

# НР

НАУКА В РЕГИОНЫ

## Методические материалы по физике (оптика)



Иннопрактика

2017

Данное пособие предлагает школьникам ознакомиться с теоретическими основами геометрической оптики и излучения атомов.

*Автор*  
*к.ф.-м.н. В.М. Курносов*



# ОПТИКА

Корректоры: В.А. Сушко  
Компьютерная верстка: В.А. Сушко

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Начала оптики</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Отражение</b>	<b>17</b>
2.1	Плоское зеркало . . . . .	18
2.2	Рассеяние . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Преломление</b>	<b>23</b>
3.1	Полное внутреннее отражение . . . . .	24
3.2	Неоднородная (слоистая) среда. . . . .	25
3.3	Явление дисперсии . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Линзы</b>	<b>29</b>
4.1	Построение изображения собирающей линзой. . . . .	33
4.2	Рассеивающая линза . . . . .	36
4.3	Построение изображения рассеивающей линзой . . . . .	37



# Предисловие от автора

Данное пособие представляет собой краткое изложение теоретической части школьного курса физики по разделу «Геометрическая оптика» в 8 классе. В пособии рассматривается природа света на квантово-механической основе, и приводятся основные законы геометрической оптики с примерами построений изображений. Способ изложения теоретического материала помогает правильному пониманию природных явлений и эффективному поиску решений олимпиадных задач.

Пособие адресовано ученикам, обучающимся в физико-математических классах, интересующихся физикой, а так же будет полезно учителям физики, работающих в таких классах.





# Глава 1

## Начала оптики

Свет является электромагнитной волной, но как и где он появляется?

Появляется свет в атоме. По представлениям Резерфорда, атом похож на солнечную систему: в центре – атомное ядро, а вокруг движутся электроны. Законы классической физики указывали на потери энергии атомом при таком движении электронов. Все электроны должны были бы упасть на ядро всего за  $10^{-8}$  с ! Однако, такого не происходит. Датчанин Нильс Бор предложил построить модель атома водорода, опираясь на два постулата (предположения, принимаемых без доказательств) и еще одно правило.

**Первый постулат Бора.** *Атомная система может находиться только в особых, стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует*

*определенная энергия. В стационарном состоянии атом не излучает.*

(Заслуга Бора здесь в том, что он "узаконил" то, что есть в природе, констатировал факт)

**Второй постулат Бора.** *При переходе атомной системы из одного стационарного состояния в другое испускается или поглощается квант электромагнитной энергии:*

$$E = E_k - E_n,$$

где  $k$  и  $n$  – номера стационарных состояний. Итак: излучение происходит в атоме, происходит порциями; частота излучения зависит только от разности энергий атома до и после излучения:

$$\begin{aligned} h\nu &= E_k - E_n, \\ \nu &= \frac{E_k}{h} - \frac{E_n}{h}. \end{aligned}$$

Согласно новой теории, электрон может находиться только на некоторых «разрешенных» орбитах, радиусы которых находят по формуле

$$r_n = \frac{\varepsilon_0 h^2 n^2}{\pi m_e e^2}.$$

Если  $n = 1$ , то  $r_0 = 0.5 \cdot 10^{-10}$  м, следовательно, радиусы других орбит равны соответственно  $r_n = 0.5 \cdot 10^{-10} \cdot n^2$  м. Энергия атома может быть найдена по формуле

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2 n^2}.$$

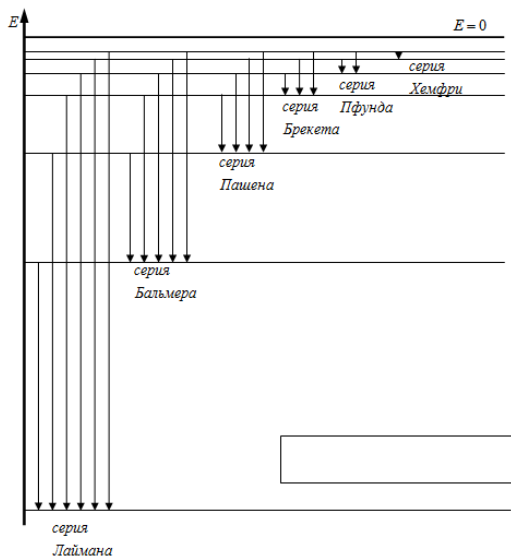
Если  $n = 1$ , то для первого (основного) состояния атома водорода легко вычислить значение энергии:

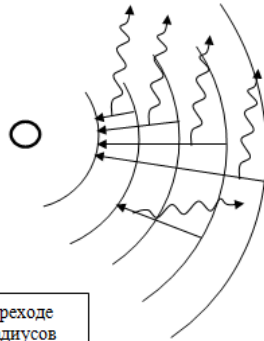
$$E_0 = -13,6 \text{ эВ},$$

а для других состояний получим другие значения:

$$E_n = -n^2 \cdot 13,6 \text{ эВ}.$$

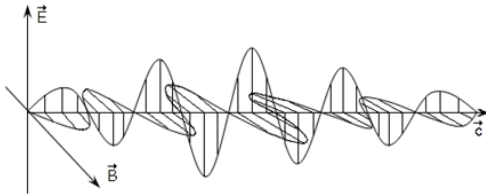
Из выше сказанного следует, что электрон может перескакивать с одного уровня на другой. Если он перескакивает вниз по энергетической диаграмме, что означает ближе к ядру (см. рисунок а и б), то атом излучает фотон с определенной энергией, равной разности энергий между уровнями перехода.





Б) Излучение атома при переходе между орбитами разных радиусов

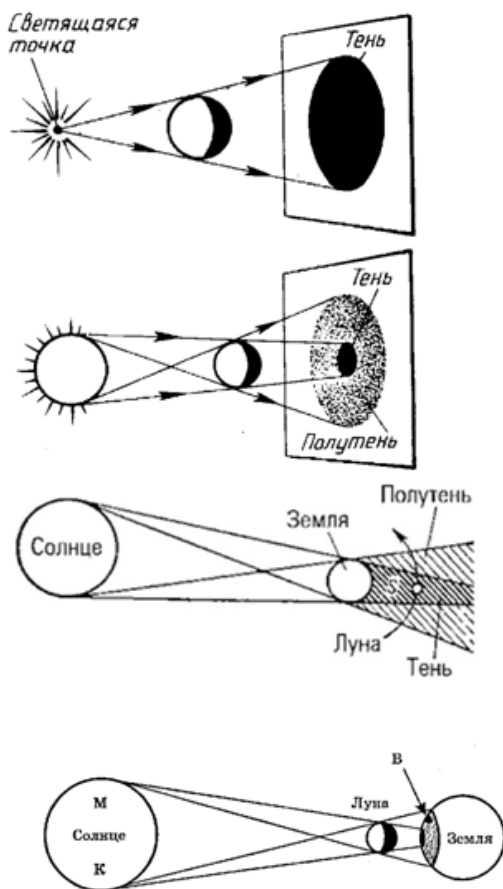
Таким образом, в атоме при переходе электрона с одного уровня энергии на другой, с меньшей энергией, происходит рождение фотона. Фотон, являясь электромагнитной волной, распространяется (перемещается, летит) со скоростью света прямолинейно.



Направления излучений атомов произвольные. Естественный свет от естественных источников распространяется во все стороны изотропно.

Прямолинейностью распространения световых лучей объясняется природное явление образование теней. А са-

ми тени мы наблюдаем и во время спектакля в теневом театре и во время лунных или солнечных затмений и т.д.



**Тенью** называют часть поверхности, на которую не попадают лучи от светового источника. Если размеры светового источника много меньше расстояния до него, то

источник называют **точечным**, если нет, то **протяженным**. **Полутенью** называют часть поверхности, на которую падают лучи от части поверхности светового источника.

