

Колебания и волны.
Геометрическая и волновая оптика

Кузнецов Сергей Иванович
доцент кафедры
ОФ ЕНМФ ТПУ

Тема 7 ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА.

7.1 Оптическое излучение

7.2 Геометрическая оптика

**7.3 Развитие взглядов на природу
света**

7.4 Корпускулярно-волновой дуализм

**7.5 Основные характеристики
световых волн**

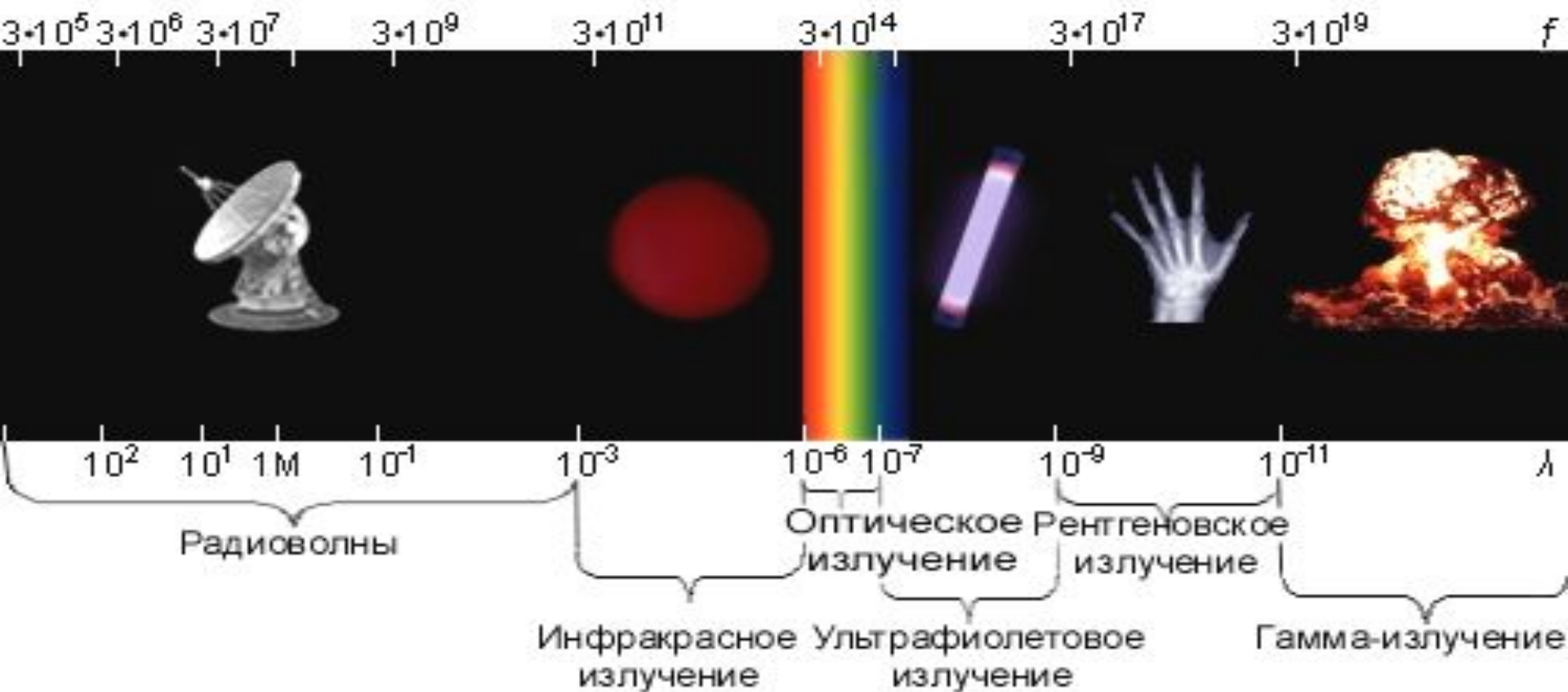
**7.6 Световые, или фотометрические
величины**

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.*

Оптический диапазон длин волн λ ограничен с одной стороны рентгеновскими лучами, а с другой – микроволновым диапазоном радиоизлучения.



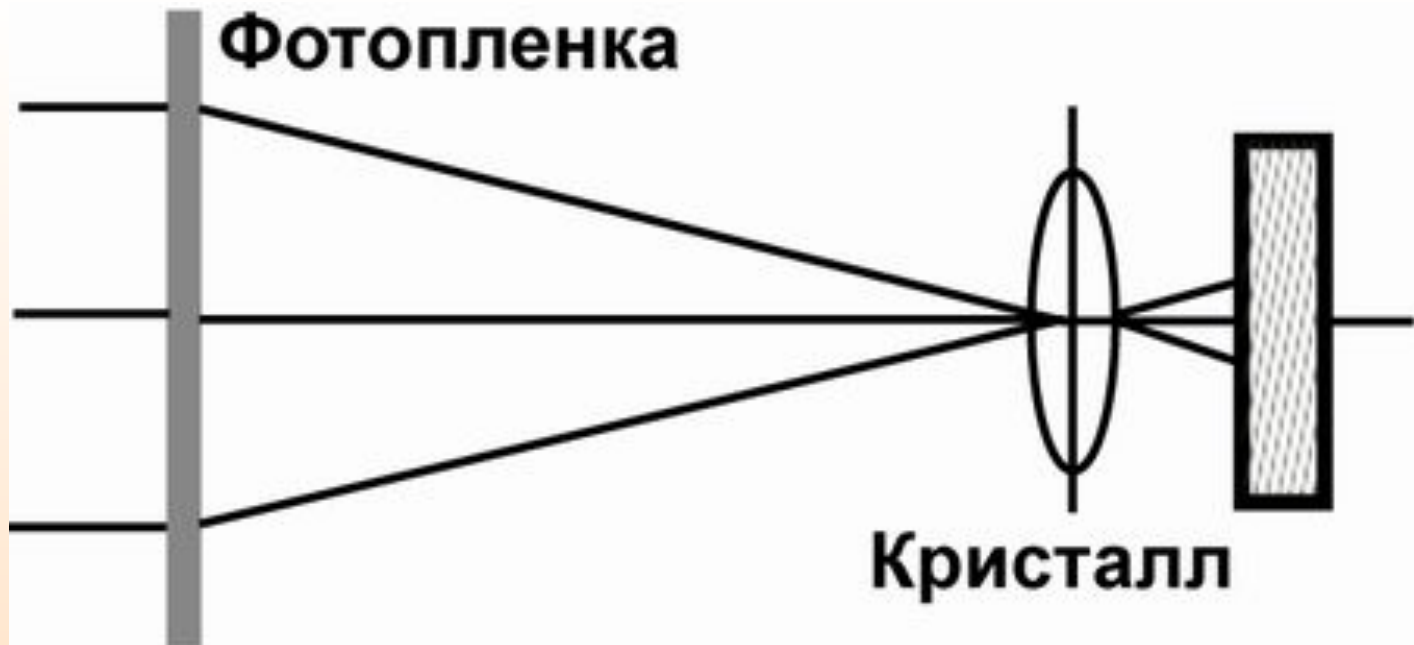
Такое ограничение условно и в значительной степени определяется общностью технических средств и методов исследования явления в указанном диапазоне.



Эксперимент И. Ньютона

- 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.



Наибольшее значение геометрическая оптика имеет для расчета и конструирования оптических приборов — от очковых линз до сложных объективов и огромных астрономических инструментов.

Док 7.543.003-2

RZ0.04/ (✓)

ΔnD	36
$\Delta (nF-nC)$	38
Однородность	3
Дв. лучепр.	4
Светопогл.	1
Бессвилен.	1A
Пузырность	2Б
N кривиз.	1
ΔN разн. прел.	0.2
P клас. прел.	V
θ	—
C	0.05
ΔR	3
f'	-32 ± 0.8
$S'r$	
Sf	
св. ϕ	6
λ	589.3

* Размер для справок

Док 7.543.003-2

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
Разраб.		Агапов Д.Н.		
Провер.		Самуilenкова		
Т. контр.				
Согласов.				
Н. контр.				
Утв.		Агапов Н.А.		

