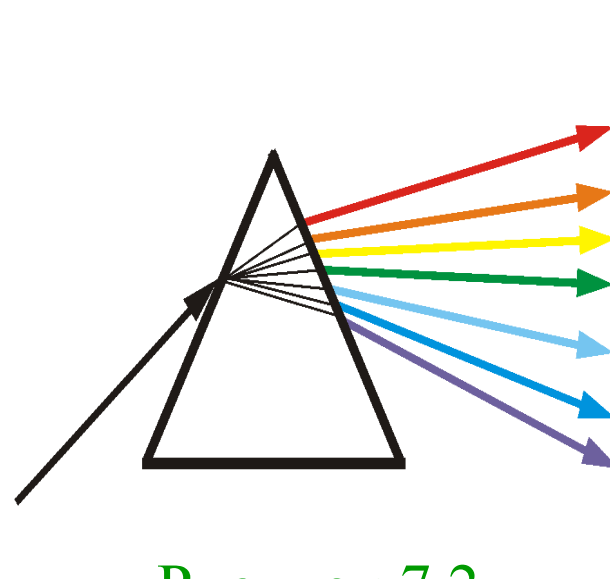


Рисунок 7.2

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

**Христиан Гюйгенс**  
*Christiaan Huygens*  
14.04.1629 – 08.08.1695

*нидерландский механик, физик и  
математик*  
Гаага, Нидерланды (*Hague,  
Netherlands*)



**Огюстен Жан Френель**  
**Augustin Jean Fresnel**  
**10.05.1788 – 14.07.1827**

**французский физик**  
**Броли, Франция (Broglie, France)**  
**Ville-d'Avray, France**





**Фраунгофер Йозеф** (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 создание

ахроматических линз. Фраунгофер изучал дифракцию в параллельных лучах (так называемая дифракция Фраунгофера) сначала от одной щели, а потом от многих. Большой заслугой учёного является использование(с 1821 года) дифракционных решеток для исследования спектров (некоторые исследователи считают его даже изобретателем первой дифракционной решетки).



*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 и Ж. Фуко экспериментально измерили скорость света, а французский астроном У. Леверье теоретически, "на кончике пера", открыл планету Нептун. Араго с 1829 года член Петербургской академии наук.



***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, гидромеханике, теории колебаний, теории света. Член Петербургской академии наук (с 1826 года).



*Максвелл Джеймс Клерк* (13.VI.1831 - 5.XI.1879) - английский физик, член Эдинбургского королевского общества (с 1855 года) и Лондонского королевского общества (с 1861 года). Под руководством Максвелла создана известная Кавендишская лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены электродинамике, молекулярной физике, общей статистике, оптике, механике, теории упругости. Самым большим достижением Максвелла является созданная им в 1860-1865 годах теория электромагнитного поля, которую он сформулировал в виде системы нескольких уравнений, выражающих все основные закономерности электромагнитных явлений.



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;

**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 исследовал электромагнитное поле и подтвердил, что *электромагнитные волны распространяются со скоростью света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с*

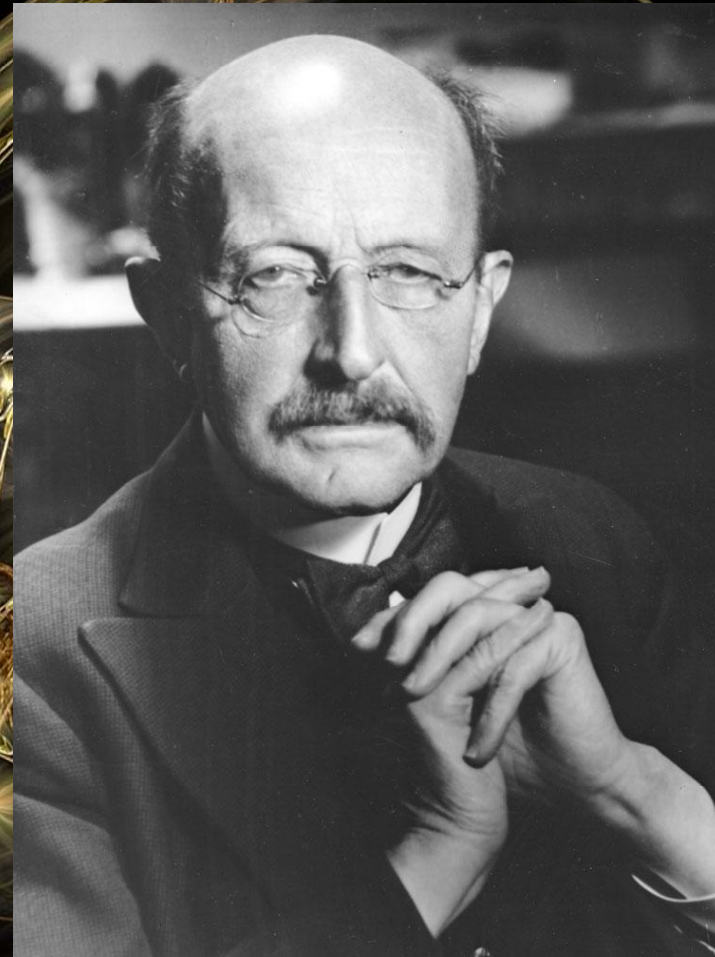
*1899 г. П.Н. Лебедев измерил давление света.*

*1900 г. Макс Планк* показал, что излучение абсолютно черного тела можно объяснить, если предложить, 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 Мюнхенском 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.

Макс Карл Эрнст Людвиг  
Планк(23 апреля 1858 – 4  
октября 1947) –  
выдающийся немецкий  
физик. Как основатель  
квантовой теории  
предопределил основное  
направление развития  
физики с начала XX века.



Планка постоянная  $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с.

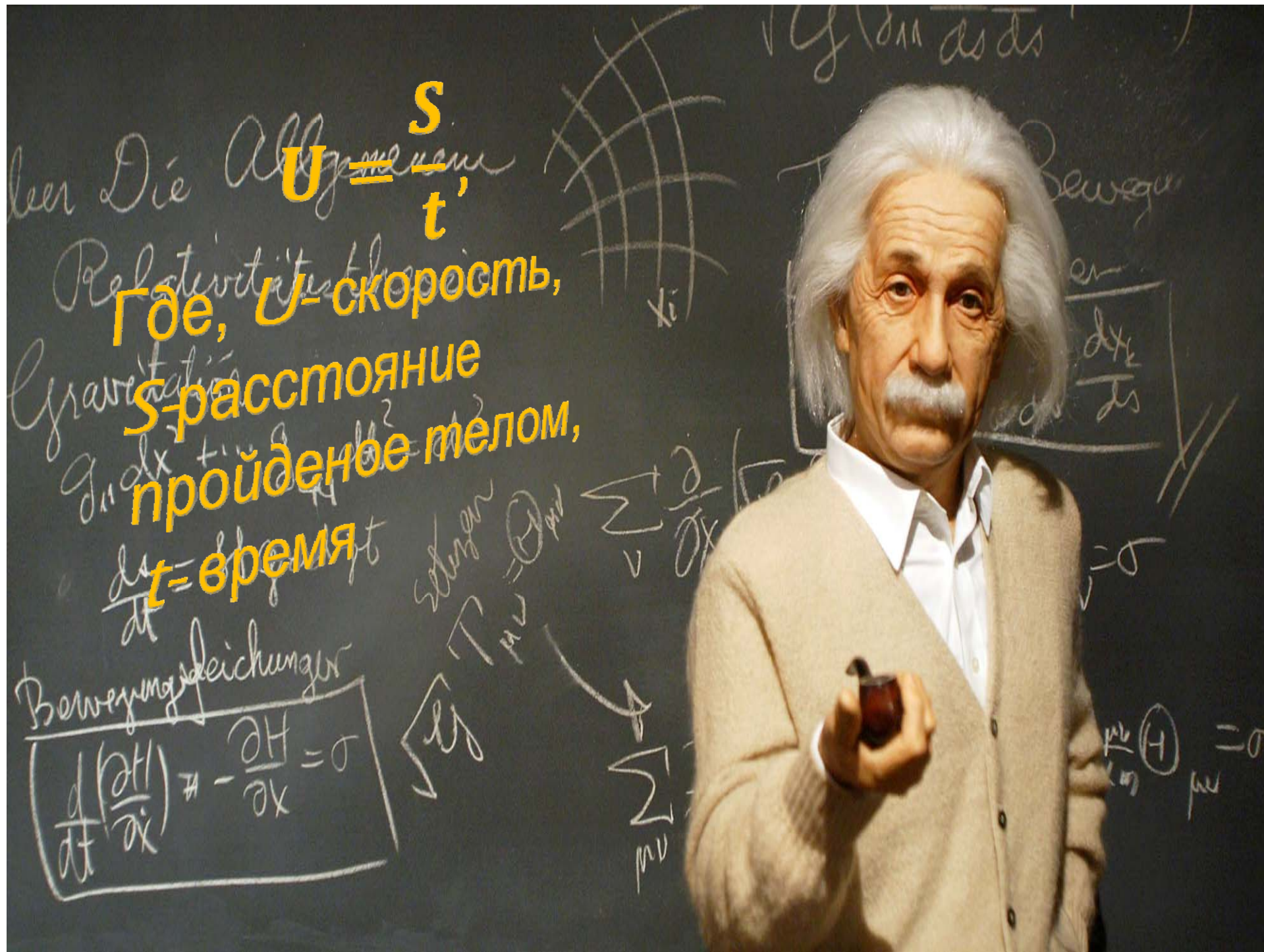
В 1905 г. Альберт Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта на основе представления о световых частицах – «квантах» света, «фотонах», масса которых

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

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.*





$$U = \frac{S}{t}$$

Где,  $U$  - скорость,  
 $S$  - расстояние  
пройденное телом,  
 $t$  - время

Возвращаясь к уравнению

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{h}{c} \frac{dx}{dt} \right) - \frac{h}{c} \frac{d^2x}{dt^2} = 0$$

## Корпускулярно – волновой дуализм

Волновая оптика позволяет объяснить все эмпирические законы геометрической оптики и установить границы ее применимости.

Хорошо описывая распространение света в материальных средах, волновая оптика *не смогла* удовлетворительно объяснить процессы его испускания и поглощения.



Исследование этих процессов привели к выводу, что элементарная система (атом, молекула) может испускать или поглощать энергию электромагнитного поля лишь дискретными порциями (квантами), пропорциональными частоте излучения  $\nu$ .

Поэтому *световому электромагнитному полю сопоставляется поток квантов света – фотонов*, распространяющихся в вакууме со скоростью света.

*Двойственность природы света* – наличие у него одновременно характерных черт, присущих и волнам, и частицам, – является проявлением *корпускулярно-волнового дуализма*.

Эта концепция была впервые сформулирована именно для оптического излучения; она утвердилась как универсальная для всех частиц микромира после обнаружения волновых свойств у материальных частиц (дифракция частиц).

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

# Основные характеристики световых волн

В данном разделе будем  
*рассматривать свет как  
электромагнитные волны.*

## Световые волны:

**Плоская волна:**

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

**Сферическая волна:**

$$E = \frac{E_0}{r} \cos(\omega t - kr + \varphi)$$

$\vec{E}$  - вектор напряженности электрического поля;

$E_0$  - амплитуда;

$r$  - расстояние до источника ;

$k$  - волновое число;

$\varphi$  - начальная фаза.

**Световой вектор** - вектор напряженности электрического поля.

Его колебаниями обусловлено физиологическое, фотохимическое и т.д. действие света.

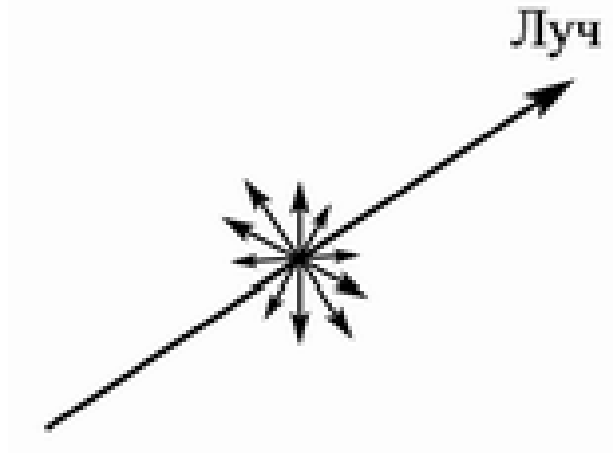
**Интенсивность света** – модуль среднего по времени значения плотности потока энергии, переносимой световой волной:

$$I = \left| \langle \vec{P} \rangle \right| = \left| \langle [\vec{E}, \vec{H}] \rangle \right| \quad \vec{P} \text{ – вектор Пойнтинга}$$

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n E_0^2 \sim n E_0^2$$

В случае однородной среды ( $n = \text{const}$ ) интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды световой волны

**В естественном свете** колебания светового вектора совершаются во всех направлениях, перпендикулярных к лучу.



**Излучение тела обусловлено волнами, испускаемыми его атомами или молекулами:**

**длительность излучения атома/молекулы**  $\sim 10^{-8}$  с, за это время образуется **цуг волн** (набор горбов и впадин) **длиной**  $\sim 3\text{м}$ .

Плоскость колебаний каждого цуга ориентирована случайным образом.