Изменить его направление распространения может только вещество (среда). Взаимодействуя с ним, электромагнитные волны (фотоны) изменяют направление распространения. Наиболее часто встречающимися явлениями изменения направления распространения фотонов являются отражение и преломление. В вакууме свет распространяется со скоростью

$$c = 299792458 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Это точное значение скорости света. Это самая большая скорость в Природе. Как ее измеряли и как появилось точное значение этой скорости будет изучаться позже.

В другом веществе скорость света меньше. Физическая величина, показывающая во сколько раз скорость света в веществе меньше, чем в вакууме, называется **абсолютным показателем преломления среды**:

$$n = \frac{c}{V}.$$

Если другая среда будет однородной, то свет в ней будет распространяться так же прямолинейно, но с другой, меньшей, скоростью.

Если световой поток падает на плоскую, а, значит, и гладкую, поверхность, то световые лучи отразятся. При

<b>Показатель преломления некоторых веществ</b>	
<b>вещество</b>	<b>n</b>
алмаз	2,42
ацетон	1,36
бензин	1,39
вода	1,33
воздух	1,000271
глицерин	1,47
железо (пленка)	1,63
золото (пленка)	0,37
каменная соль	1,54
лед ( $0^\circ - 4^\circ$ )	1,31
сахар	1,56
стекло	1,5 , 1,9
эфир	1,35
янтарь	1,55

распространении, отражении и преломлении, световые лучи идут так, что для них применим принцип Ферма.

### **Принцип Ферма**

- *Луч света всегда распространяется в пространстве между двумя точками по тому пути, по которому время его прохождения меньше, чем по любому из всех других путей, соединяющих эти точки. (Принцип наименьшего времени).*

- *При распространении световых лучей из всех близких между собой путей свет выбирает тот путь, где произведение геометрического пути на показатель преломления среды будет минимальным. (Принцип наименьшего пути).*

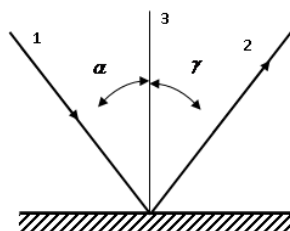


# Глава 2

## Отражение

Основные термины:

1. - луч падающий;
2. - луч отраженный;
3. - перпендикуляр, восстановленный в точке падения;



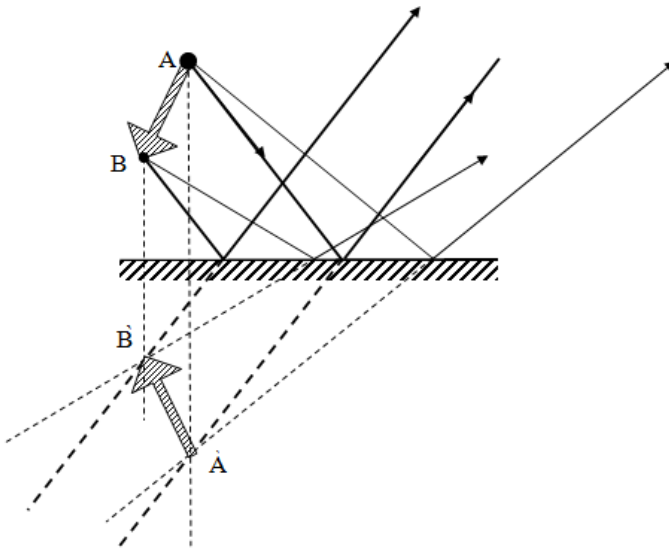
$\alpha$  - угол падения – угол между лучом падающим и перпендикуляром, восстановленным в точке падения;

$\gamma$  – угол отражения – угол между лучом отраженным и перпендикуляром, восстановленным в точке падения.

Каждая среда характеризуется некоторым свойством – **показателем преломления**. Произведение длины геометрического хода луча на показатель преломления среды называют **оптическим ходом волны** (луча).

