

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ И ВОЛНОВАЯ ОПТИКА. КОРПУСКУЛЯРНО-ВОЛНОВАЯ ТЕОРИЯ СВЕТА.

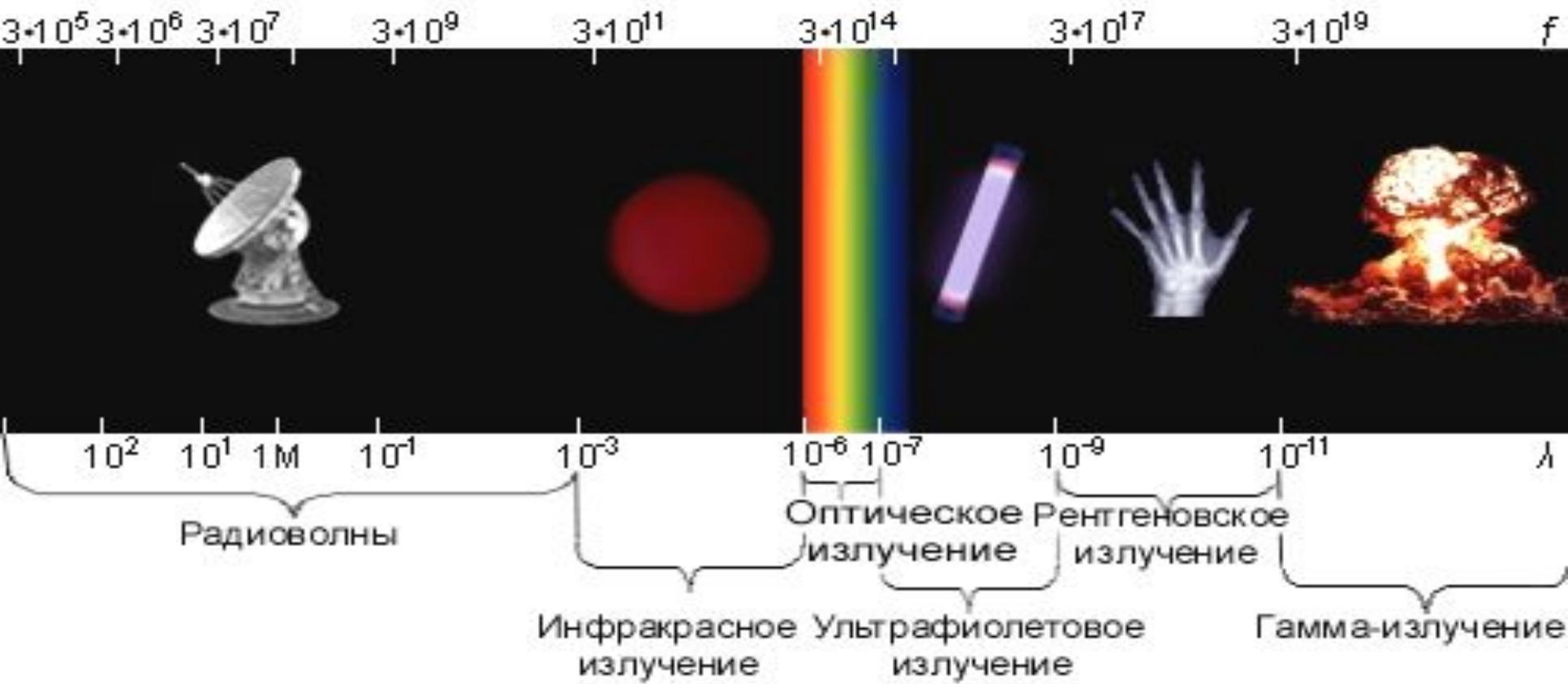
1. Оптическое излучение
2. Геометрическая оптика
3. Развитие взглядов на природу света
4. Корпускулярно-волновой дуализм
5. Основные характеристики световых волн
6. Световые, или фотометрические величины

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.**

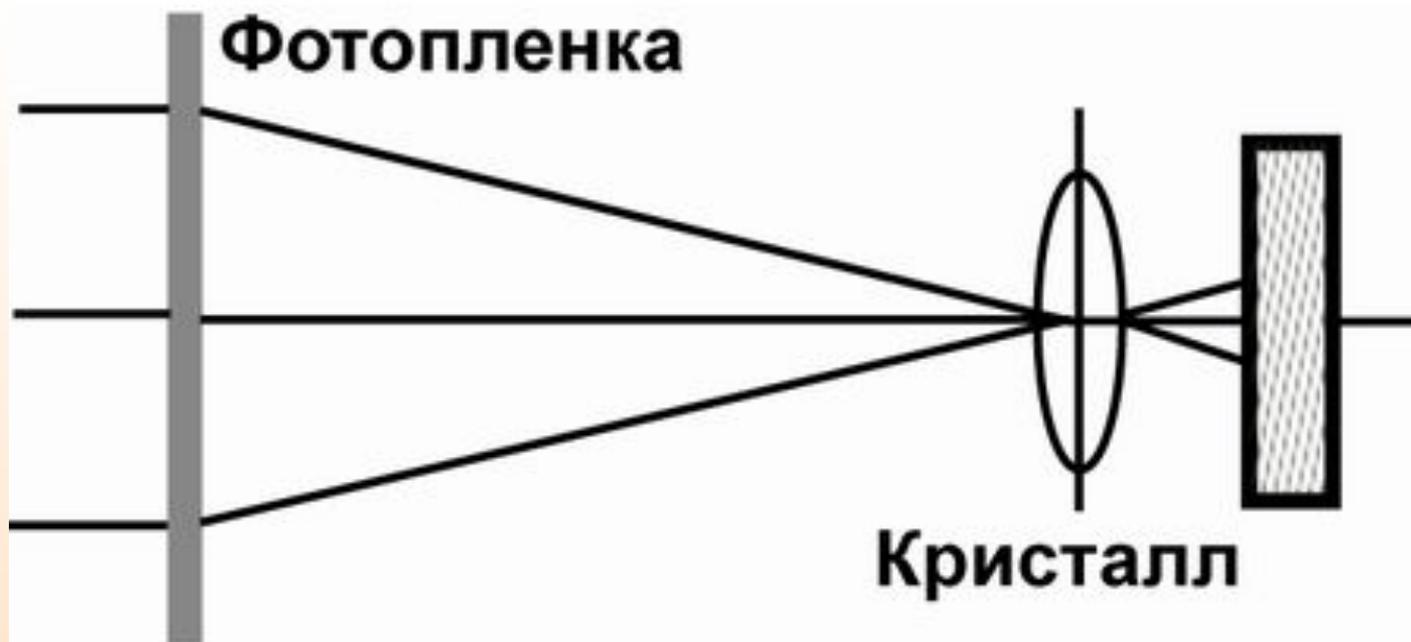
Оптический диапазон длин волн λ ограничен с одной стороны рентгеновскими лучами, а с другой – микроволновым диапазоном радиоизлучения.



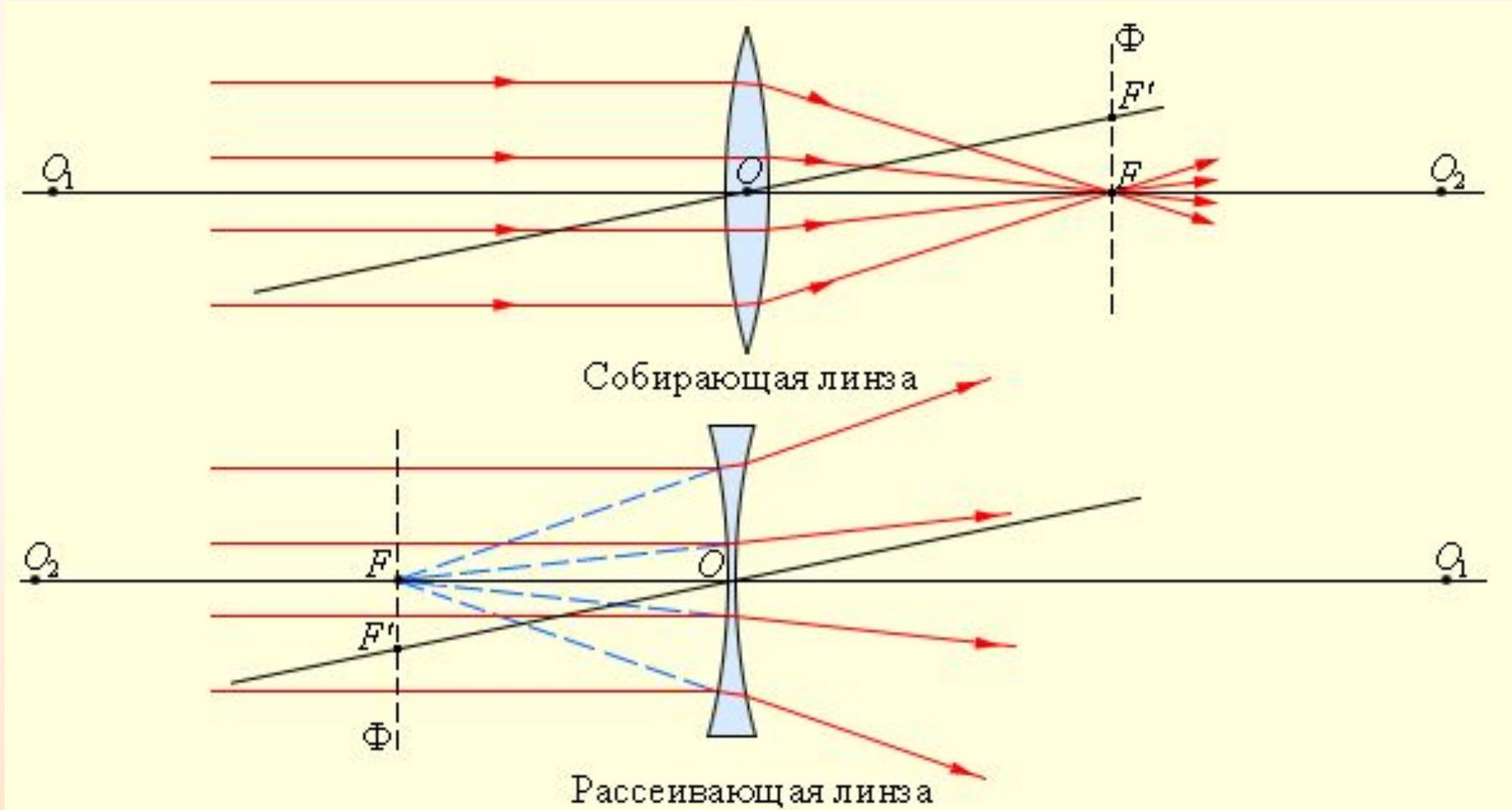
Оптика подразделяется на

- геометрическую,
- физическую,
- 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.



Применяется для расчета и конструирования оптических приборов – от очковых линз до сложных объективов и огромных астрономических инструментов.