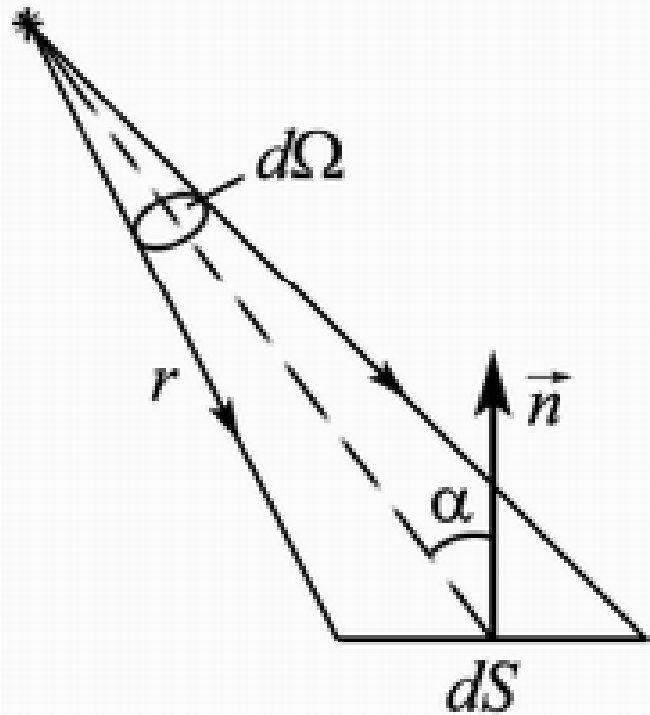
**В результирующей волне** (суперпозиции цугов от разных атомов) **все направления равновероятны.**

## Световые, или фотометрические величины

Энергия, переносимая световыми лучами в единицу времени, называется **поток энергии  $\Phi$**  (световым или лучистым потоком), проходящим через площадку  $dS$  в телесный угол  $d\Omega$ .

Если нормаль к площадке  $dS$  образует с направлением излучения угол  $\alpha$ , то необходимо рассматривать ее проекцию – видимую величину площадки:

$$dS_{\perp} = dS \cos \alpha$$





*Силой света источника  $I$  в заданном направлении называется световой поток, посылаемый им в этом направлении и отнесенный к единице телесного угла.*

Единицы измерения:  $[I] = \text{кд (кандела)}$

*Световой поток* для точечного источника

$$\Phi = \int I \cdot d\Omega$$

**1 люмен** – это **световой поток**, посылаемый источником с силой света в 1 канделу внутрь телесного угла в 1 стерадиан:

$$1 \text{ лм} = 1 \text{ кд} \cdot 1 \text{ ср}$$

**Освещенностью  $E$  некоторой поверхности называется световой поток, падающий на единицу площади освещаемой поверхности:**

$$E = \frac{d\Phi}{dS}$$

$$[E] = \text{лк (люкс)}: 1 \text{ лк} = \frac{1 \text{ лм}}{1 \text{ м}^2}$$

Для точечного источника

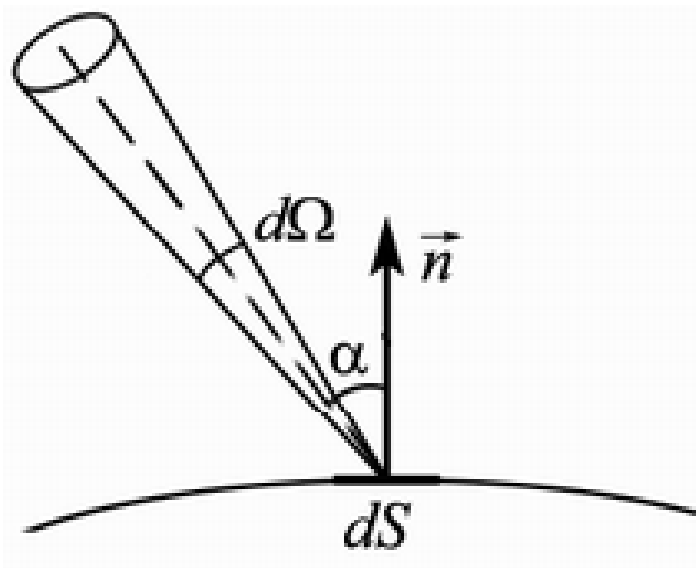
$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$

**- закон обратных квадратов:**

- освещенность, создаваемая точечным источником, обратно пропорциональна квадрату расстояния до него и прямо пропорциональна косинусу угла между направлением падающих лучей и нормалью к освещаемой поверхности.

Для протяженных источников вводятся следующие понятия:

- **Яркостью  $L$**  называется световой поток, исходящий из площадки  $dS$  в заданном направлении, отнесенный к единице телесного угла и к единице ее **видимой величины**:



$$L_{\alpha} = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot dS \cdot \cos \alpha} = \frac{dI}{dS \cdot \cos \alpha}$$

где

$$dI = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

- сила света площадки  $dS$  в том же направлении

Источники, яркость которых одинакова по всем направлениям, называются **ламбертовскими (косинусными)**:

$$dI \sim \cos \alpha$$

- **Светимостью  $M$**  называется полный световой поток, посылаемый единицей светящейся поверхности в одну сторону (в телесный угол  $\Omega = 2\pi$ ):

Световой поток с единицы поверхности в телесный угол  $d\Omega$  равен

$$d\Phi = L_\alpha \cos \alpha \cdot d\Omega$$

Тогда

$$M = \int L_\alpha \cos \alpha \cdot d\Omega = 2\pi \int_0^{\pi/2} L_\alpha \cos \alpha \sin \alpha \cdot d\alpha$$

Для ламбертовских источников ( $L = \text{const}$ ):

$$M = \pi L$$

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ

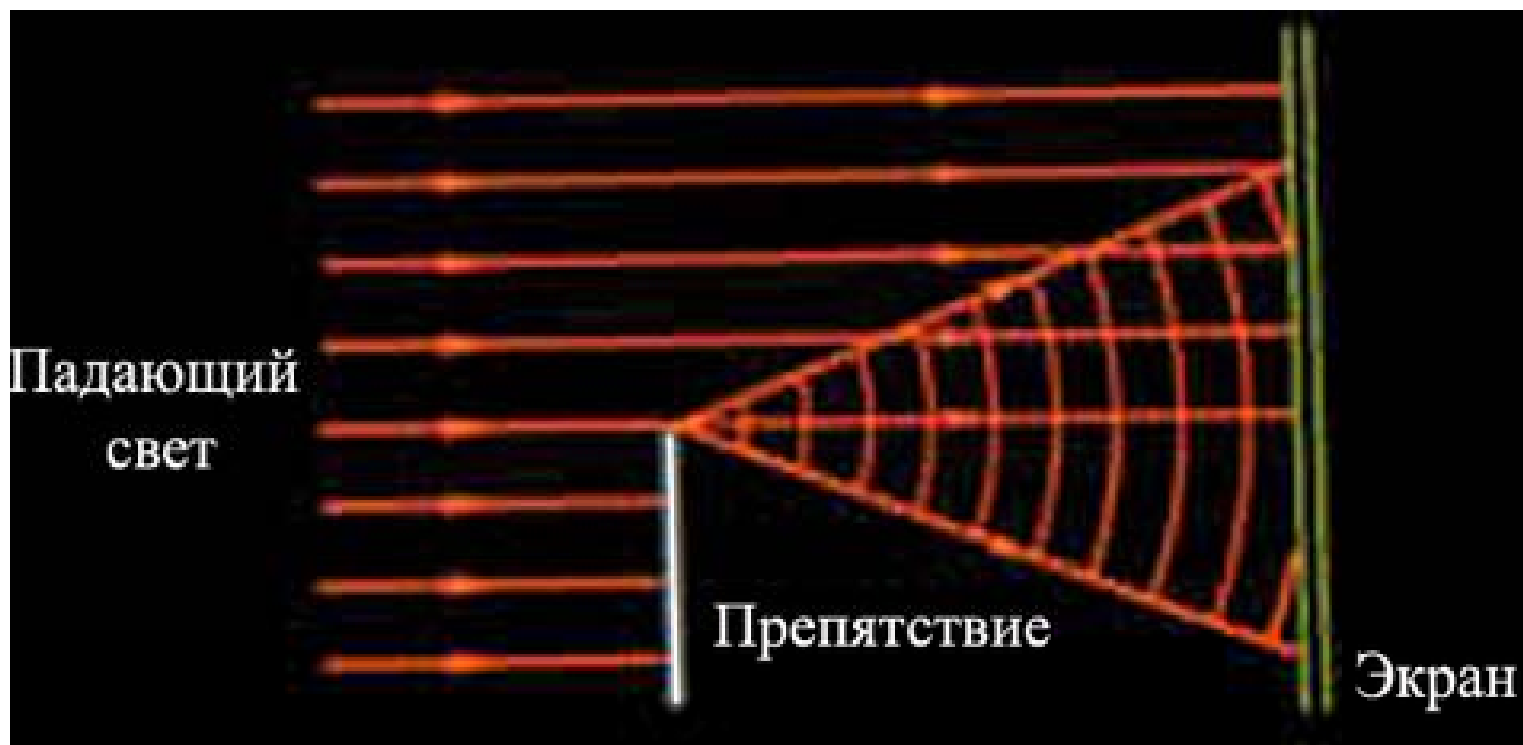
# ***1. закон прямолинейного распространения света***



Если размеры препятствия много больше длины волны, то волны за него не проникают, создается область тени

# Принцип Гюйгенса

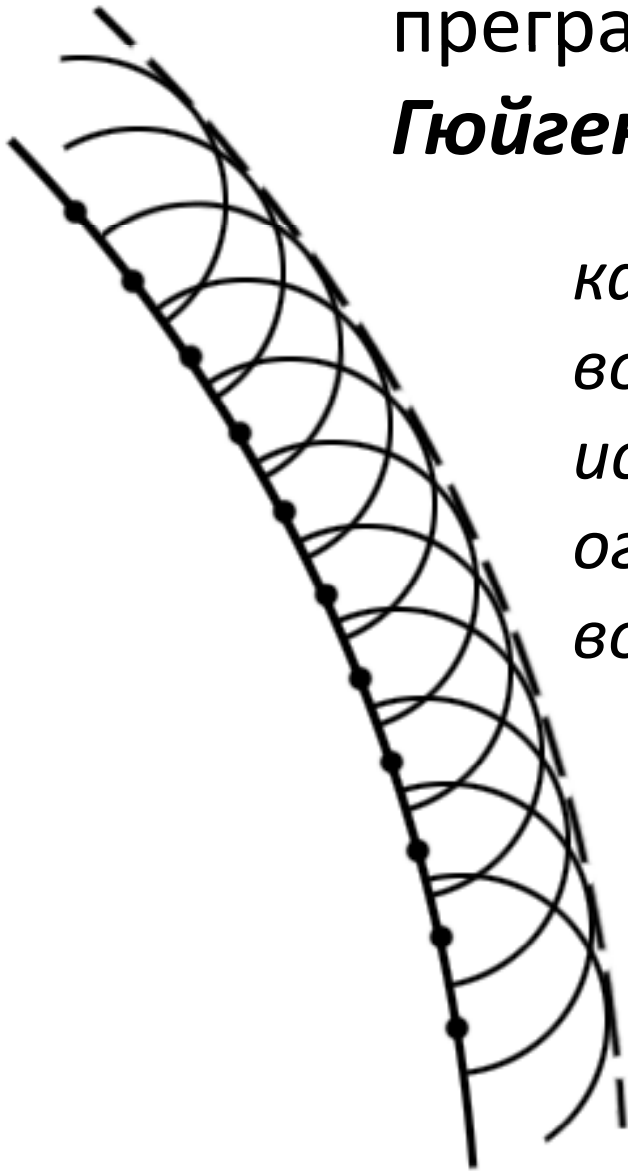
- Приближения геометрической оптики неправомерны при описании процессов, происходящих при падении световой волны на преграду с отверстиями:
- В приближении геометрической оптики свет за преградой не проникает в область геометрической тени
- В действительности свет проникает в область геометрической тени, причем проникновение тем больше, чем меньше размеры отверстий. Если эти размеры сравнимы с длиной волны, законы геометрической оптики совершенно неправомерны.