**Закон отражения.**

- Луч падающий, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости.
- Угол падения равен углу отражения.

**2.1 Плоское зеркало**

При рассмотрении хода лучей, вышедших из начала и конца предмета (стрелки), и отразившихся от плоского

зеркала, можно доказать, что точка  $A'$  симметрична точке  $A$ , и точка  $B'$  симметрична точке  $B$ . (Предлагаем провести доказательства самостоятельно). Следовательно, изображение:

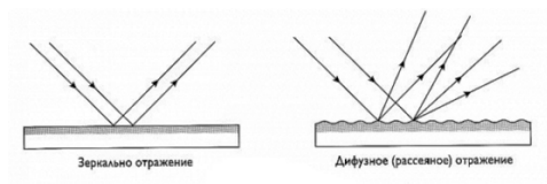
- равновеликое
- мнимое (пересекаются продолжения лучей)
- зеркальное

Зеркальные поверхности отражают не одинаково хорошо. Коэффициент отражения зависит от многих характеристик падающего излучения.

Для астрономических целей поверхности зеркал обрабатывают разными методами, в частности жестким излучением, повышая коэффициент отражения до 94%.

## 2.2 Рассеяние

Если поверхность не гладкая, то свет будет рассеиваться. Отражение называют рассеянным.



<b>Коэффициент зеркального отражения света различными поверхностями</b>	
<b>вещество</b>	<b>%</b>
серебро	93
серебро (пленка)	88
ртуть	73
ртуть (амальгама)	71
алюминий	89
сталь	57
алмаз	17
стекло ( $n= 1,7$ )	7
стекло ( $n= 1,5$ )	4
вода	2

<b>Рассеянное отражение света различными поверхностями</b>	
<b>вещество</b>	<b>%</b>
поверхность, покрытая оксидом магния (II)	98
бумага белая, мелованная	85
бумага белая, обычная	60,70
бумага желтая, голубая	25
бумага черная	5
снег	85
стена белая оштукатуренная	70
кожа человека	35
обои серые	20
сукно черное	2
бархат черный	0,5

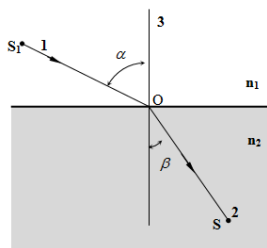


# Глава 3

## Преломление

Рассмотрим распространение луча света через границу двух однородных сред с показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ .

1. - луч падающий;
2. - луч отраженный;
3. - перпендикуляр, восстановленный в точке падения;



$\alpha$  - угол падения – угол между лучом падающим и перпендикуляром, восстановленным в точке падения;

$\beta$  – угол преломления– угол между лучом отраженным и перпендикуляром, восстановленным в точке падения.

### Закон преломления

- Луч падающий, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости.
- Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для данных двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{\text{отн}} \quad - \text{закон Снеллиуса (Снелла)}.$$

Удобнее этот закон записывать в виде

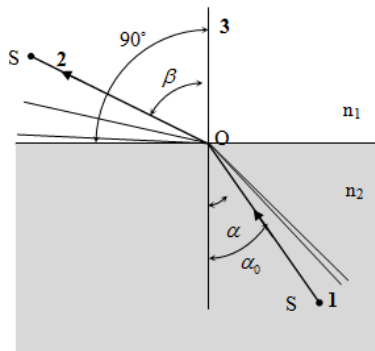
$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad - \text{закон Снелла}.$$

### 3.1 Полное внутреннее отражение

Рассмотрим распространение светового луча из среды с большим показателем преломления (оптически более плотной) в среду с меньшим показателем (оптически менее плотную).

В силу принципа обратимости хода световых лучей, траектория распространения от источника  $S_2$  к точке  $S_1$  останется прежней.