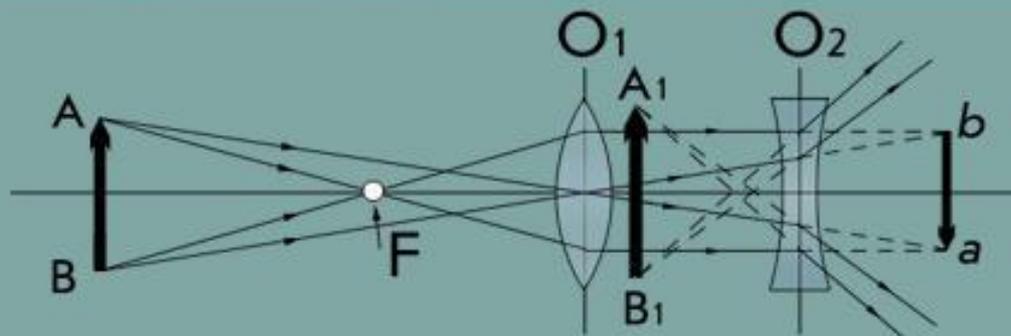


Подзорные трубы, телескоп

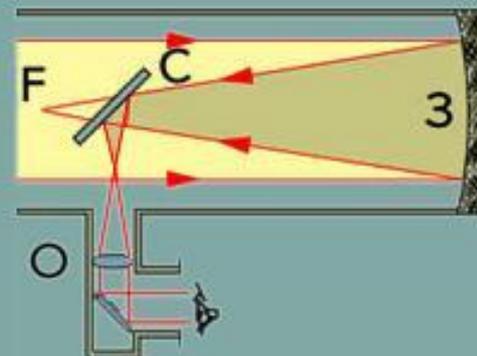
Труба Кеплера



Труба Галилея

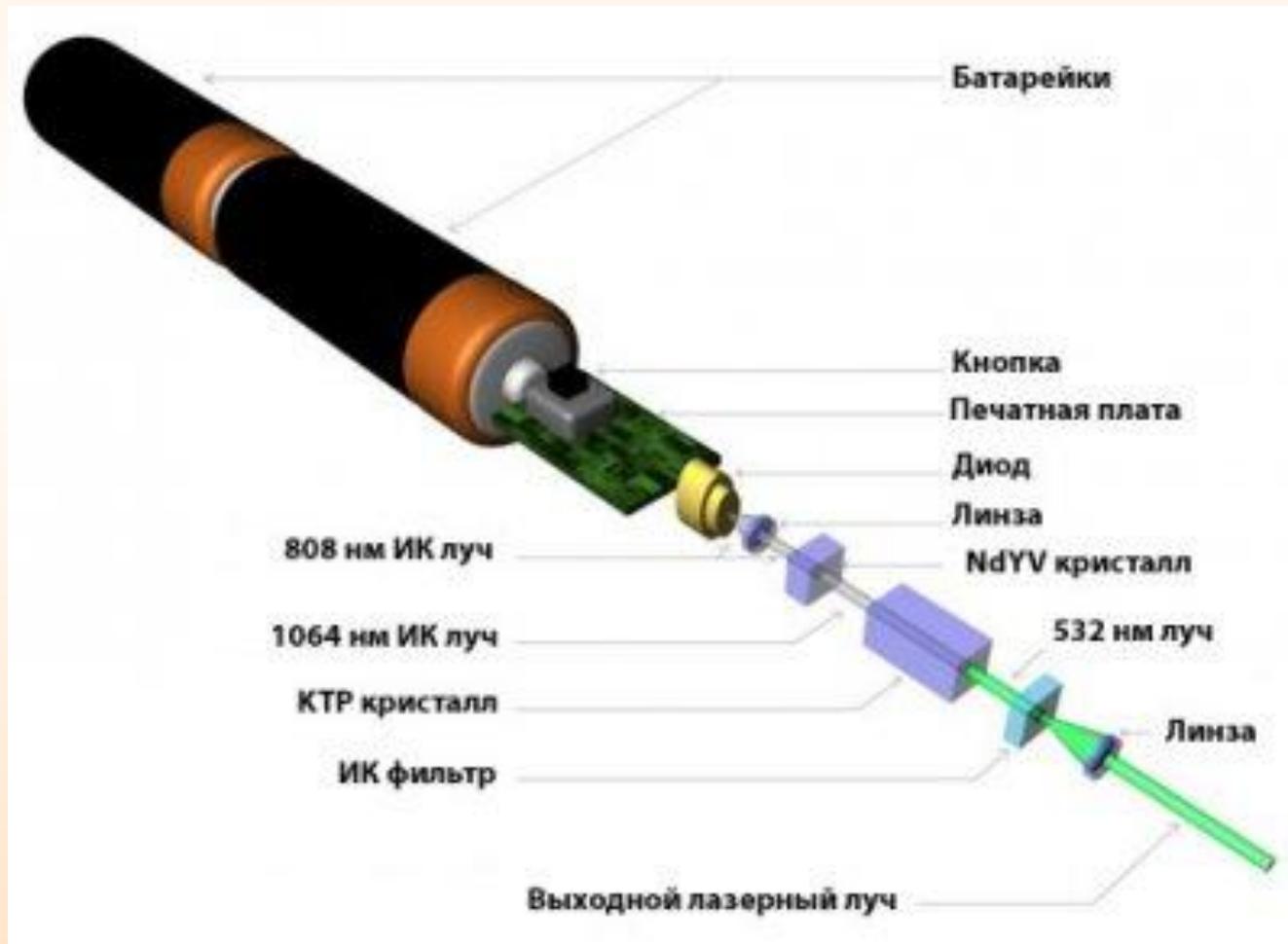


Зеркальный телескоп Ньютона

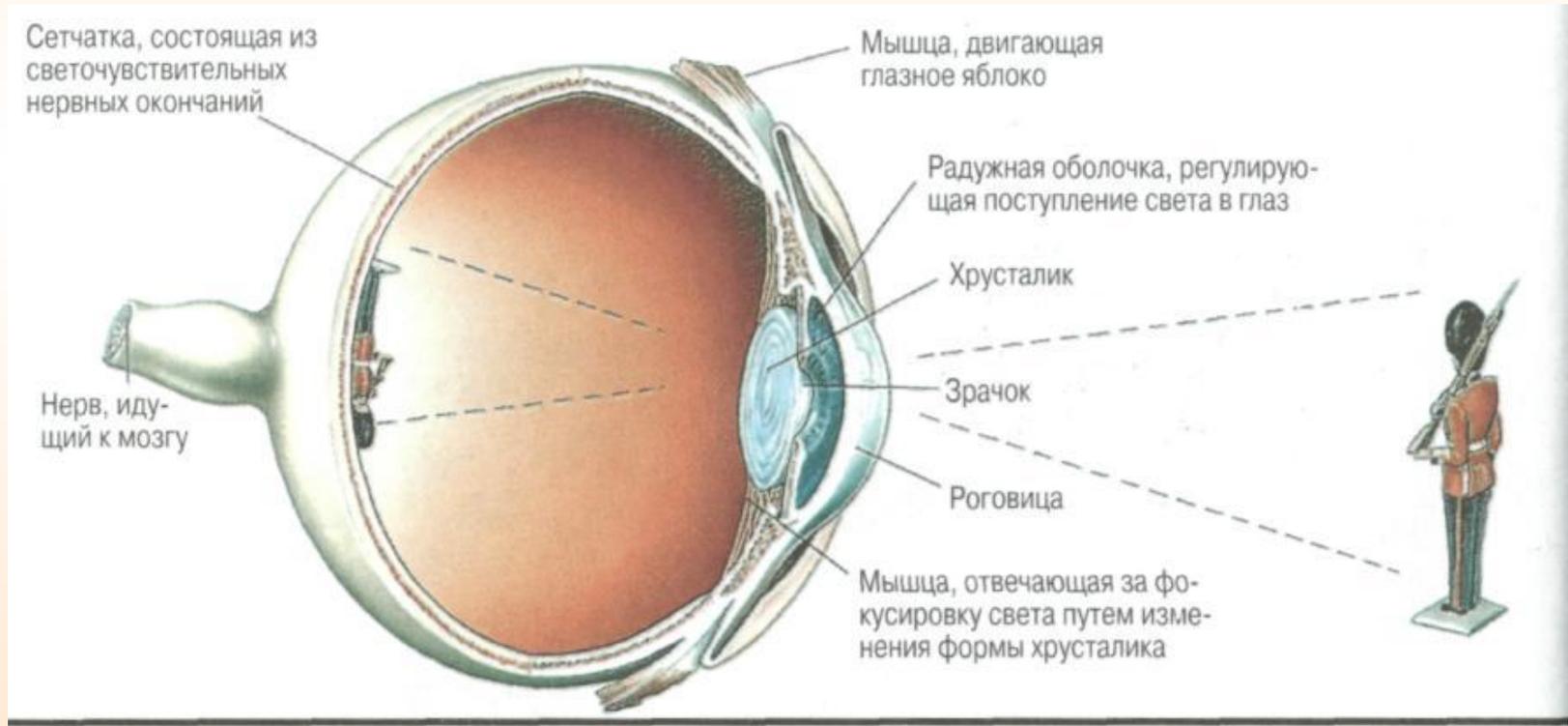


Физическая оптика рассматривает проблемы, связанные с процессами испускания света, природой света и световых явлений.

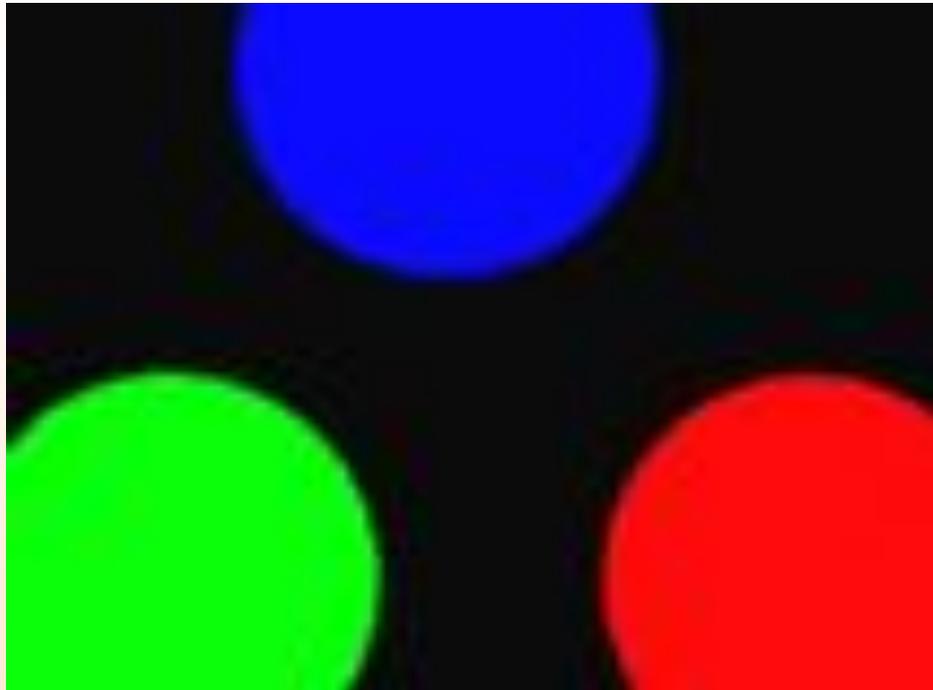
Устройство лазера



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



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



2. Геометрическая оптика

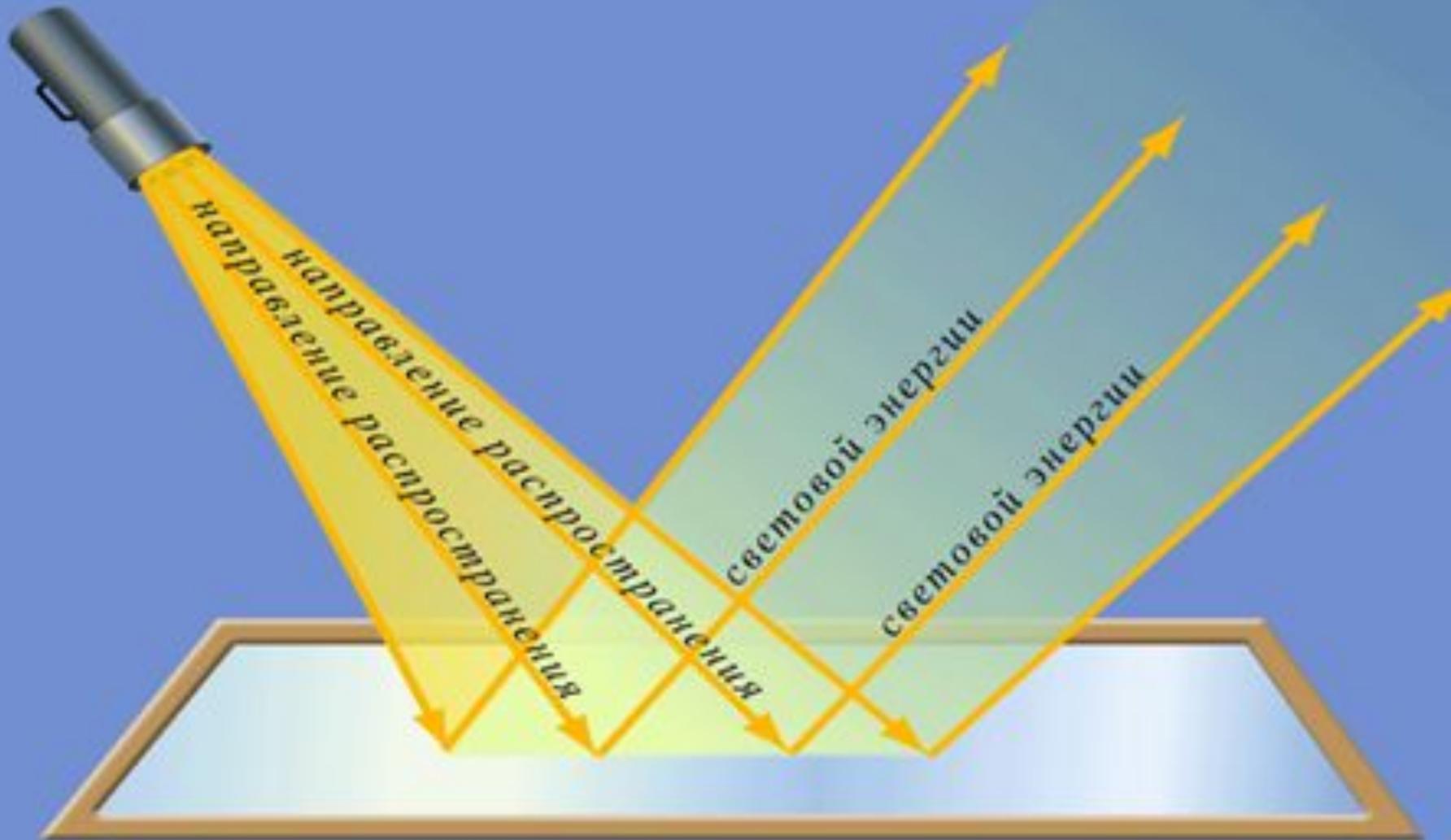
Основные законы геометрической оптики известны ещё с древних времен.