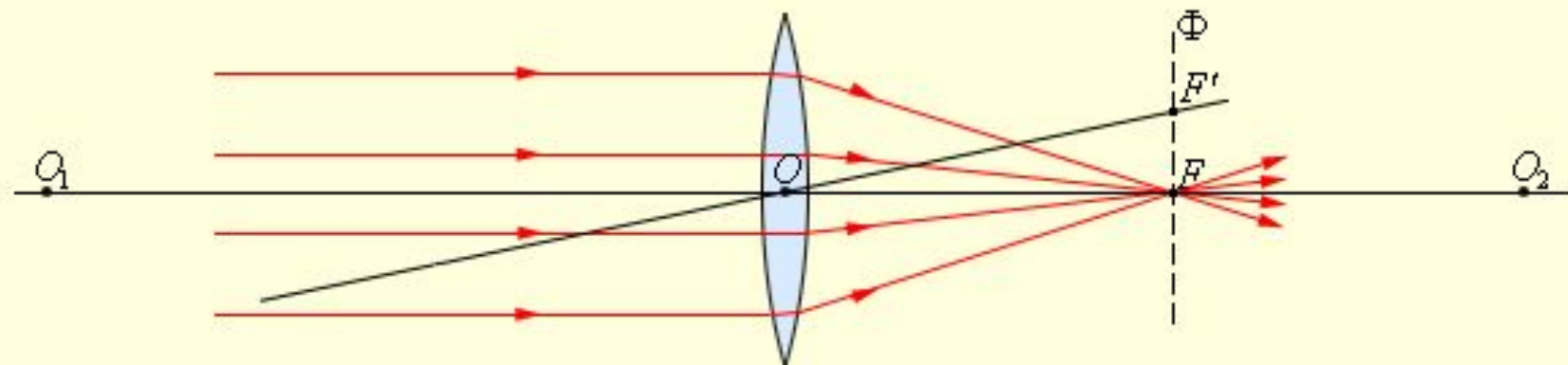
Линза-1

Стекло кварцевое КУ-1
ГОСТ 15130-86

Литера	Масса	Масштаб
		5:1
Лист 11	Листов 11	
8		

Копировал

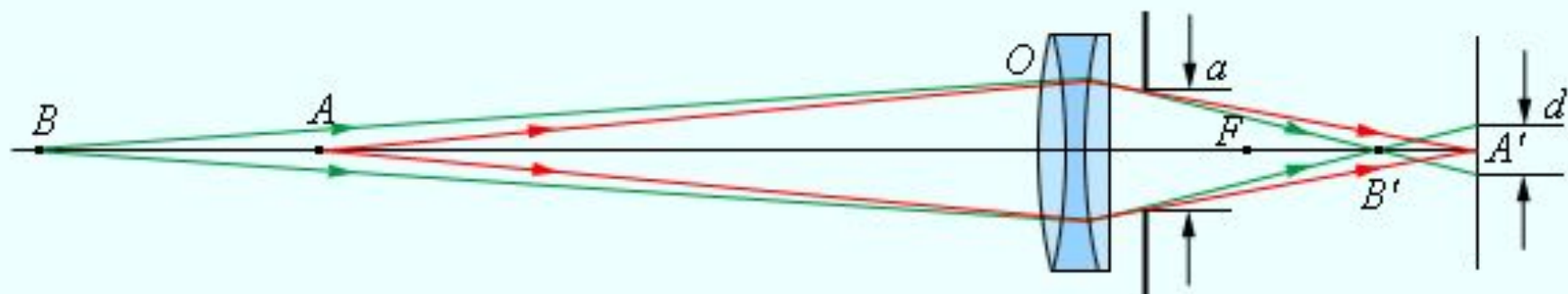
Формат А4



Собирающая линза

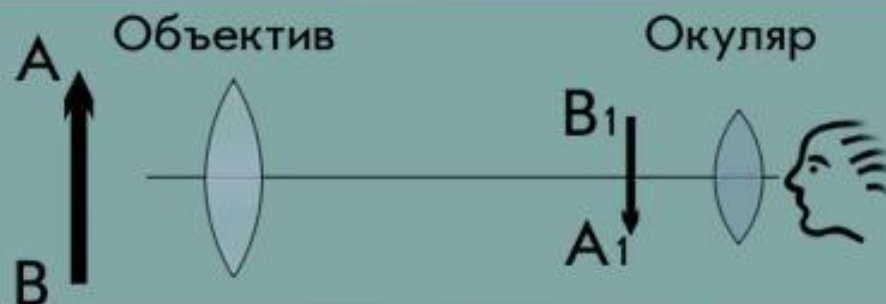


Рассеивающая линза

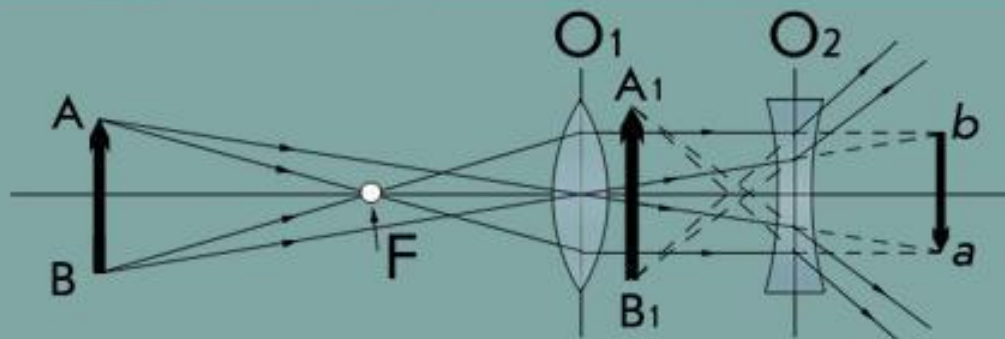


Подзорные трубы, телескоп

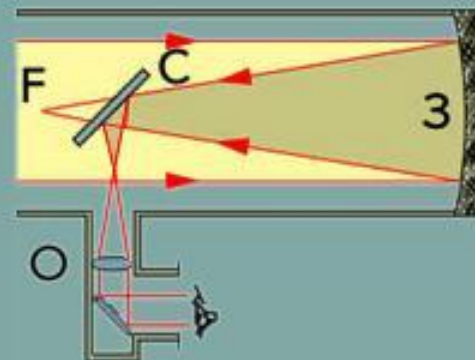
Труба Кеплера



Труба Галилея

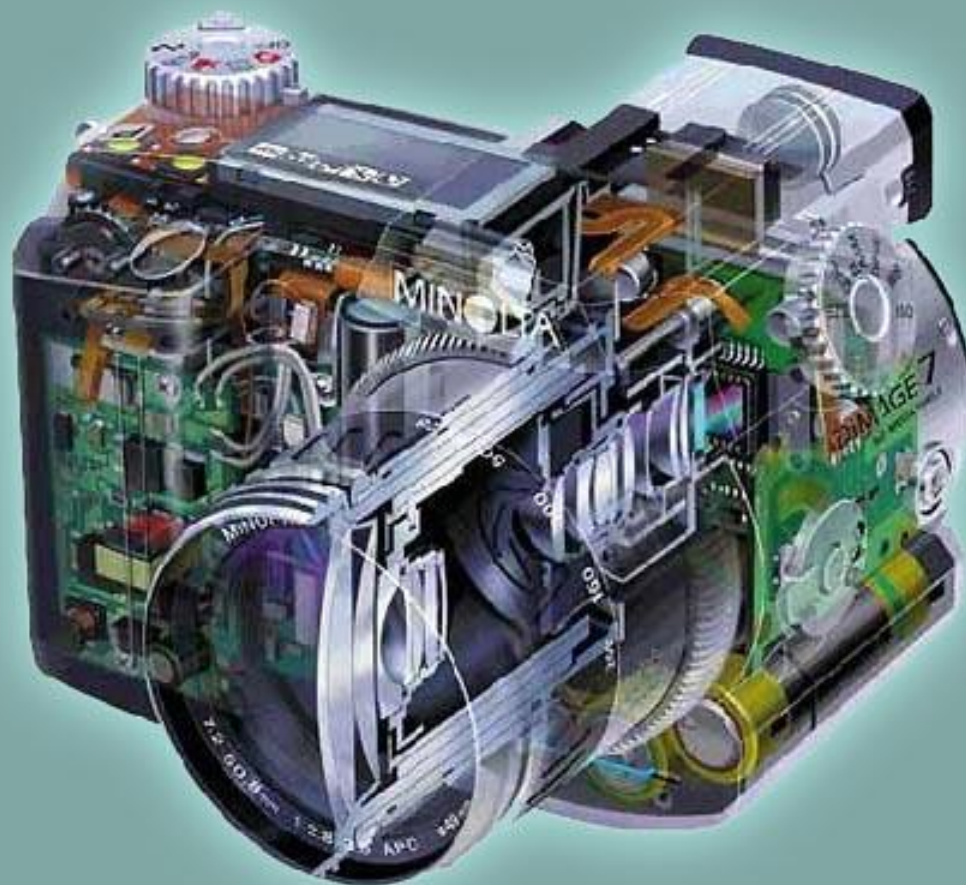


Зеркальный телескоп Ньютона



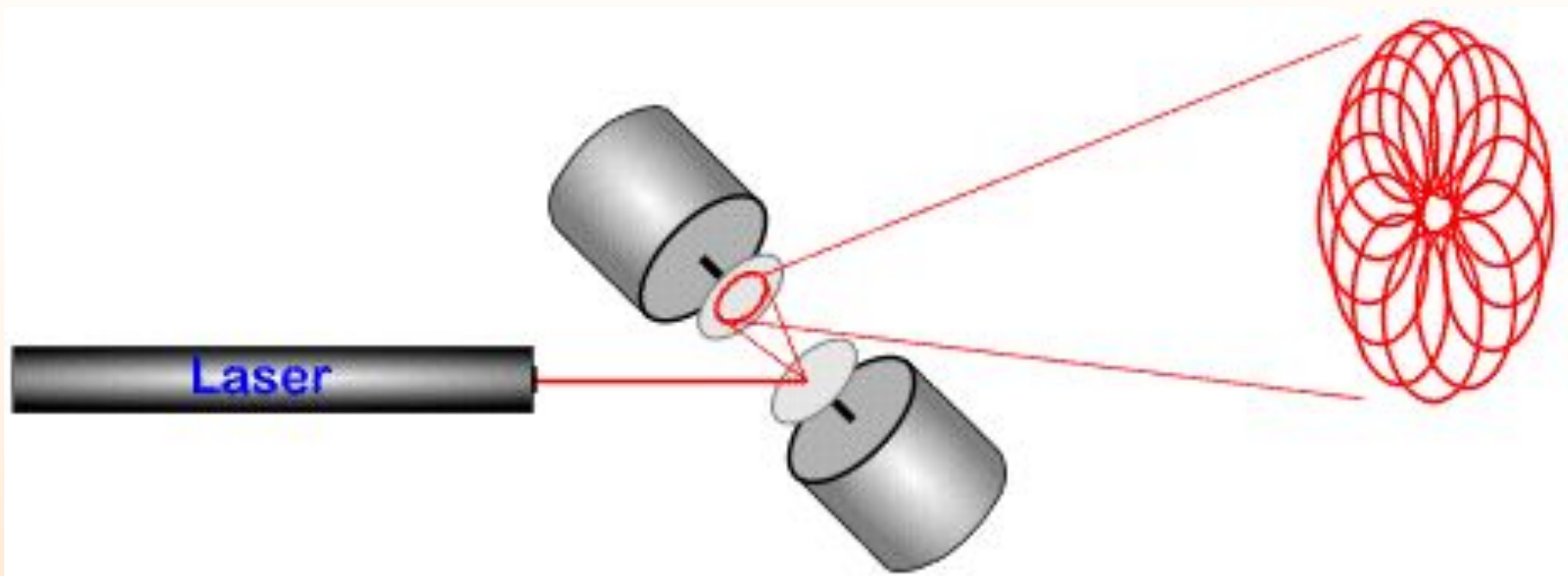
Цифровая фотокамера

Внешний вид и внутреннее устройство

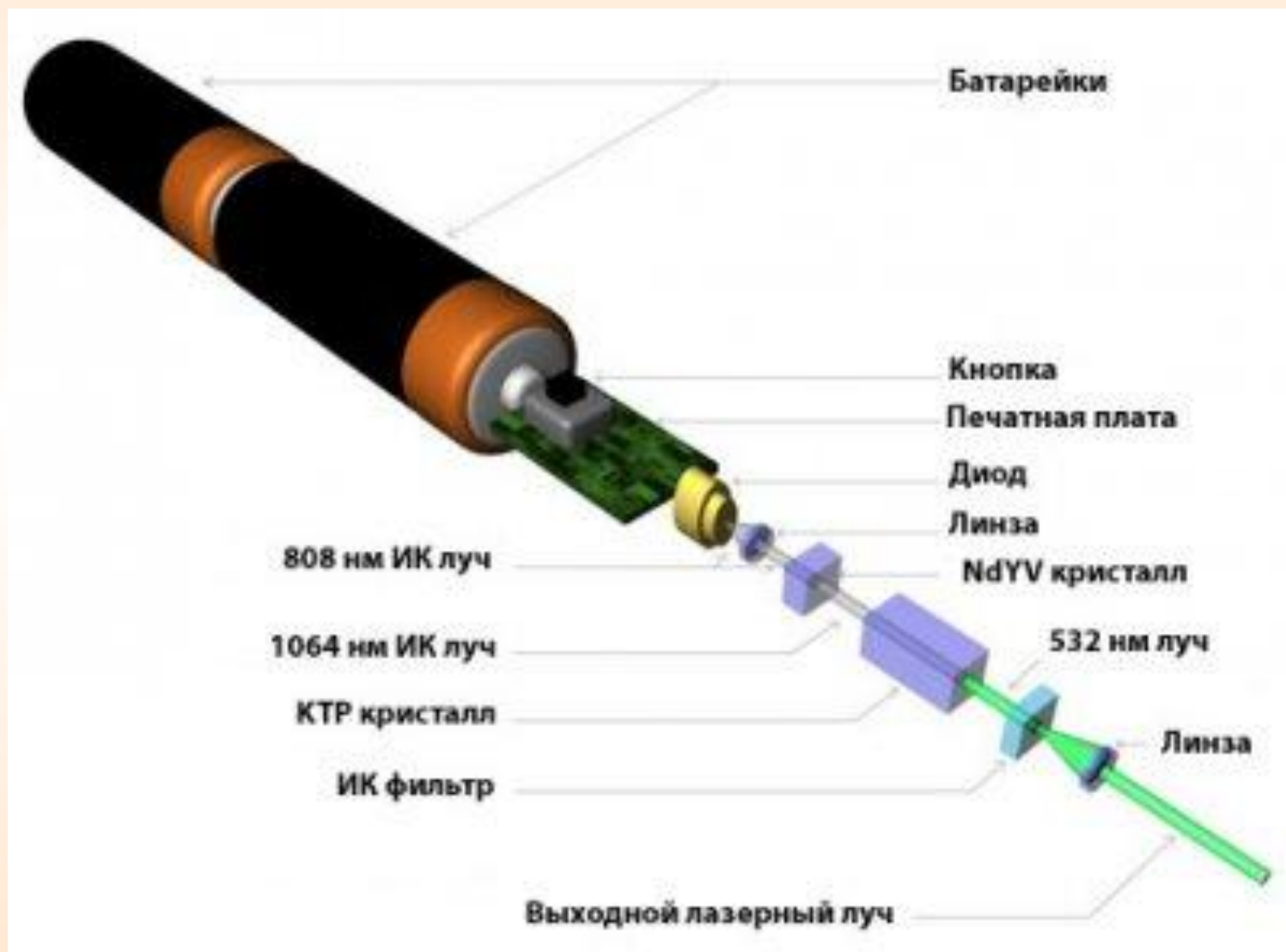


Физическая оптика

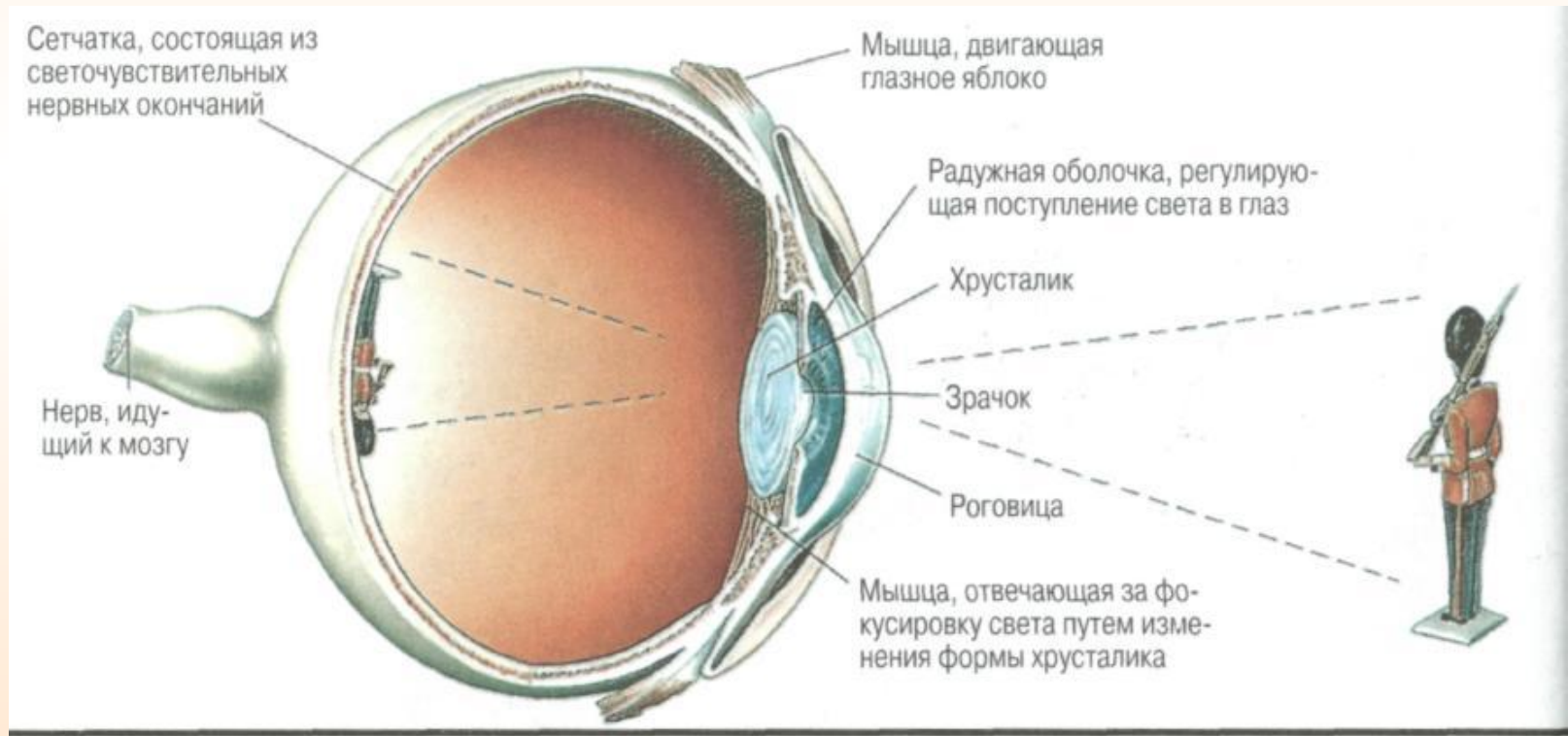
рассматривает проблемы, связанные с процессами испускания света, природой света и световых явлений.



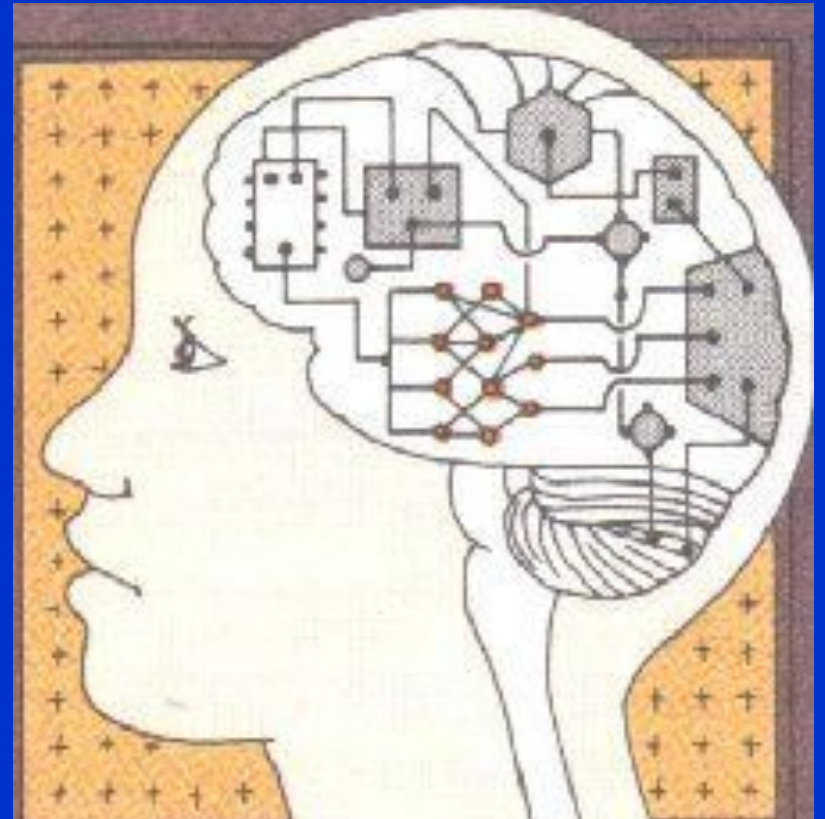
Устройство лазера



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



80% - через зрение



Сознание человека преобразует информацию

Результаты физиологической оптики используются в медицине, физиологии, технике при разработке разнообразных устройств – от осветительных приборов и очков до цветного кино и телевидения.

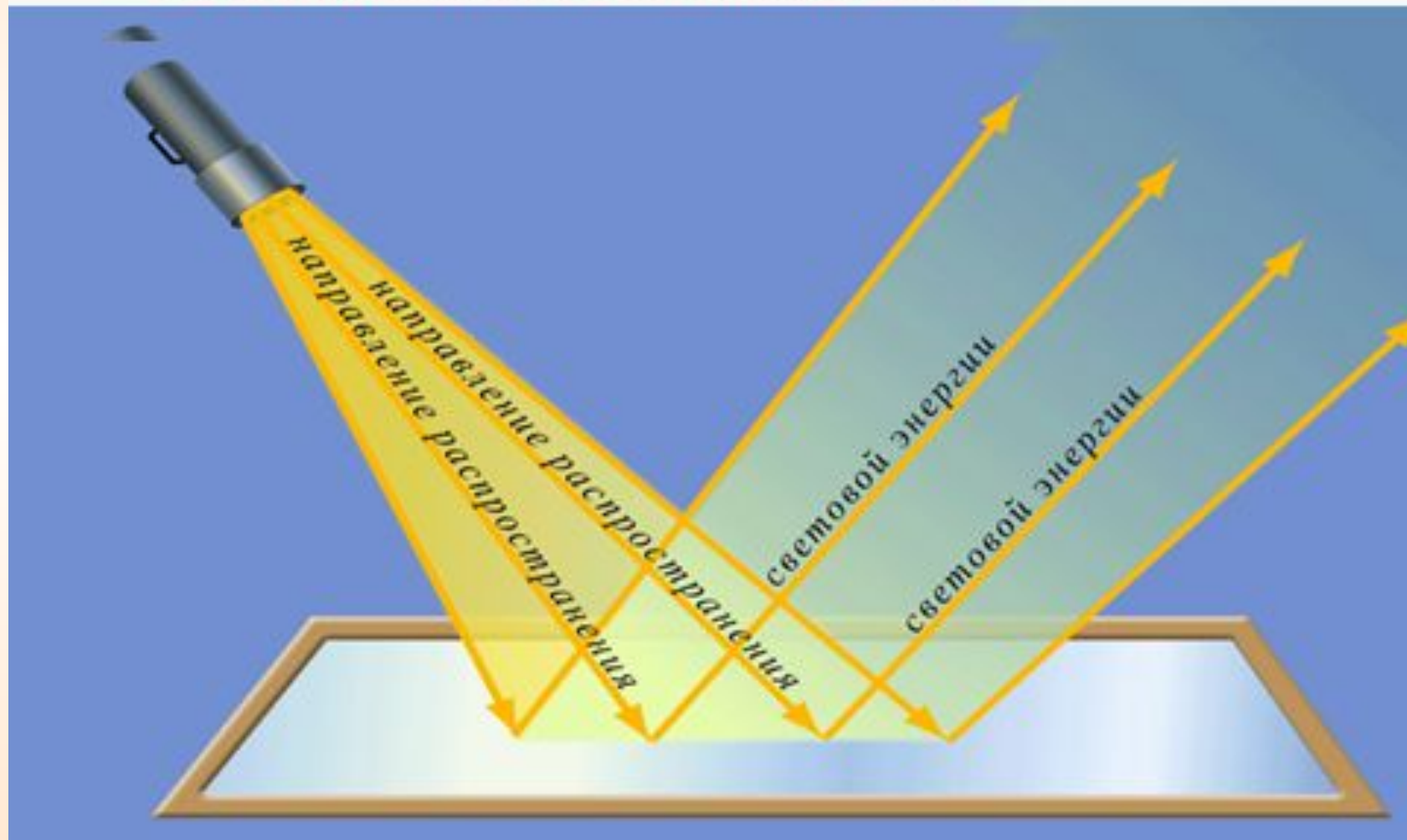


7.2 Геометрическая оптика

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.

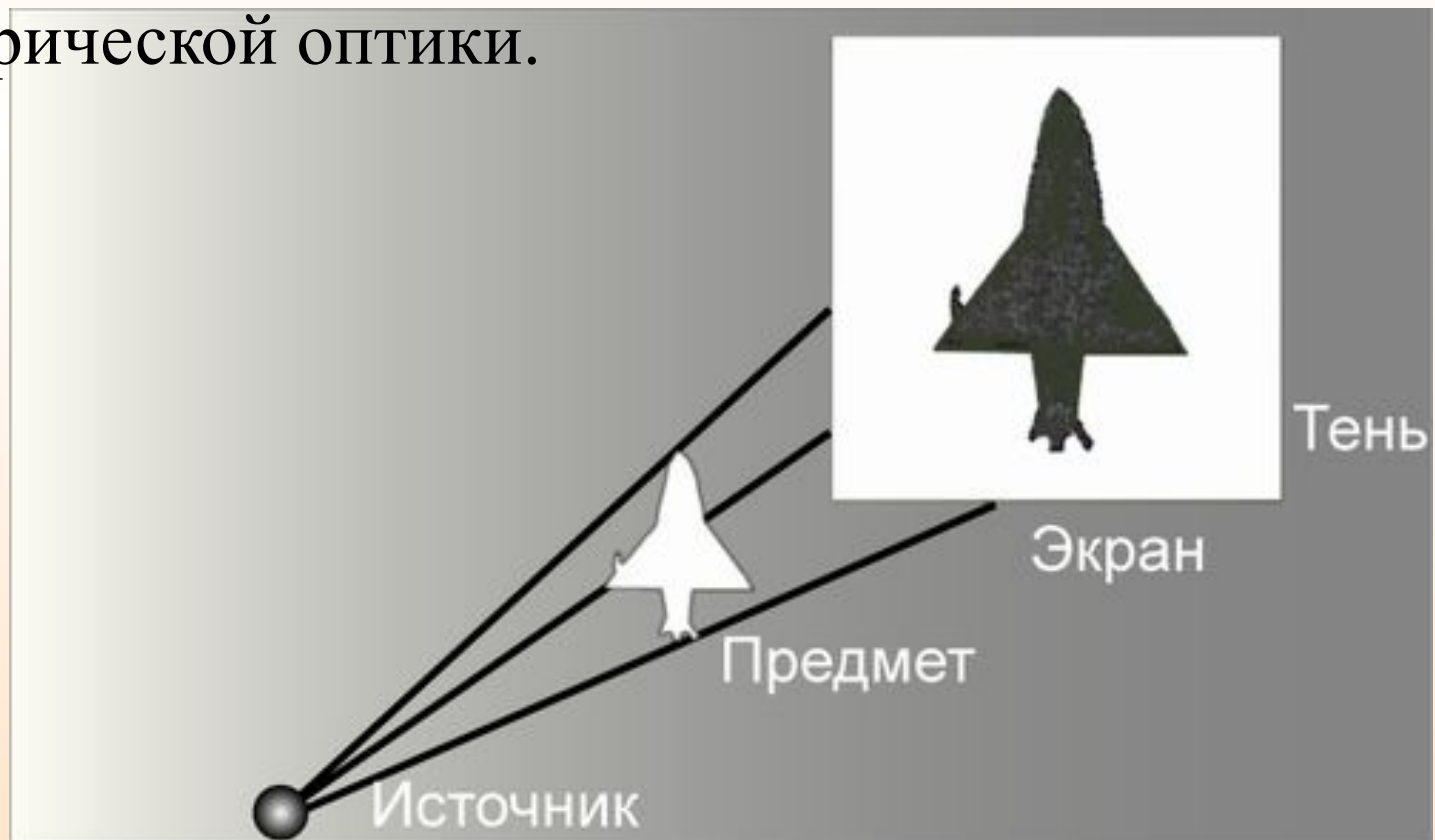
1. Что такое световой луч?

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



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.