Теперь угол падения равен  $\alpha$ , а угол преломления равен  $\beta$ . Если угол падения увеличить, то воз-





растет и угол преломления, но он будет увеличиваться быстрее, чем угол падения. При некотором угле падения  $\alpha_0$  угол преломления достигнет значения  $90^\circ$ . Это угол называют предельным углом. При дальнейшем увеличении угла падения, угол преломления не имеет значений. В этих случаях свет полностью отражается от поверхности, создавая явление полного внутреннего отражения. Закон преломления для этого (предельного) случая выглядит так:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin 90^\circ} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n_{\text{отн}}}, \text{ откуда}$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n_{\text{отн}}} - \text{ предельный угол.}$$

## 3.2 Неоднородная (слоистая) среда.

Если свет проходит через неоднородную среду, то ее иногда можно представить как ряд плоскопараллельных слоев с разными показателями преломления.

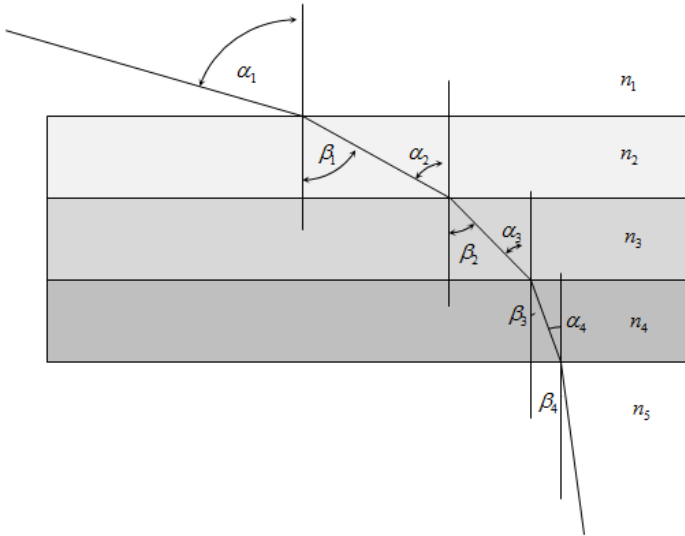
В этом случае рассматриваем явление преломления на каждой поверхности, записываем закон Снелла для этих точек:

На первой поверхности:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{n_2}{n_1} \text{ или } n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \beta_1; \quad \text{заметим, что } \alpha_2 = \beta_1.$$

На второй поверхности

$$\frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{n_3}{n_2} \text{ или } n_2 \cdot \sin \alpha_2 = n_3 \cdot \sin \beta_2; \quad \text{заметим, что } \alpha_3 = \beta_2.$$



На третьей поверхности

$$\frac{\sin \alpha_3}{\sin \beta_3} = \frac{n_4}{n_3} \text{ или } n_3 \cdot \sin \alpha_3 = n_4 \cdot \sin \beta_3; \quad \text{заметим, что } \alpha_4 = \beta_3.$$

На четвертой поверхности

$$\frac{\sin \alpha_4}{\sin \beta_4} = \frac{n_5}{n_4} \text{ или } n_4 \cdot \sin \alpha_4 = n_5 \cdot \sin \beta_4$$

В итоге получим:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 = n_3 \cdot \sin \alpha_3 = n_4 \cdot \sin \alpha_4 = n_5 \cdot \sin \beta_4.$$

Устраняя промежуточные равенства, можем записать:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_5 \cdot \sin \beta_4$$

Если задан закон изменения показателя преломления, то сможем найти значение  $n_5$ , зная значение  $n_1$ , и сможем найти  $\beta_4$ .

