

Сегодня: вторник, 20 мая 2014 г.

Колебания и волны. Геометрическая и волновая оптика

**Степанова Екатерина Николаевна
доцент кафедры ОФ ФТИ ТПУ**

Тема 2. Геометрическая и волновая оптика. Корпускулярно-волновая теория света

2.1. Геометрическая оптика

2.2. Развитие взглядов на природу света

Введение

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.

Учение о свете принято делить на три части:

❖ *геометрическая или лучевая оптика*, в основе которой лежит представление о световых лучах;

❖ *волновая оптика*, изучающая явления, в которых проявляются волновые свойства света;

❖ *квантовая оптика*, изучающая взаимодействие света с веществом, при котором проявляются корпускулярные свойства света.



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

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.

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.

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

2.1. 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 является предельным случаем волновой оптики, когда *длина световой волны стремится к нулю.*

Простейшие оптические явления, например возникновение теней и получение изображений в оптических приборах, могут быть поняты в рамках геометрической оптики. В основу формального построения последней положено *четыре закона, установленных опытным путем:*

- *закон прямолинейного распространения света;*
- *закон независимости световых лучей;*
- *закон отражения;*
- *закон преломления света.*

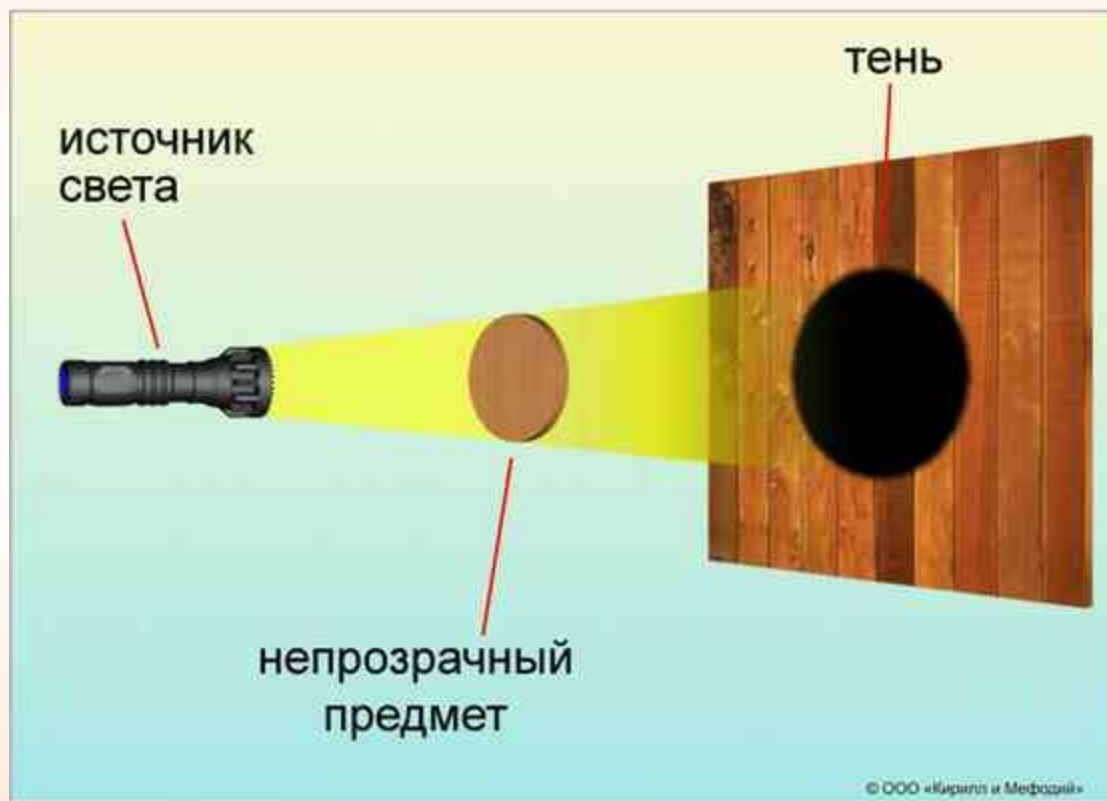
I. Закон прямолинейного распространения света:

**Свет в оптически однородной среде распространяется
прямолинейно**

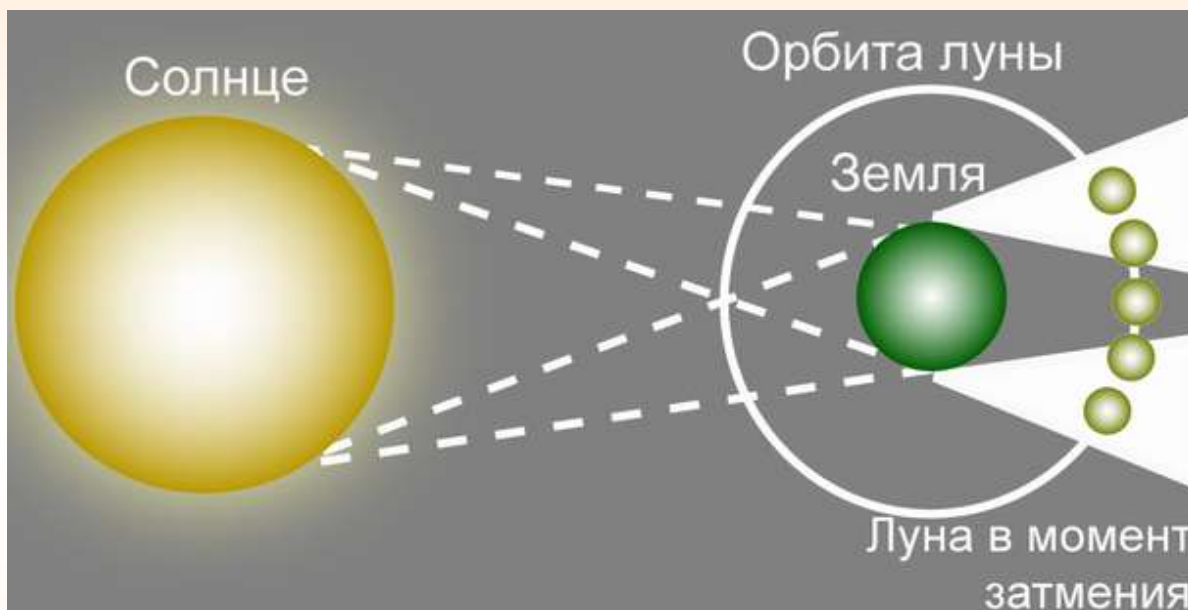
Доказательством этого закона является наличие тени с резкими границами от непрозрачных предметов при освещении их источниками малых размеров.

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.