Платон (430 г. до н.э.) установил закон прямолинейного распространения света.

Евклид сформулировал закон прямолинейного распространения света и закон равенства углов падения и отражения.

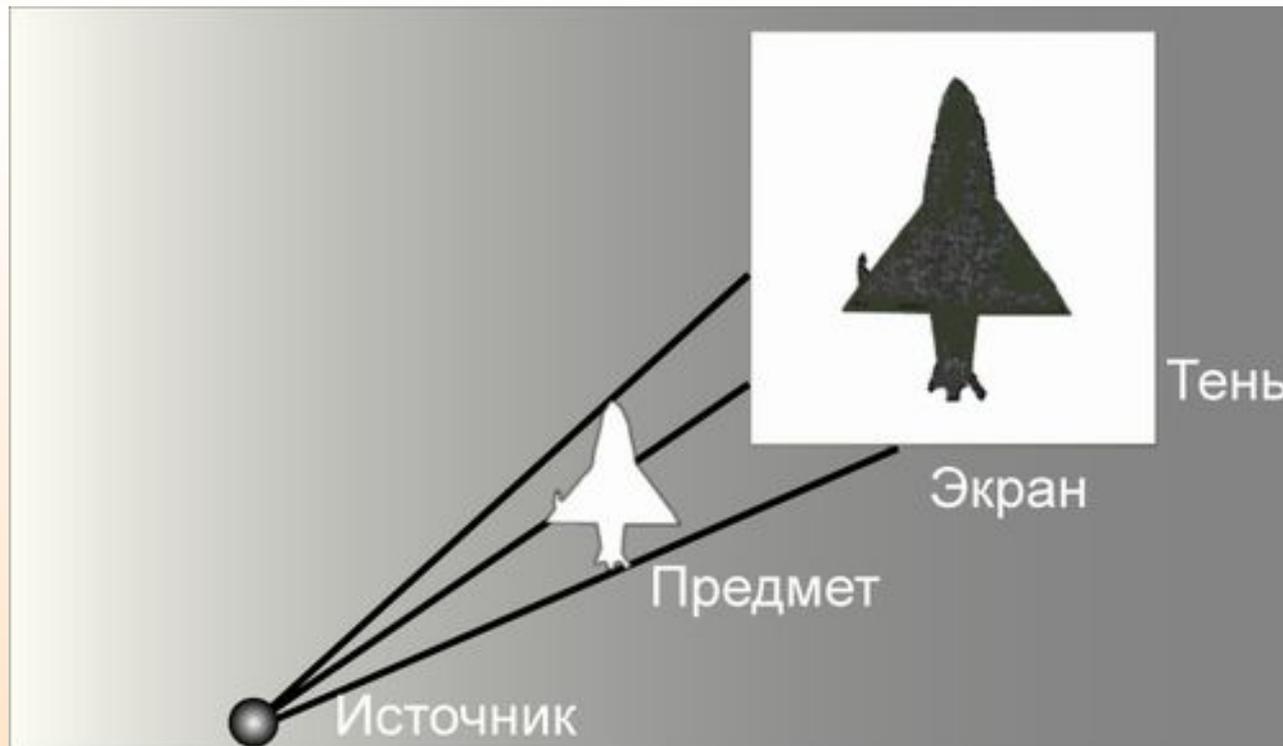
Аристотель и Птолемей изучали преломление света.

Линия, вдоль которой распространяется световая энергия, называется **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.



Законы геометрической оптики,

установленные опытным путем:

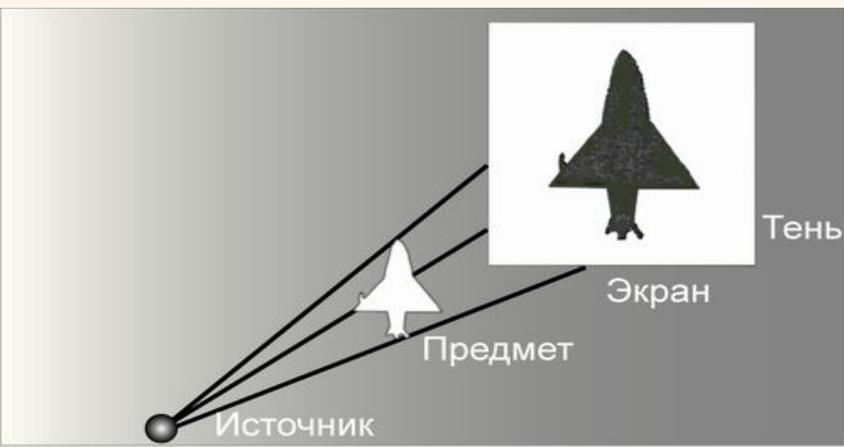
1. закон прямолинейного распространения света;
2. закон независимости световых лучей;
3. закон отражения;
4. закон преломления света.

1. Закон прямолинейного распространения света:

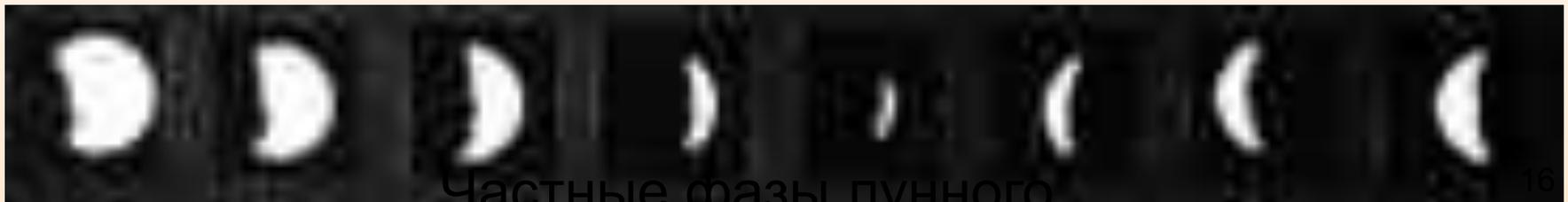
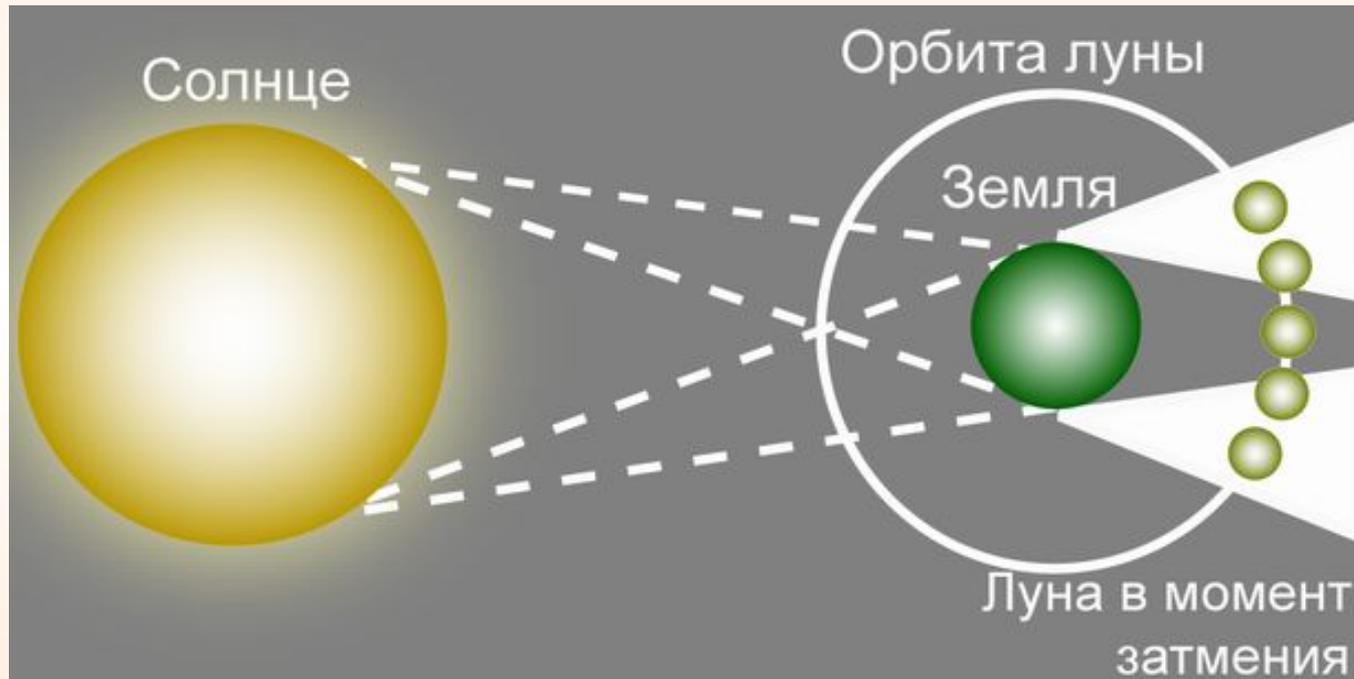
свет в оптически однородной среде распространяется прямолинейно.

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

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 затмение одних планет другими, например затмение Луны, когда Луна попадает в тень Земли.



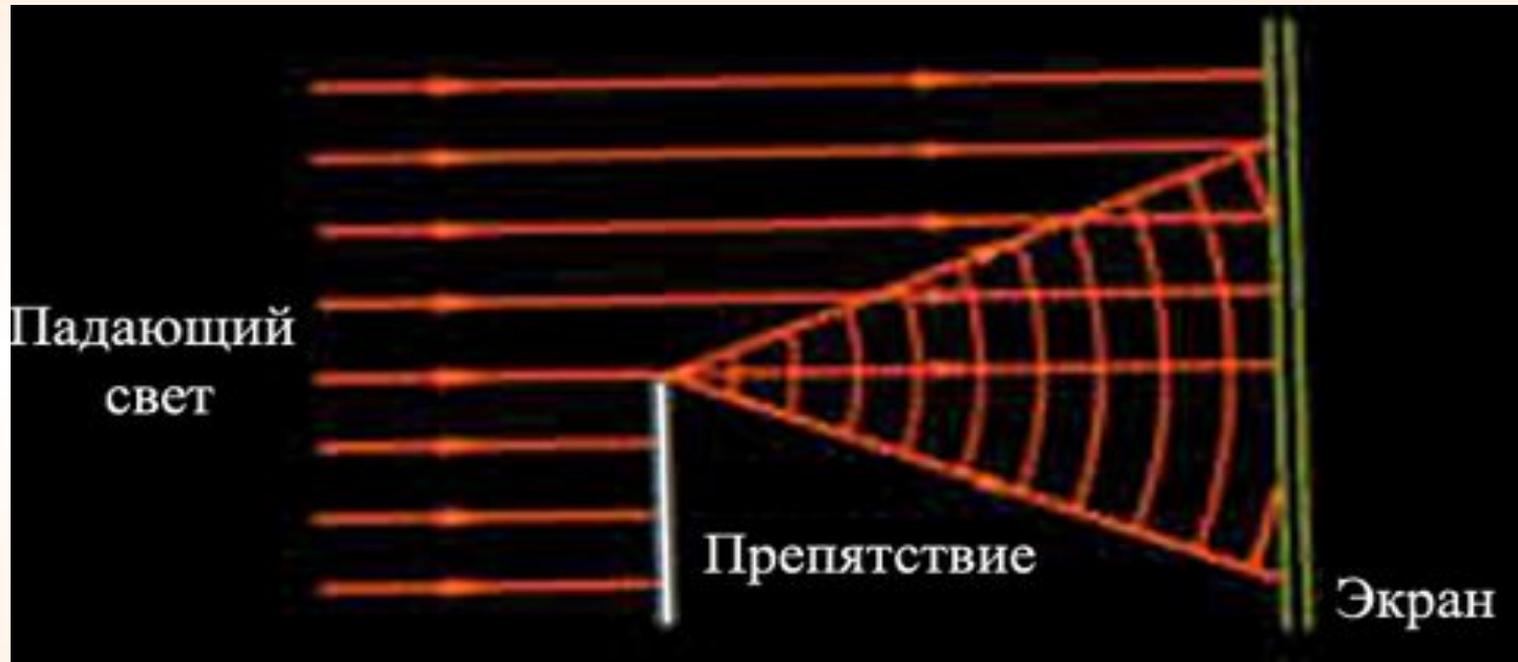
Частные фазы лунного затмения

Проявление прямолинейного распространения света – образование тени.