Сам закон преломления для неоднородной среды удобно записывать в виде:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2 = n_3 \cdot \sin \alpha_3 = n_4 \cdot \sin \alpha_4 = \dots$$

### 3.3 Явление дисперсии

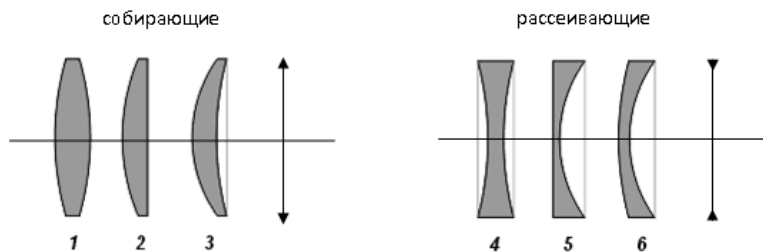
Рассмотрев явление преломления, можем заметить, что показатель преломления среды зависит от «цвета» падающего излучения (зависит от длины волны) и это явление зависимости называют дисперсией, и зависит от температуры вещества. Таблицы позволят провести небольшой анализ этих зависимостей.

<b>Показатель преломления для световых волн различной длины</b>				
Вещество	показатель преломления при длинах волн			
	759 нм	589,8 нм	486 нм	397 нм
	красный	желтый	голубой	фиолетовый
вода	1,329	1,333	1,337	1,344
стекло	1,51	1,515	1,521	1,531

<b>Показатель преломления воды при различной температуре</b>	
<b>температура, °С</b>	<b>n</b>
0	1,3339
10	1,3337
20	1,3330
30	1,3319
40	1,3306
50	1,3289
60	1,3272
70	1,3251
80	1,3229
90	1,3205
100	1,3178

# Глава 4

## ЛИНЗЫ



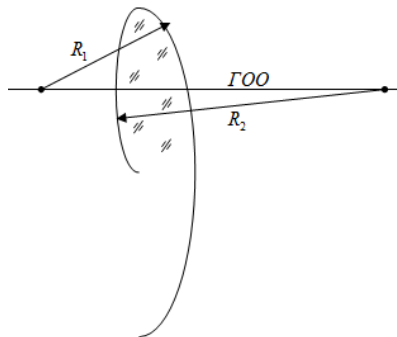
Линзой называют прозрачное (для данного диапазона излучения) тело, ограниченное двумя поверхностями вращения (например сферическими). Линзы бывают:

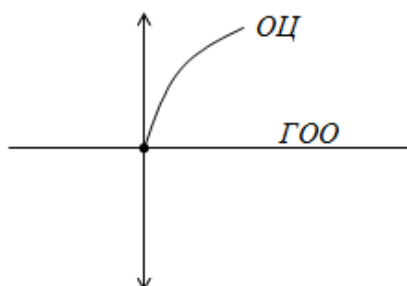
- собирающими (двояковыпуклые, плосковыпуклые, выпукло-вогнутые)
- рассеивающими (двояковогнутые, плосковогнутые, выпукло-вогнутые)

И те, и другие имеют обозначения для изображения их в схемах. Символы не являются стрелками, это указание, что линза в середине толще (собирающая) или тоньше (рассеивающая).

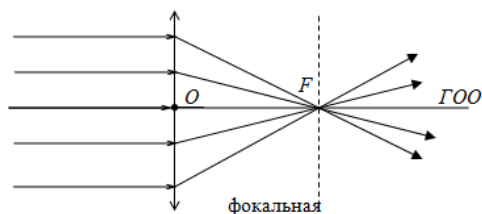
Реальная линза имеет два центра кривизны поверхностей вращения. Прямая, проходящая через эти центры, называется **Главной Оптической Осью** (ГОО).

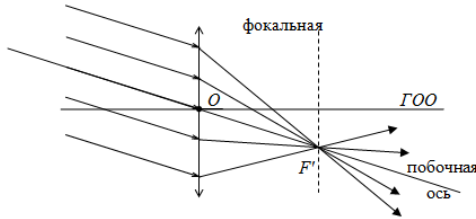
**Тонкая линза** – модель, в которой толщиной линзы можно пренебречь, следовательно, Оптический Центр (ОЦ) – точка пересечения ГОО с плоскостью линзы.