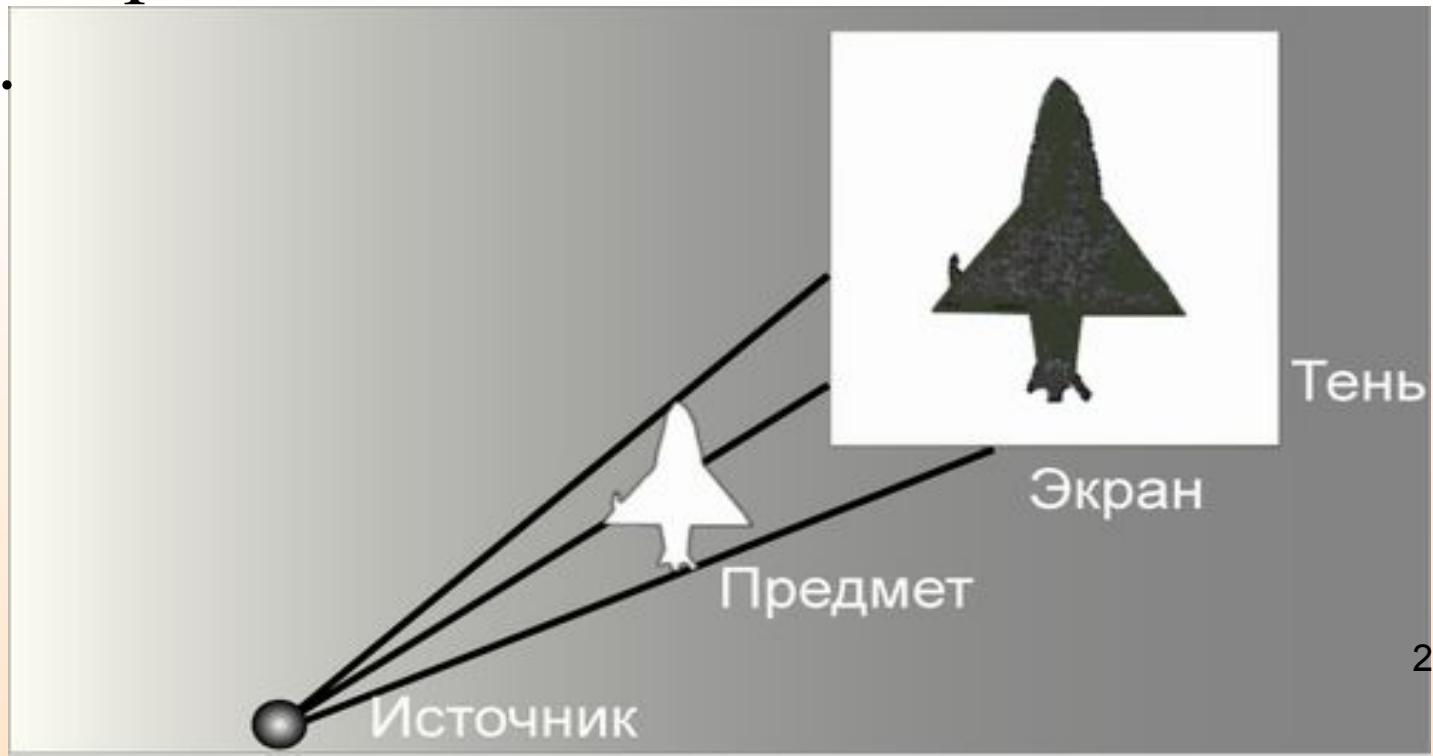
Четыре закона геометрической оптики,

установленные опытным путем:

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

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

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

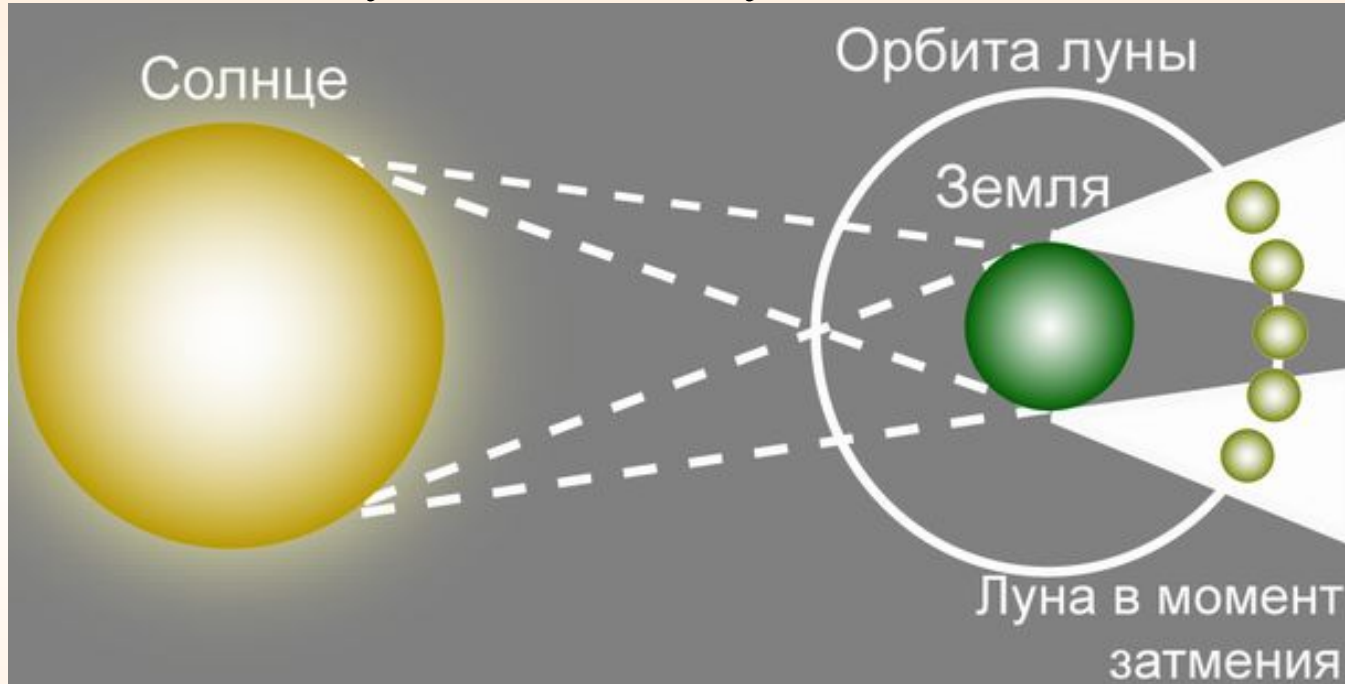


Тень, отбрасываемая предметом, обусловлена *прямолинейностью распространения световых лучей* в оптически однородных средах

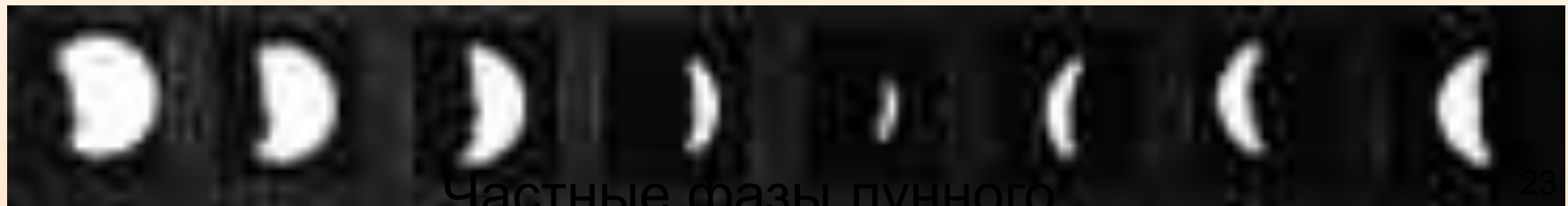


Если размеры препятствия много больше длины волны, то волны за него не проникают, создается область тени

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:



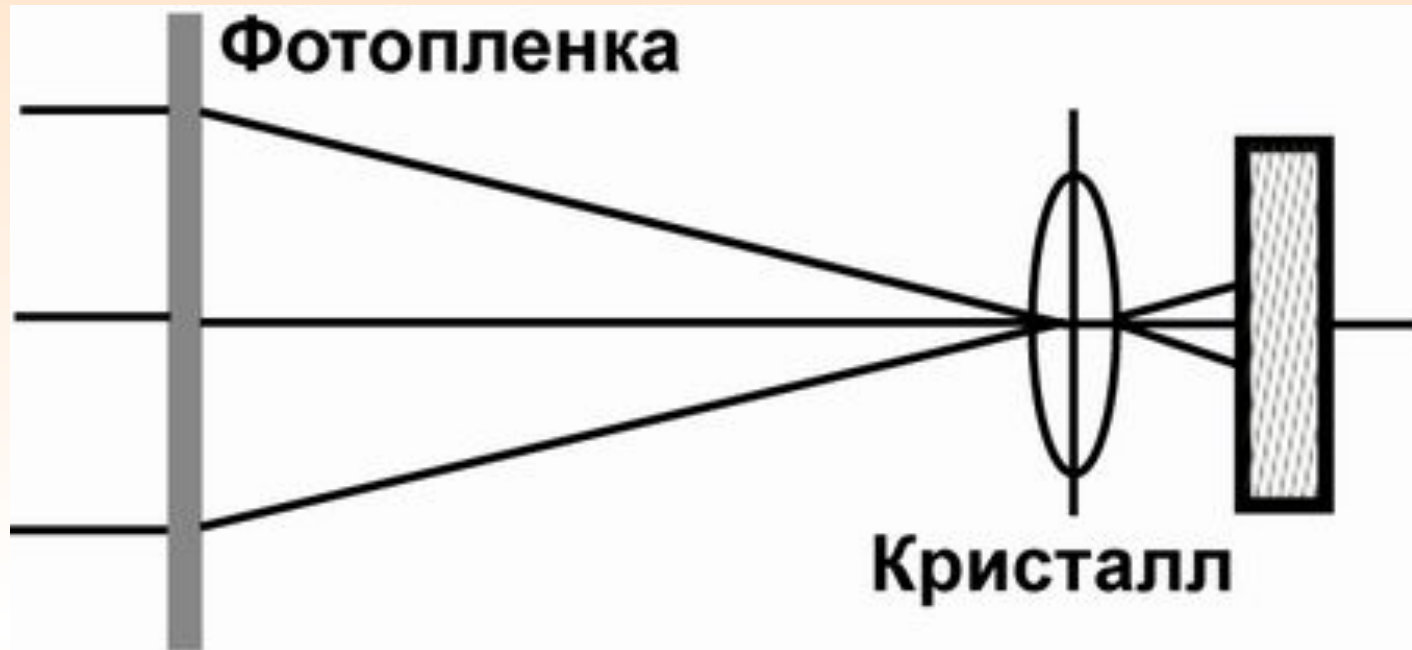
Частные фазы лунного затмения

Проявление прямолинейного распространения
света – образование тени.

Солнечное затмение

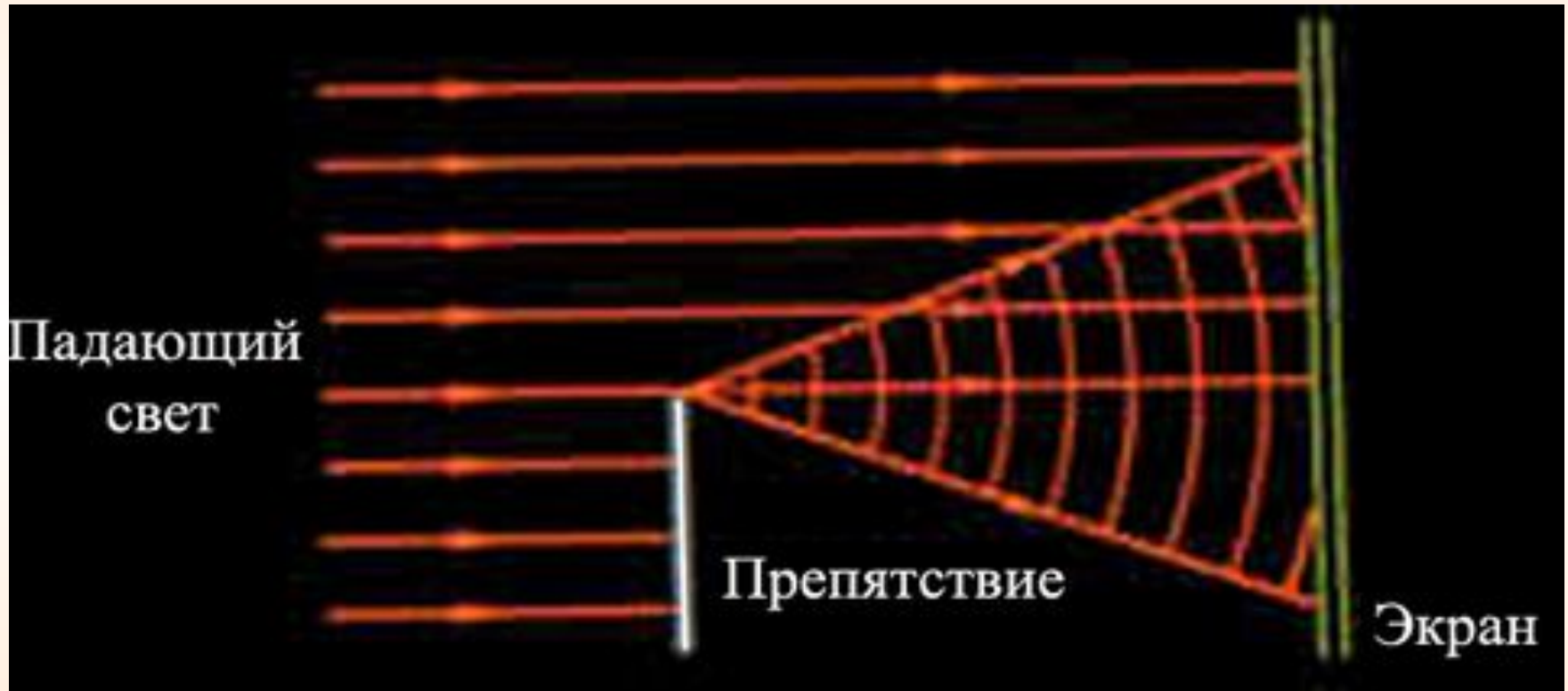


Прямолинейный ход световых лучей в оптических приборах



Изображенные на фотопленке элементы микросхемы проецируются на кристалл кремния, где получается подобное уменьшенное (с помощью системы линз) изображение микросхемы. Специальная обработка позволяет превратить это изображение в печатную микросхему

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.**

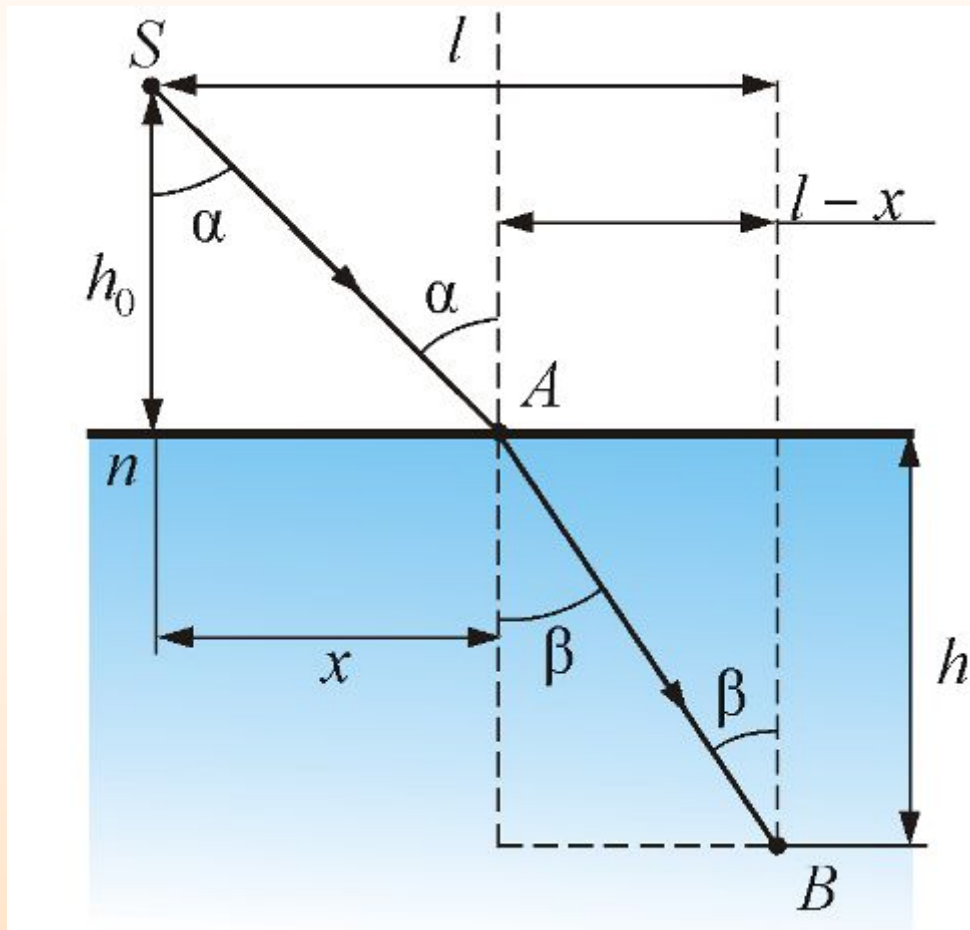


Огибание электромагнитными волнами препятствий и проникновение их в область геометрической тени наиболее отчетливо обнаруживается в тех случаях, **когда размер огибаемых препятствий соизмерим с длиной волны**



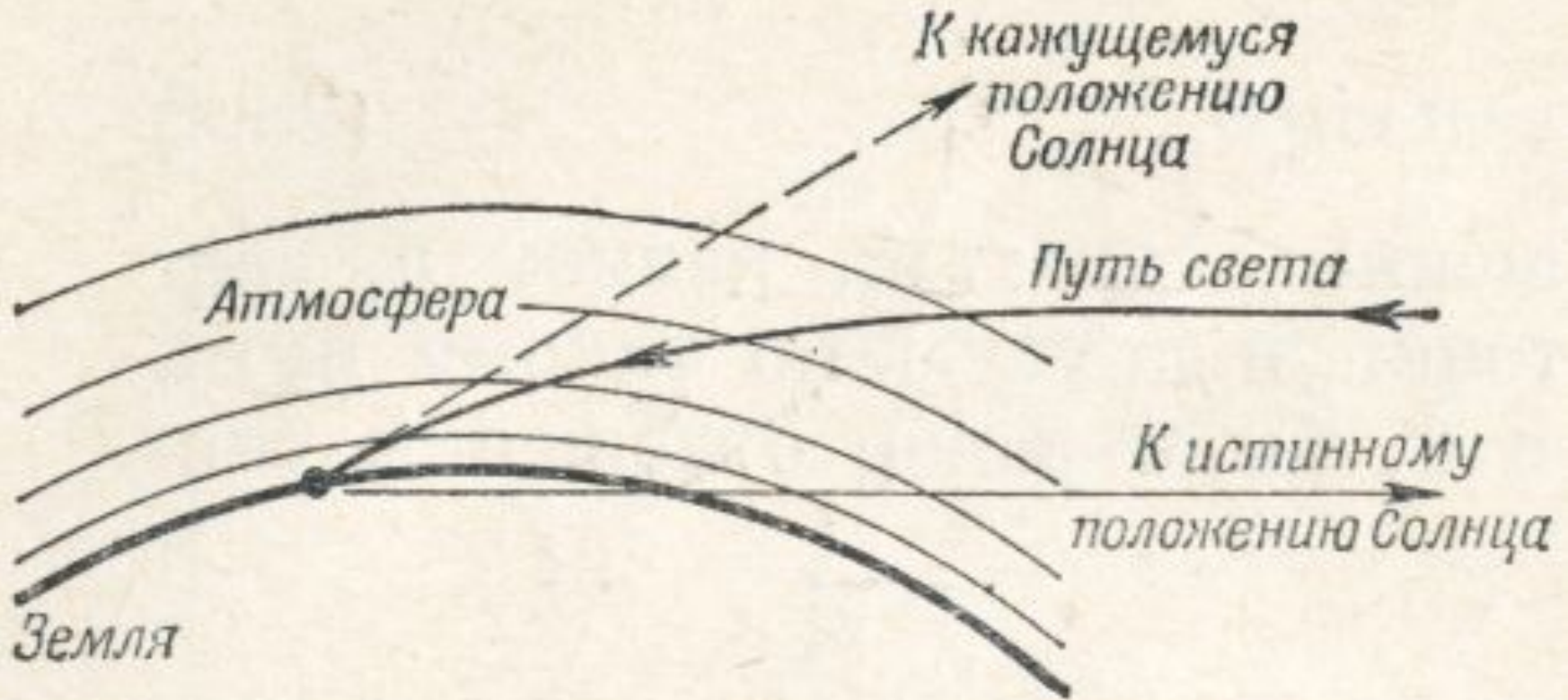
Ферма Пьер (1601 – 1665) – французский математик и физик. Родился в Бомон-де-Ломань. Получил юридическое образование. С 1631 г. был советником парламента в Тулузе. Физические исследования относятся в большинстве к оптике, где он установил (примерно в 1662 г.) основной принцип геометрической оптики (принцип Ферма). Аналогия между принципом Ферма и вариационными принципами механики сыграла значительную роль в развитии современной динамики и теории оптических инструментов.