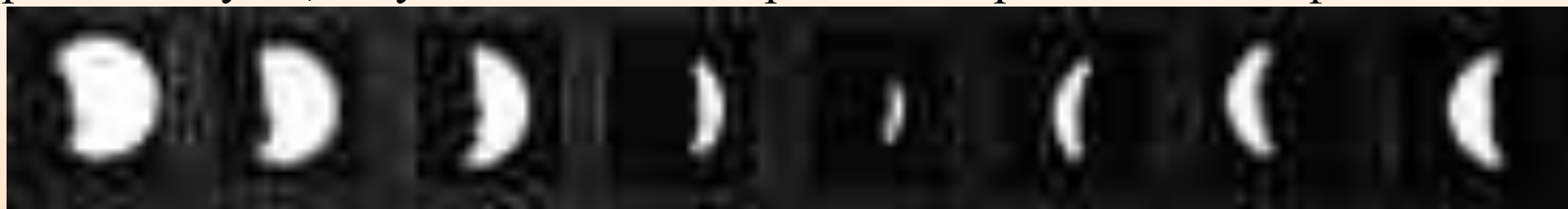
Тень, отбрасываемая предметом, обусловлена *прямолинейностью распространения световых лучей* в оптически однородных средах



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:



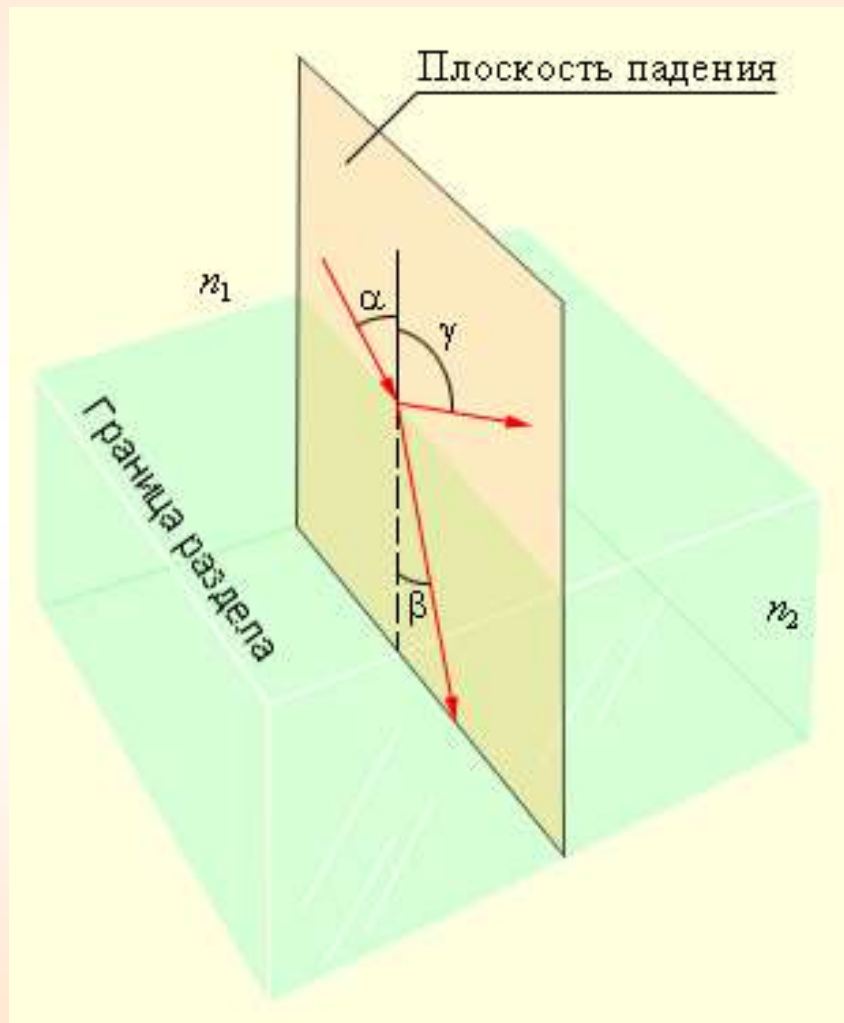
Частные фазы лунного затмения

II. 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.

Производимое одним пучком действие не зависит от наличия других пучков

III. Закон отражения



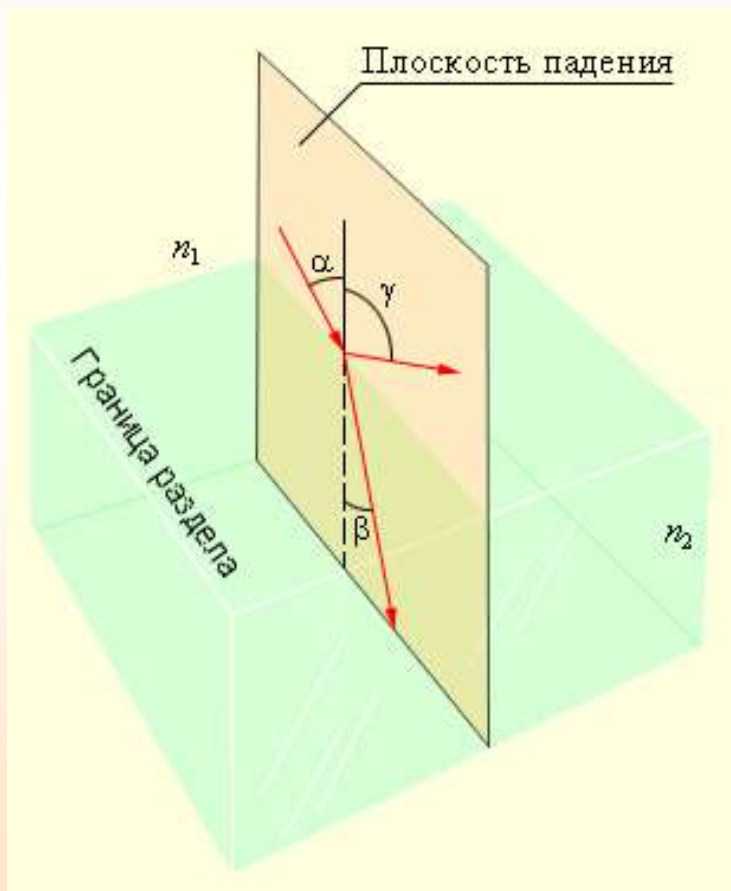
Угол падения равен углу отражения.

α - угол падения, γ - угол отражения, β - угол преломления

IV. Закон преломления:

- ❖ луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, проведенный к границе раздела в точке падения, лежат в одной плоскости;

(закон Снеллиуса): отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных сред



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{v} = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

(Закон выведен с использованием принципа Гюйгенса)



Гюйгенс Христиан (1629 – 1695), нидерландский ученый. В 1665 – 81 гг. работал в Париже. Изобрел (1657 г.) маятниковые часы со спусковым механизмом, дал их теорию, установил законы колебаний физического маятника. Опубликовал в 1690 г. созданную им в 1678 г. волновую теорию света, объяснил двойное лучепреломление. Усовершенствовал телескоп; сконструировал окуляр, названный его именем. Открыл кольцо у Сатурна и его спутник Титан. Автор одного из первых трудов по теории вероятностей (1657 г.).

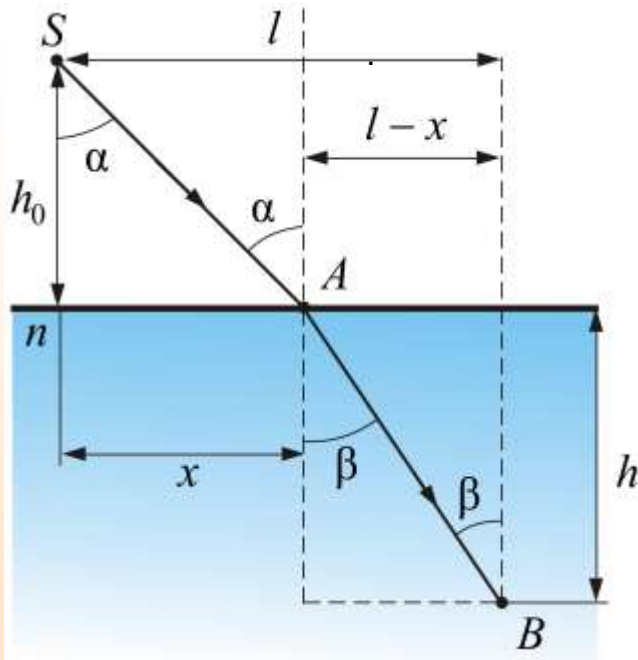
Принцип Гюйгенса:

«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.