Огибание электромагнитными волнами препятствий и проникновение их в область геометрической тени наиболее отчетливо обнаруживается в тех случаях, **когда размер огибаемых препятствий соизмерим с длиной волны**



Объяснение поведению света за преградой с отверстием дает **принцип Гюйгенса**:



*каждая точка, до которой доходит волновое движение, служит источником вторичных волн; их огибающая дает положение фронта волны в следующий момент.*

**Вторичными волнами** называются волны, идущие от точек волновых поверхностей как от изотропных точечных источников.

*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.*



# Интерференция

**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.).

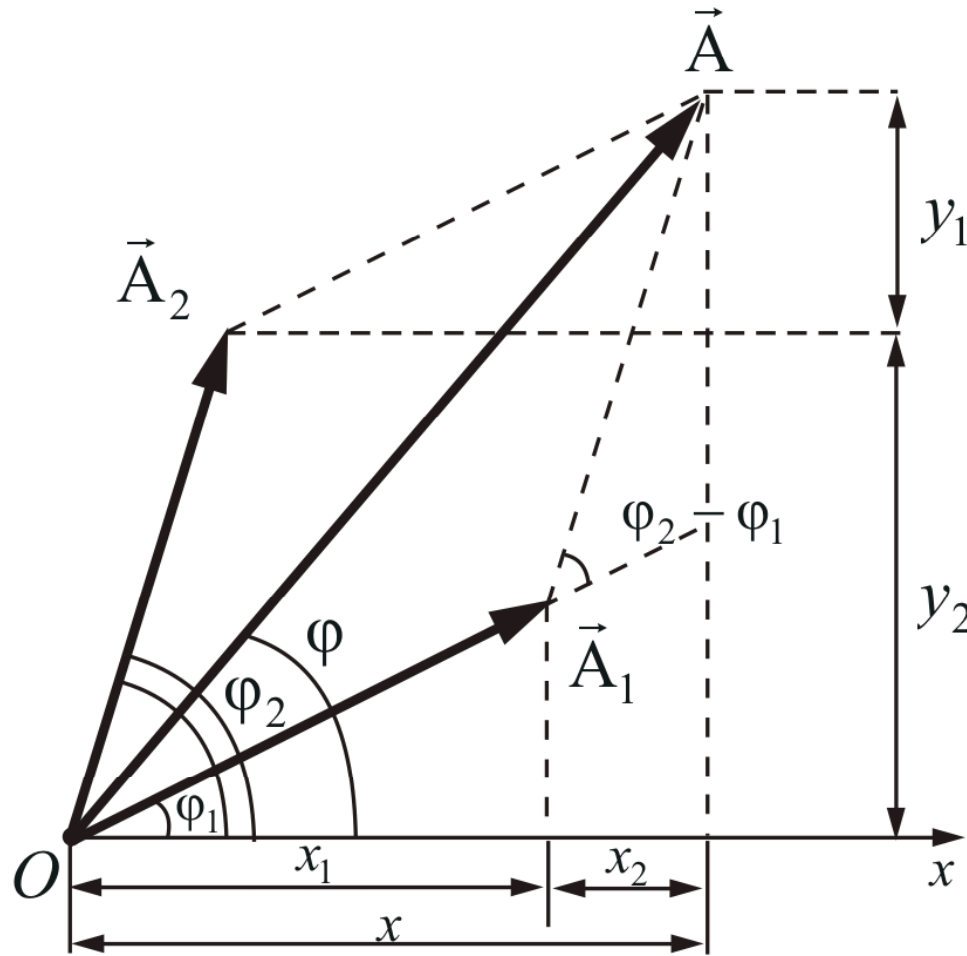
Интерференцией света объясняются окраска тонких масляных пленок на поверхности воды, металлический отлив в окраске крыльев насекомых и птиц, появление цветов побежалости на поверхности металлов, голубоватый цвет просветленных линз оптических приборов и пр.

# Интерференция

Рассмотрим две волны одинаковой частоты, накладывающиеся друг на друга и возбуждающие в некоторой точке пространства колебания одинакового направления:

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

## Интерференция световых волн



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

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

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_2 - \phi_1)$$

- амплитуда результирующего колебания

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_2 - \phi_1)$$

*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 (вследствие чего ее среднее значение по времени равно нулю).*

**Результирующая интенсивность некогерентных волн всюду одинакова и равна сумме интенсивностей, создаваемых каждой из волн в отдельности:**

$$I = I_1 + I_2$$

## Интерференция световых волн

При суперпозиции *когерентных волн* происходит *перераспределение интенсивности* в пространстве: в одних местах возникают *максимумы* ( $\cos\delta > 1$ ), в других — *минимумы* интенсивности ( $\cos\delta < 1$ ).

Это явление называется *интерференцией волн*.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

- В случае, если интенсивность обоих источников одинакова:

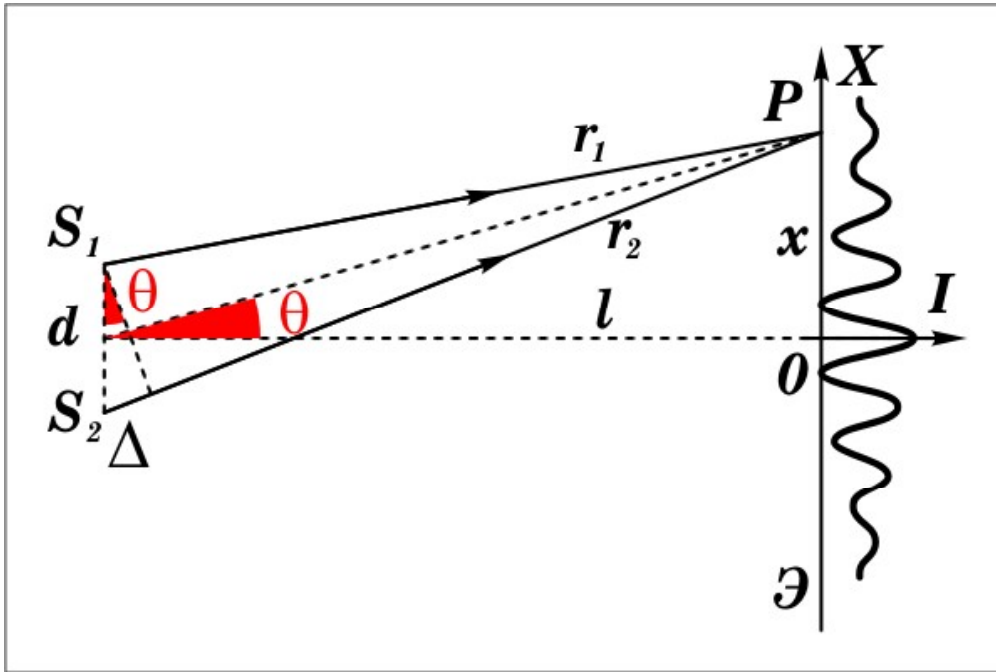
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta$$

в максимумах  $I = 4I_1$

в минимумах  $I = 0$

- **Естественные источники света некогерентны**, поскольку излучение светящегося тела складывается из цугов волн, испускаемыми многими атомами (причем фаза нового цуга не связана с фазой предыдущего цуга).
- **Когерентные волны можно получить разделением волны, излучаемой одним источником, на 2 части** если полученные волны заставить пройти разные оптические пути (их разность должна быть **небольшой**, т.к. складывающиеся колебания должны принадлежать **одному цугу волн**) и далее наложить их друг на друга, - образуется интерференционная картина.





$$\Delta = r_2 - r_1$$

**Условие максимумов**

$$\Delta_{\text{max.}} = m\lambda$$

$$\delta = 2\pi m$$

**Условие минимумов**

$$\Delta_{\text{min}} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$\delta = 2\pi m + \pi$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

**Условие максимума и минимума интерференции:**

- Если оптическая разность хода  $\Delta$  равна целому числу длин волн

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

- условие интерференционного максимума.

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

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

- условие интерференционного минимума.

*Расстояние между соседними максимумами интенсивности называется **расстоянием между интерференционными полосами***

*Расстояние между соседними минимумами интенсивности называется **шириной интерференционной полосы***

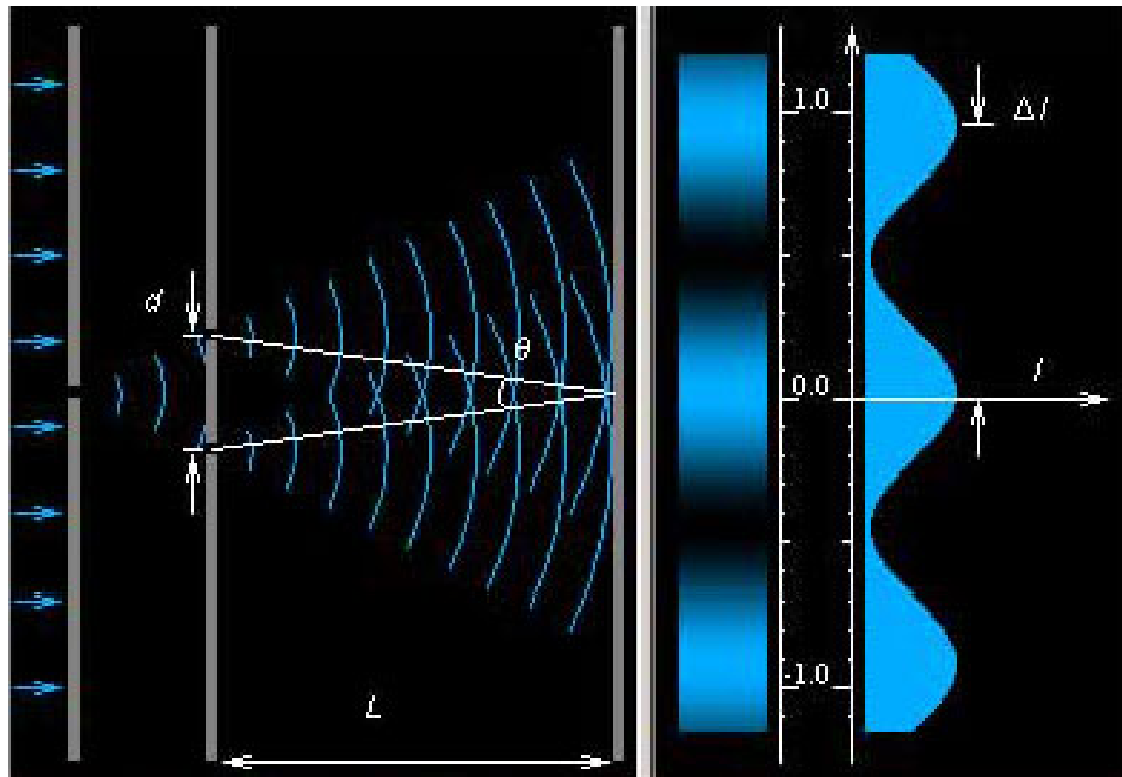
Одной из важных характеристик наблюдаемой интерференционной картины является **видность**  $V$ , которая характеризует контраст интерференционных полос:

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

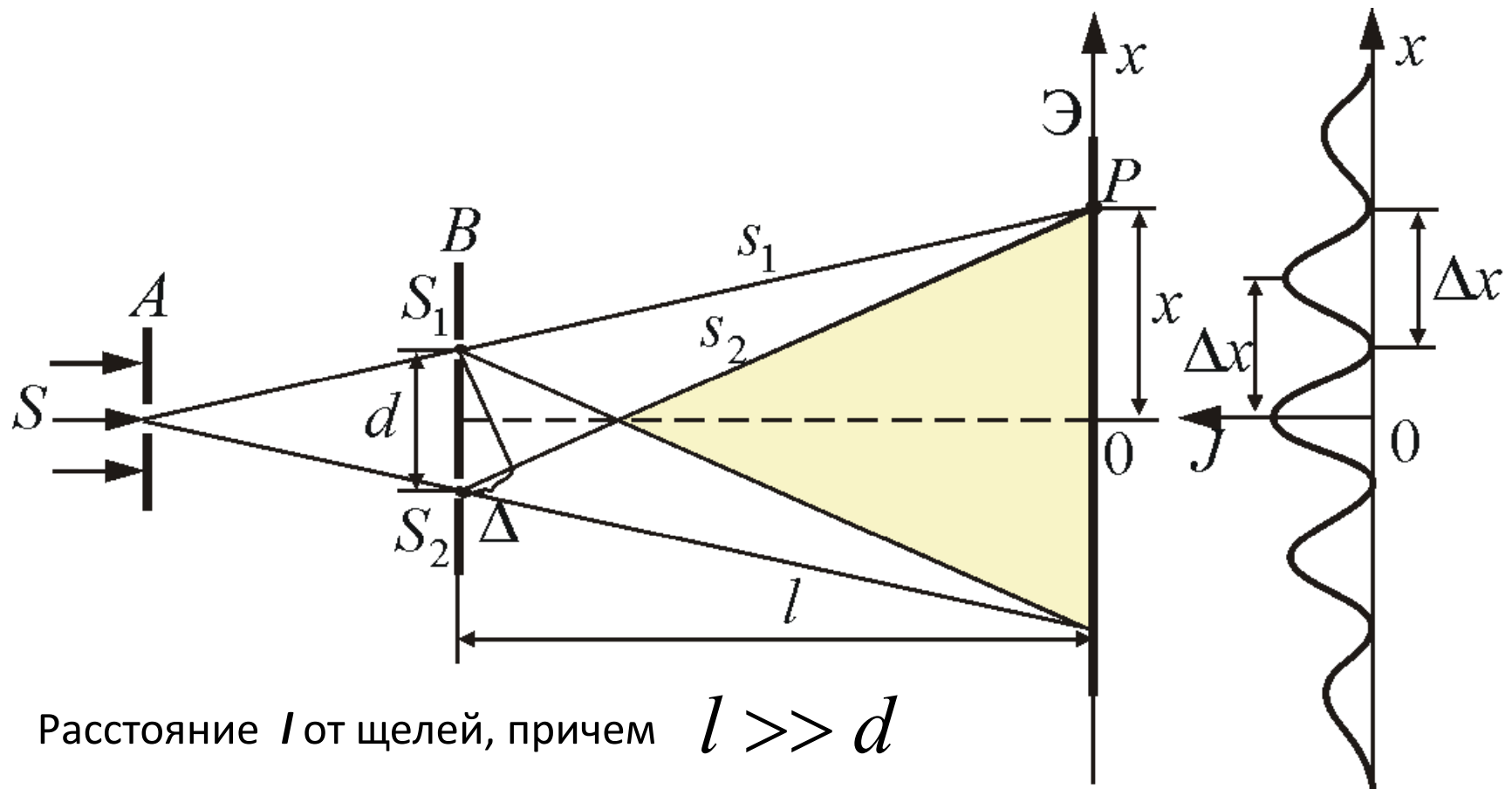
где  $I_{\max.}$  и  $I_{\min.}$  – соответственно максимальное и минимальное значения интенсивности в интерференционной картине.