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

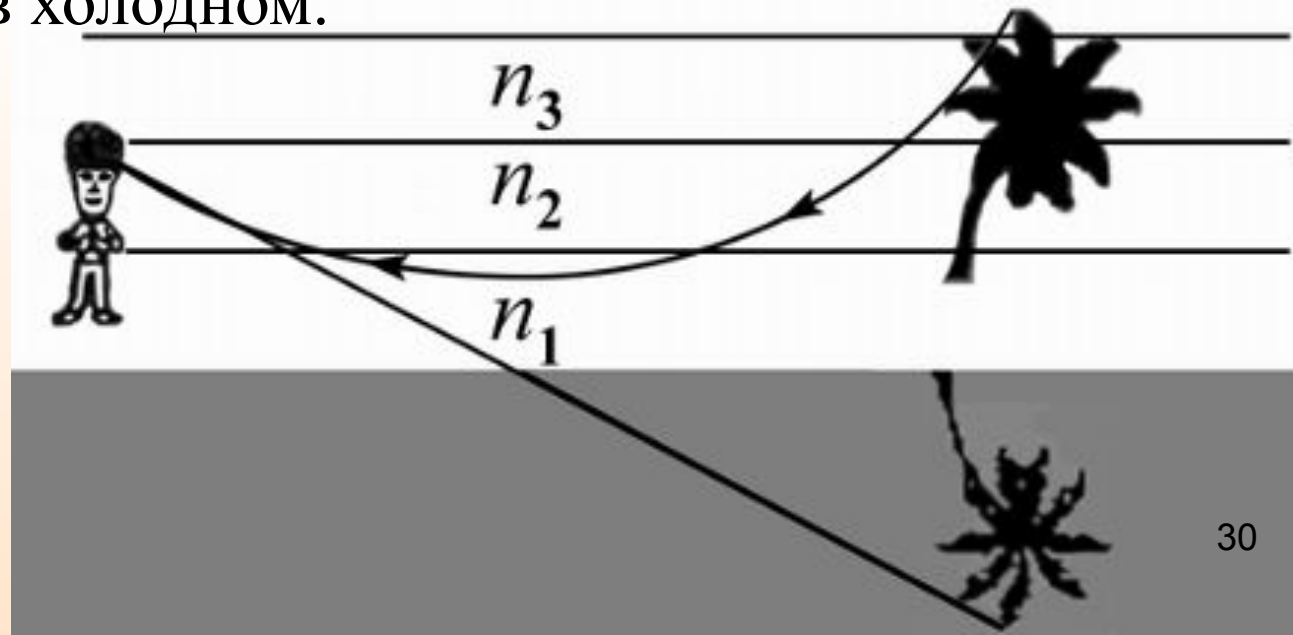


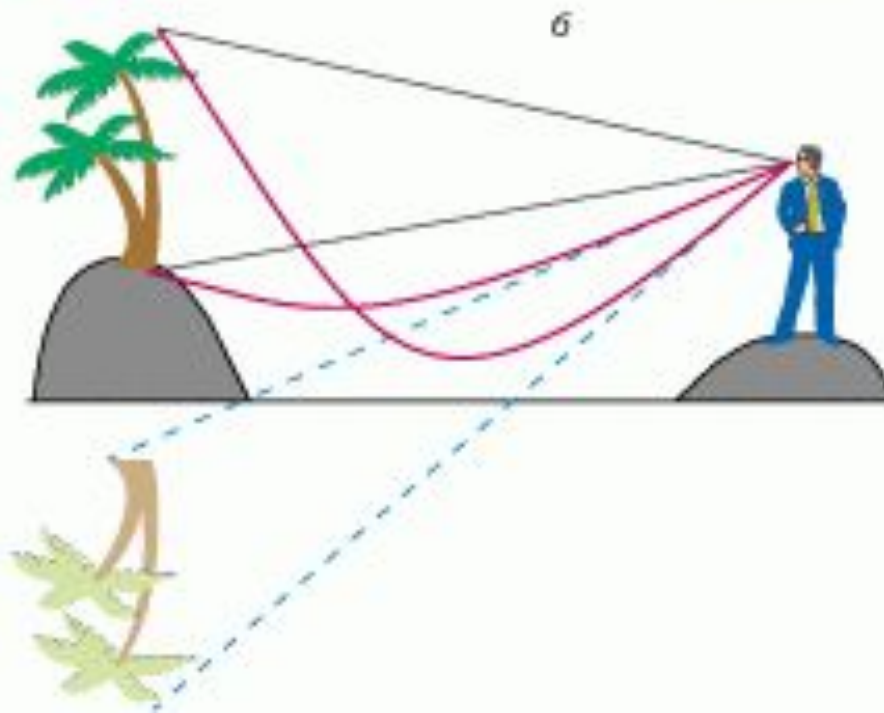
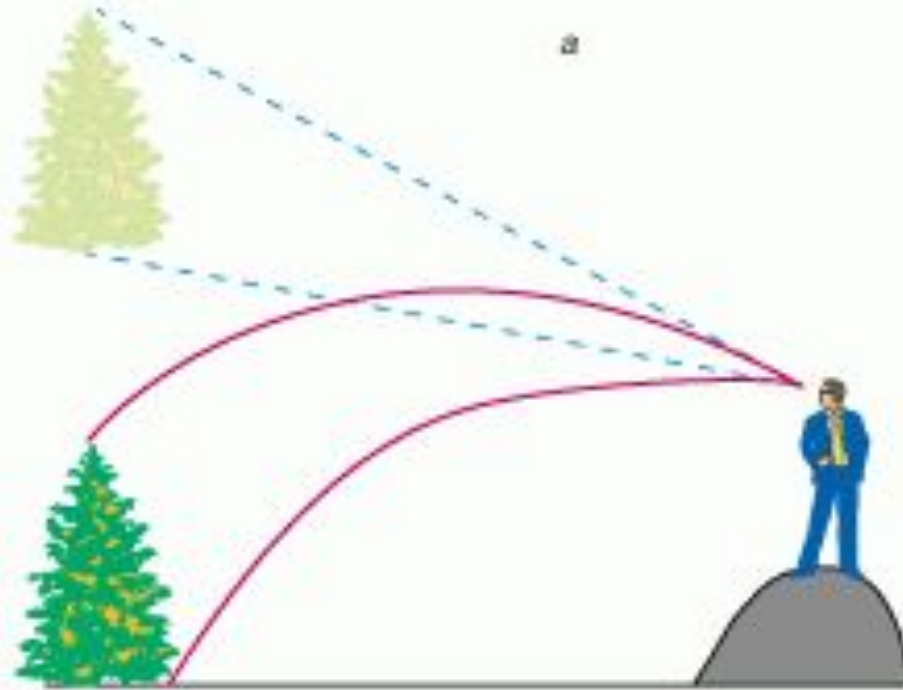
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n$$

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

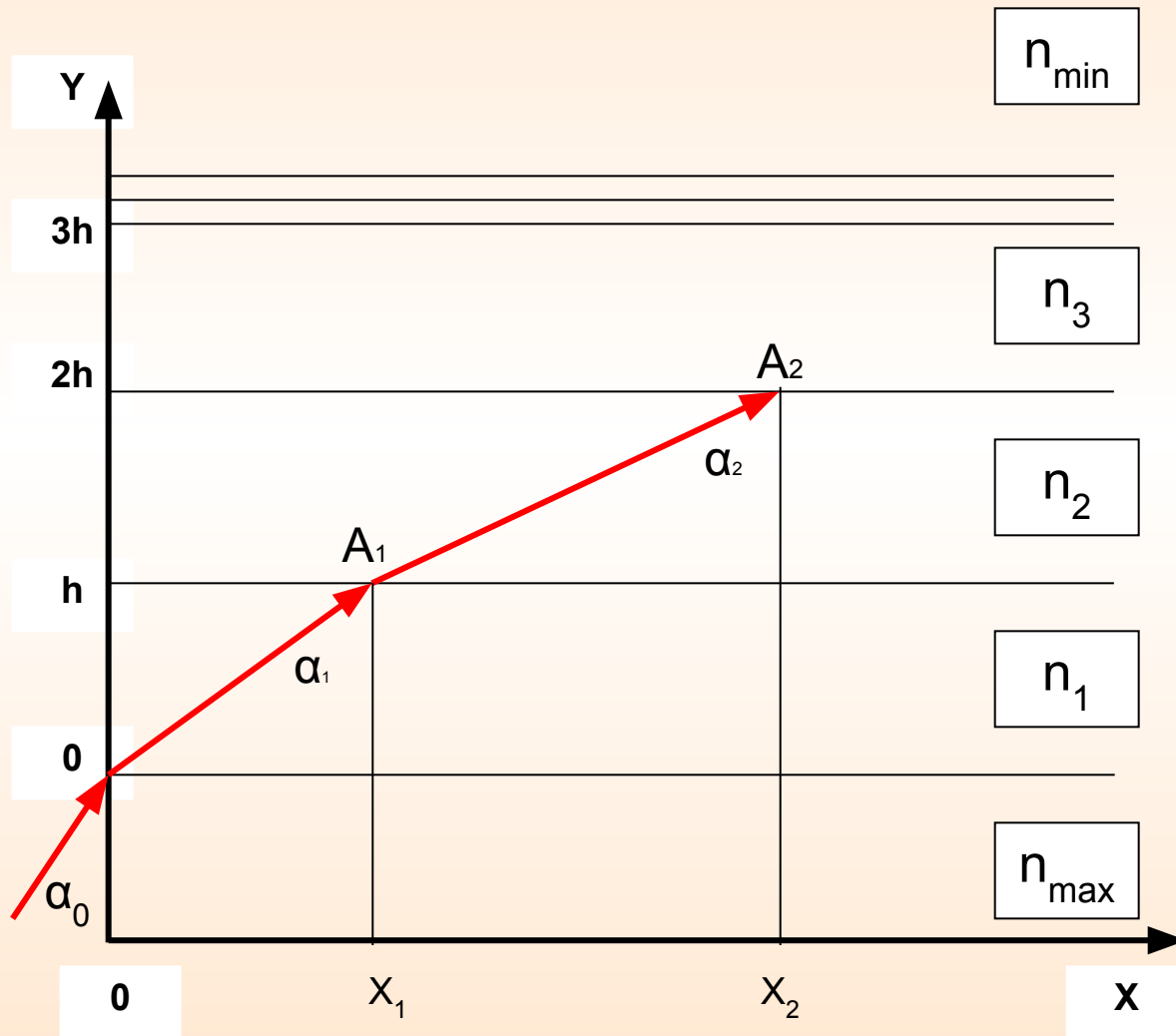


Еще пример того же рода – *мираж*, который часто наблюдают путешественники на раскаленных солнцем дорогах. Они видят впереди оазис, а когда подходят туда, то кругом оказывается песок. Сущность явления в следующем. То, что мы видим в этом случае, это прошедший над песком свет. На рис. показано, как падающий 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 и скорость света в нем больше, чем в холодном.





Модель неоднородной среды



$$\sin \alpha_i = \frac{n_{\max} \sin \alpha_0}{n_{\max} - ik}$$

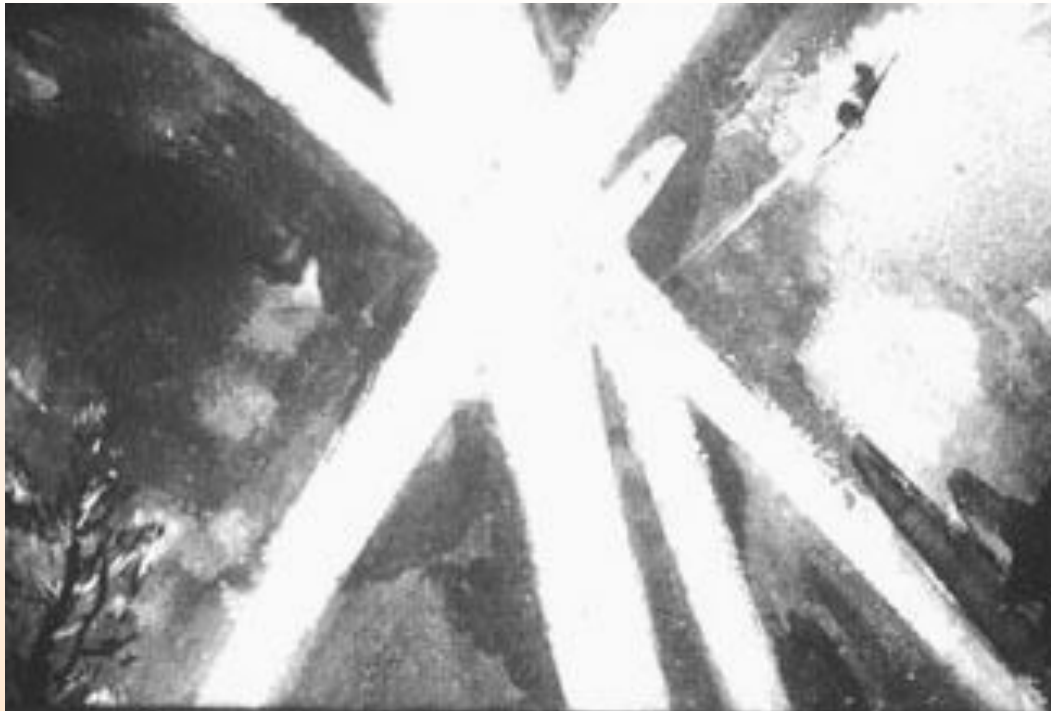
Криволинейное распространение луча в неоднородной среде



2. Закон независимости световых пучков:

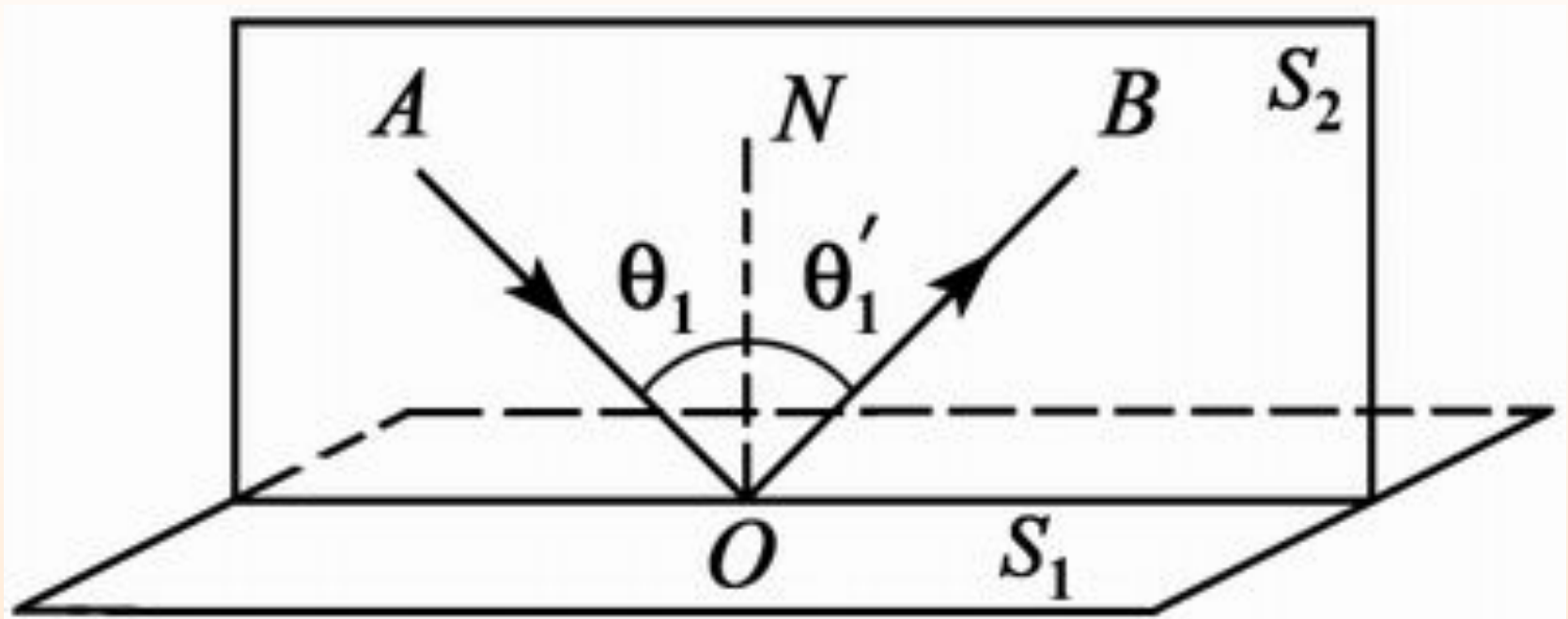
эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены.