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).

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

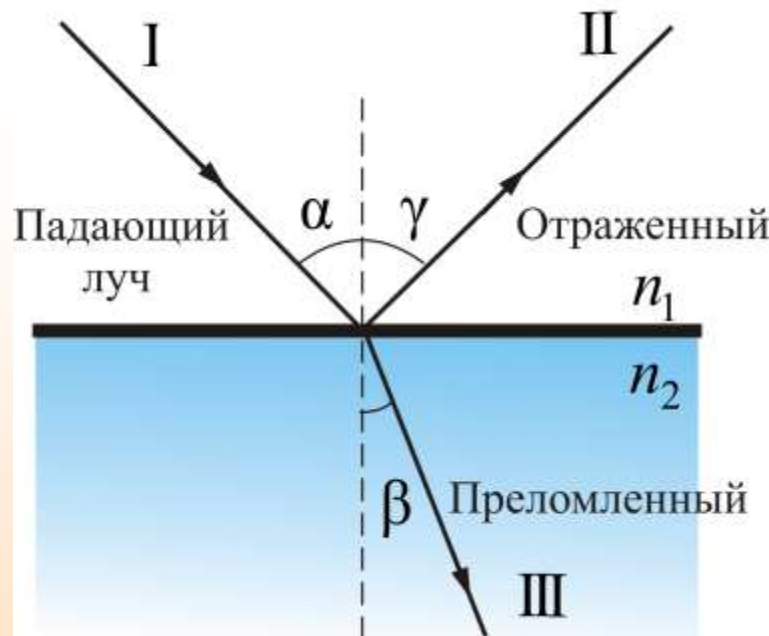


Используя рис., приходим к тому же выражению, что получено исходя из принципа Гюйгенса:

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

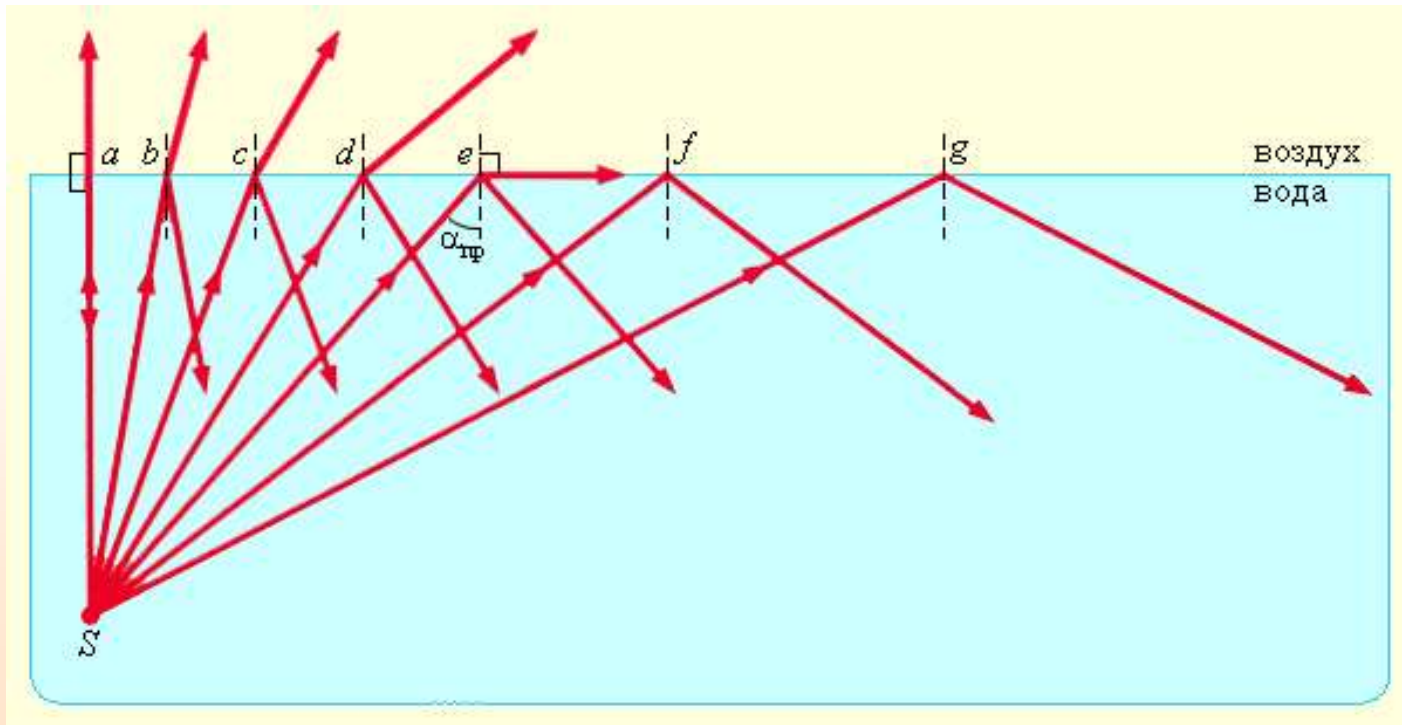
Из принципа Ферма вытекает
обратимость световых лучей:

если обратить луч 3 , заставив его падать на границу раздела под углом β , то преломленный луч в первой среде будет распространяться под углом α , т. е. пойдет в обратном направлении вдоль луча 1 .



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

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



Угол $\alpha_{\text{пр}}$ называется *предельным углом*. При углах падения

$\alpha > \alpha_{\text{пр}}$ *весь падающий свет полностью отражается.*

По мере приближения угла падения к предельному интенсивность преломленного луча уменьшается, а отраженного – растет.

Если $\alpha = \alpha_{\text{пр}}$, то интенсивность преломленного луча обращается в нуль, а интенсивность отраженного равна интенсивности падающего.

Таким образом, *при углах падения в пределах от $\alpha_{\text{пр}}$ до $\pi/2$ луч не преломляется, а полностью отражается в первую среду, причем интенсивности отраженного и падающего лучей одинаковы.*

Это явление называется *полным отражением*.

Предельный угол $\alpha_{\text{пр}}$ определим из формулы

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

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

Тогда

$$\sin\alpha_{\text{пр}} = n_2 / n_1 = n_{21}$$

Эти уравнения удовлетворяют значениям угла $\alpha_{\text{пр}}$ при $n_2 < n_1$

Следовательно,

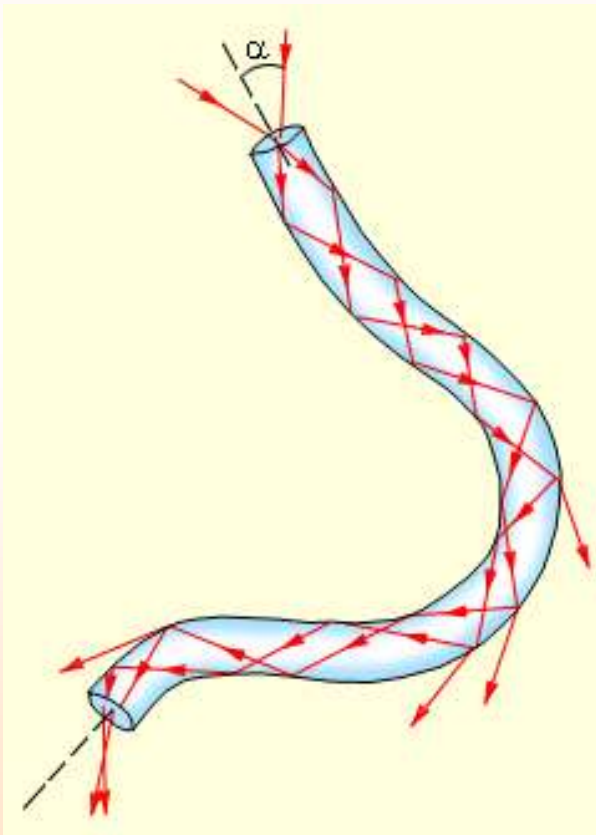
явление полного отражения имеет место только при падении света *из среды оптически более плотной в среду оптически менее плотную.*

Применение явления полного внутреннего отражения

Волоконные световоды - тонкие (от нескольких микрометров до миллиметров) произвольно изогнутые нити из оптически прозрачного материала (стекло, кварц). Свет, попадающий на торец световода, может распространяться по нему на большие

расстояния за счет полного внутреннего отражения от боковых поверхностей. Научно-техническое направление, занимающееся разработкой и применением оптических световодов, называется **волоконной оптикой**.