Солнечное затмение



Если свет проходит через очень малые отверстия, прямолинейность распространения нарушается, причем отклонение от прямолинейности распространения тем больше, чем меньше отверстия.



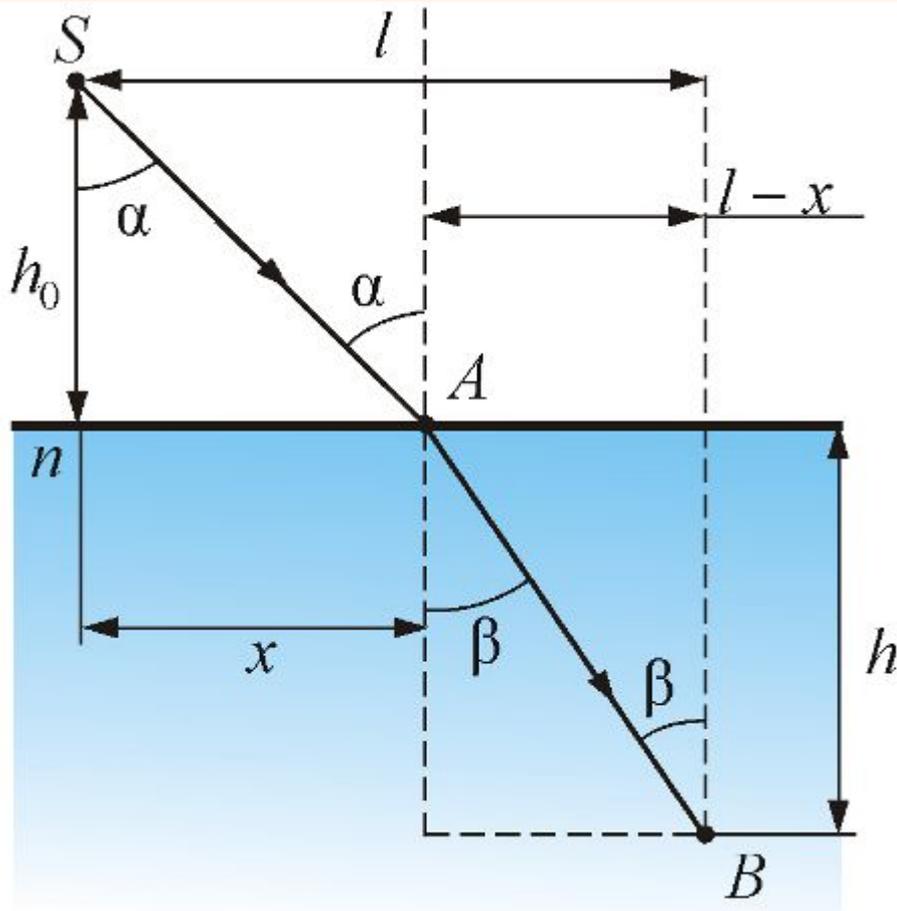
Огибание электромагнитными волнами препятствий и проникновение их в область геометрической тени наиболее отчетливо обнаруживается в тех случаях, когда **размер огибаемых препятствий соизмерим с длиной волны**



Ферма Пьер (1601 – 1665) – французский математик и физик.

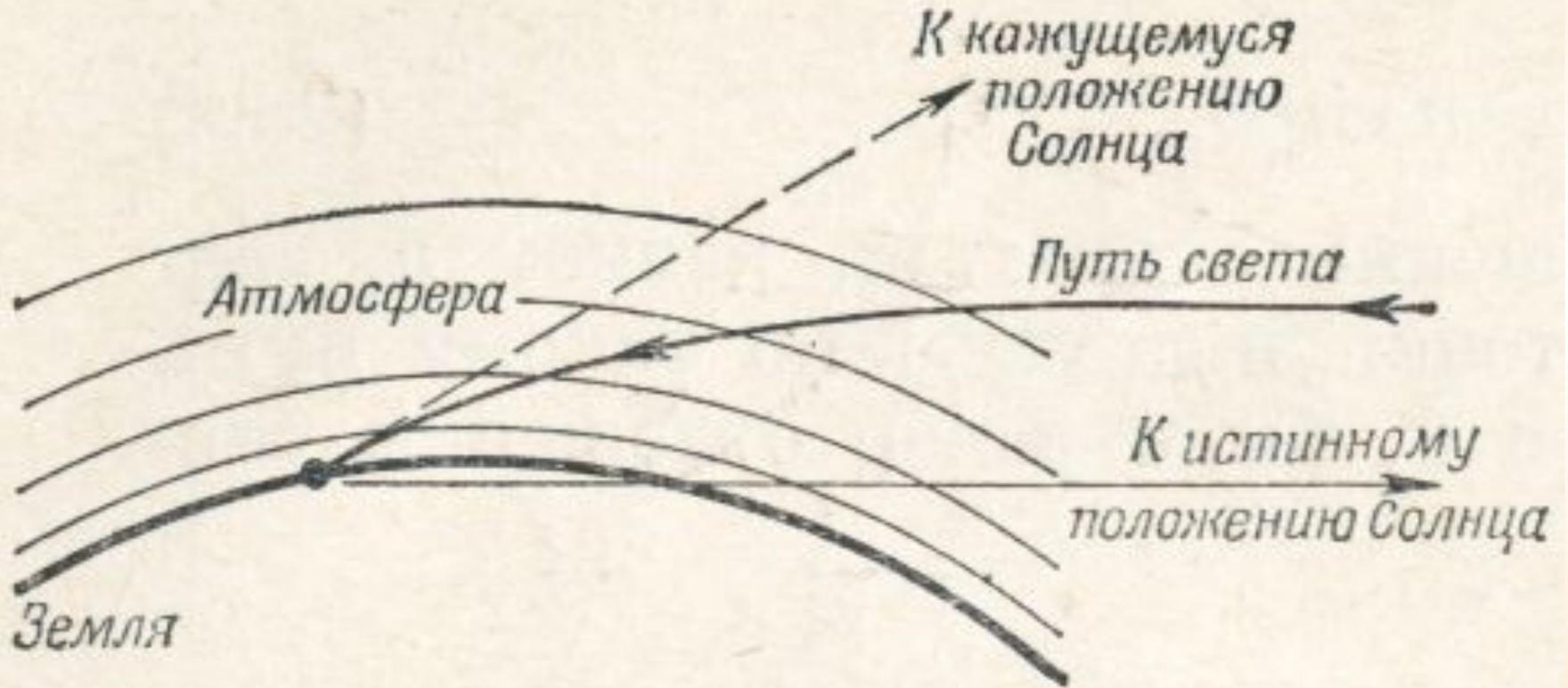
Физические исследования относятся в большинстве к оптике, где он установил (примерно в 1662 г.) основной принцип геометрической оптики (принцип Ферма).

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

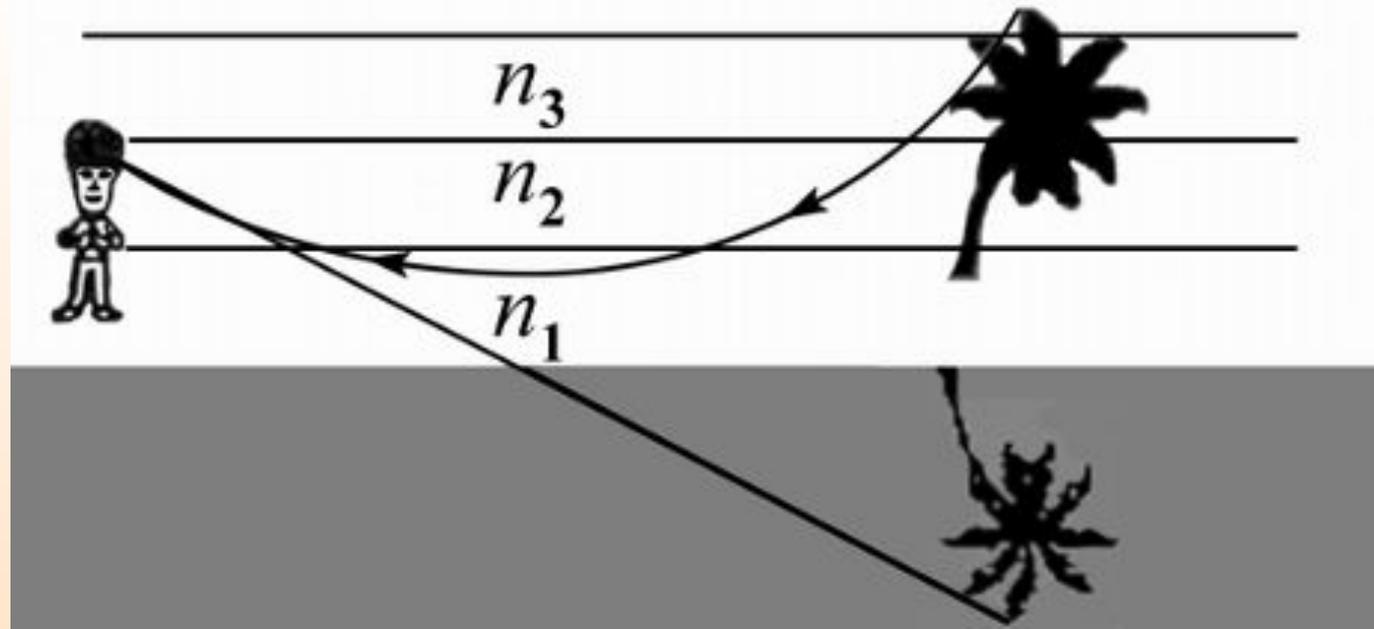


$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = n$$

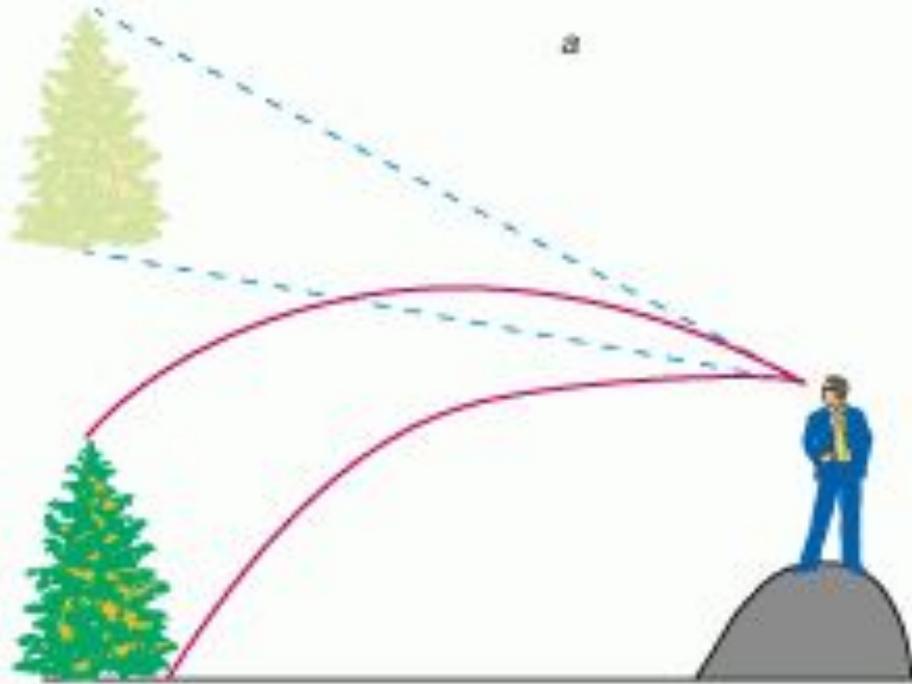
У горизонта Солнце кажется на 1–2 градуса выше, чем на самом деле