Разбивая световой поток на отдельные световые пучки (например, с помощью диафрагм), можно показать, что действие выделенных световых пучков независимо.



3. Закон отражения

- *Угол падения равен углу отражения.*
- *Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, к границе раздела двух сред в точке падения.*



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.

Принцип Гюйгенса

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



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

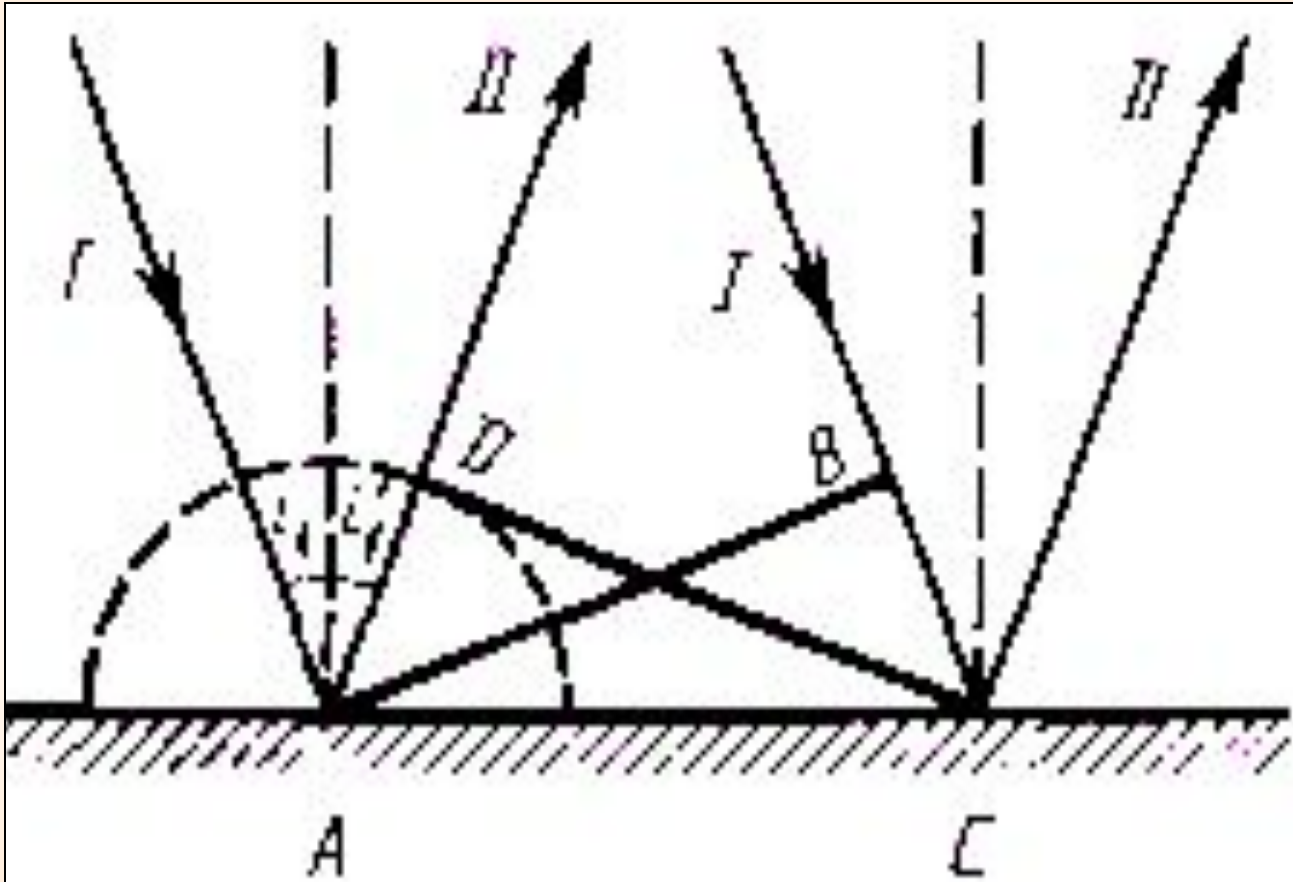
французский физик

Броли, Франция (Broglie, France)

Ville-d'Avray, France

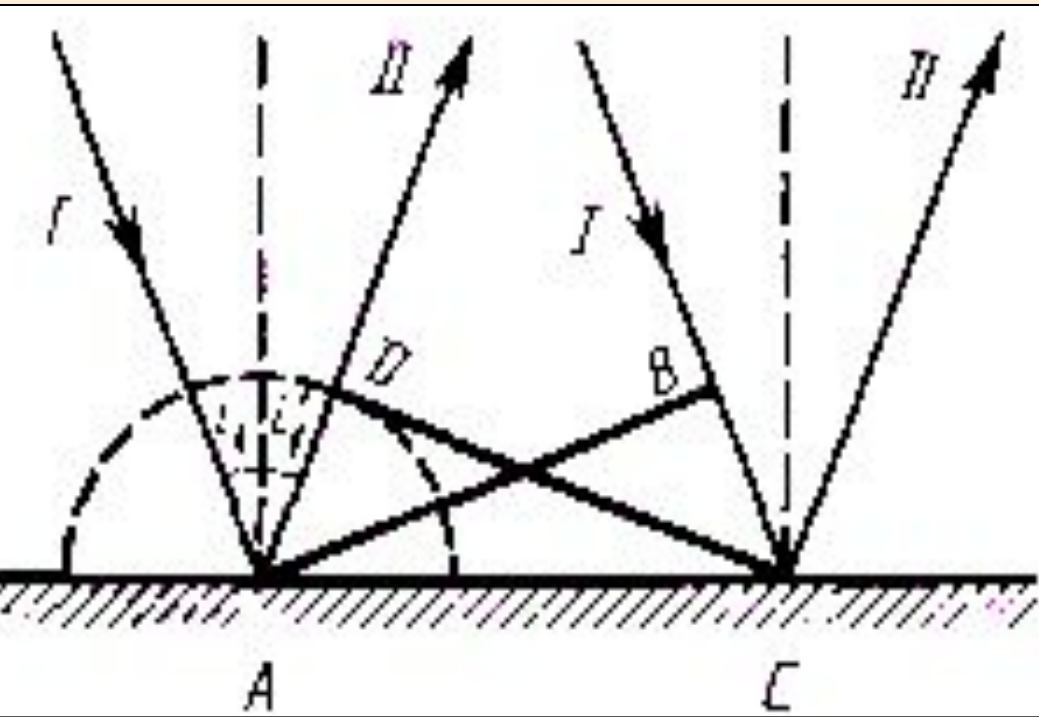


Для доказательства закона отражения
рассмотрим рисунок:



угол падения i_1 равен углу отражения i'_1 : $i'_1 = i_1$.

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

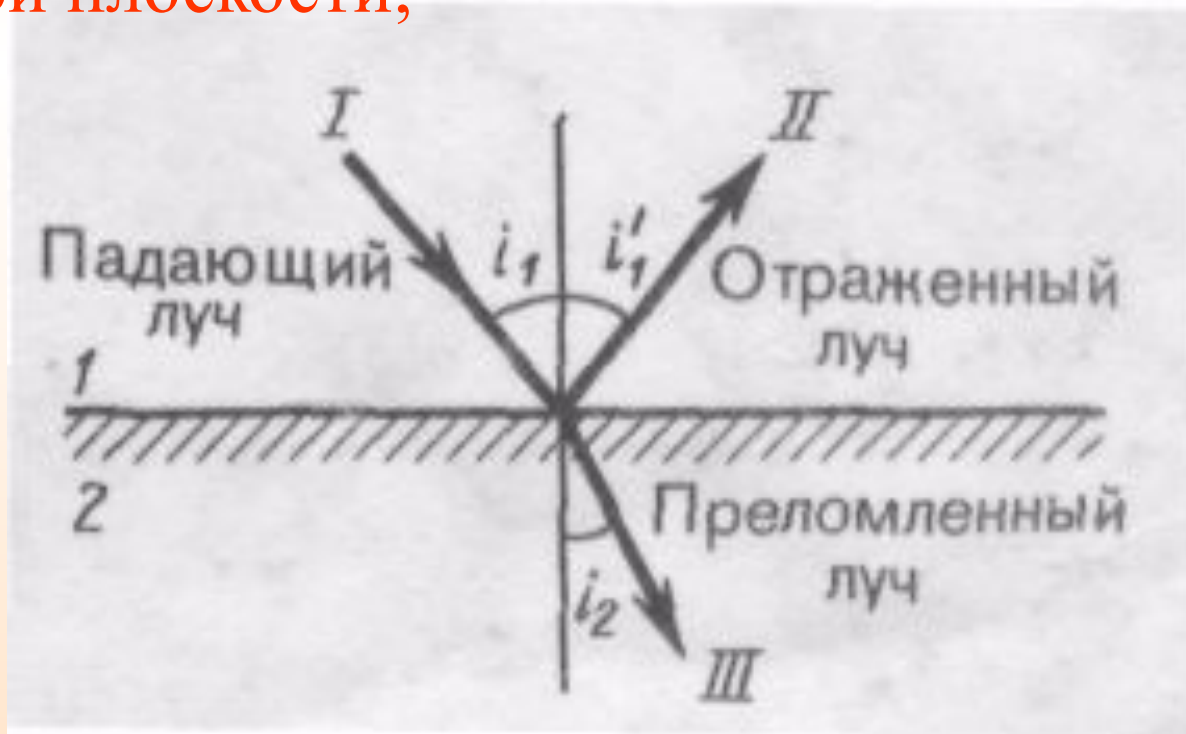


Для прохождения волной расстояния BC требуется время $\Delta t = BC/v$. За это же время фронт вторичной волны достигнет точек полусферы, радиус AD которой равен $v\Delta t = BC$. Положение фронта

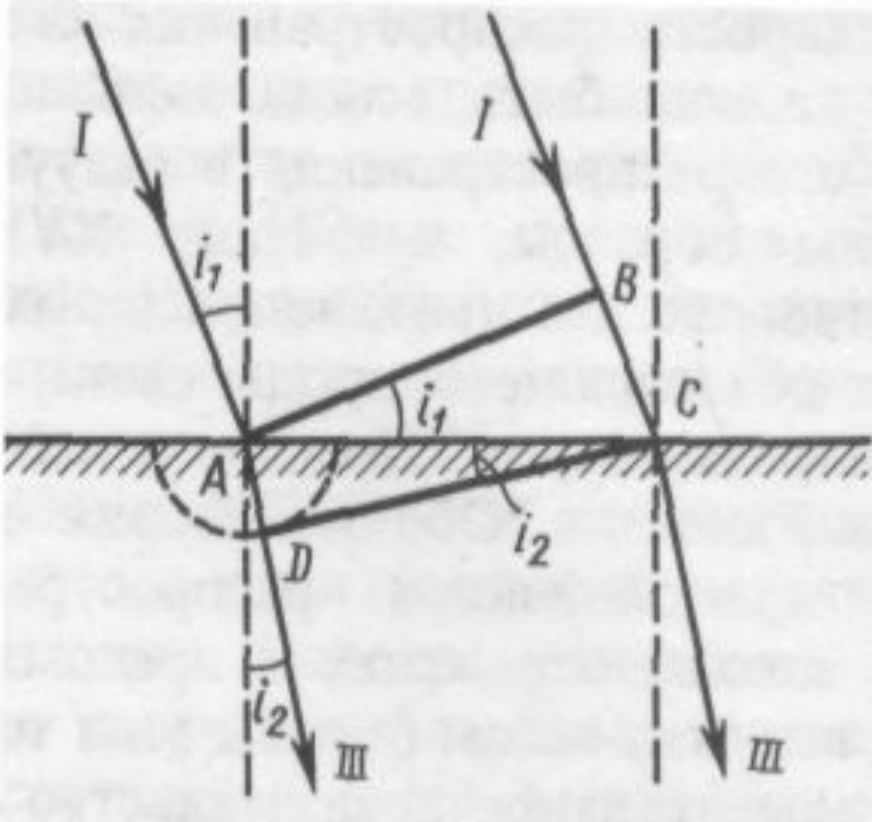
отраженной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью DC , а направление распространения этой волны — лучом II . Из равенства треугольников ABC и ADC вытекает **закон отражения**: **угол отражения i'_1 равен углу падения i_1** .

4. Закон преломления:

- *отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред:*
- *луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости;*



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



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 **Δt** .

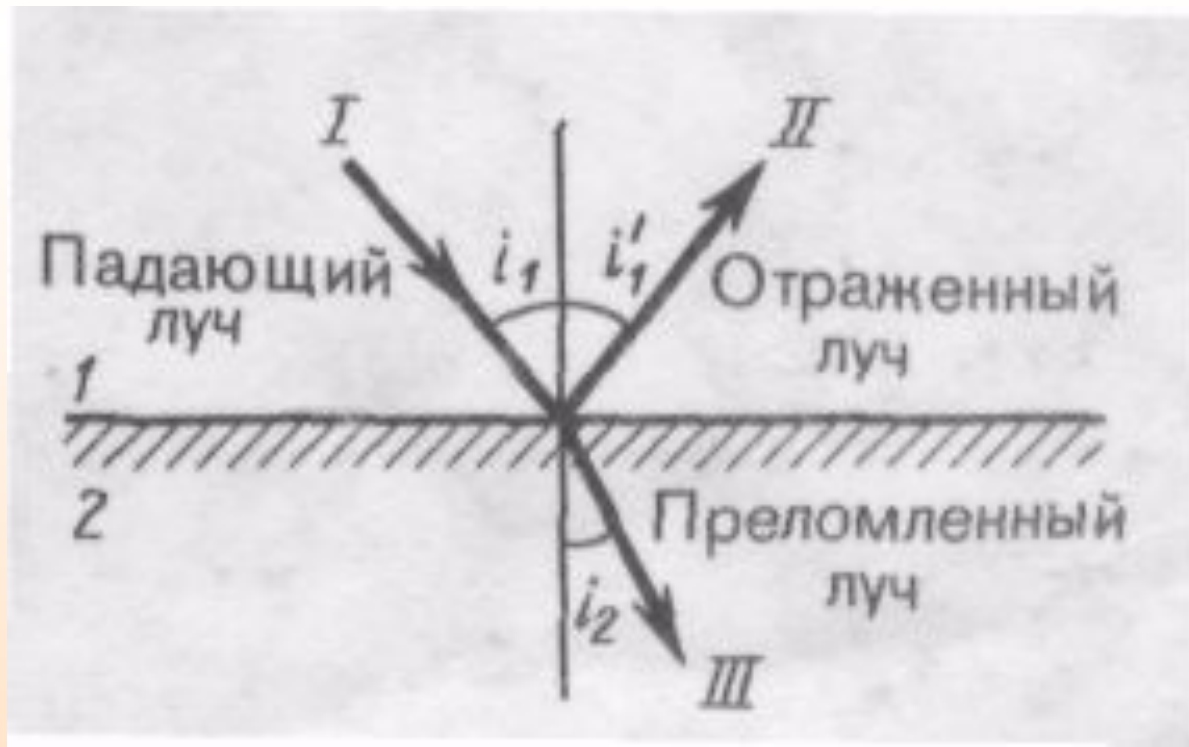
Тогда **$BC = c\Delta t$** . За это же время фронт волны, возбуждаемой точкой ***A*** в среде со скоростью ***v***, достигнет точек полусферы, радиус которой **$AD = v\Delta t$** . Положение фронта преломленной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью ***DC***, 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. $c \Delta t / \sin i_1 = v \Delta t / \sin i_2,$

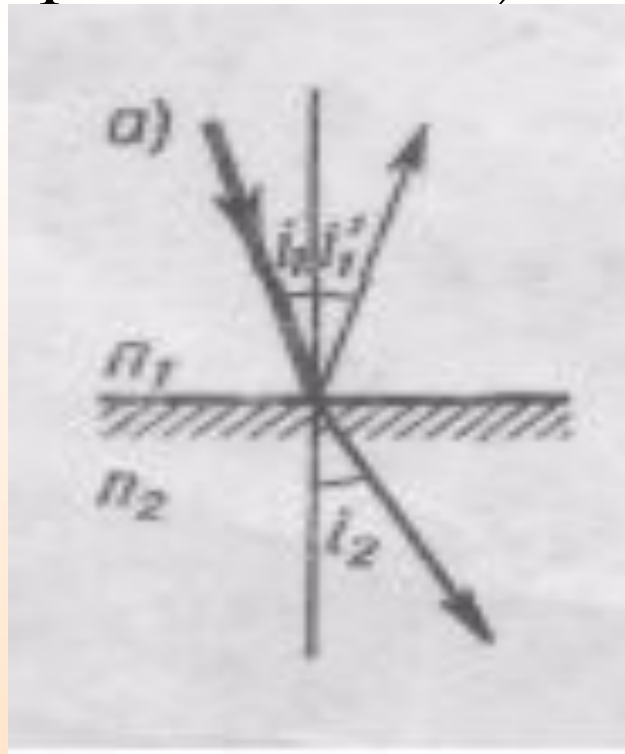
Из симметрии этого выражения вытекает **обратимость световых лучей**:
если обратить луч III , заставив его падать на границу раздела под углом i_2 , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом i_1 , т. е. пойдет в обратном направлении вдоль луча I .



Явление полного отражения.