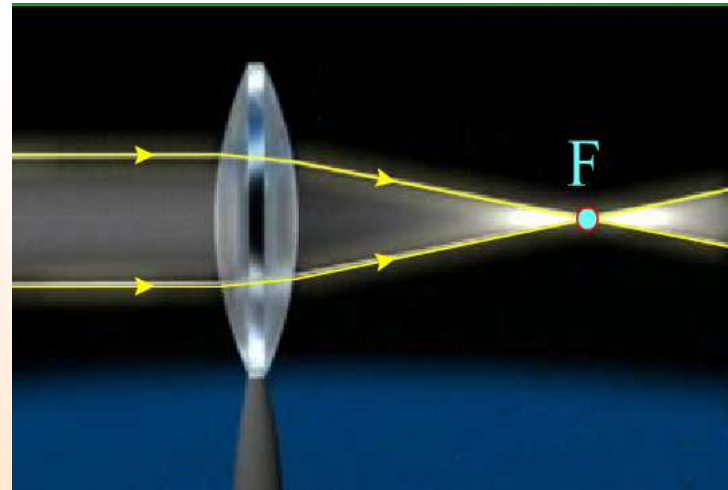
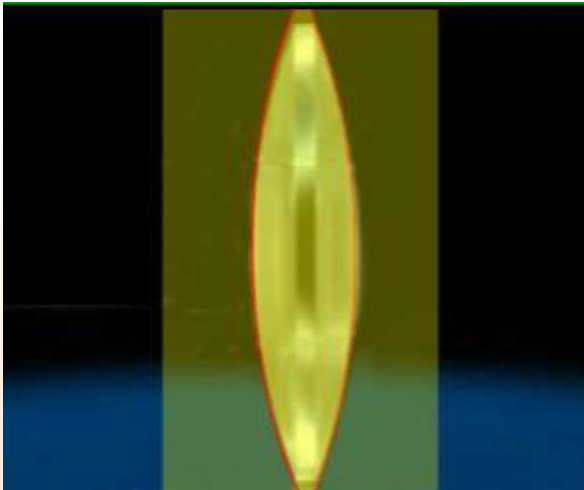
Распространение света в волоконном световоде. При сильном изгибе волокна закон полного внутреннего отражения нарушается, и свет частично выходит из волокна через боковую поверхность



Линзы

Линза – прозрачное тело, образованное двумя сферическими поверхностями либо сферическое с одной стороны и плоское с другой.

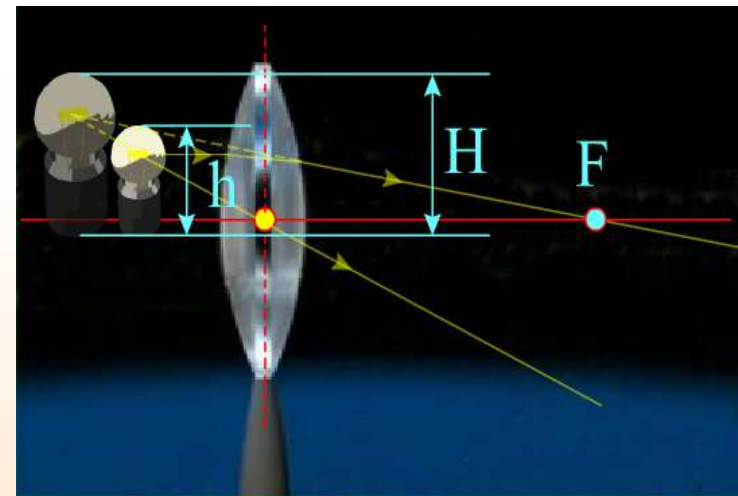
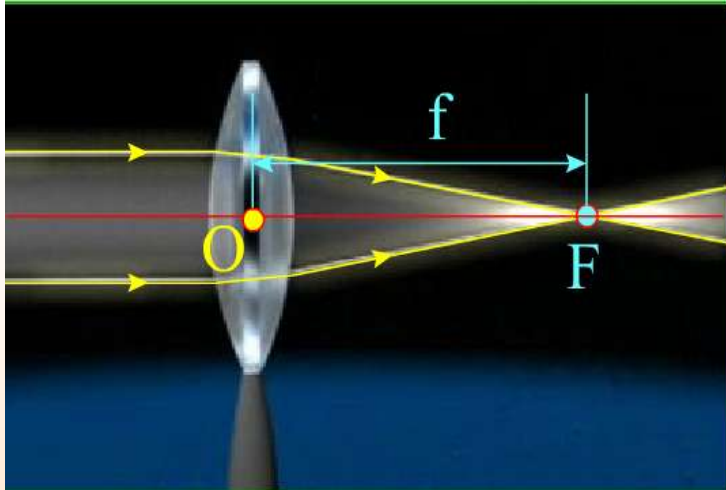
Главный фокус линзы - точка пересечения преломленных лучей, падающих на линзу параллельно главной оптической оси.



Фокусное расстояние – расстояние между главным фокусом и оптическим центром.