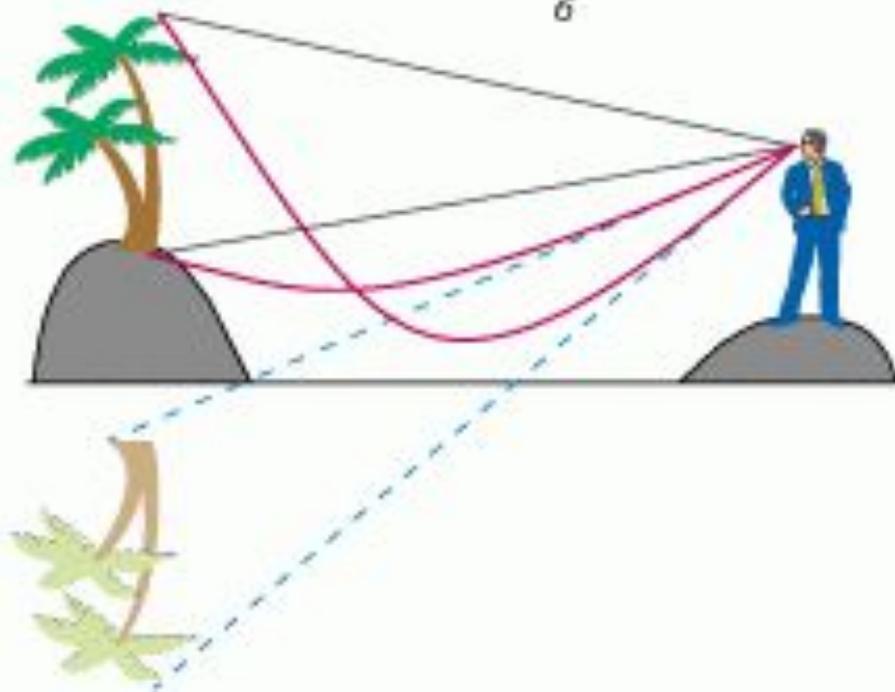
Мираж, который часто наблюдают путешественники на раскаленных солнцем дорогах. Они видят впереди оазис, а когда подходят туда, то кругом оказывается песок. Сущность явления в следующем. То, что мы видим в этом случае, это прошедший над песком свет. На рис. показано, как падающий на дорогу луч света попадает 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.



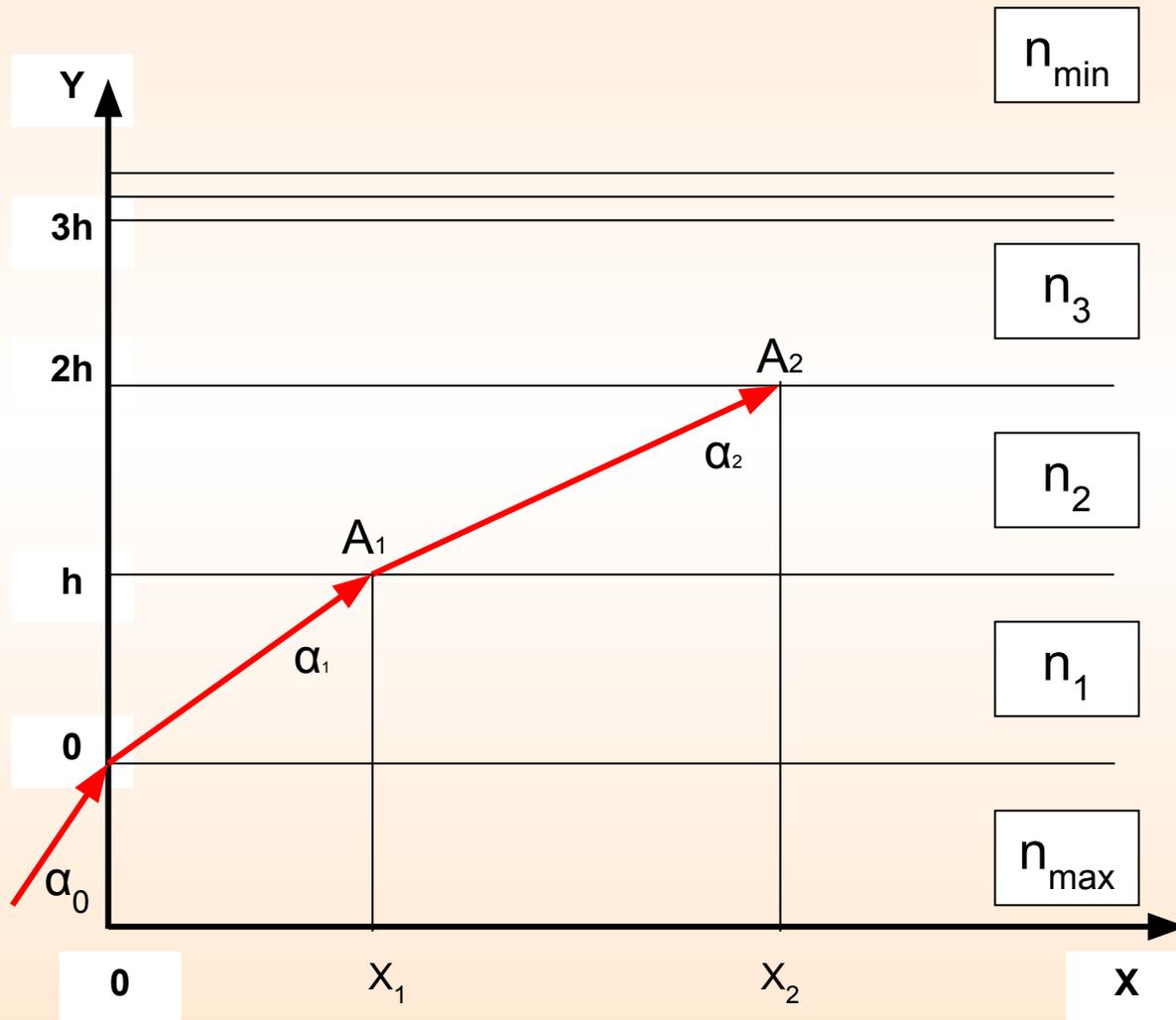
5



6



Модель неоднородной среды

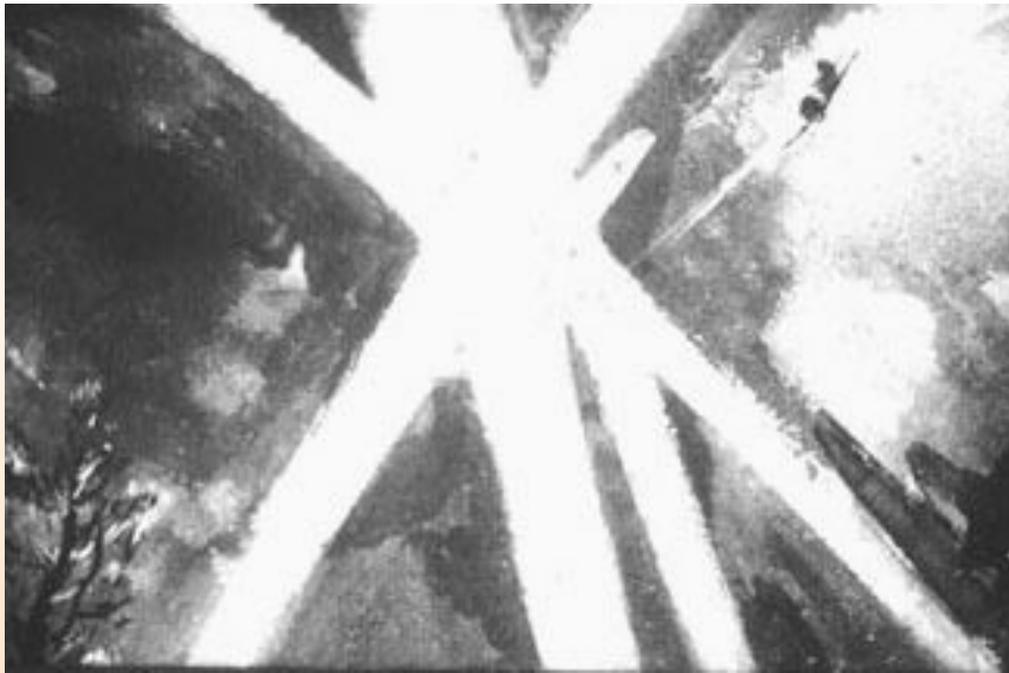


$$\sin \alpha_i = \frac{n_{\max} \sin \alpha_0}{n_{\max} - ik}$$

2. Закон независимости световых пучков:

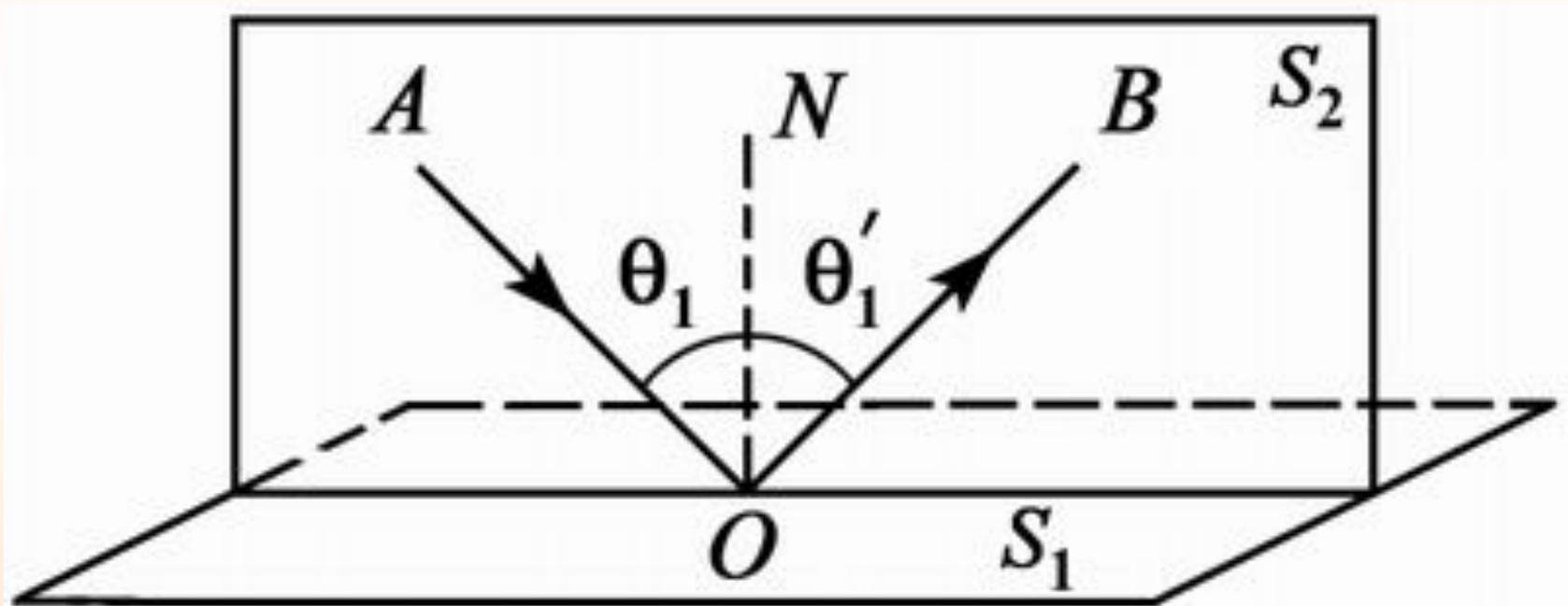
эффект, производимый отдельным пучком, не зависит от того, действуют ли одновременно остальные пучки или они устранены.

Разбивая световой поток на отдельные световые пучки, можно показать, что действие выделенных световых пучков независимо.