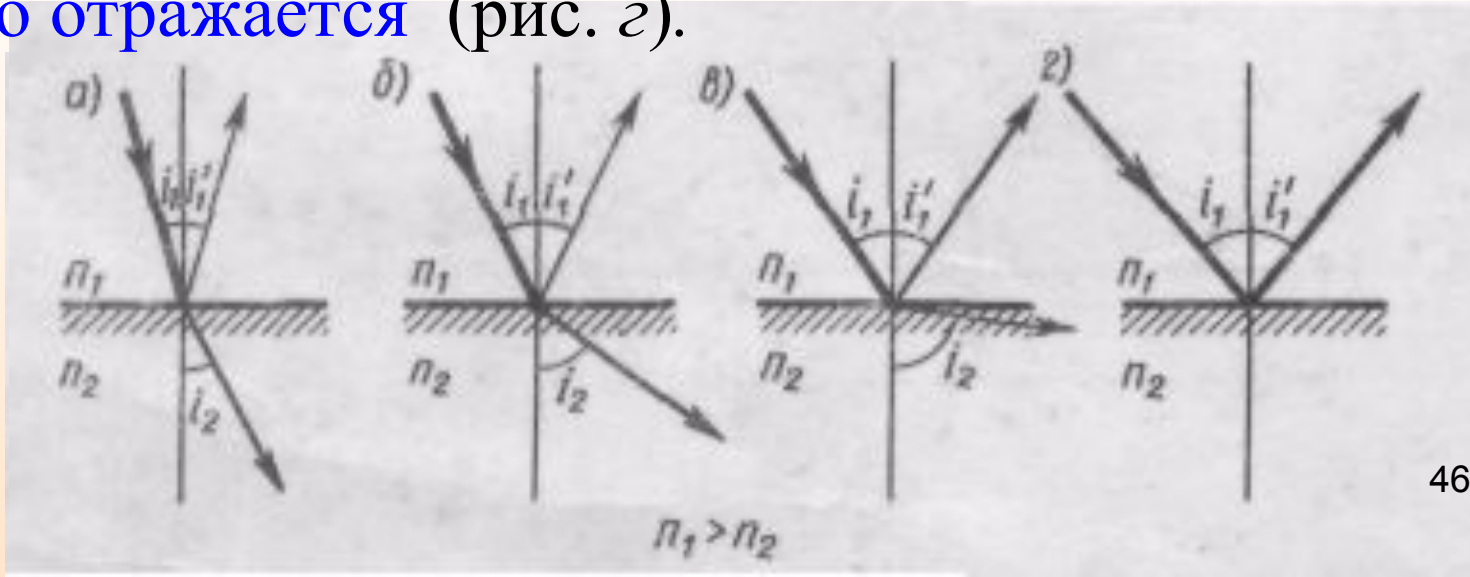
Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления n_1 (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления n_2 ($n_1 > n_2$), например из стекла в воду, то, согласно закону преломления, *преломленный луч удаляется от нормали* и угол преломления i , больше, чем угол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

$$n_1 > n_2$$

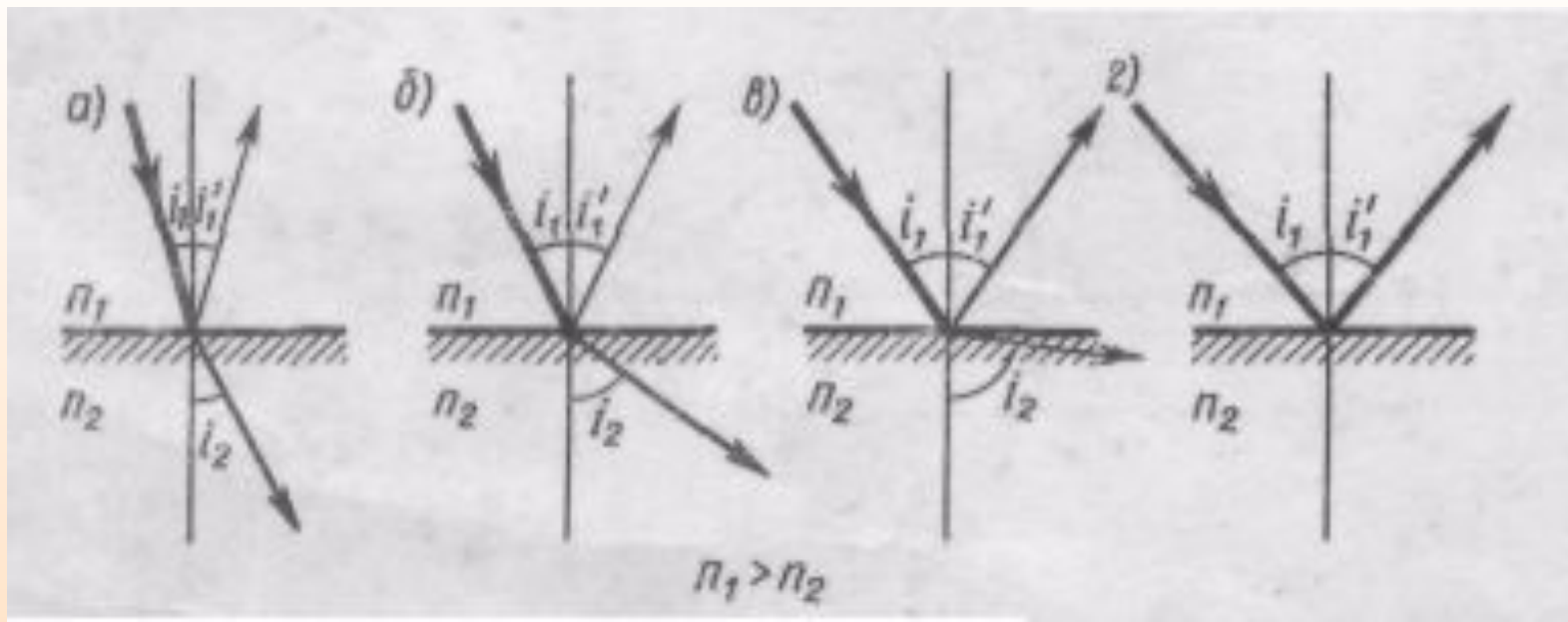


- С увеличением угла падения увеличивается угол преломления (рис. б, в), до тех пор пока при некотором угле падения ($i_1 = i_{\text{пр}}$) **угол преломления не окажется равным $\pi/2$** .
- **Угол $i_{\text{пр}}$ называется *предельным углом*.**
- Если $i_1 = i_{\text{пр}}$, то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего (рис. г).

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



- Таким образом, при углах падения в пределах от $i_{\text{пр}}$ 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} определим из формулы

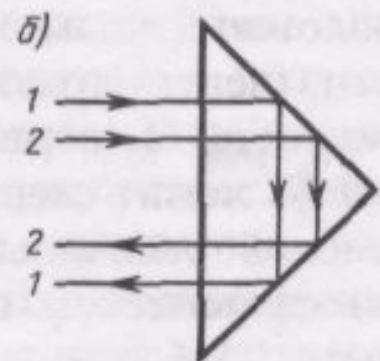
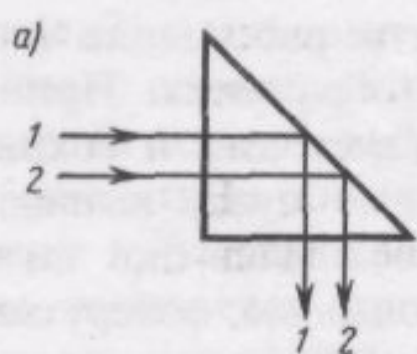
$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2.$$

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

Тогда

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

Эти уравнения удовлетворяют 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.

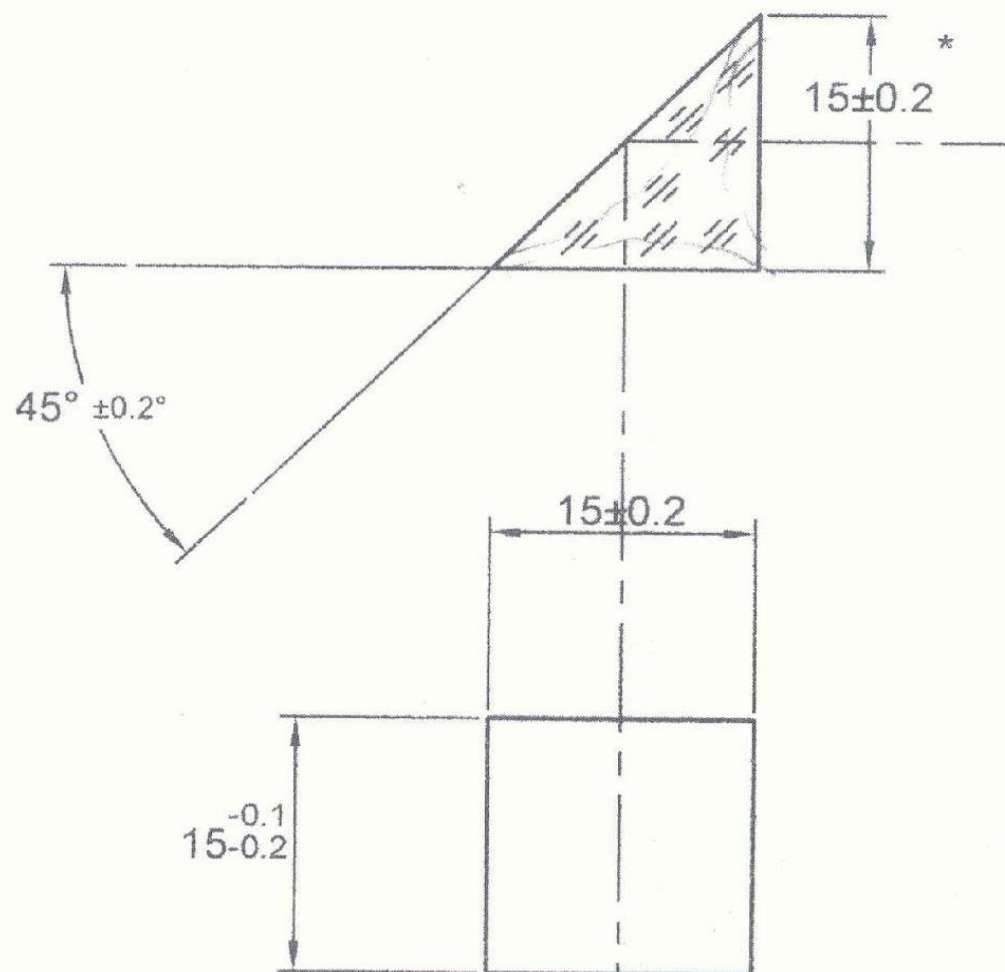
Показатель преломления стекла равен $n \approx 1,5$, поэтому предельный угол для границы стекло – воздух

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

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

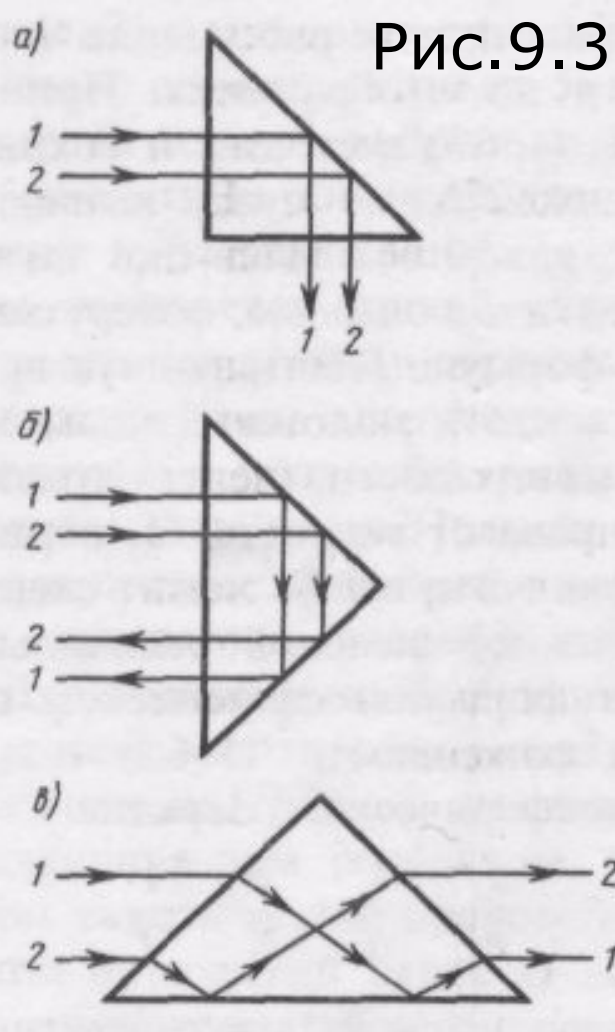
На рис. а — в показаны призмы полного отражения, позволяющие:

- а) повернуть луч на 90° ;
- б) повернуть изображение:
- в) обернуть лучи.



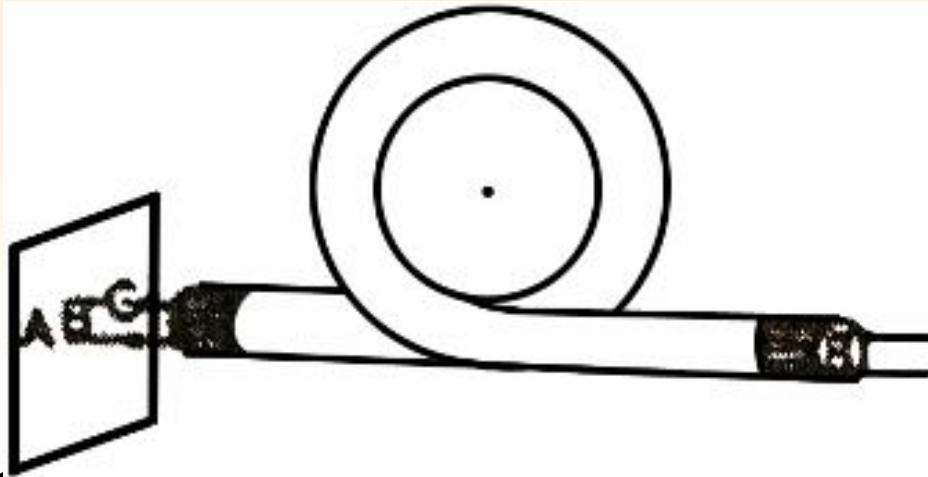
* Размер для справок

Дв. лучепр.	
Светопогл.	
Бессвильн.	
Пузырность	
N	
ΔN	
P	
Φ	
C	0
ΔR	
f	
S' _{F'}	
S _F	
св. Φ	6
λ	589,3

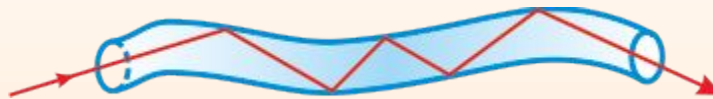


Такие призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел (по закону преломления, измеряя $i_{\text{пр}}$, определяем относительный показатель преломления двух сред, а также абсолютный показатель преломления 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.



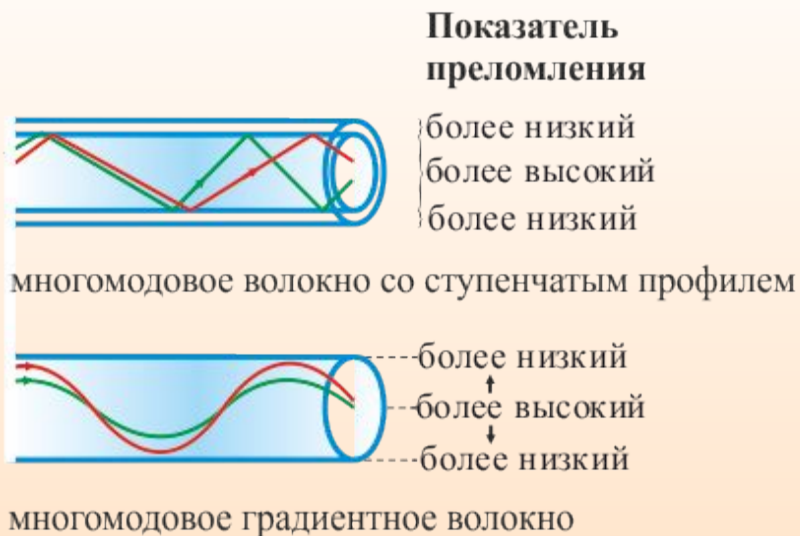
В волокнах используется **двухслойное** волокно, световедущая жила (сердцевина) которого окружается стеклом — оболочкой из другого стекла с меньшим показателем преломления.



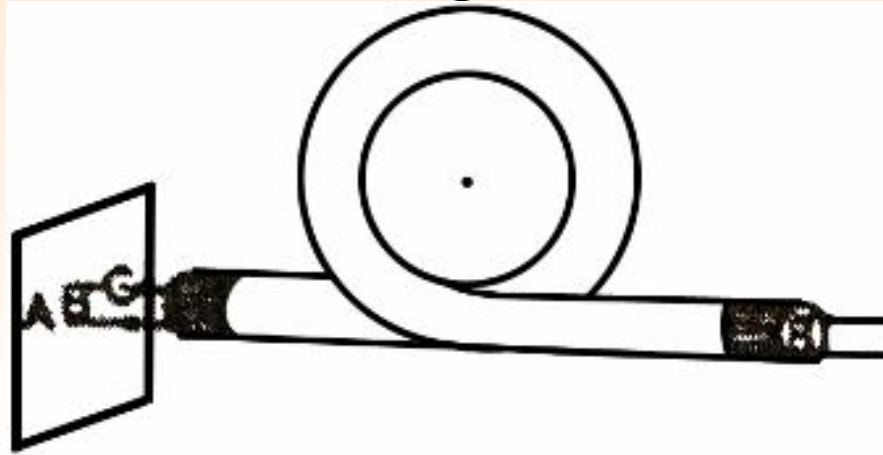
Свет, падающий на торец световода **под углами, большими предельного**, претерпевает на поверхности раздела сердцевины и оболочки **полное отражение** и распространяется только по световедущей жиле.

В *волоконно - оптических* деталях световые сигналы передаются по светопроводам с одной поверхности (торца светопровода) на другую (выходную), как совокупность элементов изображения, каждый из которых передается по своей светопроводящей жиле.

В волоконных деталях обычно применяют стеклянное волокно, световедущая жила которого (сердцевина) имеет высокий показатель преломления и окружена стеклом (оболочкой) с более низким показателем преломления. Вследствие этого на поверхности раздела сердцевины и оболочки лучи претерпевают полное внутреннее отражение и распространяются только по световедущей жиле. Коэффициент пропускания светопроводов в видимой области спектра составляет 30...70 % при длине 1 м.



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 микрон до нескольких миллиметров. Для передачи изображений, как правило, применяются многожильные световоды.



Этот телефонный провод содержит 144 оптических 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 так же в электронно-лучевых трубках, в электронно-счетных машинах, для кодирования информации, в медицине (например, диагностика желудка), для целей интегральной оптики

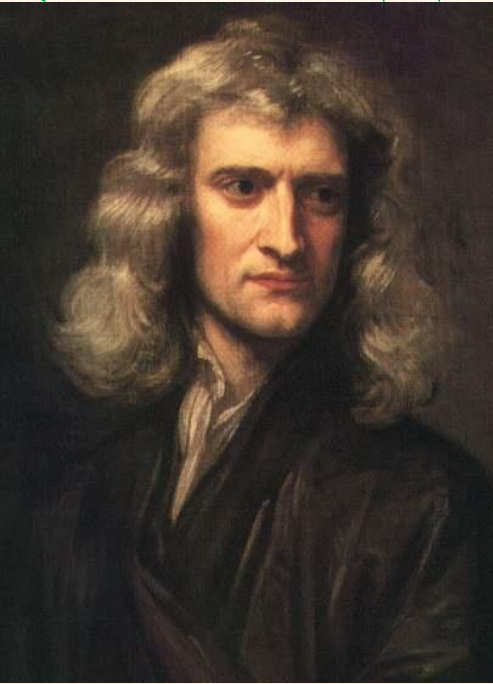
7.3 Развитие взглядов на природу света

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).