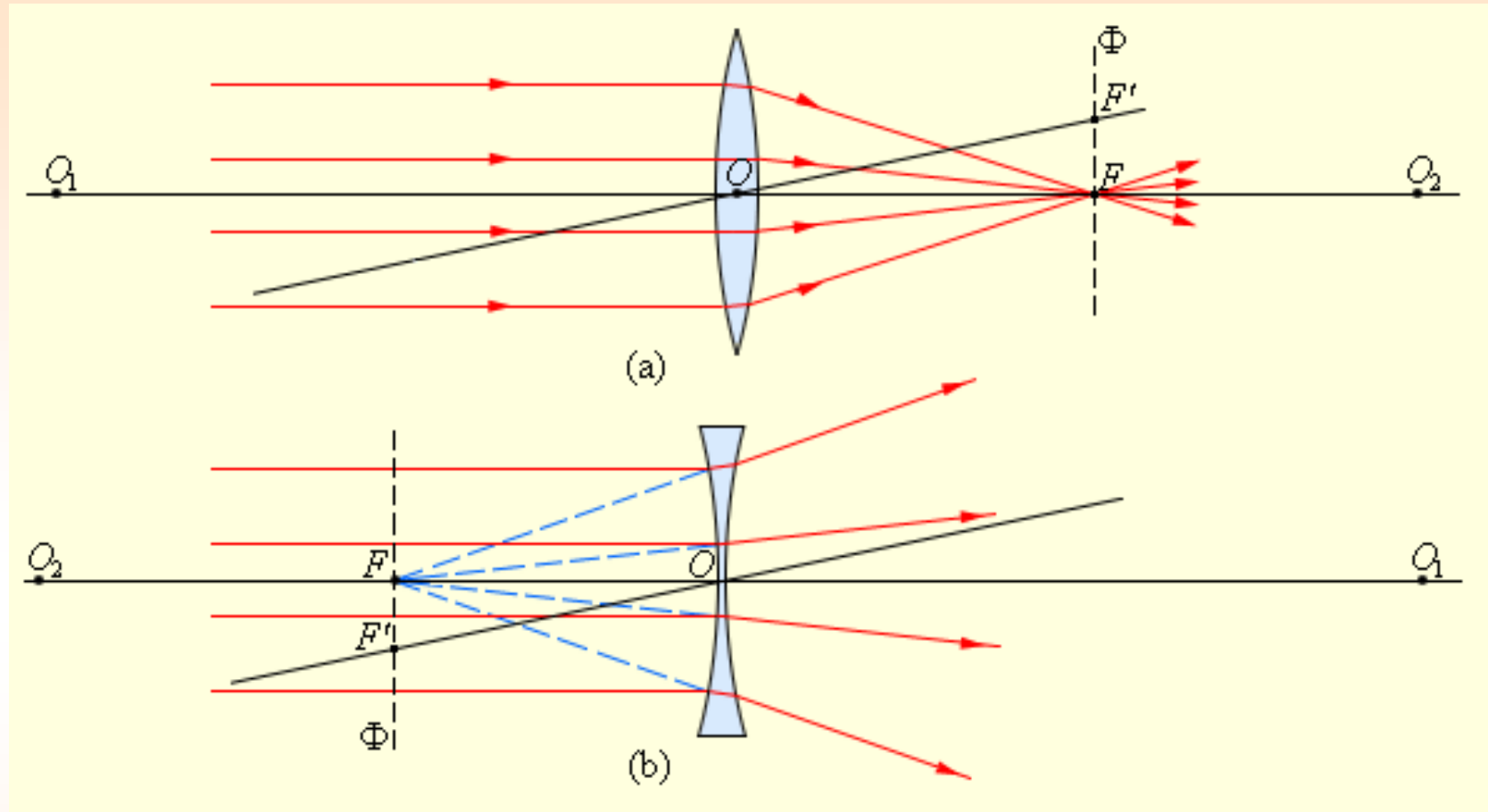
Увеличение – это отношение высоты изображения H к высоте предмета h

$$\Gamma = \frac{H}{h}$$

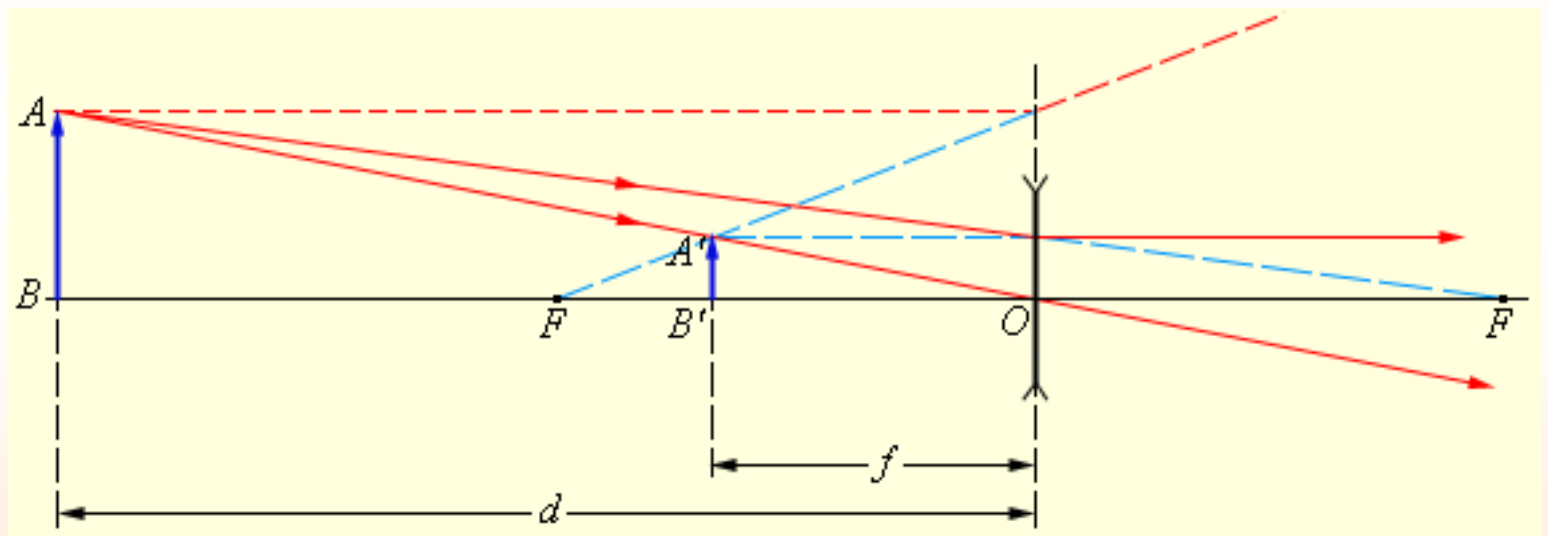
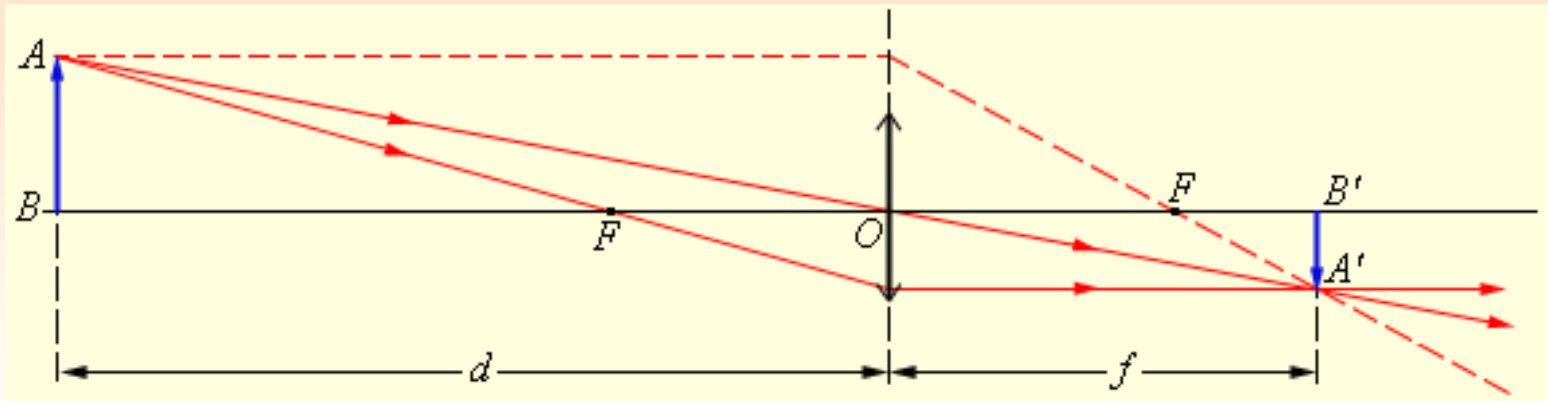