# **МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ**

# 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.



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

**Главный максимум**, соответствующий  $m = 0$  проходит через точку  $O$ .

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

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

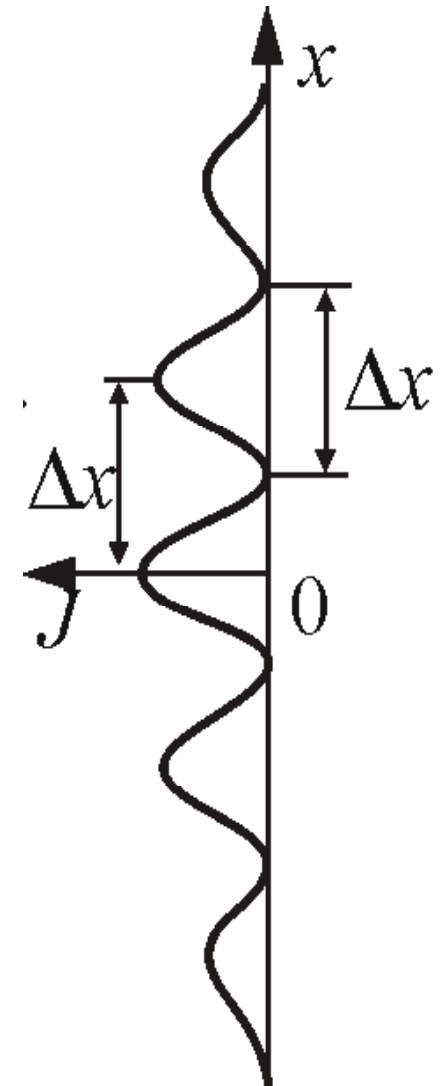
а **минимумы – в координатах:**

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

Расстояние между двумя соседними  
максимумами (или минимумами) равно

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

**- ширина интерференционной полосы.**

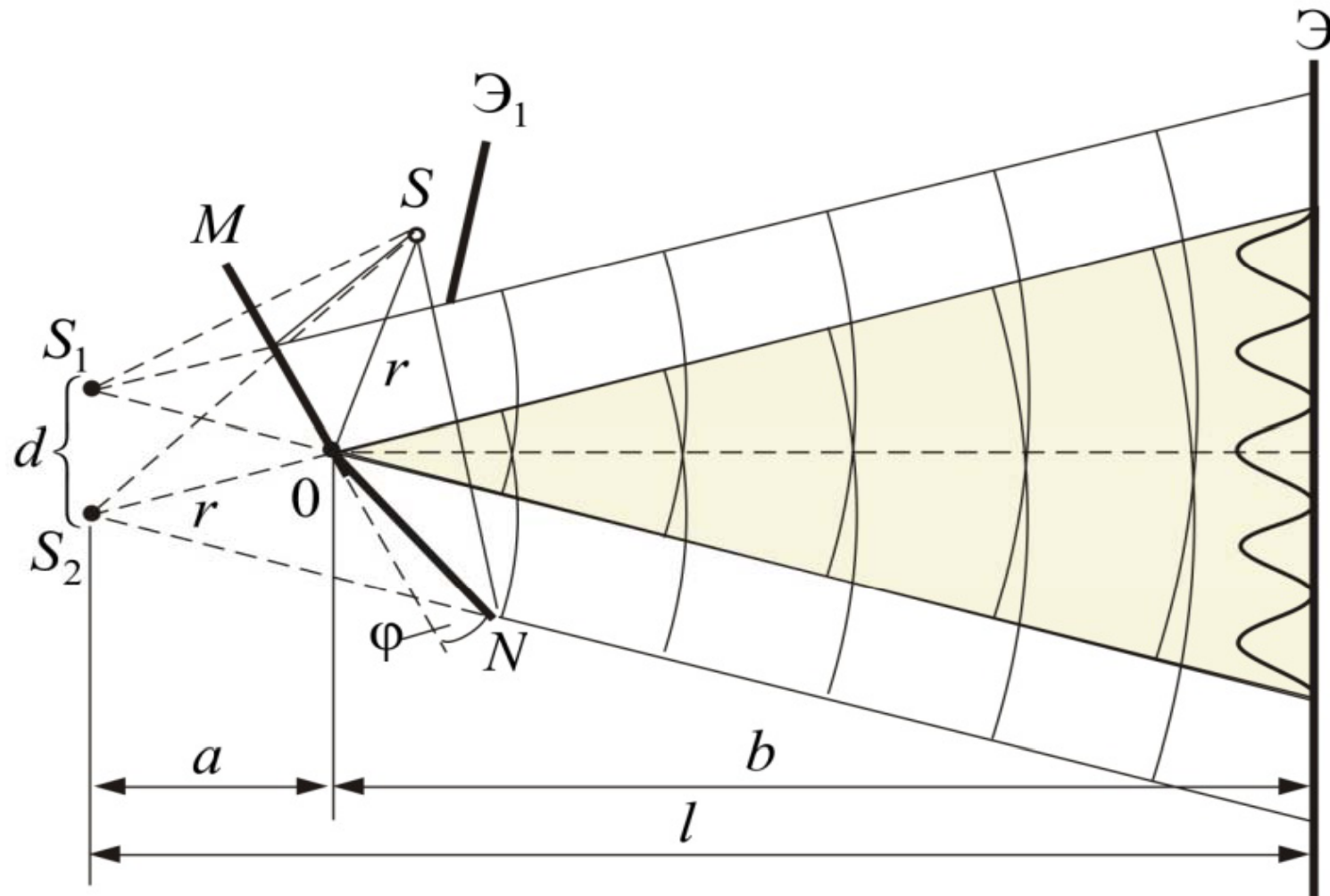




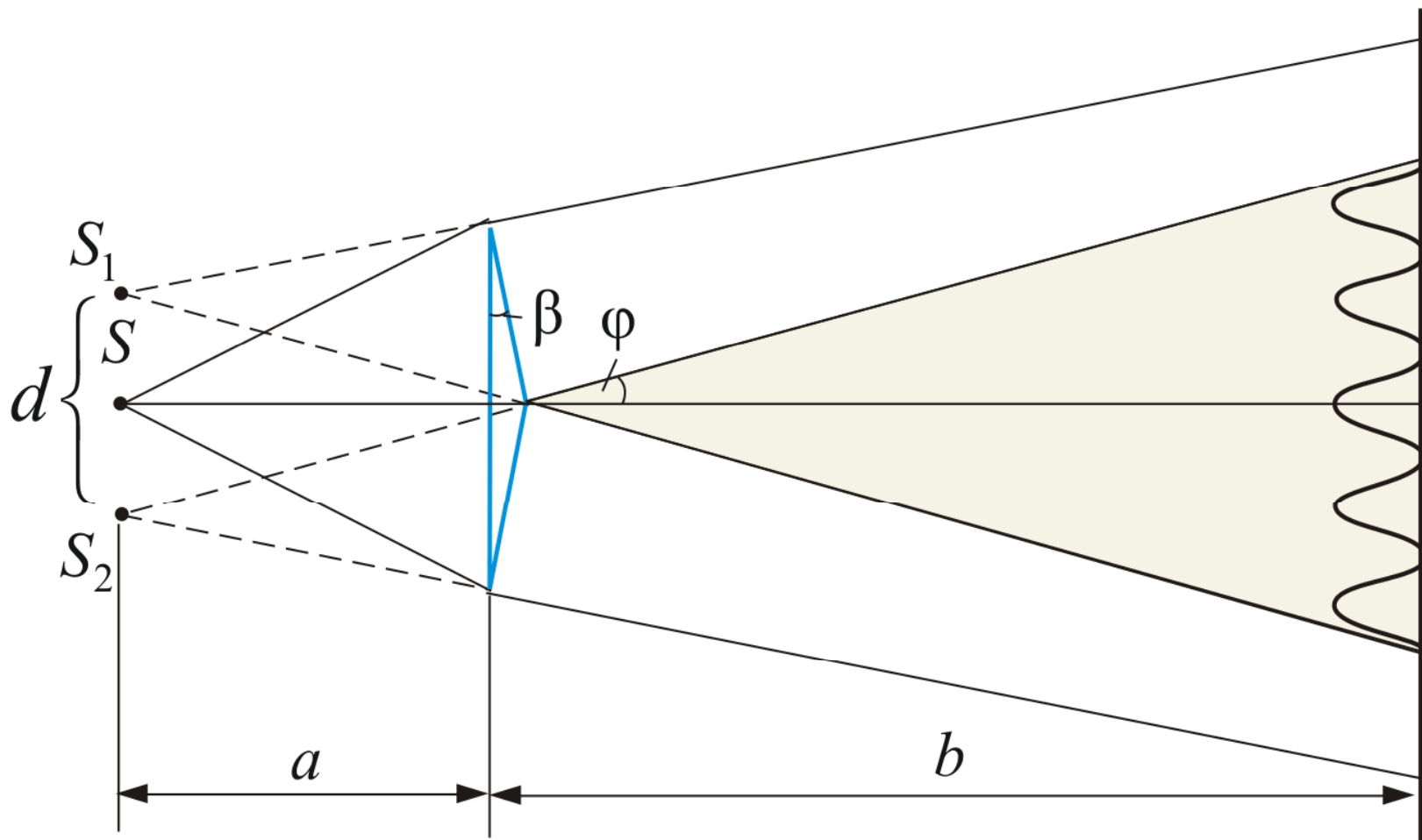
Необходимым **условием** интерференции волн является **их когерентность**, т.е. согласованное протекание **во времени и пространстве** нескольких колебательных или волновых процессов.