3. Закон отражения

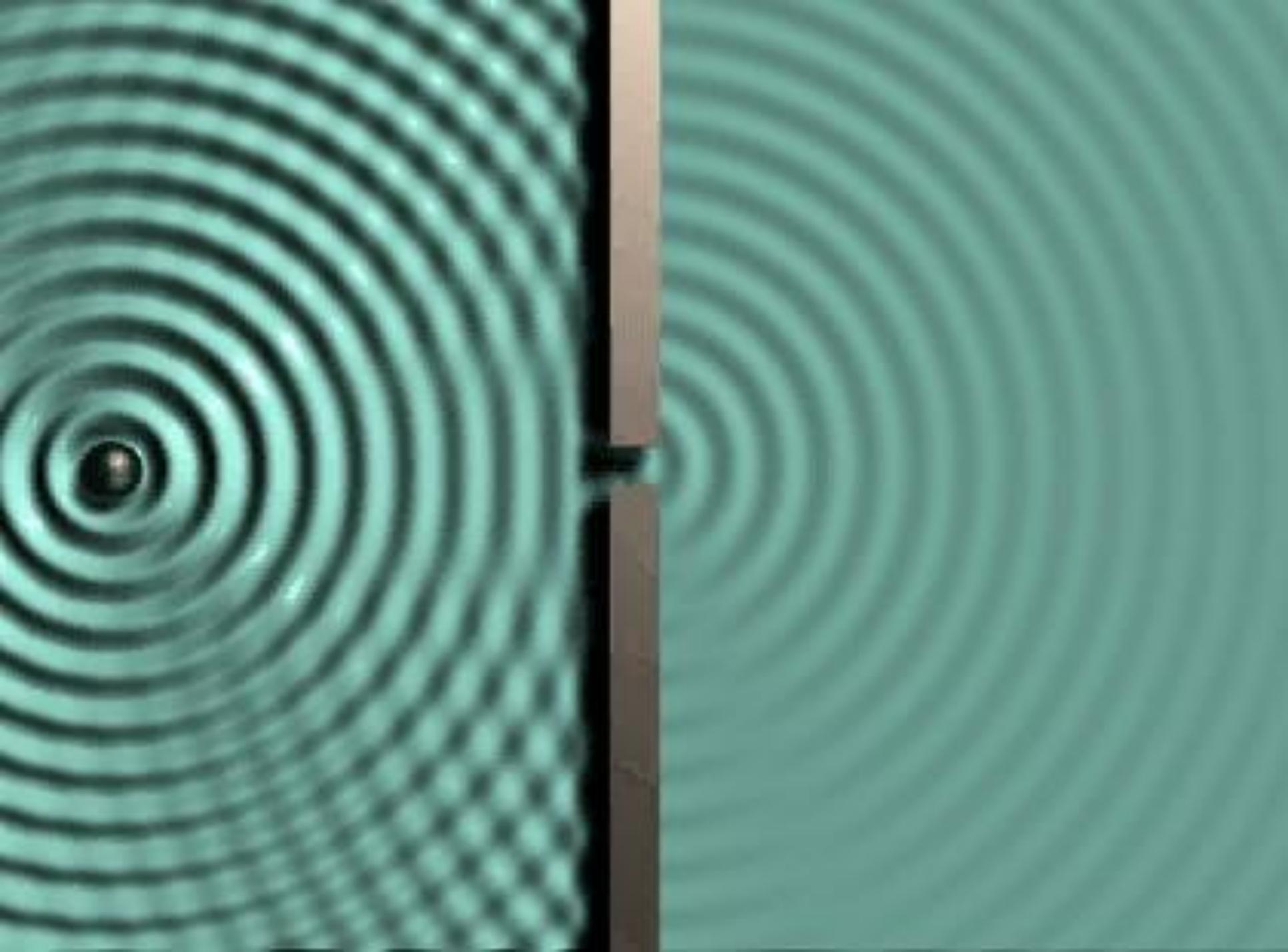
- Угол отражения равен углу падения.
- Отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и перпендикуляром, к границе раздела двух сред в точке падения.



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

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.

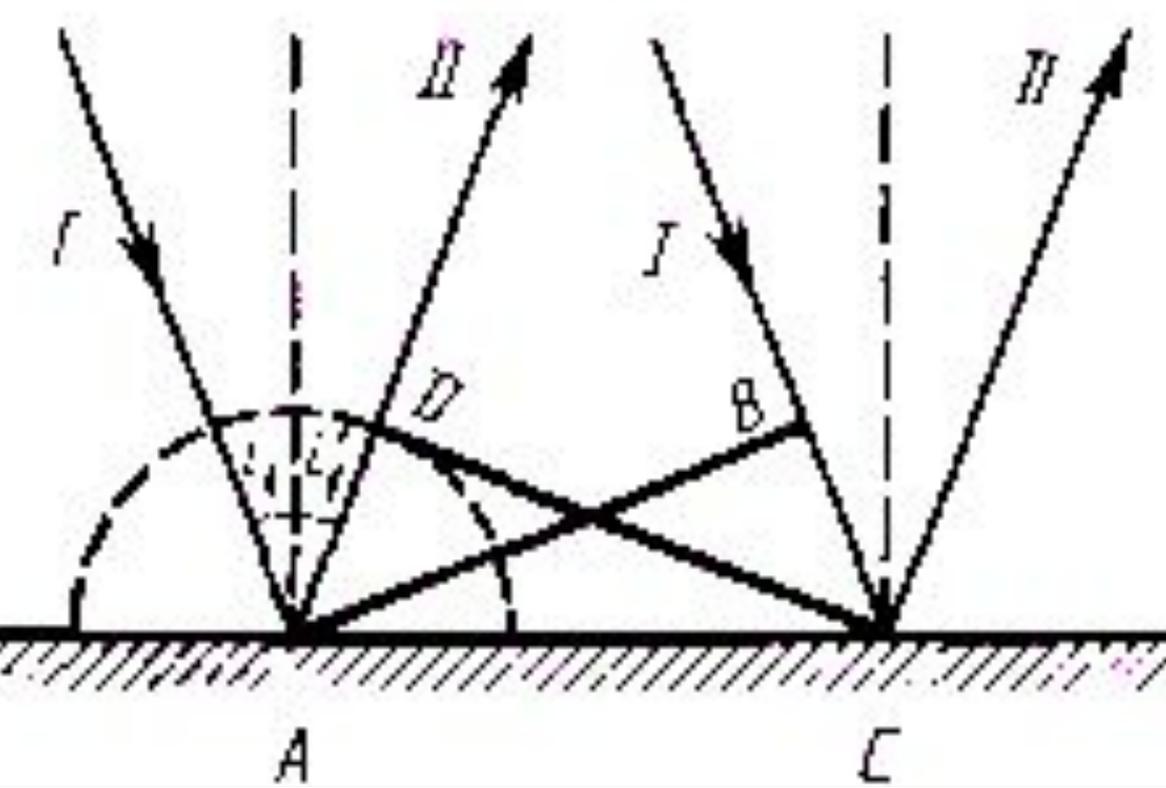




Огюстен Жан Френель
10.05.1788 – 14.07.1827
французский физик
Броли, Франция



Христиан Гюйгенс
14.04.1629 – 08.08.1695
нидерландский механик,
физик и математик
Гаага, Нидерланды

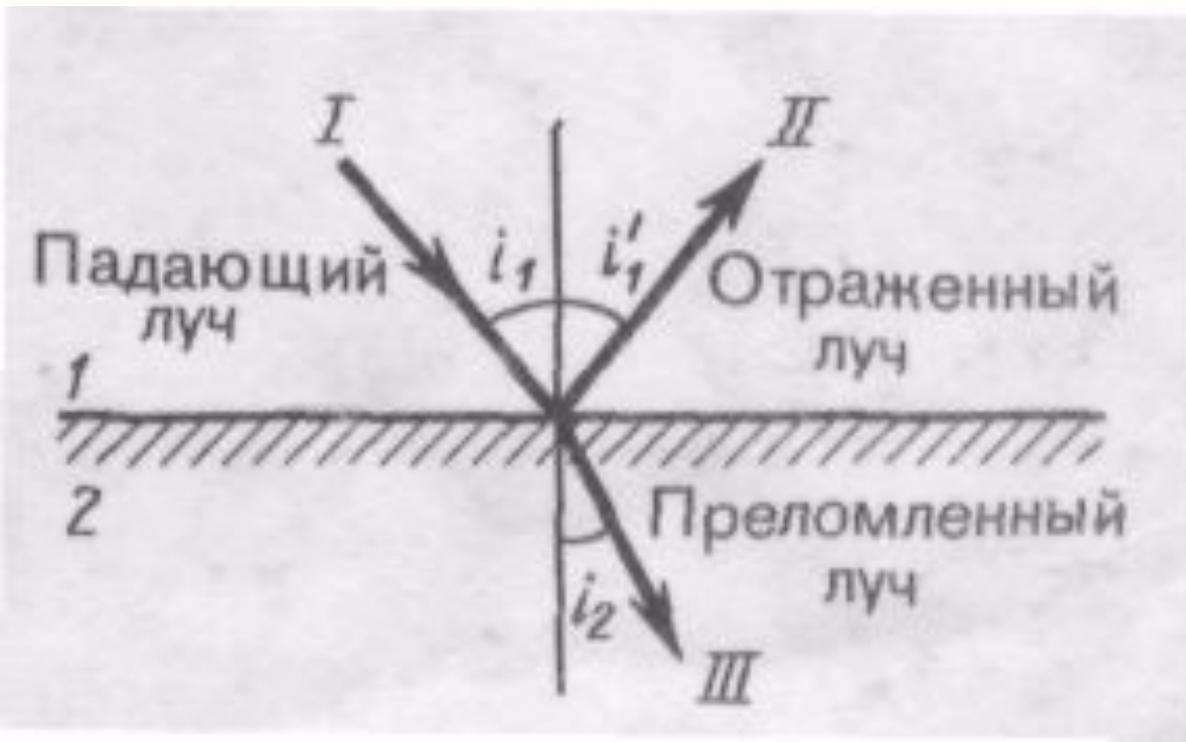


Когда фронт волны (AB) достигнет отражающей поверхности в точке **A**, эта точка **начнет излучать вторичную волну**.

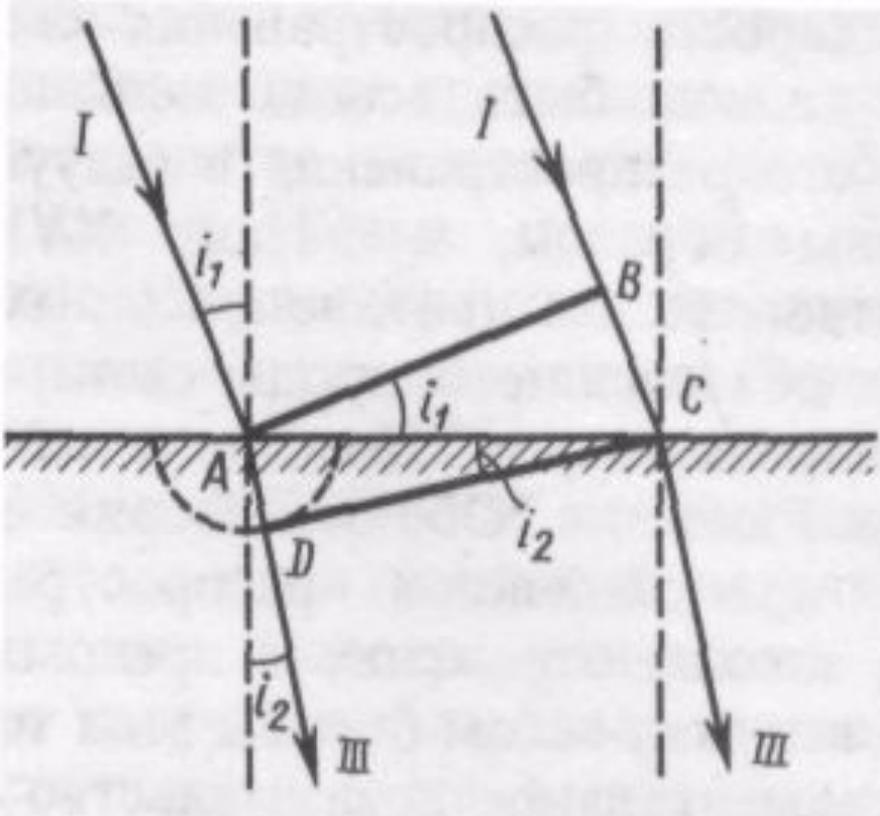
Для прохождения волной расстояния BC требуется время $\Delta t = BC/v$. За это же время фронт вторичной волны достигнет точек полусферы, радиус **AD** которой равен $v\Delta t = BC$. Положение фронта отраженной волны в этот момент времени в соответствии с принципом Гюйгенса задается плоскостью **DC**, а направление распространения этой волны - лучом **П**. 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;