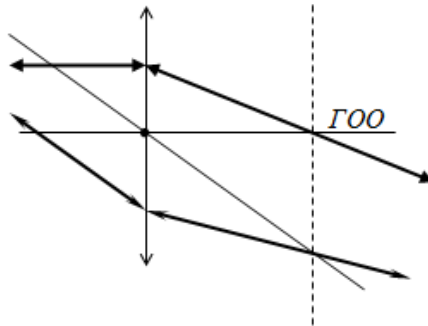
Если на собирающую линзу направить поток лучей, параллельных ГОО, то эти лучи пересекутся за линзой на ГОО в точке, называемой Главным Фокусом линзы, или просто фокусом  $F$ . Плоскость, параллельная плоскости линзы, и содержащая точку фокуса, называют фокальной плоскостью. Расстояние  $OF$  называют фокусным расстоянием, для собирающей линзы оно положительное.





Если на собирающую линзу направить поток лучей, параллельных некоторой побочной оси, проходящей через  $O$ , то эти лучи пересекутся за линзой на этой побочной оси в точке, называемой Побочным Фокусом линзы  $F'$ . Побочный фокус тоже лежит на фокальной плоскости. Фокальная плоскость полностью состоит из побочных фокусов. Побочный фокус – есть точка пересечения побочной оси и фокальной плоскости.

В силу обратимости хода лучей можем констатировать:



- луч, падающий на линзу параллельно ГОО (побочной оси), потом идет через фокус (побочный фокус);

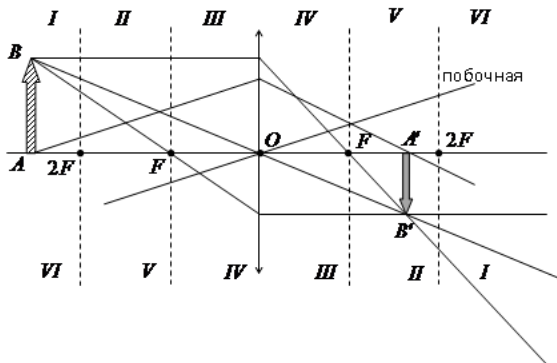


#### 4.1. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ

- луч, падающий на линзу через фокус (побочный фокус), потом идет параллельно ГОО (побочной оси).

(Обратимость на рисунке показана двунаправленной стрелкой)

### 4.1 Построение изображения собирающей линзой.



Пространство около линзы разделим на шесть секторов (*I, II, III, IV, V, VI*). Пусть предмет *AB* находится в первом секторе. Из точки проведем три луча:

1. сначала параллельно ГОО, потом через фокус,
2. через ОЦ,
3. Сначала через фокус, потом параллельно ГОО.

Пересечение трех лучей в точке  $B'$  дает изображение этой точки. Для построения изображения т.А проведем произвольный луч на линзу и побочную ось через ОЦ параллельно произвольному лучу. Получим побочный фокус. Проведем дальнейший ход луча. Второй луч представляет собой ГОО. Пересечение этих лучей дает точку  $A'$ .

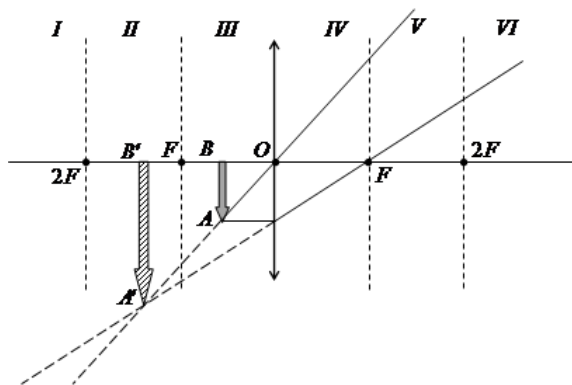
Изображение предмета  $A'B'$ : УМЕНЬШЕННОЕ, ОБРАТНОЕ, ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ, перешло  $I \rightarrow V$ .