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

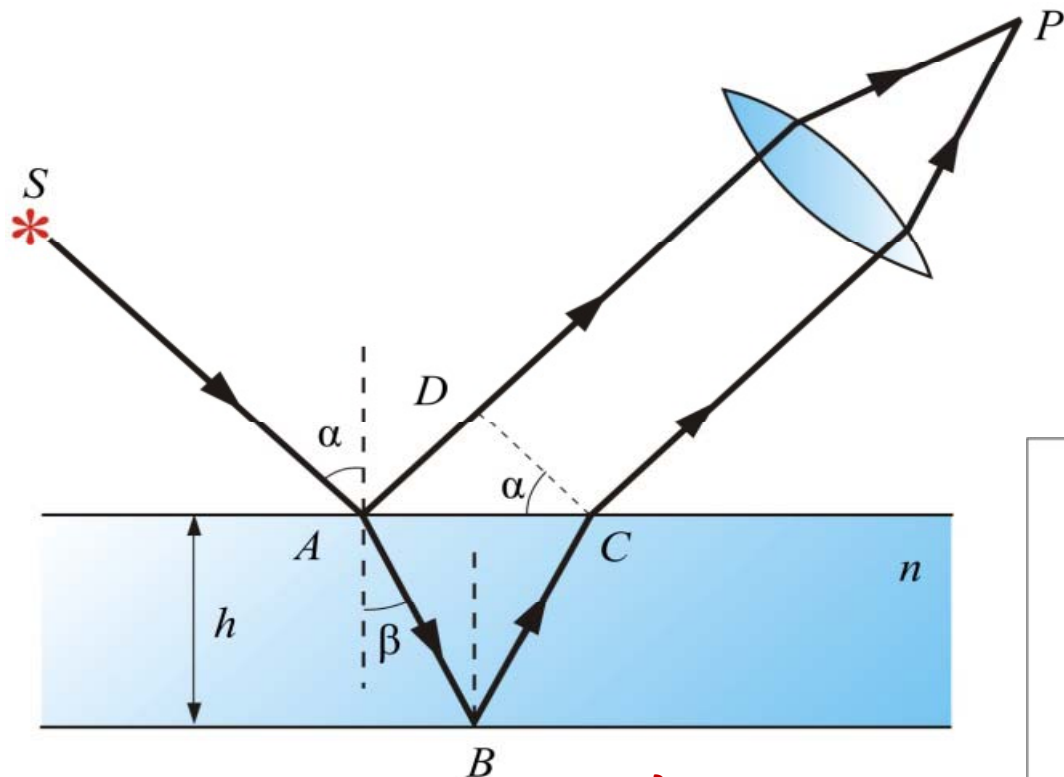
# Зеркало Френеля



# Бипризма Френеля

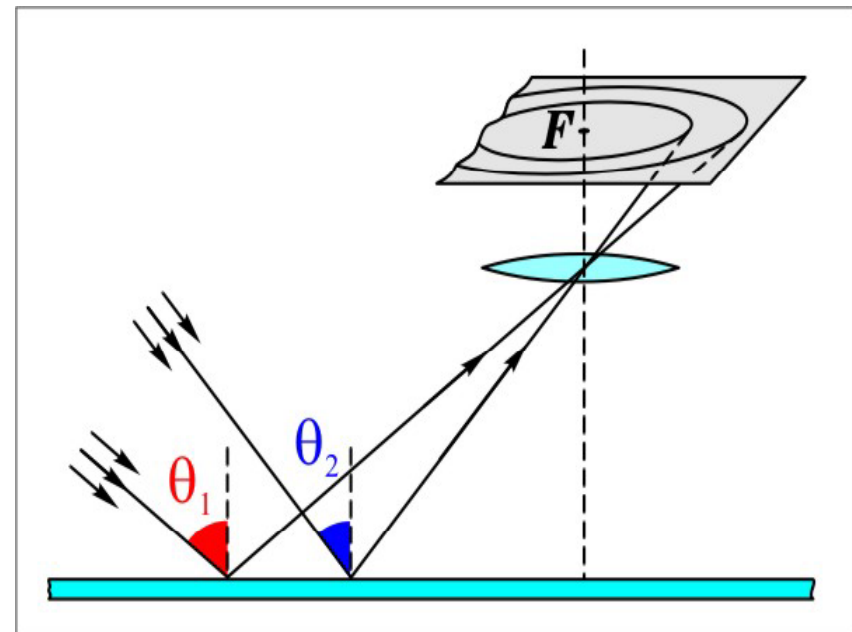


# Полосы равного наклона

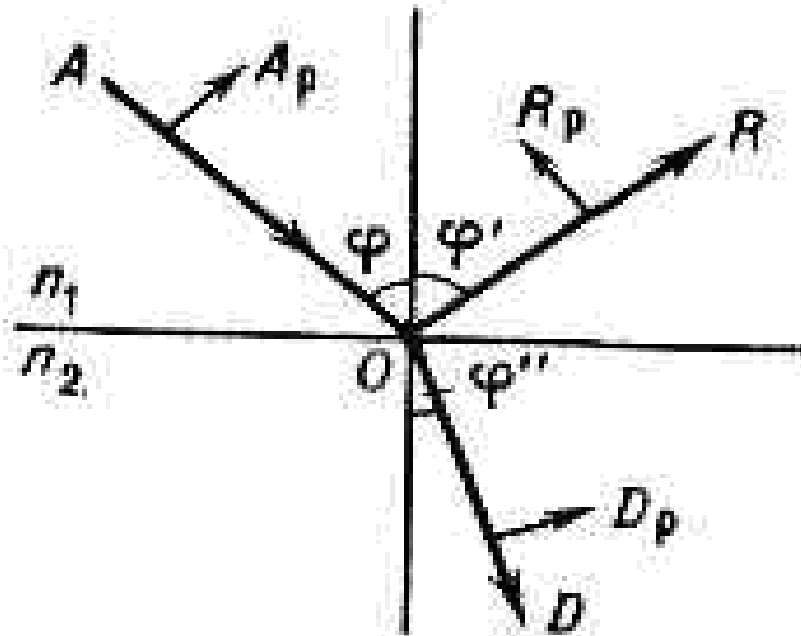


- $n$  - показатель преломления среды,
- $h$  - толщина пластины,
- $\alpha$  - угол падения света,
- $\lambda$  - длина волны

$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \lambda/2$$



# ФОРМУЛЫ ФРЕНЕЛЯ

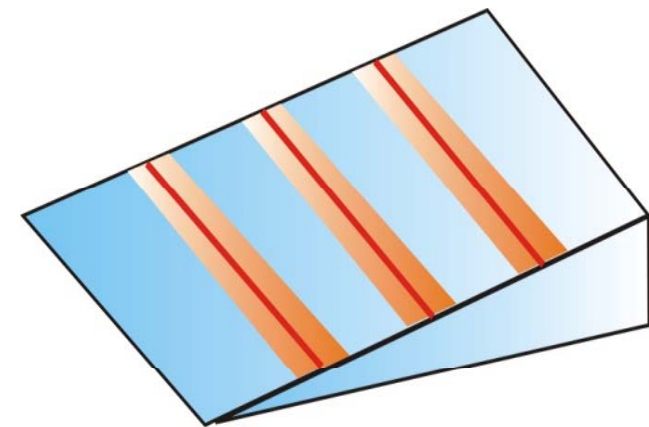
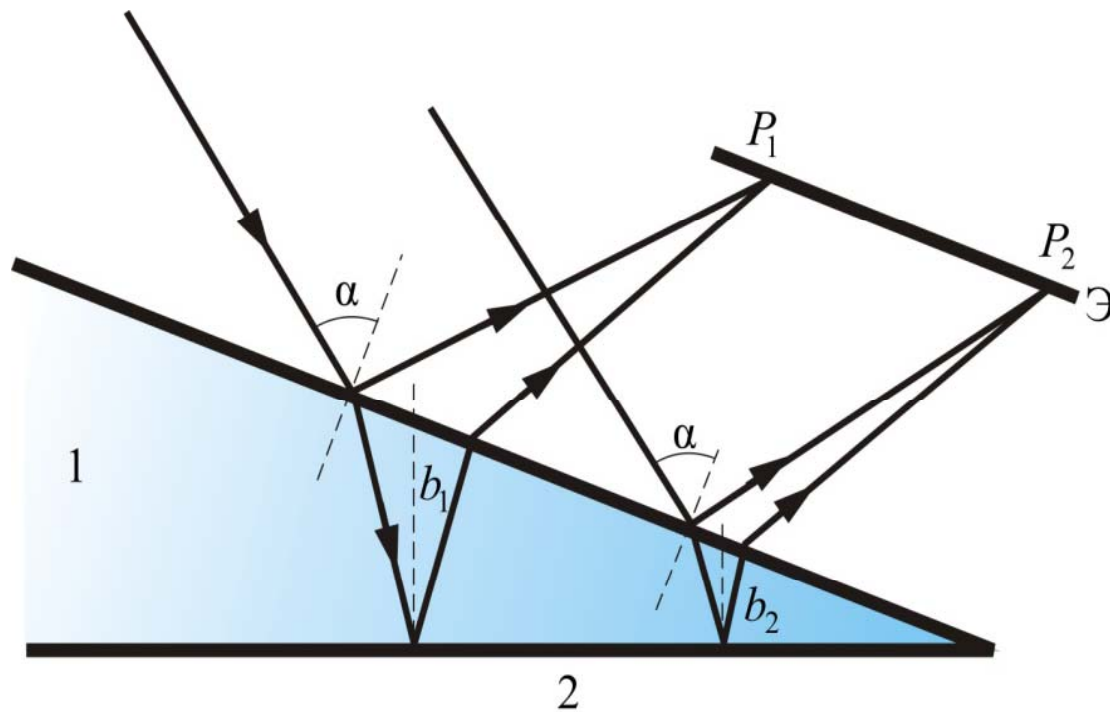


$$R_s = -\frac{\sin(\varphi - \varphi'')}{\sin(\varphi + \varphi'')} A_s; \quad R_p = \frac{\operatorname{tg}(\varphi - \varphi'')}{\operatorname{tg}(\varphi + \varphi'')} A_p;$$

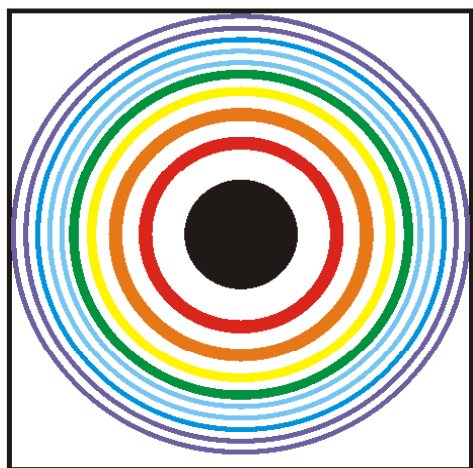
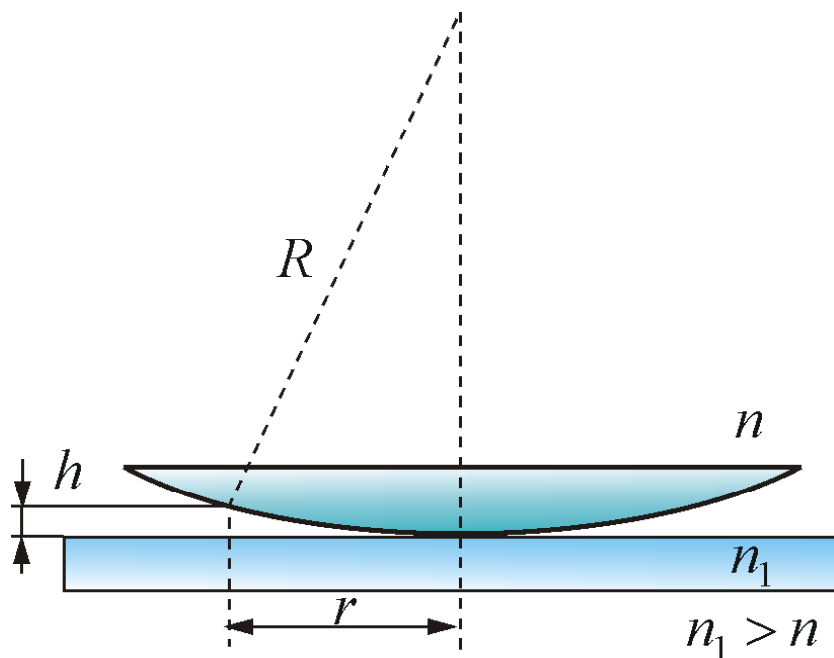
$$D_s = \frac{2 \sin \varphi'' \cos \varphi}{\sin(\varphi + \varphi'')} A_s; \quad (1)$$

$$D_p = \frac{2 \sin \varphi'' \cos \varphi}{\sin(\varphi + \varphi'') \cos(\varphi - \varphi'')} A_p.$$

# Интерференция от клина. Полосы равной толщины



# Кольца Ньютона – пример полос равной толщины



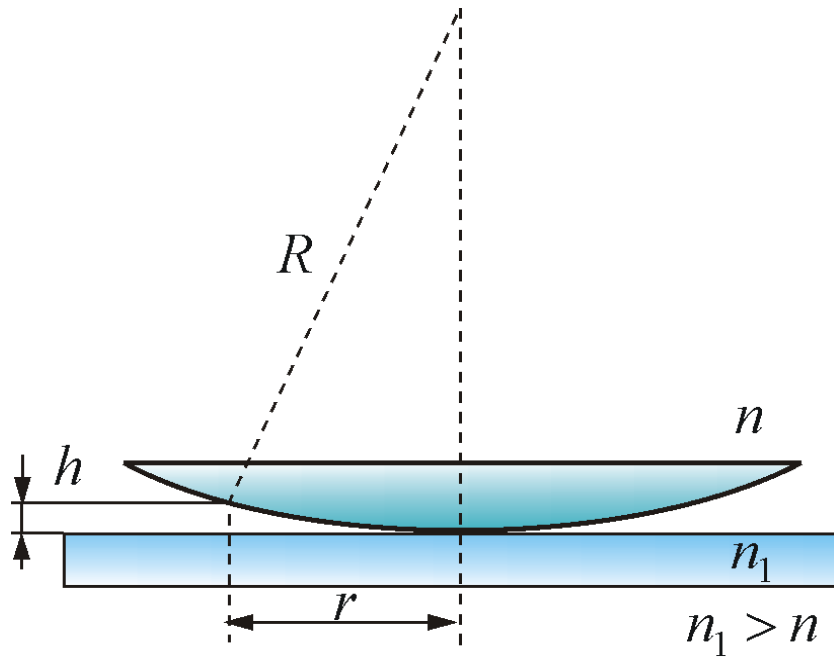
На плоской стеклянной поверхности лежит **плоско-выпуклая стеклянная линза** небольшой кривизны (обычно берут линзу с фокусным расстоянием порядка метра). Система **освещается параллельным пучком естественного или монохроматического света** сверху, со стороны линзы.

$$\Delta = 2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \lambda/2$$

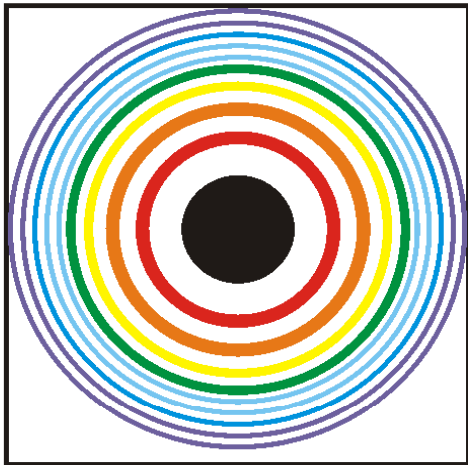
$$n = 1; \alpha = 0 \quad \Downarrow$$

$$\Delta = 2h + \lambda/2$$

# Кольца Ньютона



Вблизи оптической оси системы (то есть точки касания линзы и стеклянной подложки) разность хода лучей, отраженных от подложки и выпуклой поверхности линзы, невелика и медленно изменяется по квадратичному закону с ростом расстояния до оси системы R:

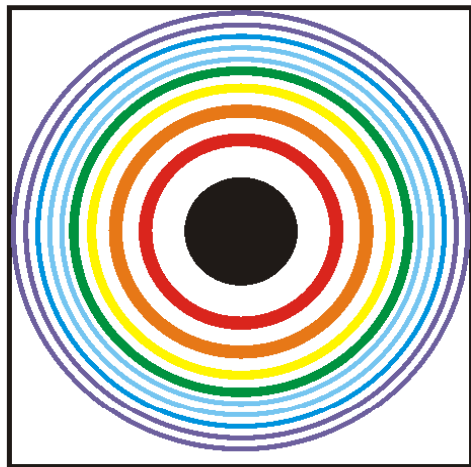
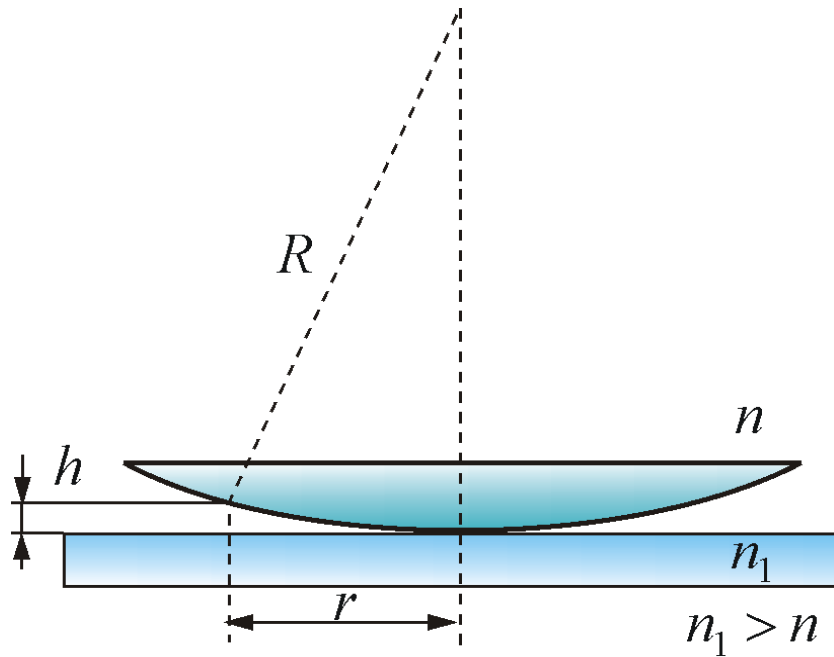


$$\Delta = 2h + \lambda/2 \quad \Rightarrow \quad \Delta = \frac{r^2}{R} + \lambda/2$$

R- радиус кривизны линзы, порядка метра;  
 $\lambda$  - длина волны света;  
h - малый зазор между линзой и подложкой



# Кольца Ньютона



В случае когда  $\Delta = \pm m\lambda$ , то есть разность хода обеих отраженных волн кратна длине волны, - обе волны складываются синфазно, то есть дают в отраженном свете интерференционный максимум. Это соответствует условию:

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

- радиус  $m$ -того светлого кольца

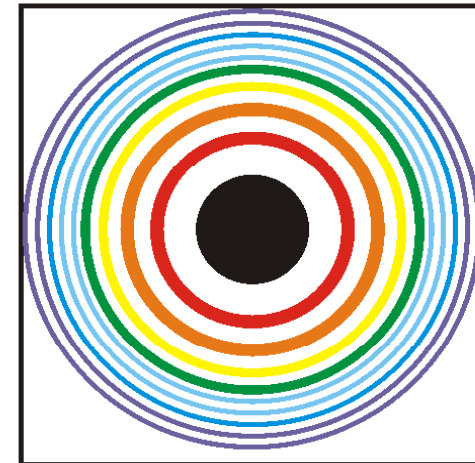
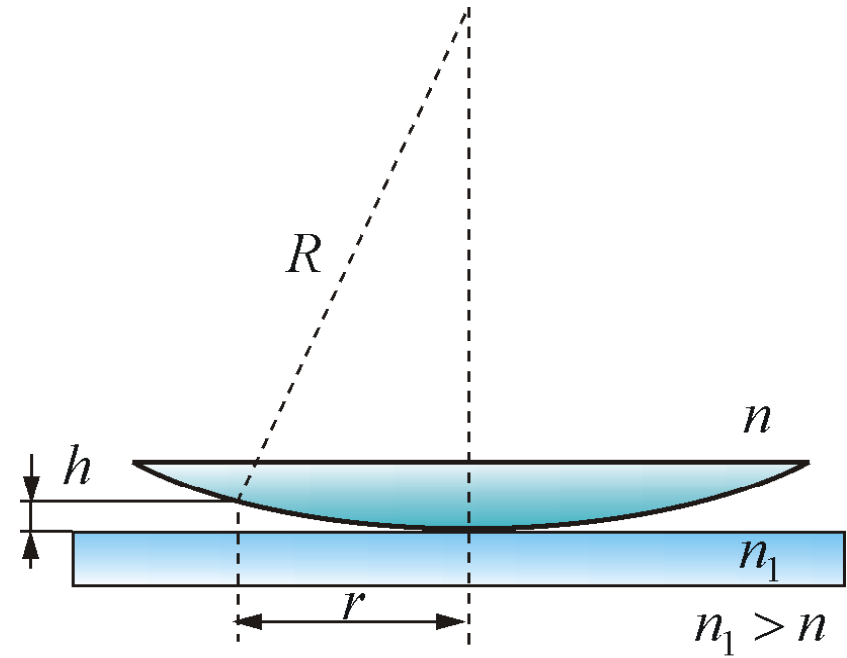
$$m = 0, 1, 2, \dots$$

Аналогично

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}$$

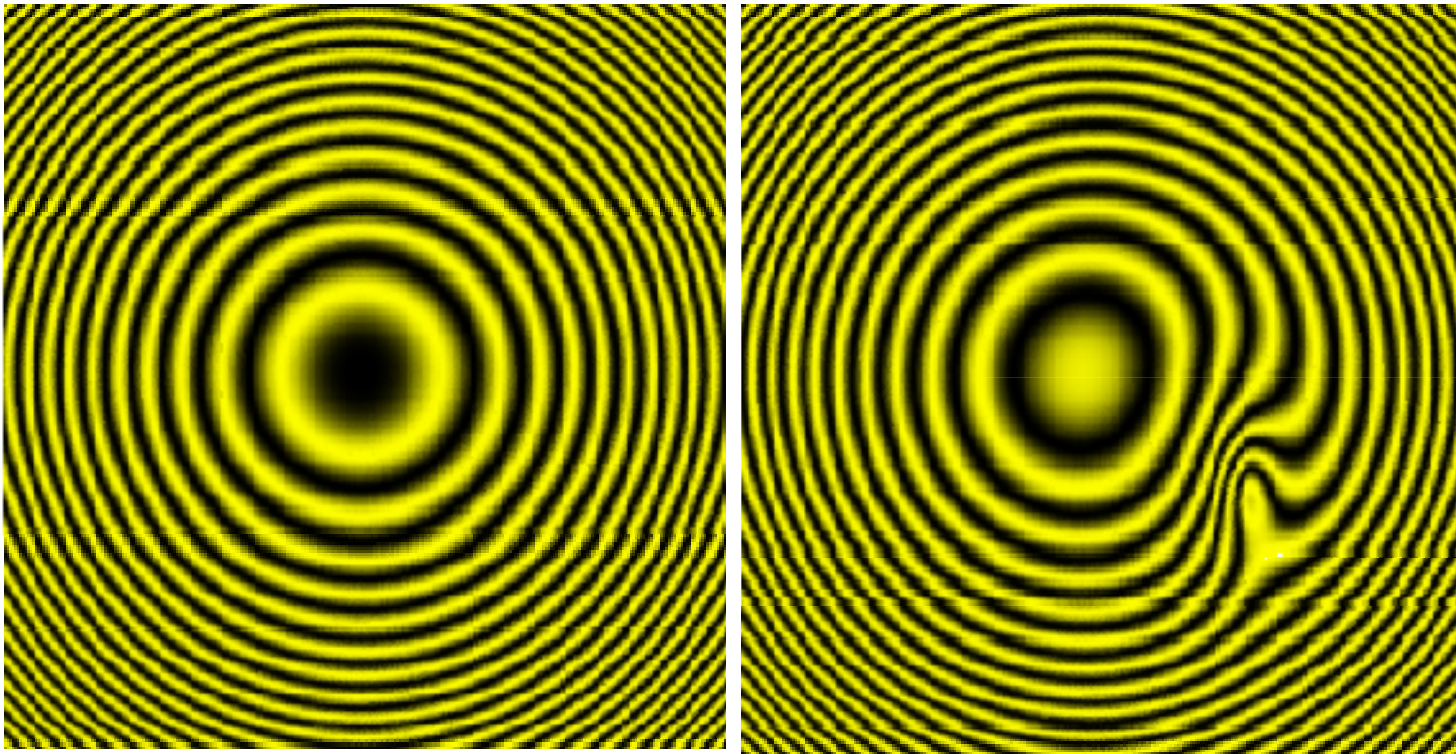
- радиус  $m$ -того темного кольца

# Кольца Ньютона



# Применение интерференции света

- *по интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды*

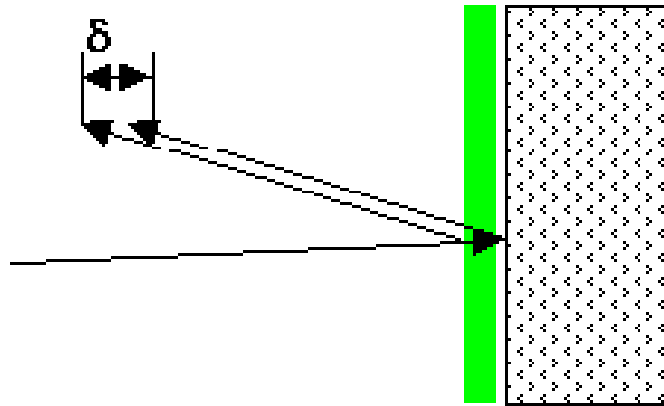


# **Применение интерференции света**

- *по интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды*
- *просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров*

## Просветление оптики

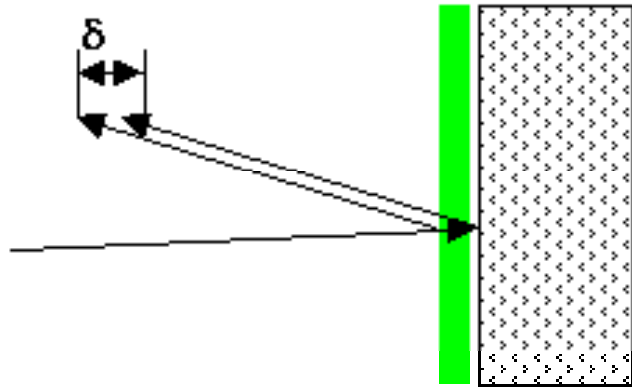
Уменьшение отражательной способности оптических поверхностей путем нанесения на них непоглощающих пленок.



Создание покрытий на поверхности оптических деталей, в первую очередь линз, является одним из простейших и наиболее распространенных применений интерференции света.

На плоской стеклянной поверхности с показателем преломления  $n_1$  наносится (путем вакуумного распыления или осаждения из раствора на вращающуюся подложку), дополнительный тонкий слой диэлектрика с показателем преломления  $n_2$ . Толщина слоя  $d$  подбирается исходя из условия, чтобы дополнительный набег фазы  $d$  излучения на двойном прохождении слоя был кратен  $(2n+1)\pi$ .

## Просветление оптики



$$\delta = \frac{4\pi d}{\lambda} = (2n + 1)\pi$$

$$d = \lambda \frac{2n + 1}{4}$$

В таком случае волны, отраженные от границ раздела пленка-воздух и пленка-стекло будут складываться в противофазе и “гасить” друг друга. Для того чтобы это гашение было наиболее эффективным, необходимо дополнительно постараться уравнивать амплитуды обеих отраженных волн. Это достигается подбором материала пленки с показателем преломления  $n_2 = (n_1)^{1/2}$ .