Виды линз

<p>$R_2 > 0$ $R_1 > 0$</p>	<p>$R_2 > 0$ $R_1 < 0$ $R_1 < R_2$</p>
<p>Двойко-выпуклая</p>	<p>Выпукло-вогнутая</p>
<p>$R_2 \rightarrow \infty$ $R_1 > 0$</p>	<p>$R_1 < 0$ $R_2 < 0$</p>
<p>Плоско-выпуклая</p>	<p>Двойко-вогнутая</p>
<p>$R_2 > 0$ $R_1 < 0$ $R_1 > R_2$</p>	<p>$R_1 < 0$ $R_2 \rightarrow \infty$</p>
<p>Вогнуто-выпуклая</p>	<p>Плоско-вогнутая</p>

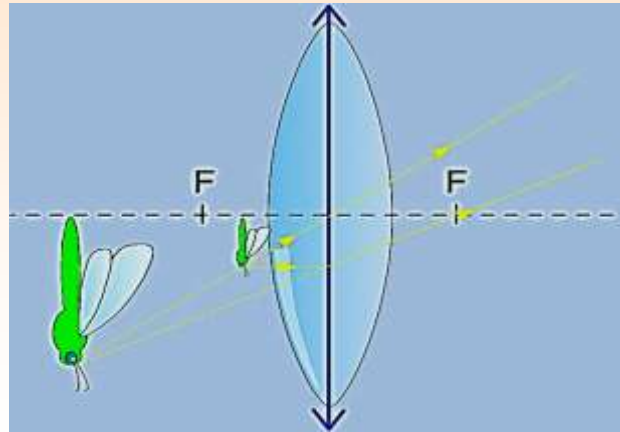


Преломление параллельного пучка лучей в собирающей (а) и рассеивающей (б) линзах. Точки O_1 и O_2 – центры сферических поверхностей, O_1O_2 – главная оптическая ось, O – оптический центр, F – главный фокус, F' – побочный фокус, OF' – побочная оптическая ось, Φ – фокальная плоскость

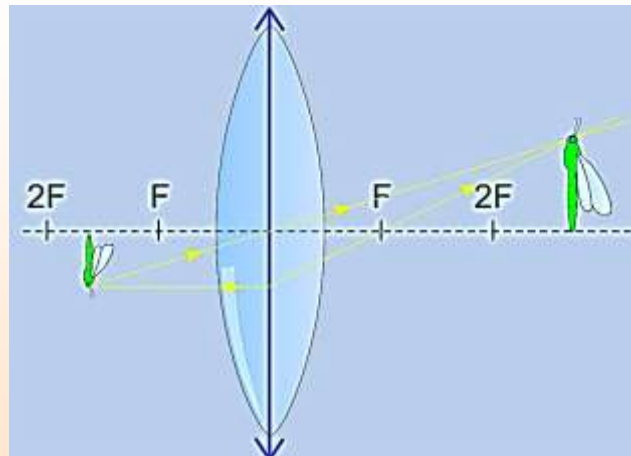


Построение изображения в собирающей
и рассеивающей линзах

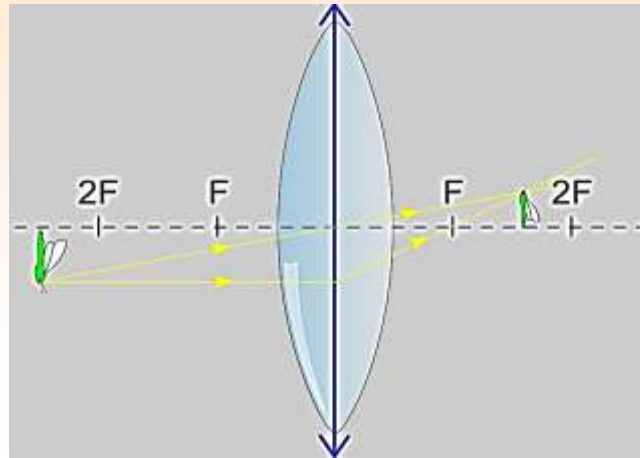
Собирающая линза. Предмет между фокусом и линзой.
Изображение мнимое, увеличенное, прямое.



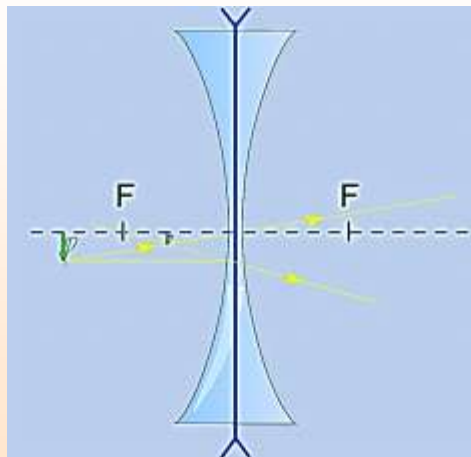
Собирающая линза. Предмет между фокусом и двойным фокусом.
Изображение действительное, увеличенное, перевернутое.



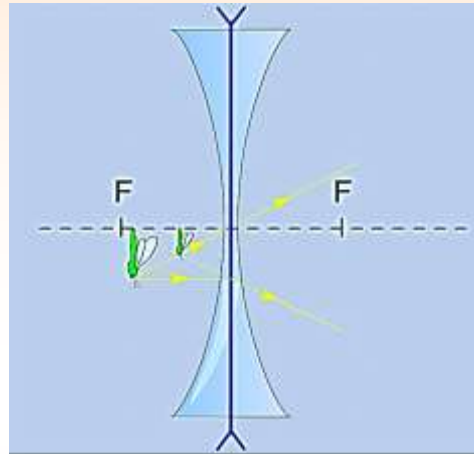
Собирающая линза. Предмет за двойным фокусом. Изображение действительное, уменьшенное, перевернутое.



Рассеивающая линза. Предмет между фокусом и двойным фокусом. Изображение мнимое, уменьшенное, прямое.



Рассеивающая линза. Предмет ближе фокуса. Изображение мнимое, уменьшенное, прямое.



Оптическая сила тонкой линзы

$$\Phi = \frac{1}{f} = \left(\frac{n_{\text{л}}}{n_{\text{ср}}} - 1\right)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right),$$

где f - фокусное расстояние линзы; $n_{\text{л}}$ - абсолютный показатель преломления вещества линзы; $n_{\text{ср}}$ - абсолютный показатель преломления окружающей среды (одинаковой с обеих сторон линзы).

Радиусы выпуклых поверхностей (R_1 и R_2) берутся со знаком плюс, вогнутых - со знаком минус.

Оптическая сила двух тонких сложенных вплотную линз

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2.$$

Формула тонкой линзы

$$\pm \frac{1}{f} = \frac{1}{a} \pm \frac{1}{b},$$

где a – расстояние от оптического центра линзы до предмета;
 b – расстояние от оптического центра линзы до изображения.

Если фокус мнимый (линза рассеивающая), то величина $f < 0$.

Если изображение мнимое, то величина $b < 0$.