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



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

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

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

32

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

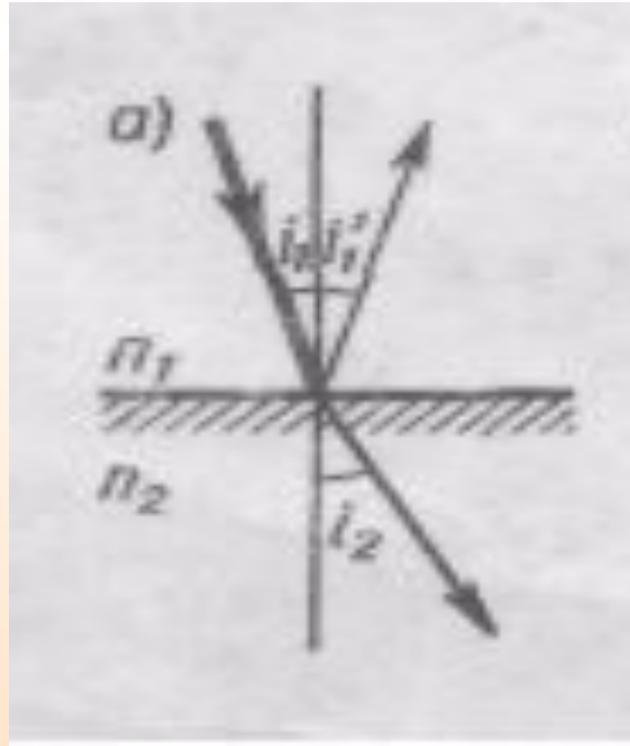
Из симметрии выражения вытекает **обратимость световых лучей**: если обратить луч III, заставив его падать на границу раздела под углом i_2 , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом i_1 , т. е. пойдет в обратном направлении вдоль луча I.



Явление полного отражения

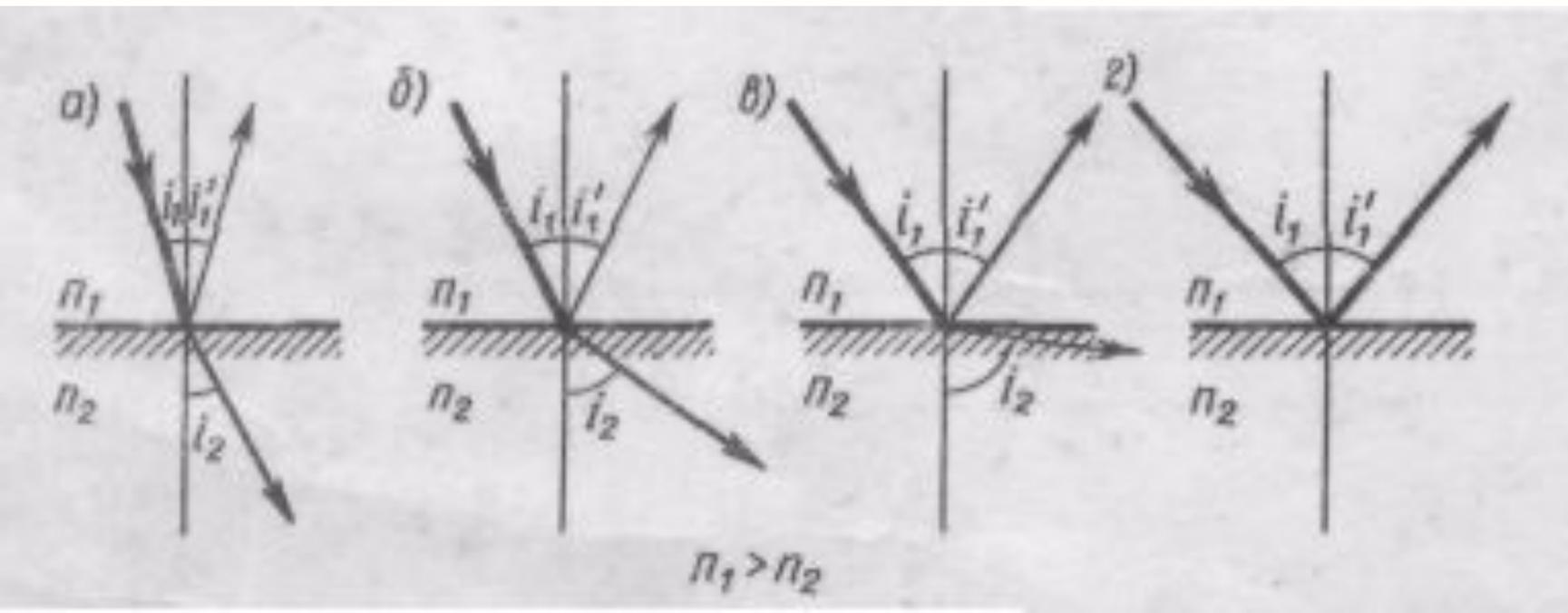
Если свет распространяется из среды с большим показателем преломления n_1 (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем преломления n_2 ($n_1 > n_2$), например из стекла в воду, то, согласно закону преломления, **преломленный луч удаляется от нормали** и угол преломления i_2 больше, чем угол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

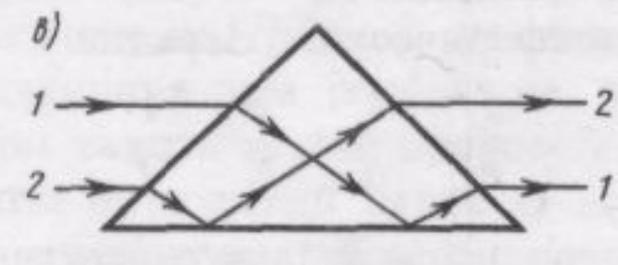
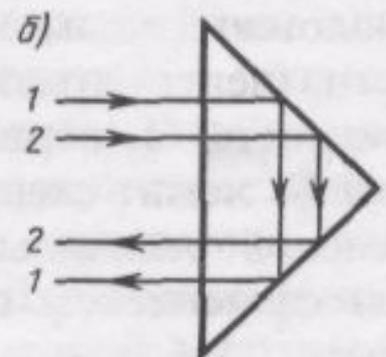
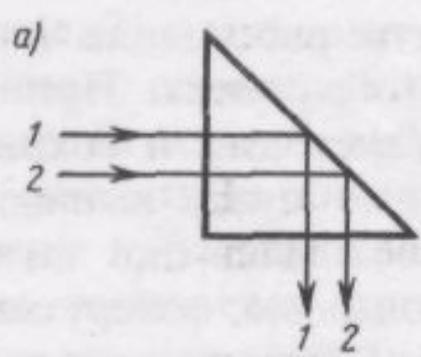
$$n_1 > n_2$$



С увеличением угла падения увеличивается угол преломления, 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**.
- $i_1 = i_{\text{пр}}$ интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего.
- $i > i_{\text{пр}}$ весь падающий свет полностью отражается





Явление полного отражения используется в призмах полного отражения.

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

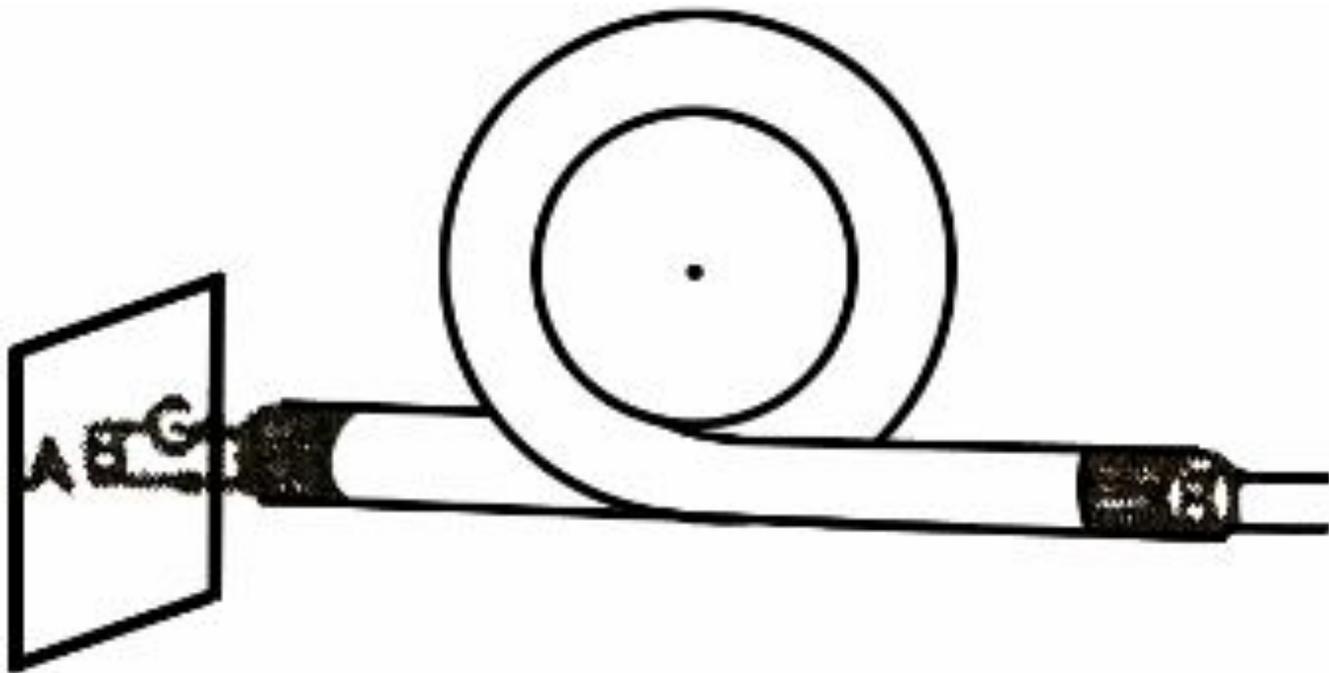
$$i_{\text{пр}} = \arcsin (1/1,5) = 42^\circ.$$

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

Такие призмы применяются в оптических приборах (например, в биноклях, перископах), а также в рефрактометрах, позволяющих определять показатели преломления тел

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.



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.

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

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.

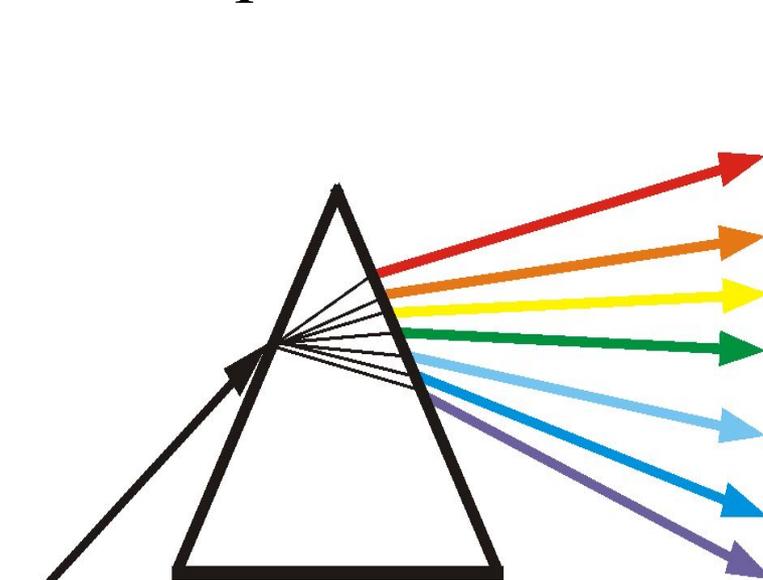
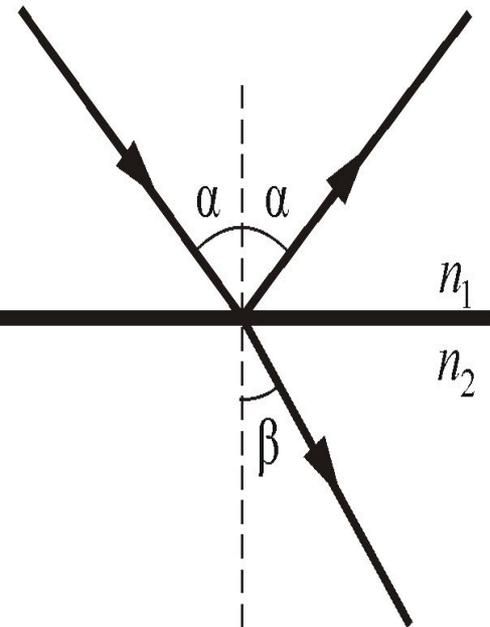
В конце XVII века возникли **две теории света** — **корпускулярная (Ньютон-Декарт)** и **волновая (Гук-Гюйгенс)**.