<http://www.youtube.com/watch?v=E9RkXBV0Ktc>

# **Применение интерференции света**

- *по интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды*
- *просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров*
- *получение высокоотражающих диэлектрических зеркал (лазерные зеркала)*

# Диэлектрическое зеркало

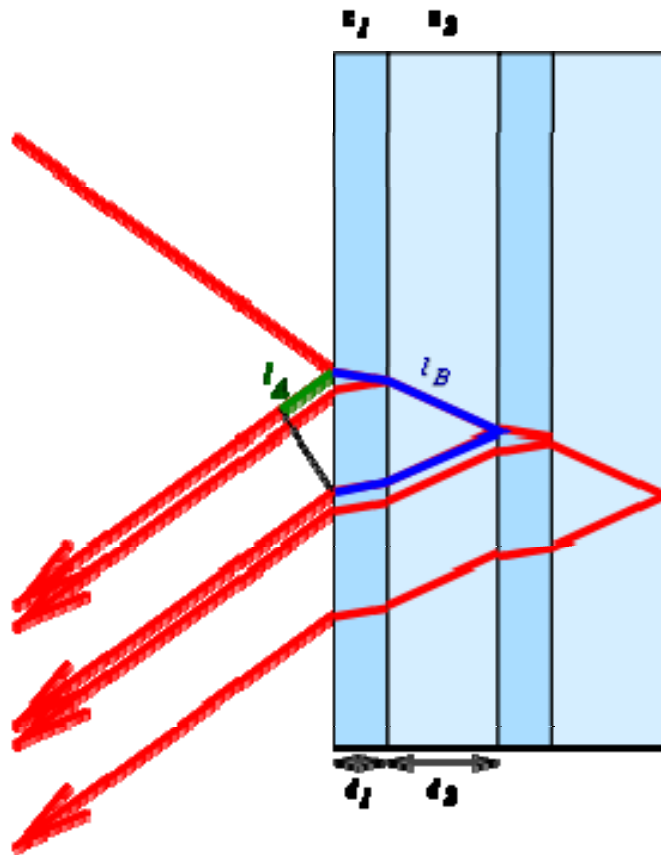


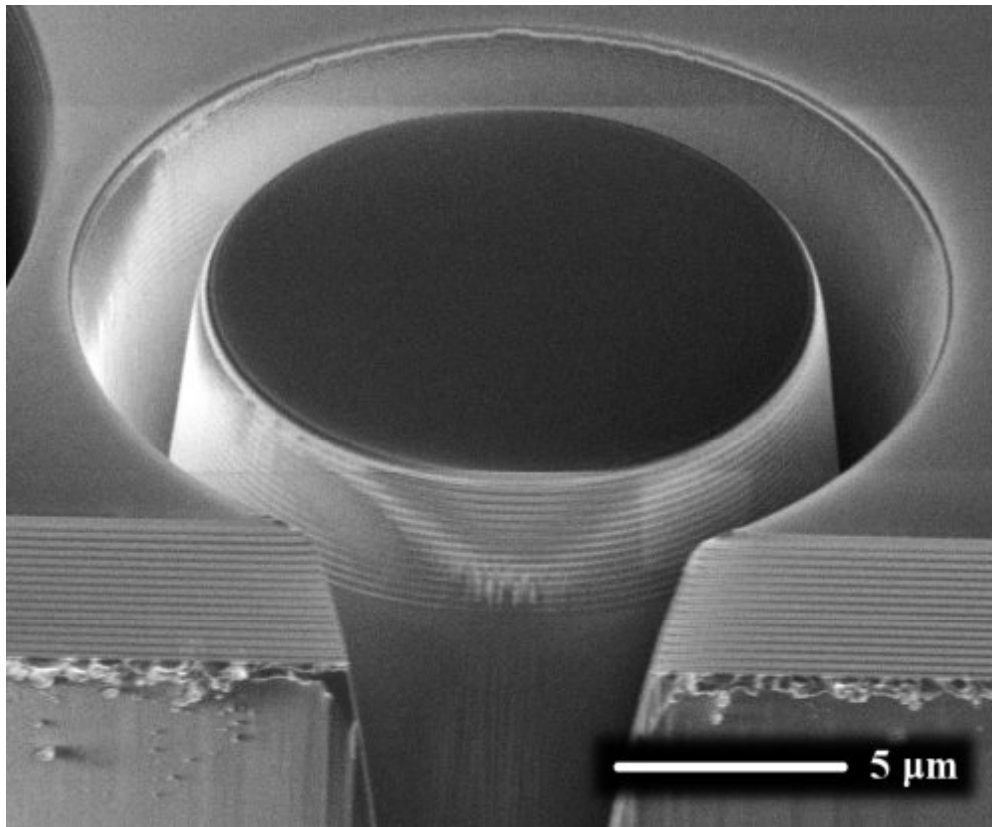
Схема диэлектрического зеркала. Тонкие слои материала с более высоким показателем преломления  $n_1$  чередуются с более толстыми слоями с меньшим показателем преломления  $n_2$ . Оптические длины пути  $I_A$  и  $I_B$  отличаются точно на одну длину волны, что приводит к конструктивной интерференции в отраженной волне.

Диэлектрические зеркала могут обеспечивать очень большие коэффициенты отражения, (так называемые суперзеркала), которые обеспечивают отражение более 0.99999 падающего света.



## Диэлектрическое зеркало

Производство диэлектрических зеркал основано на различных методах нанесения [тонких пленок](#). Основными материалами, используемыми для создания слоев являются [фторид магния](#), [диоксид кремния](#), [пентоксид тантала](#), [сульфид цинка](#) ( $n=2.32$ ), и [диоксид титана](#) ( $n=2.4$ ).



Диэлектрическое микрозеркало, диаметром около 13 микрон, вырезанное из большей подложки. Изображение получено с помощью [электронного микроскопа](#). На нижнем крае зеркала хорошо видны чередующиеся слои Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и SiO<sub>2</sub>.

# **Применение интерференции света**

- *по интерференционной картине можно выявлять и измерять неоднородности среды*
- *просветление оптики и получение высокопрозрачных покрытий и селективных оптических фильтров*
- *получение высокоотражающих диэлектрических зеркал (лазерные зеркала)*
- *интерферометры*

# Интерферометры



1 [Интерферометр Дайсона](#)



2 [Интерферометр Жамена](#)



3 [Интерферометр Люммера-Герке](#)



4 [Интерферометр Майкельсона](#)



5 [Интерферометр Маха-Цандера](#)



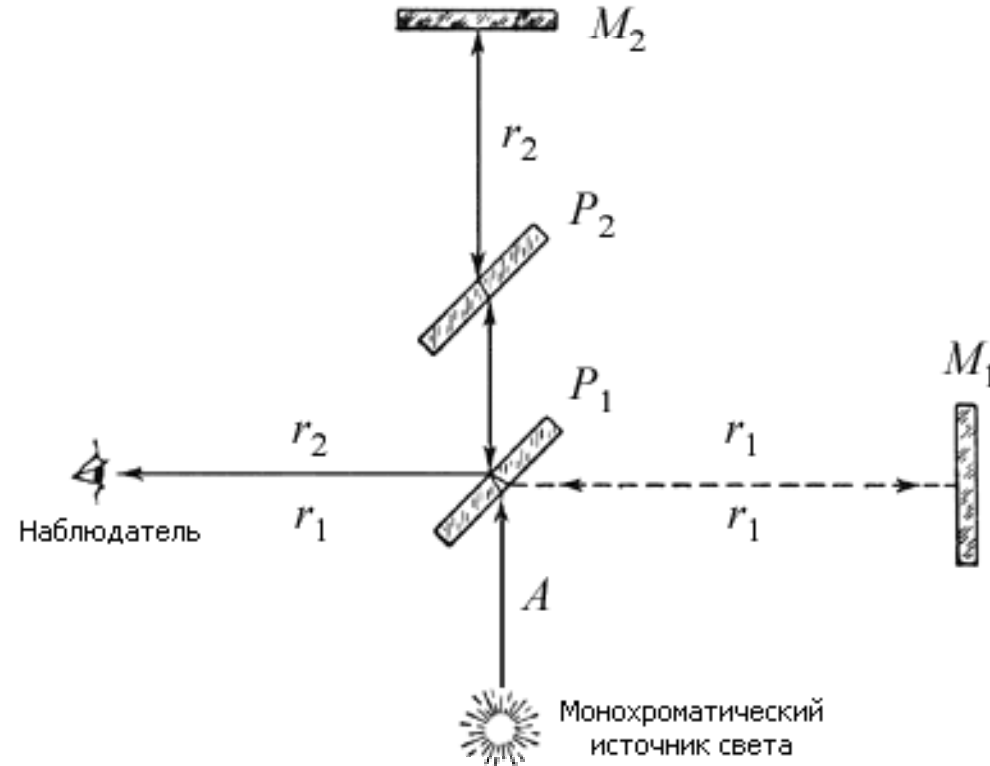
6 [Интерферометр Рэля](#)



7 [Интерферометр Фабри-Перро](#)

# Интерферометр Майкельсона

Интерферометр Майкельсона является одной из наиболее распространенных скелетных схем интерферометра.



Пучок света от практически точечного источника, находящегося в фокусе линзы, превращается этой линзой в параллельный пучок.

# Интерферометр Майкельсона

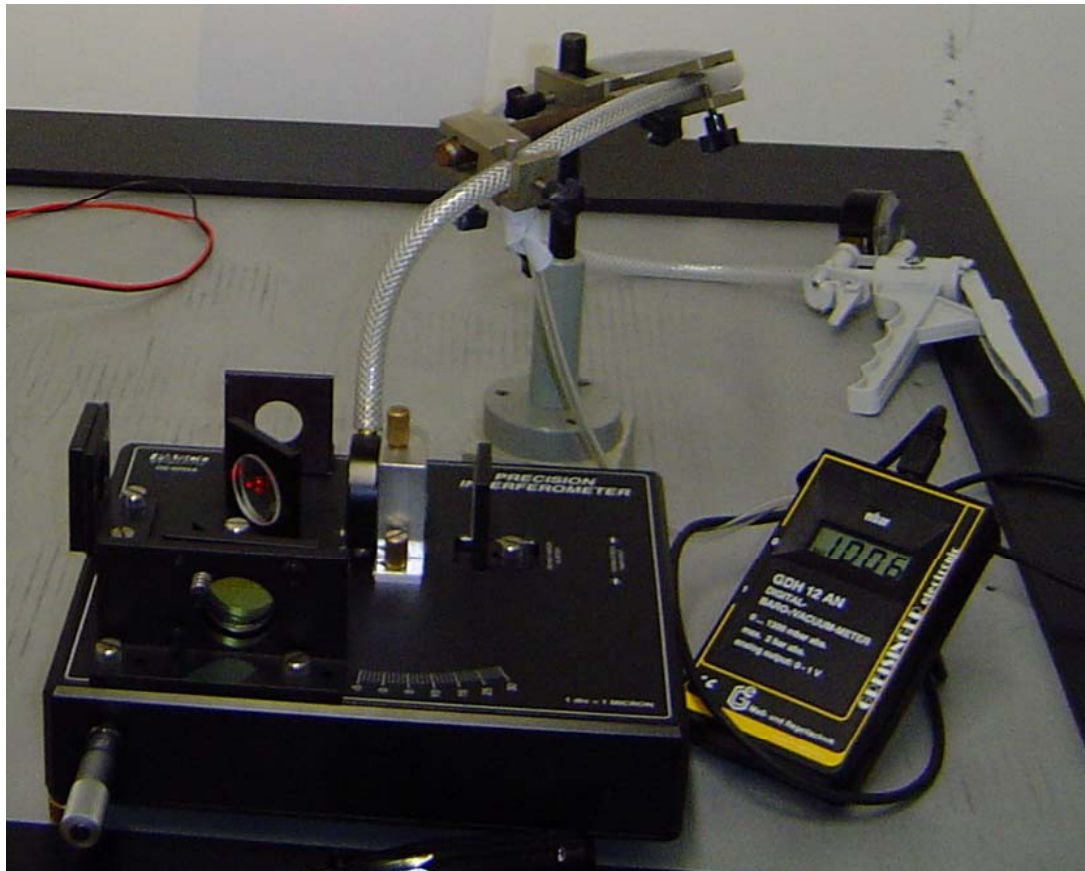
Интерференционная картина, полученная при помощи интерферометра со строго перпендикулярными зеркалами



Интерференционная картина, полученная при помощи интерферометра с зеркалами под углом около  $90^\circ$



# Интерферометр Майкельсона



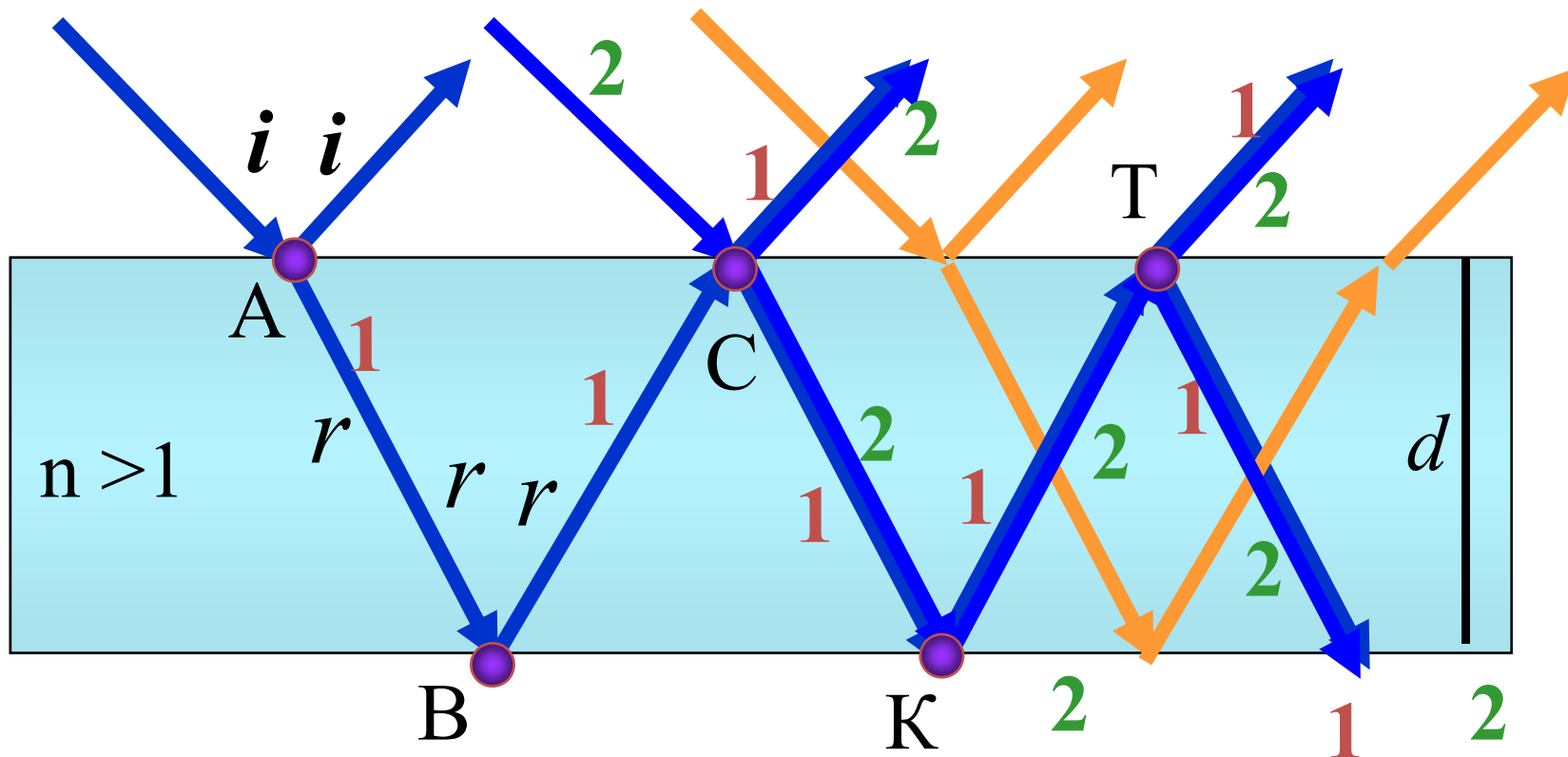
Устройство используется и сегодня в [астрономических](#), [физических исследованиях](#), а также в [измерительной технике](#). В частности, интерферометр Майкельсона лежит в основе оптической схемы современных [лазерных гравитационных антенн](#).