Из представлений корпускулярной теории **Ньютон** легко **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).

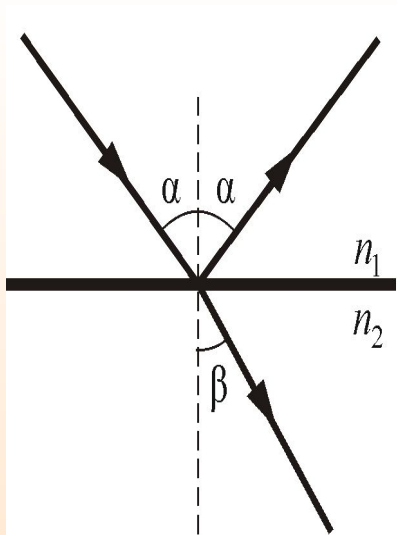


Рисунок 7.1

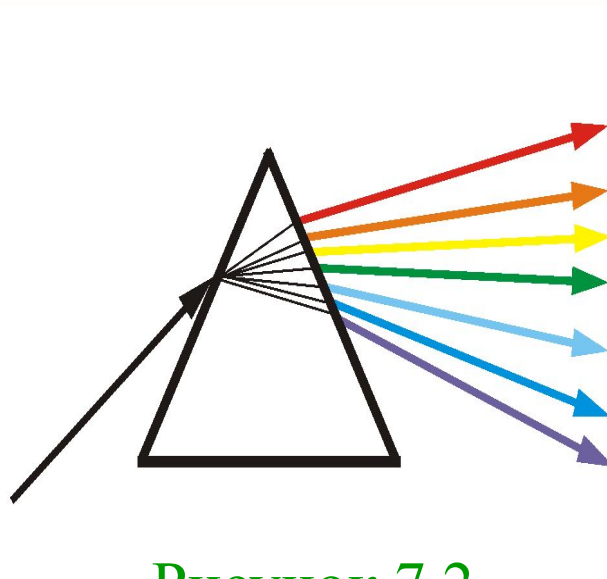


Рисунок 7.2

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

Исаак Ньютон

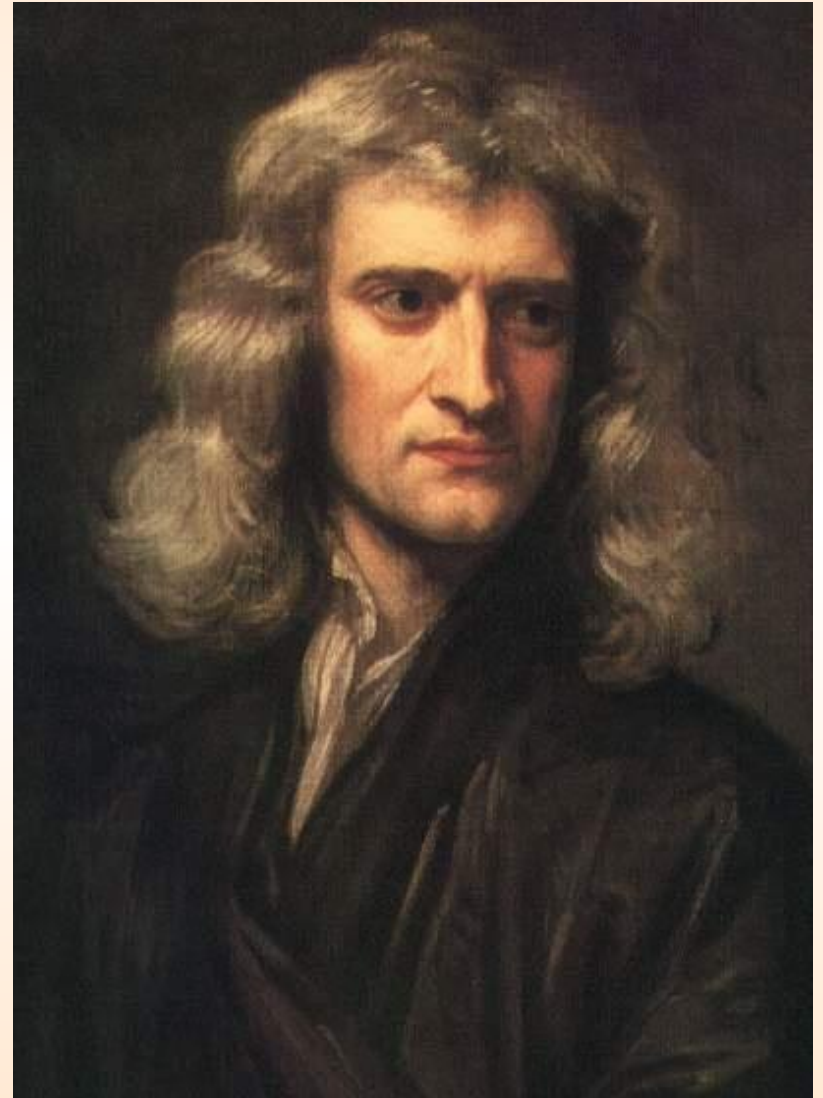
(Isaac Newton)

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

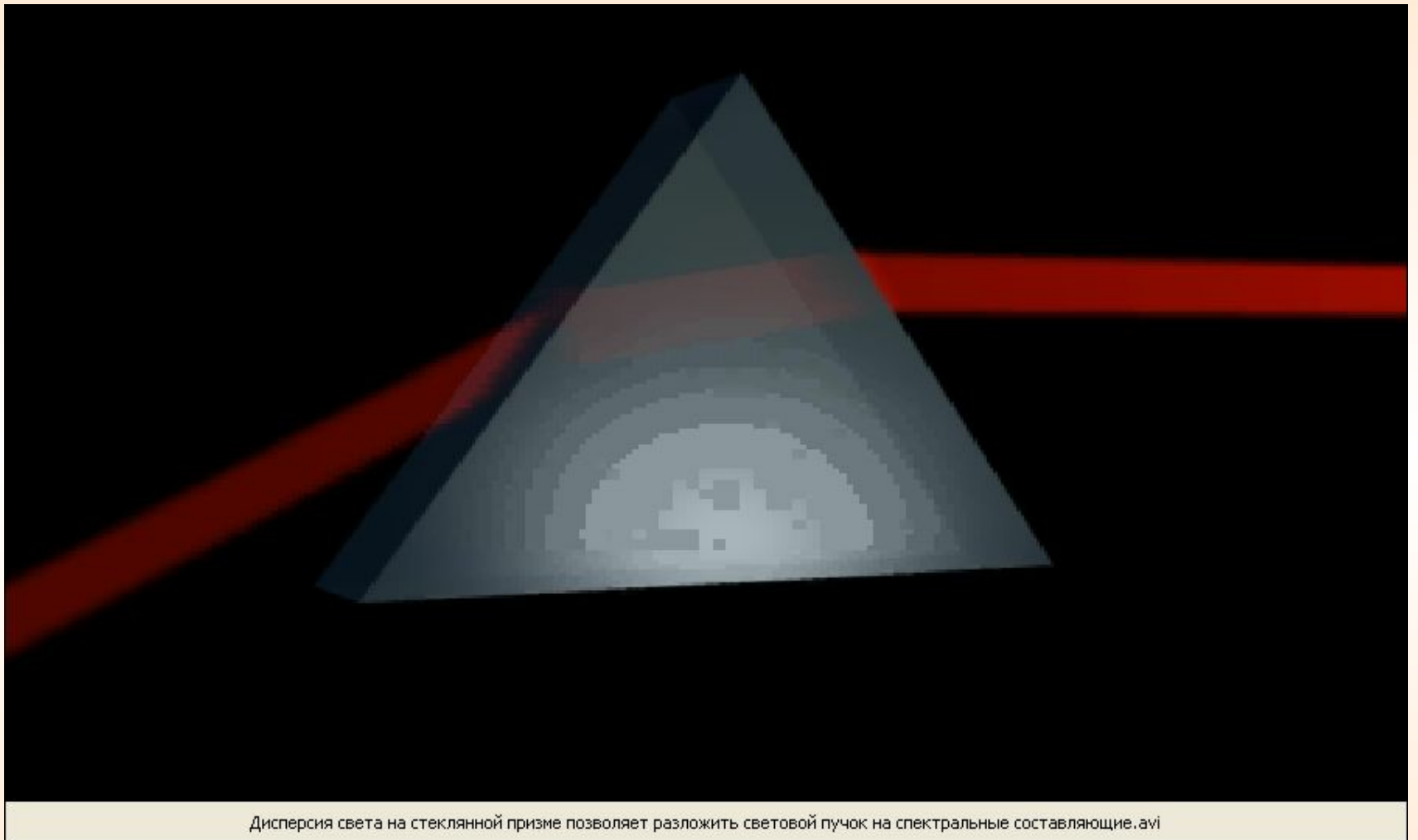
**физик, математик, астроном,
алхимик и философ**

Важнейшие работы

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







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





профессор 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.

ахроматический. Все исследования Фраунгофера посвящены дифракции 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 потом⁶⁴ от многих. Большой заслугой учёного является



Араго Доминик Франсуа (26.II.1786 - 2.X.1853) - французский учёный, член Парижской академии наук (с 1809 года), с 1830 года - непереманный 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



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 он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

электродинамике лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

физике лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

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

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

статистике лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

статистике лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

статистике лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

статистике лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

статистике лаборатория в Кембридже, которую он и возглавлял до конца жизни. Научные труды посвящены

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 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 ν — 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.

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.*

7.4 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 ν .

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

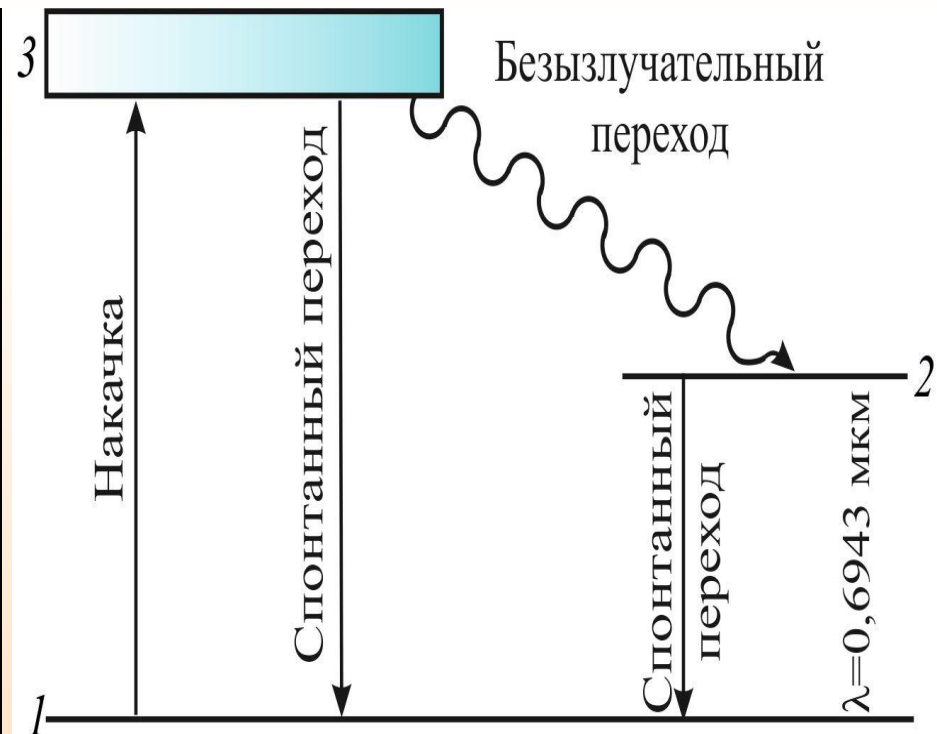
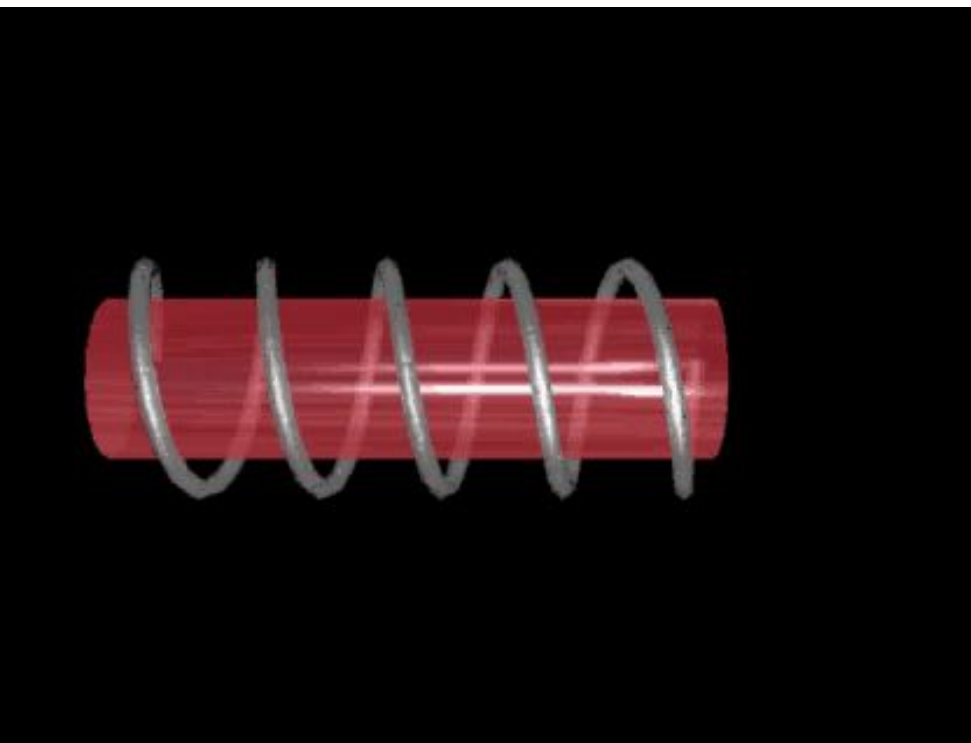
Двойственность природы света — наличие у него одновременно характерных черт, присущих и волнам, и частицам, — является частным случаем *корпускулярно-волнового дуализма*.

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).

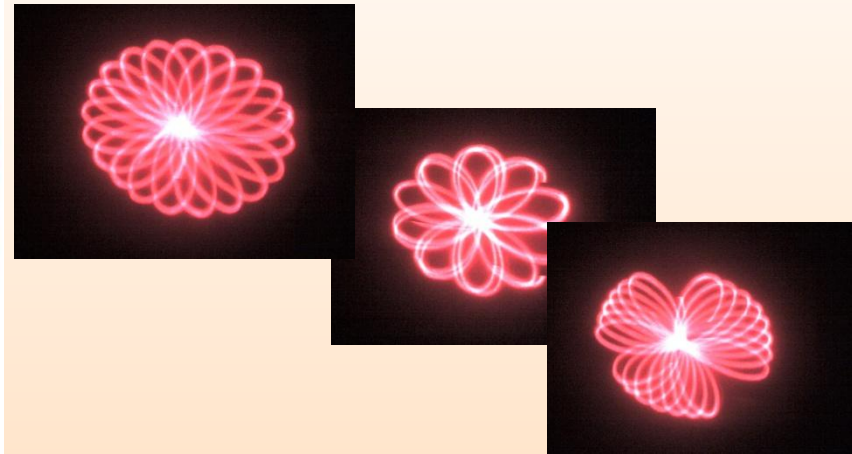
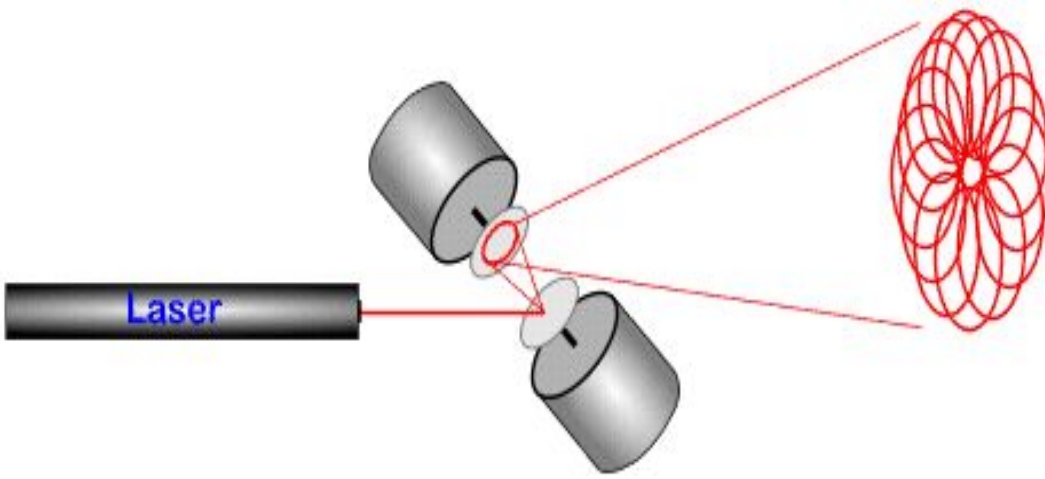
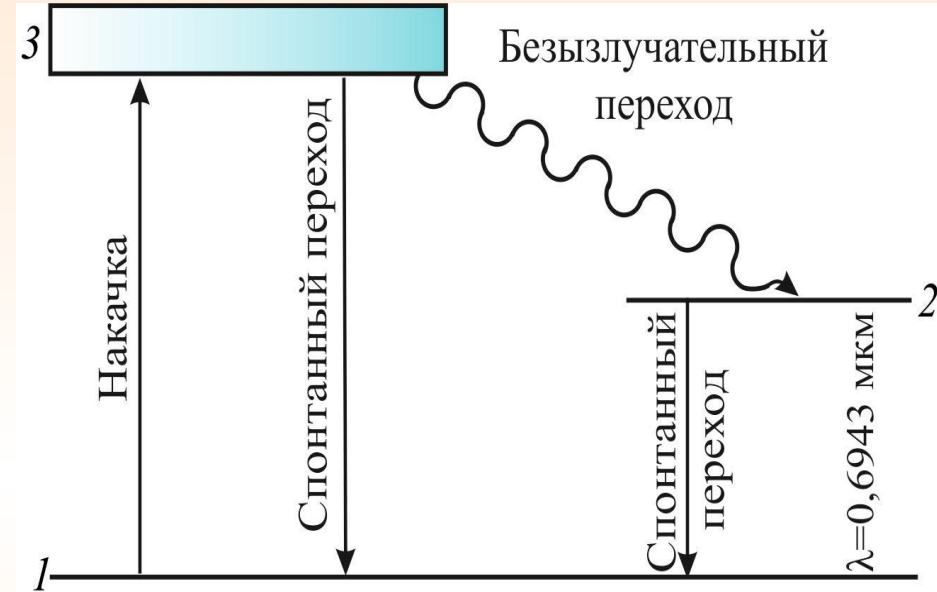
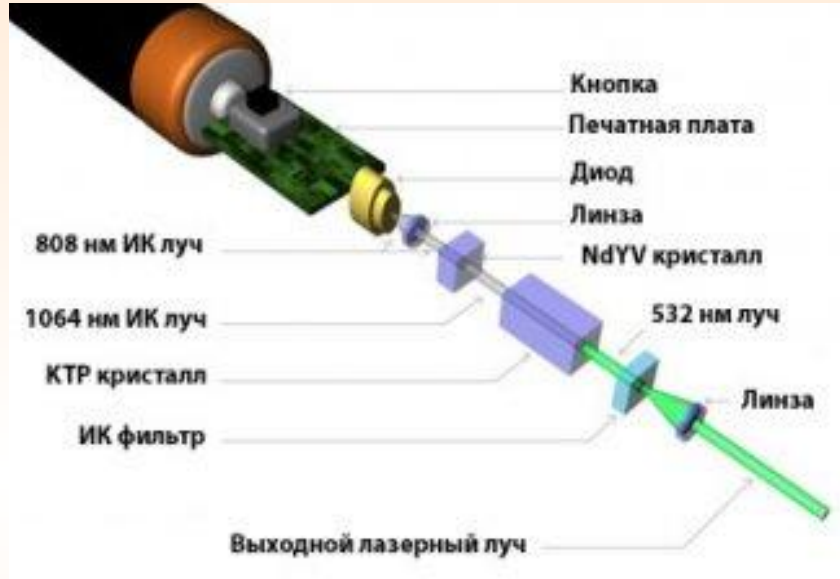
В физической оптике сформировалось новое направление, связанное с генерированием вынужденного излучения и созданием квантовых усилителей и квантовых генераторов излучения (мазеров и лазеров).