Ньютон вывел законы отражения и преломления:

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

-угол падения равен углу отражения;

-отношение синуса угла падения к синусу угла преломления – величина постоянная равная отношению скорости света в среде к скорости света в вакууме c .



Исаак Ньютон

4 января 1643 - 31 марта 1727

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

Важнейшие работы

закон всемирного тяготения

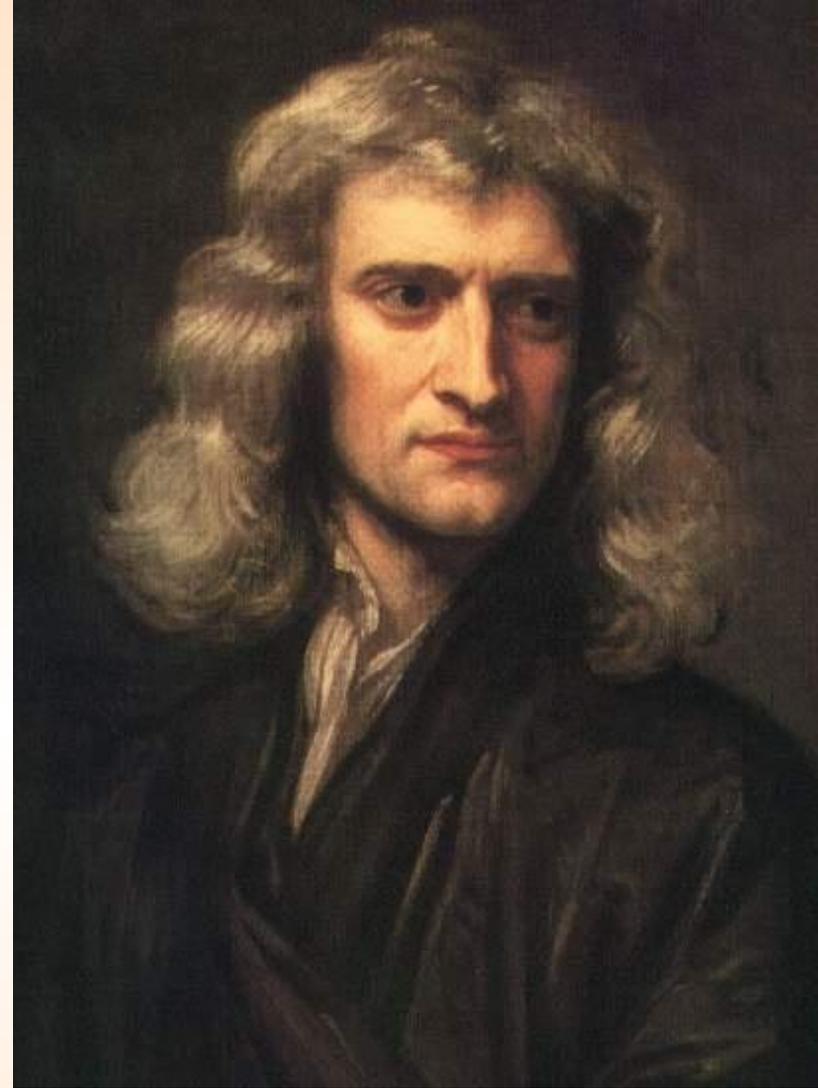
дифференциальное и

интегральное исчисления

изобрел зеркальный телескоп

развил корпускулярную

теорию света





Христиан Гюйгенс

14.04.1629 – 08.08.1695

нидерландский механик,

физик и математик

Гаага, Нидерланды



Огюстен Жан Френель

10.05.1788 – 14.07.1827

французский физик

Броли, Франция



Фраунгофер Йозеф
(6.III.1787- 7.VI.1826)
немецкий физик.

Внёс существенный вклад в исследование **дисперсии** и создание ахроматических линз.

Изучал **дифракцию** в параллельных лучах сначала от одной щели, а потом от многих.

Использовал **дифракционные решетки** для исследования спектров.



Араго Доминик Франсуа

(26.II.1786 - 2.X.1853)

французский учёный,

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, открыл планету Нептун.



Пуассон Симеон Дени
(21.VI.1781 - 25.IV.1840)
французский механик,
математик, физик

Физические исследования относятся к магнетизму, капиллярности, теории упругости, гидромеханике, теории колебаний, теории света.

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 $n=1.33$ воды, 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

$$E_0 = h\nu$$

ν – частота, h – постоянная Планка.



Макс Планк
(1858 – 1947).

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**.

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**.

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

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).

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.

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**:



СПЕКТР

spectrum (лат.) - видение.

Шкала электромагнитных волн



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

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

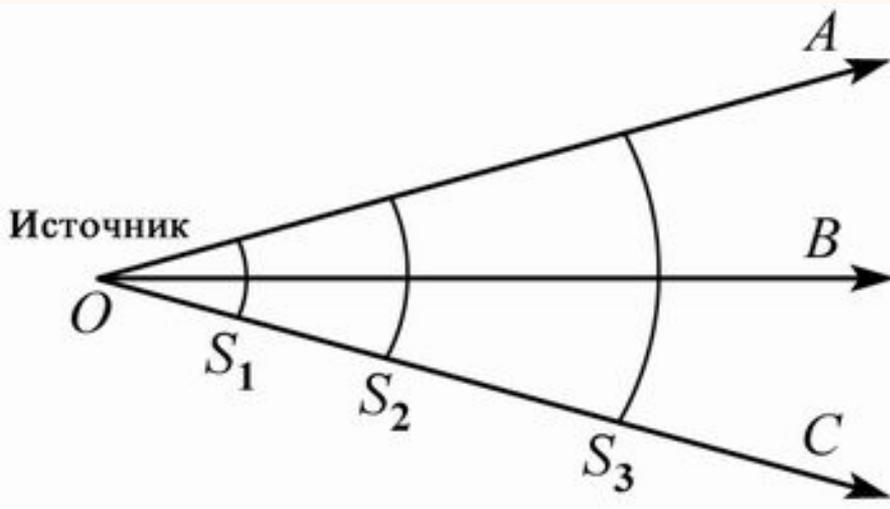
$$I = \left| \langle \vec{P} \rangle \right| = \left| \langle [\vec{E}, \vec{H}] \rangle \right| \quad \vec{P} \text{ – вектор Пойнтинга}$$

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

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

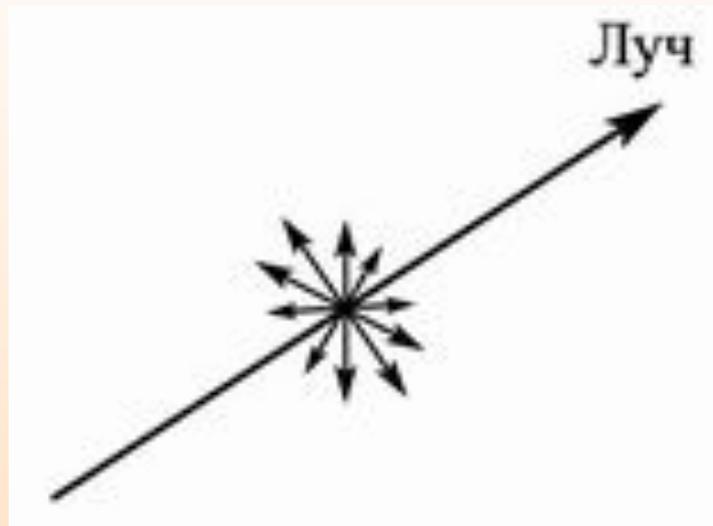
Луч — линия, вдоль которой распространяется световая волна.

- 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** $\sim 3\text{м}$.

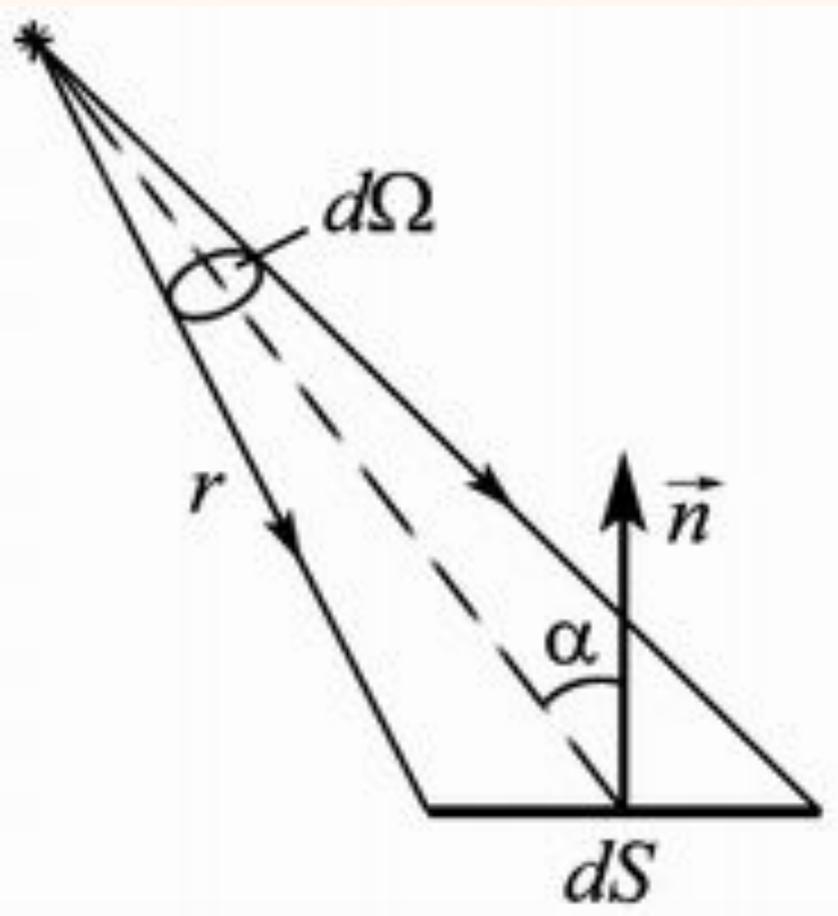
Плоскость колебаний каждого цуга ориентирована случайным образом. В **результатирующей волне** (суперпозиции цугов от разных атомов) **все направления равновероятны**.



6. Световые, или фотометрические величины

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

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



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:

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

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.

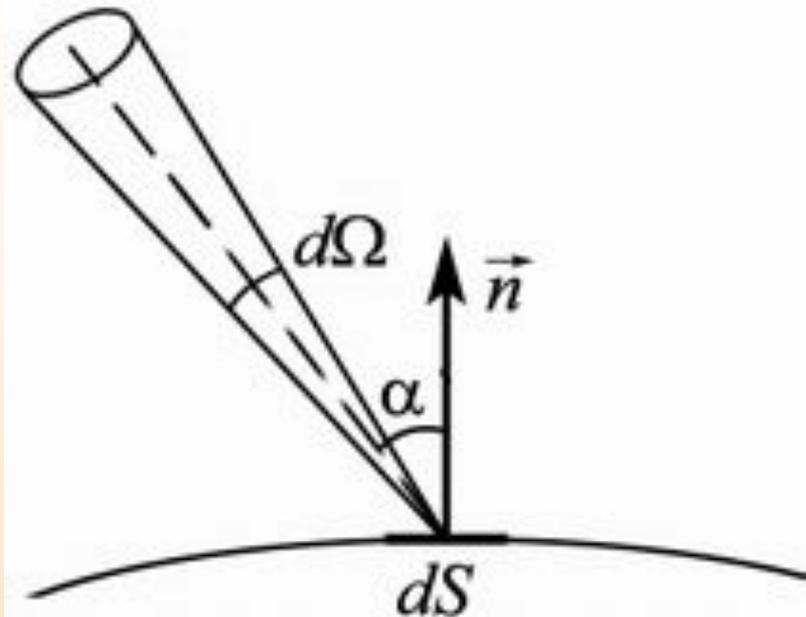
• **Яркостью L** называется световой поток, исходящий из площадки dS в заданном направлении, отнесенный к единице телесного угла и к единице ее **видимой величины**:

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

• 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 ($L = \text{const}$):

$$M = \pi L$$