<http://www.youtube.com/watch?v=lihbBbGktc8>

## Интерференция в тонких пленках

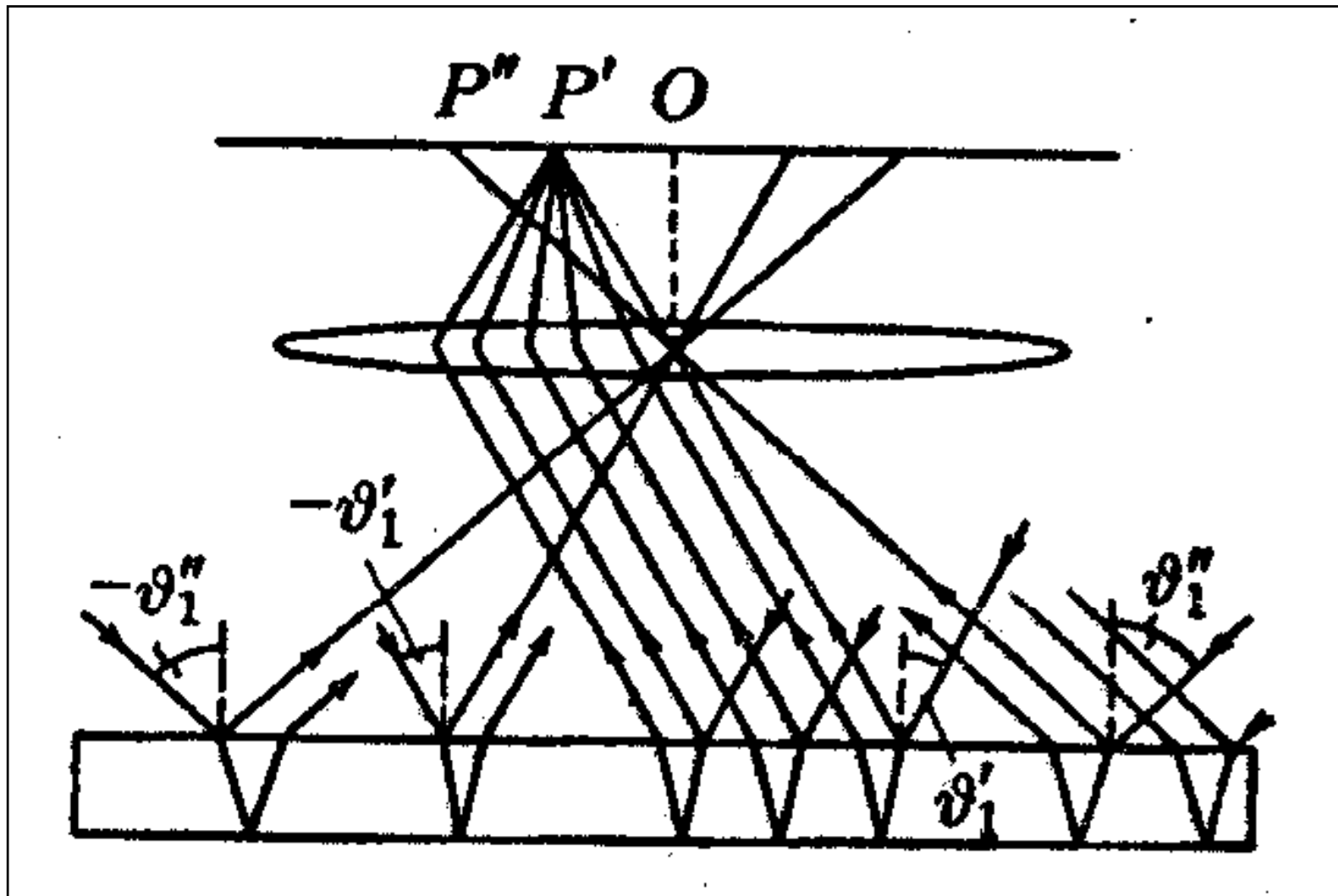
$$d = (350 \div 760) 10^{-9} \text{ м.}$$

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



## Интерференция в тонких пленках

Интерференционные *полосы равного наклона*

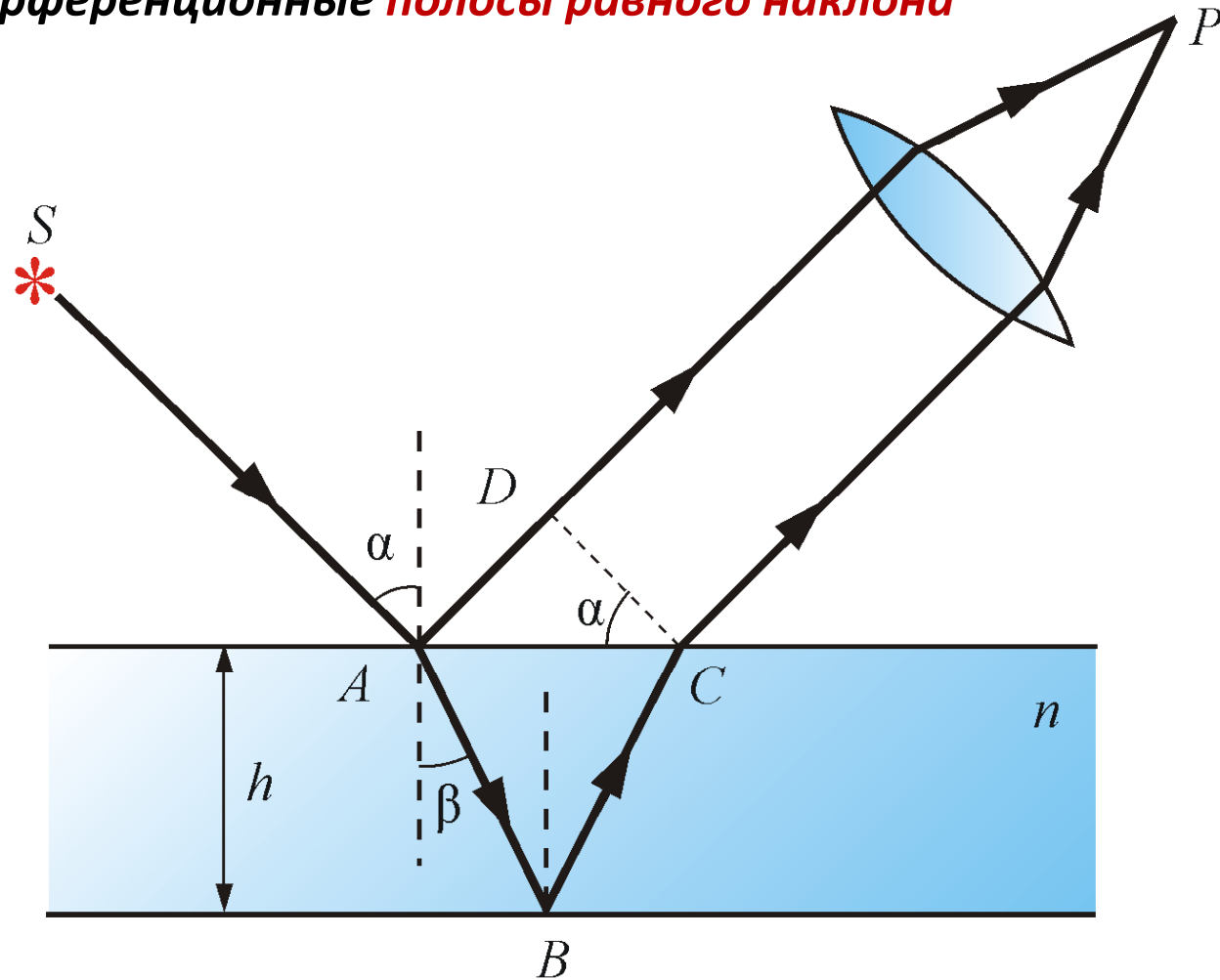




# Интерференция в тонких пленках

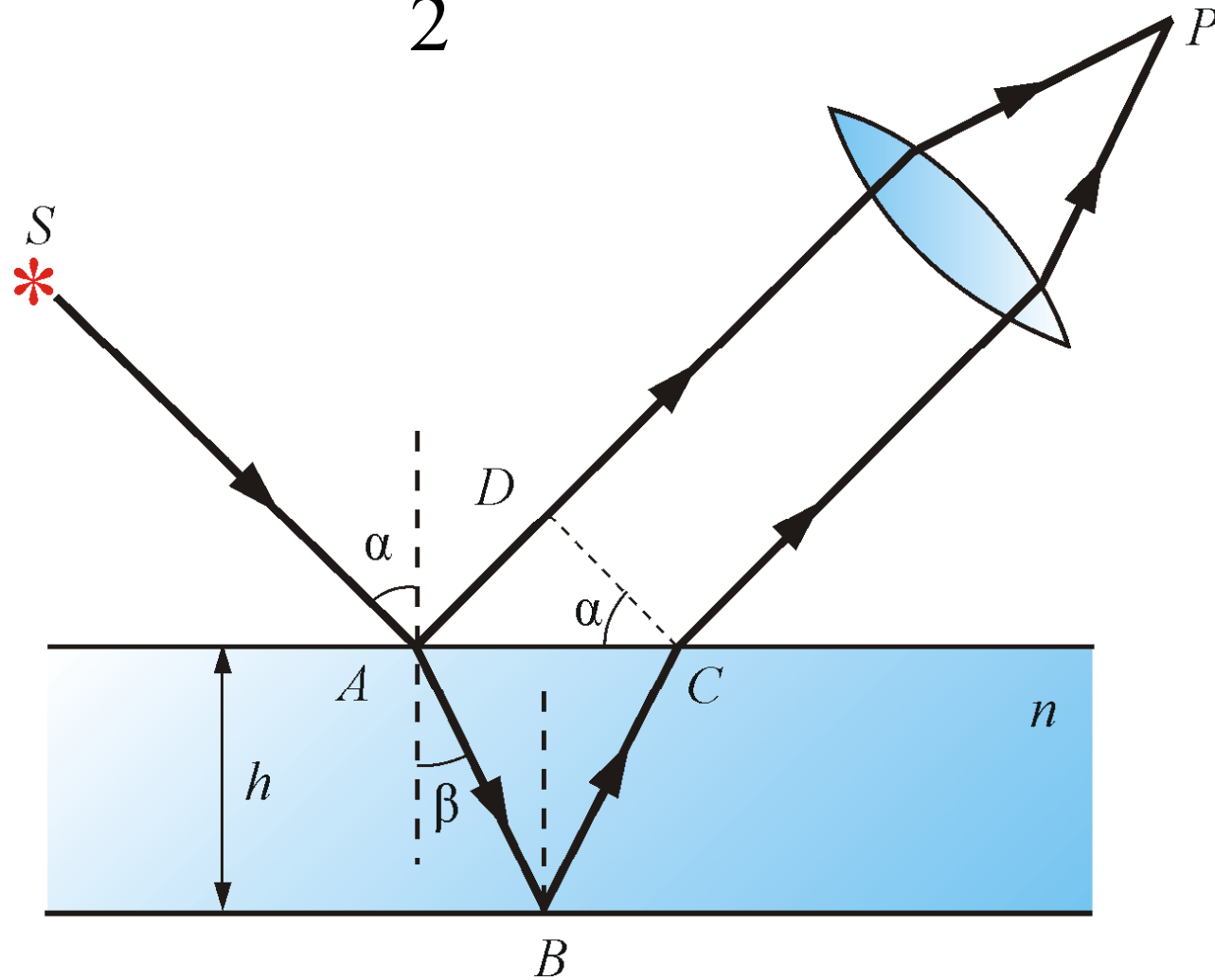
Интерференционные *полосы равного наклона*

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



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

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



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