Излучение лазеров обладает большой временной и пространственной когерентностью, высокой монохроматичностью, предельно малой расходимостью пучка и при фокусировке позволяет получать недостижимые ни для каких других источников напряженности электрического поля.

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



Оптический квантовый генератор (лазер)



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

7.5 Основные характеристики световых волн

Корпускулярно-волновой дуализм:

свет в некоторых явлениях обладает свойствами, присущими частицам (корпускулярная теория), в других явлениях свойствами, присущими волнам (волновая теория).

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;

φ – начальная фаза.

Световой вектор - вектор напряженности электрического поля.

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

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*.



СПЕКТР

spectrum (лат.) - видение.

Шкала электромагнитных волн

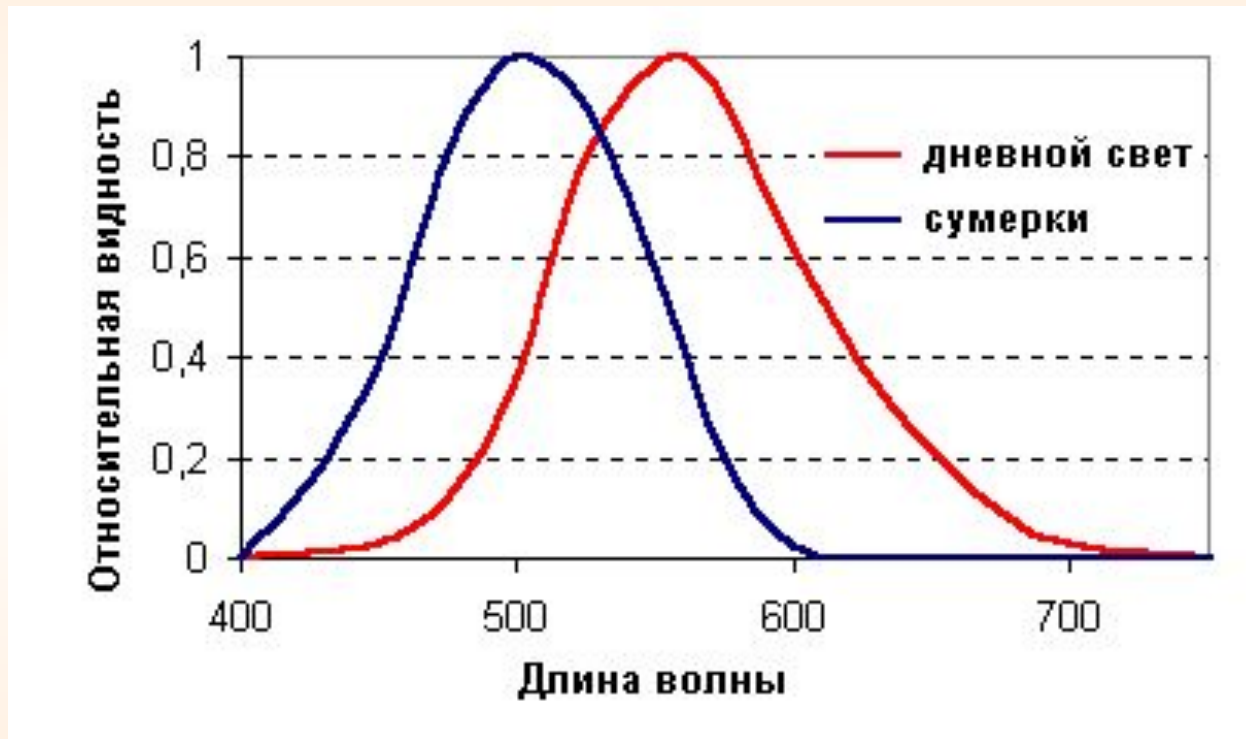


Видимый свет (в вакууме): $\lambda = [400$ (фиолетовый);
760 нм (красный)]

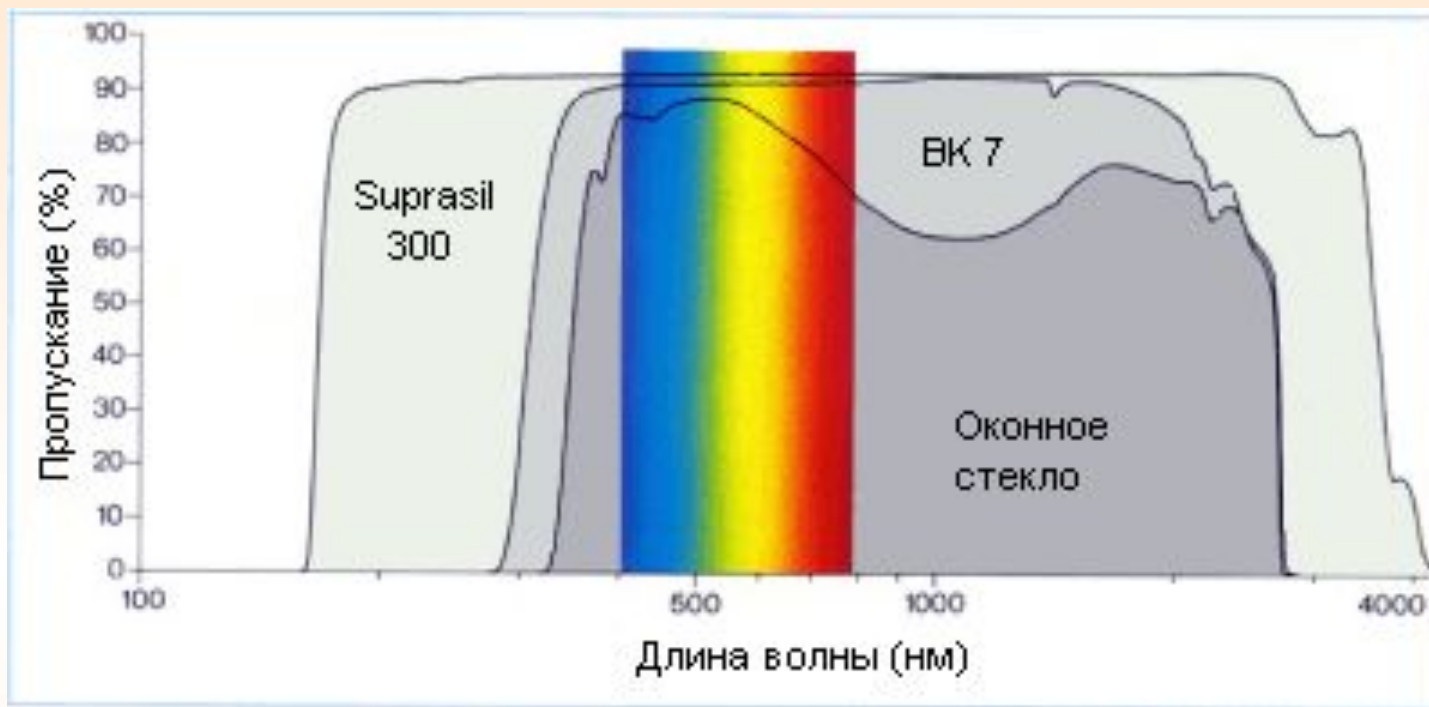


Согласно *теории цветового зрения* Юнга - Гельмгольца
ощущение любого цвета можно получить смешиванием
спектрально чистых излучений красного, зеленого и синего
ЦВЕТОВ

Кривая видности - относительная спектральная чувствительность глаза к излучениям различных длин волн



- максимальная чувствительность глаза при дневном свете —
на длине волны **555 нм**,
- при сумеречном свете - на длине волны **510 нм**.



Спектр оптического пропускания синтетического кварцевого стекла Suprasil 300, оптического стекла БК 7 и обычного стекла.

(кварцевое стекло вследствие малого количества примесей обладает чрезвычайно широким спектром пропускания и малым поглощением света (обычное оконное стекло поглощает столько же света, сколько и кварцевое стекло толщиной в 100 метров)).

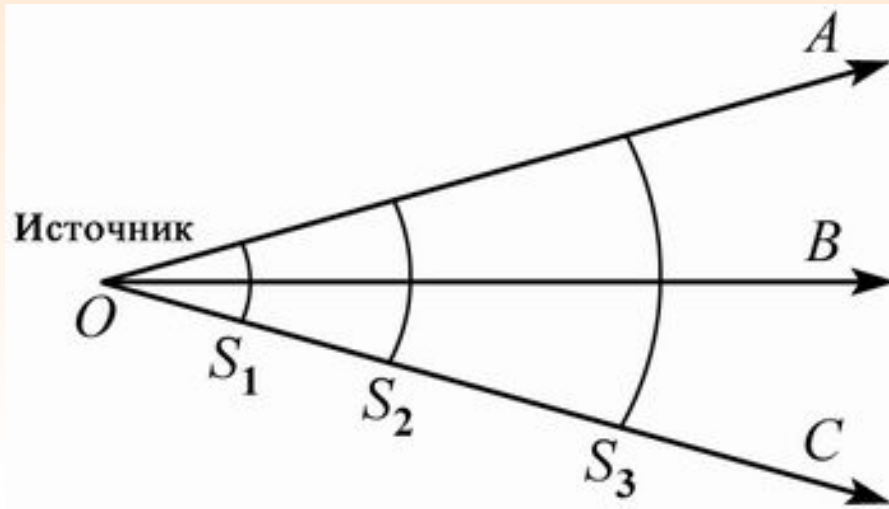
Интенсивность света – модуль среднего по времени значения плотности потока энергии, переносимой световой волной:

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

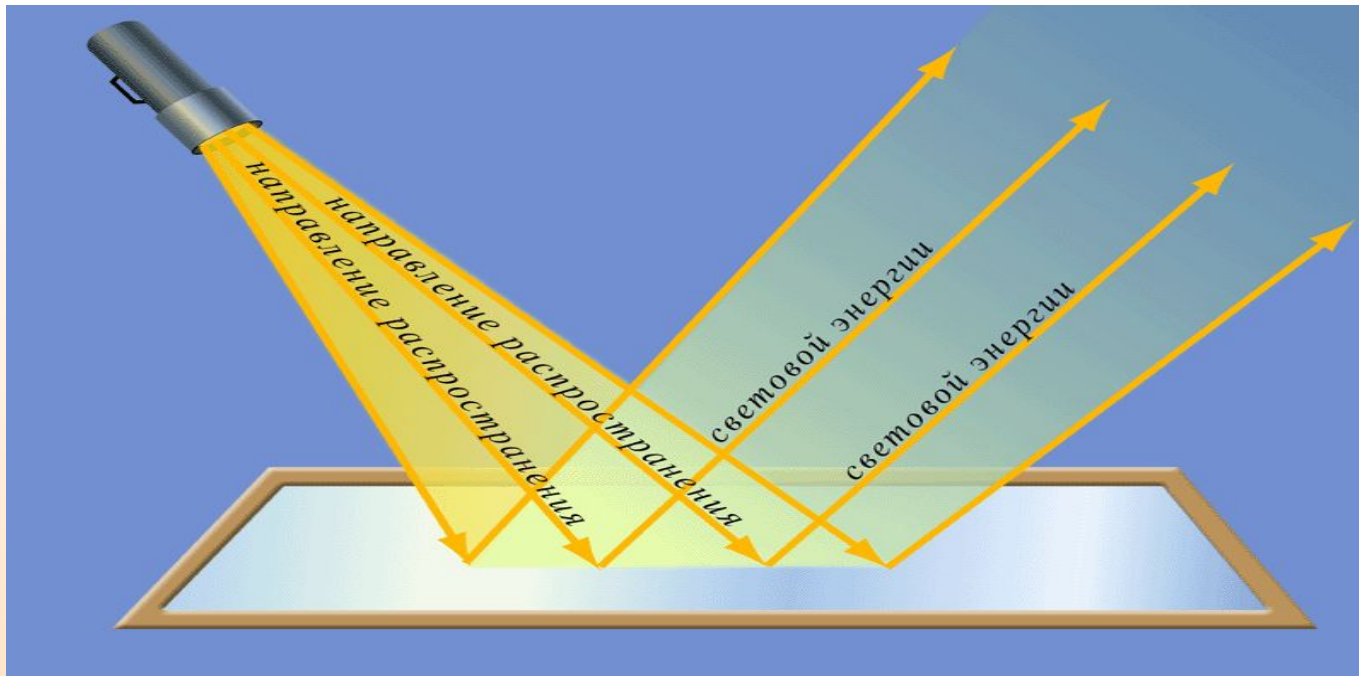
$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} n E_0^2 \sim n E_0^2$$

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

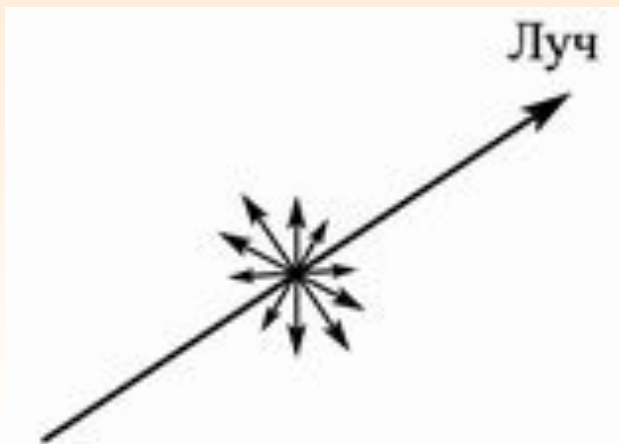
Луч – линия, вдоль которой распространяется световая волна.



- В изотропных средах лучи перпендикулярны к волновым поверхностям
- В анизотропных средах лучи не ортогональны волновым поверхностям



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



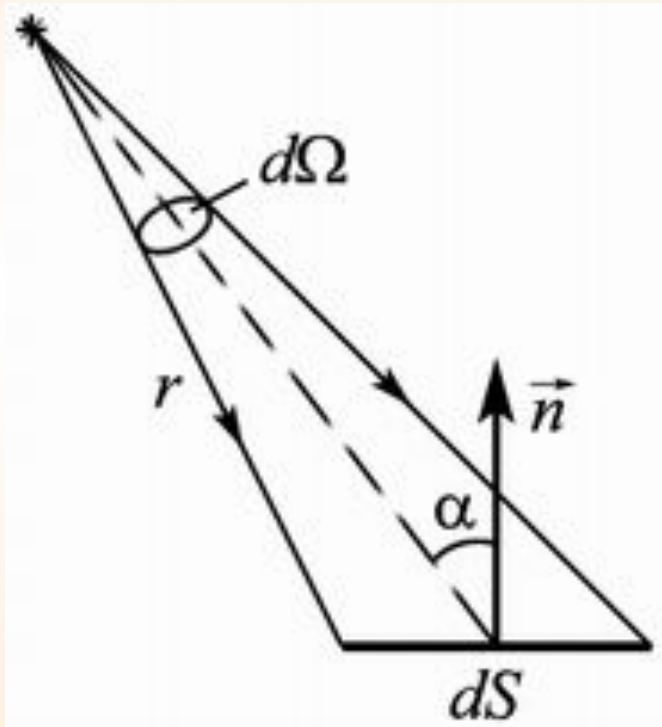
Излучение тела обусловлено волнами, испускаемыми его атомами:

длительность излучения атома $\sim 10^{-8}$ 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**.

7.6 Световые, или фотометрические величины



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

Если нормаль к площадке dS образует с направлением излучения угол α , то необходимо рассматривать ее проекцию – видимую величину площадки, если ее рассматривать под углом α к нормали:

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

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 1стерадиан:

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

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

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad [E] = \text{лк (люкс)}: \quad \text{лк} = \frac{\text{лм}}{\text{м}^2}$$

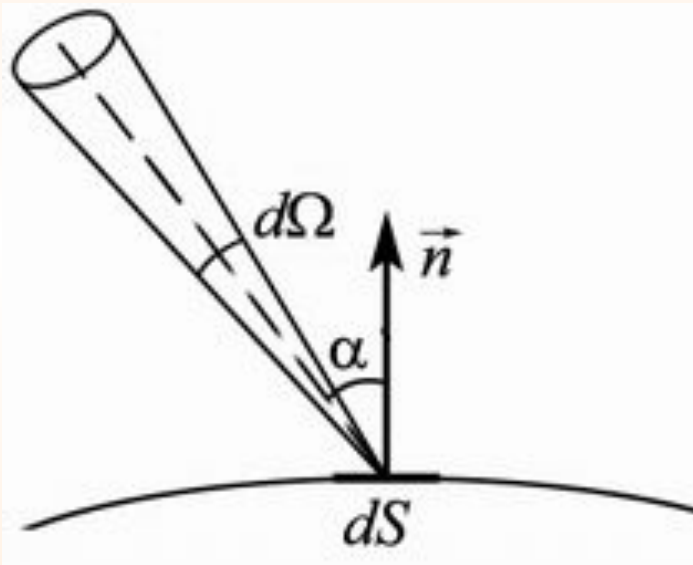
Для точечного источника

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha \quad - \text{закон обратных квадратов:}$$

- 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 ($L = \text{const}$):

$$M = \pi L$$

ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА!