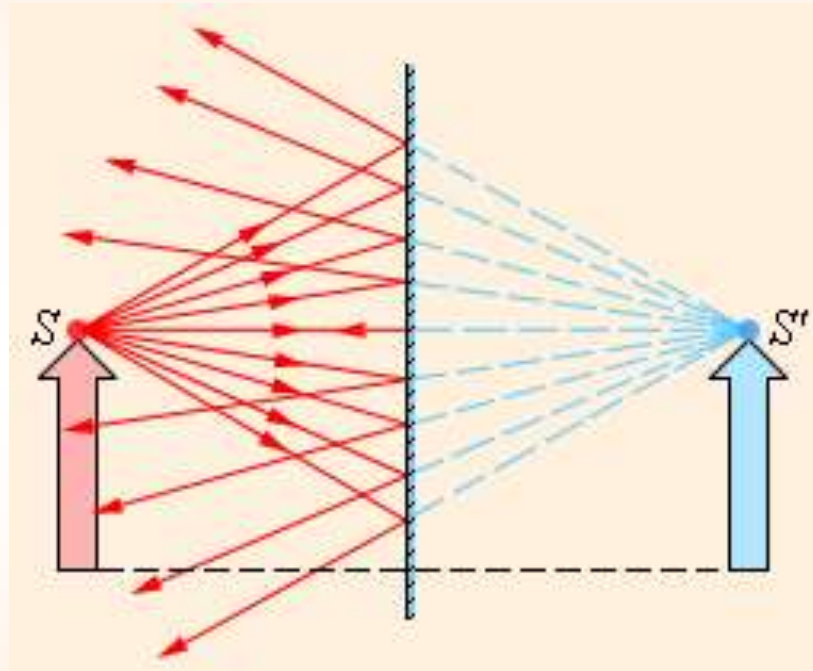
Угловое увеличение лупы

$$\Gamma = \frac{D}{f},$$

где D - расстояние наилучшего зрения ($D = 25$ см).

Зеркала

1. Плоское зеркало

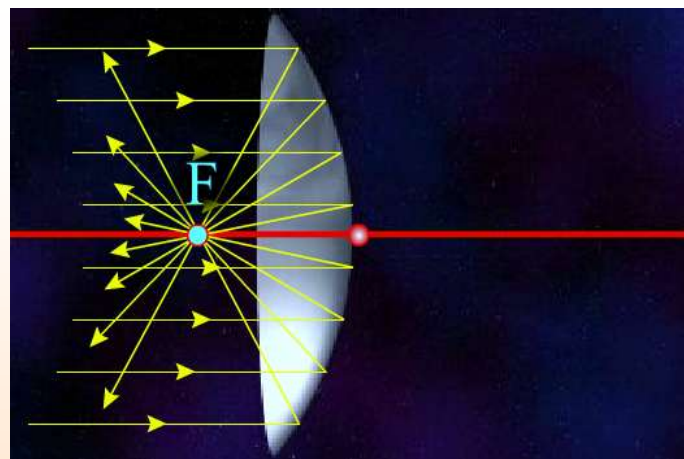
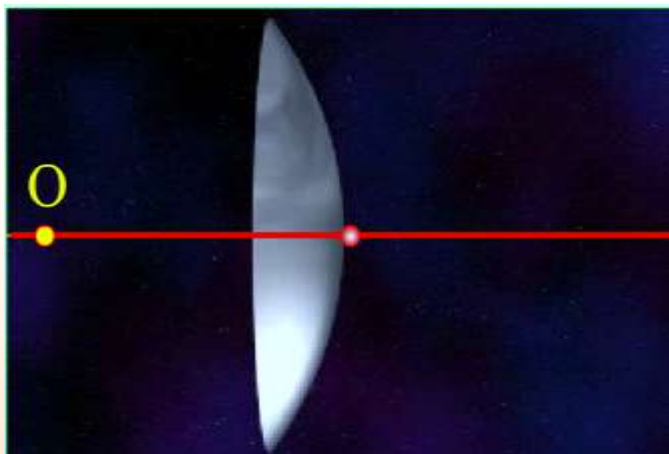


Ход лучей при отражении от плоского зеркала. Точка S' является мнимым изображением точки S

2. Сферическое зеркало — зеркально отражающая поверхность, имеющая форму сферического сегмента.

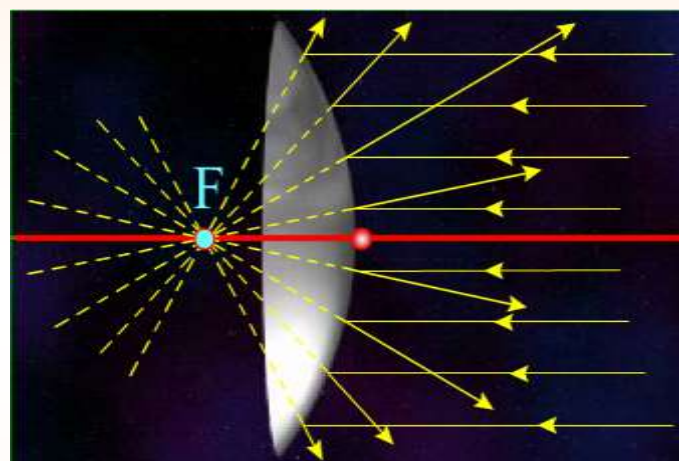
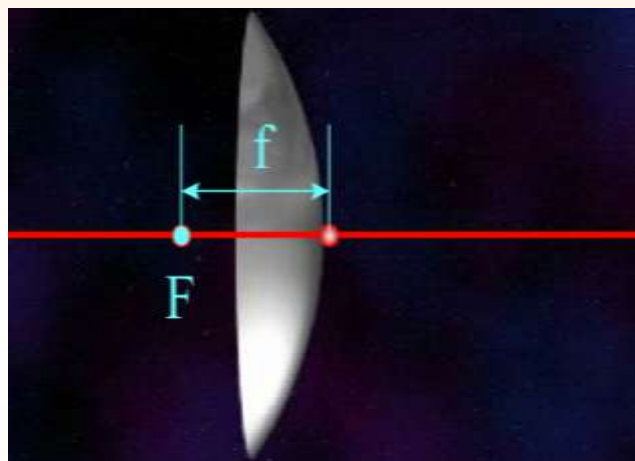
Главная оптическая ось проходит через центр кривизны и вершину зеркала

Главный фокус — это точка пересечения отраженных лучей, идущих на зеркало параллельно главной оптической оси.



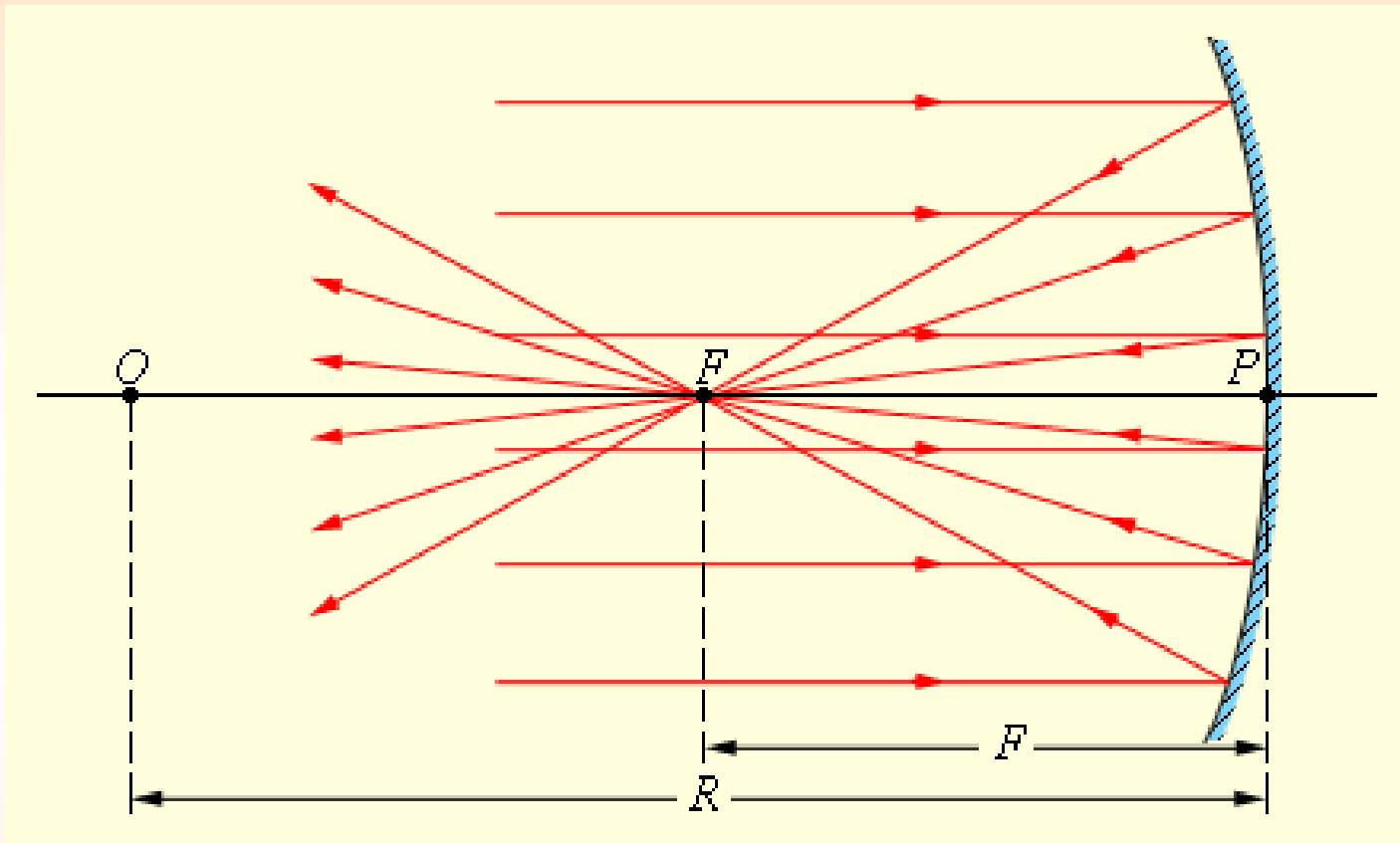
Фокусное расстояние – расстояние между фокусом и вершиной зеркала

$$f = \frac{R}{2}$$



Действительное изображение образуется в точке пересечения отраженных лучей.

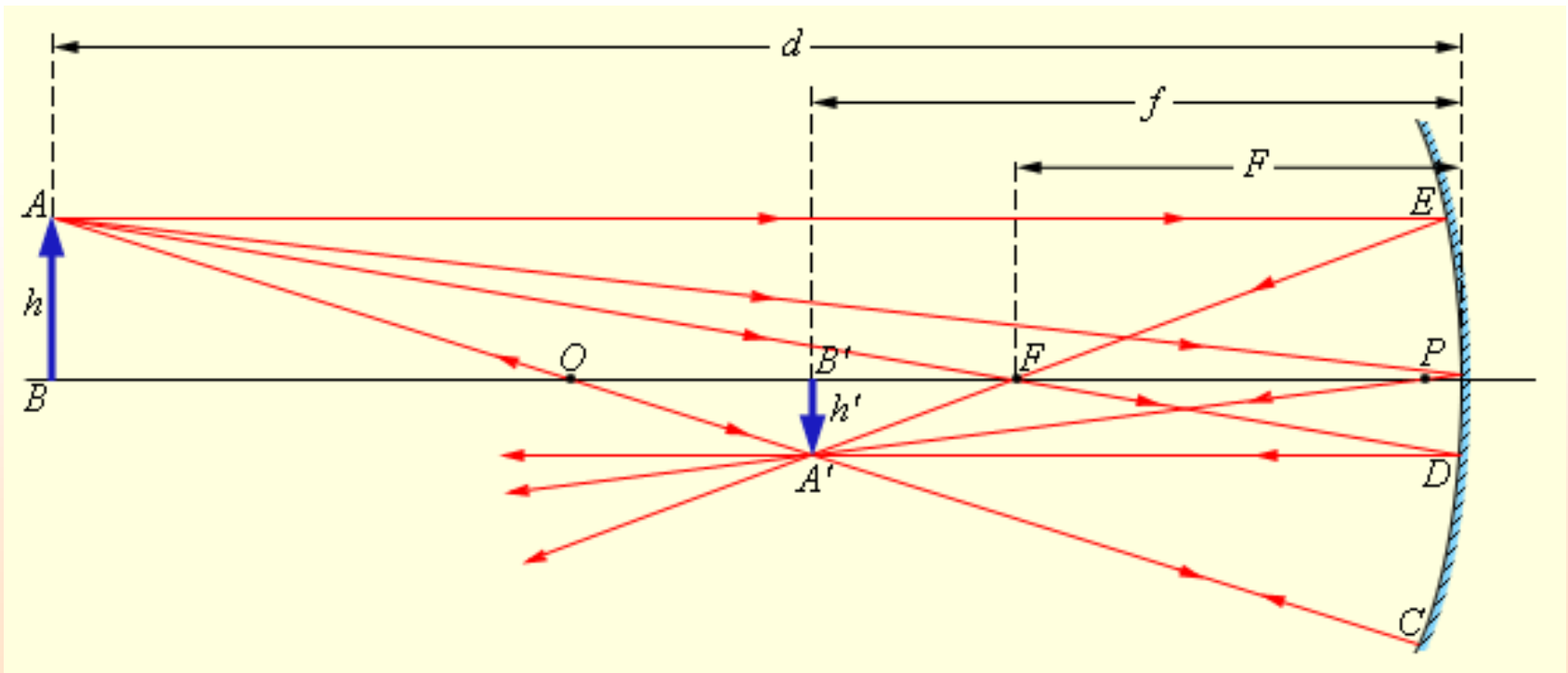
Мнимый фокус – это точка пересечения отраженных лучей, падающих параллельно главной оптической оси.



Отражение параллельного пучка лучей от вогнутого сферического зеркала. Точки O – оптический центр, P – полюс, F – главный фокус зеркала; OP – главная оптическая ось, R – радиус кривизны зеркала

Изображение в сферическом зеркале строят с помощью любой пары стандартных лучей:

- луч AOC , проходящий через оптический центр зеркала; отраженный луч COA идет по той же прямой;
- луч AFD , идущий через фокус зеркала; отраженный луч идет параллельно главной оптической оси;
- луч AP , падающий на зеркало в его полюсе; отраженный луч симметричен с падающим относительно главной оптической оси.
- луч AE , параллельный главной оптической оси; отраженный луч EFA_1 проходит через фокус зеркала.



Оптическая сила сферического зеркала

$$\Phi = \frac{1}{2f},$$

Формула сферического зеркала

$$\pm \frac{1}{f} = \frac{1}{a} \pm \frac{1}{b},$$

где a и b - расстояния от полюса зеркала соответственно до предмета и изображения.

Если изображение предмета мнимое, то величина $b < 0$.

Если фокус сферического зеркала мнимый (зеркало выпуклое), то величина $f < 0$.

2.2. Развитие взглядов на природу света

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).

1. Свет – корпускулы, испускаемые телами и летящие с огромной скоростью. К анализу движения световых корпускул Ньютон, естественно, применил сформулированные им законы механики и вывел *законы отражения и преломления*

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. - Герц экспериментально подтвердил, что электромагнитное поле распространяется со скоростью света c ;

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

В 1900 г. Макс Планк показал, что излучение абсолютно черного тела можно объяснить, если предложить, что свет излучается не непрерывно, а порциями, квантами с энергией

$$E_0 = h \cdot \nu, \text{ где}$$

ν – частота, h – постоянная Планка.



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

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

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

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

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

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

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).

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

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