Примером применения могут служить: фотоаппарат, видео и кинокамеры, веб камеры и т.п. Если применить принцип обратимости хода лучей, то заметим, что изображение  $A'B'$  можем считать предметом, а  $AB$  – изображением. В таком случае, пользуясь нижним разделением на секторы, изображение предмета: УВЕЛИЧЕННОЕ, ОБРАТНОЕ, ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ, перешло  $II \rightarrow VI$ .

Примером применения могут служить: медиа проектор, кинопроектор, фотоувеличитель и т.п.

Осталось рассмотреть построение изображения, находящегося в секторе  $III$ . Построив два луча, видим, что они расходятся. Однако продолжения лучей в обратную сторону пересекутся. В этом случае мы получаем изображение, но только мнимое. Оно находится дальше от линзы, чем сам предмет.

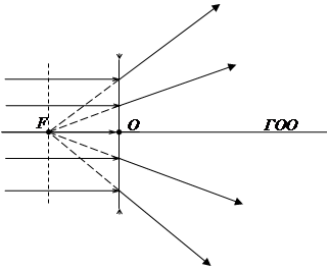
#### 4.1. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ СОБИРАЮЩЕЙ ЛИНЗЫ



Изображение предмета: УВЕЛИЧЕННОЕ, ПРЯМОЕ, МНИМОЕ, перешло  $III \rightarrow I, II$ .

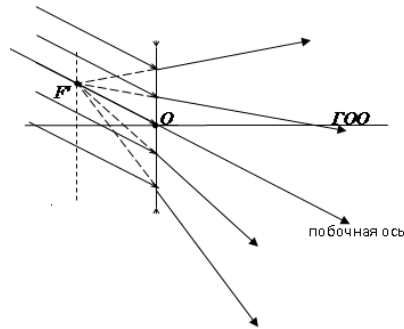
Примером применения может служить лупа.

## 4.2 Рассеивающая линза



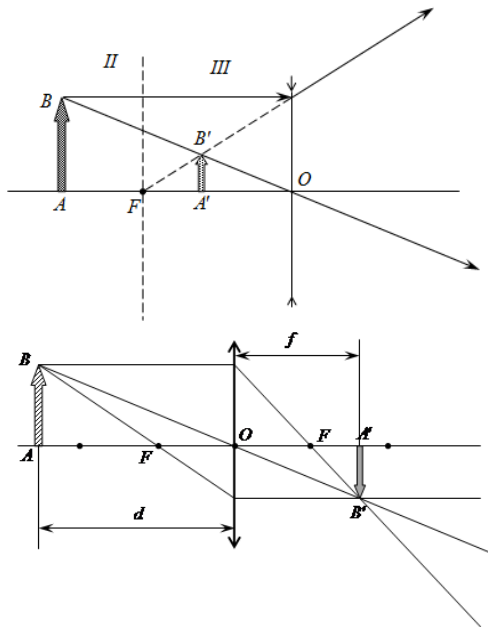
Если на рассеивающую линзу направить поток лучей, параллельных  $ГОО$ , то эти лучи после линзы идут так, что продолжения лучей в обратную сторону пересекутся на  $ГОО$  в точке, называемой Главным Фокусом линзы, или просто фокусом  $F$ . Плоскость, параллельная плоскости линзы, и содержащая точку фокуса, называют фокальной плоскостью. Фокусное расстояние рассеивающей линзы считается отрицательным.

Если на рассеивающую линзу направить поток лучей, параллельных некоторой побочной оси, проходящей через  $ОЦ$ , то эти лучи после линзы пойдут так, что их продолжения пересекутся на этой побочной оси в точке, называемой Побочным Фокусом линзы  $F'$ . Побочный фокус тоже лежит на фокальной плоскости. Побочный фокус – есть точка пересечения побочной оси и фокальной плоскости.



### 4.3 Построение изображения рассеивающей линзой

Если предмет находится в секторе *I* или *II*, то изображение неизбежно окажется в секторе *III*. Изображение будет: УМЕНЬШЕННОЕ, ПРЯМОЕ, МНИМОЕ;  $I, II \rightarrow III$ .



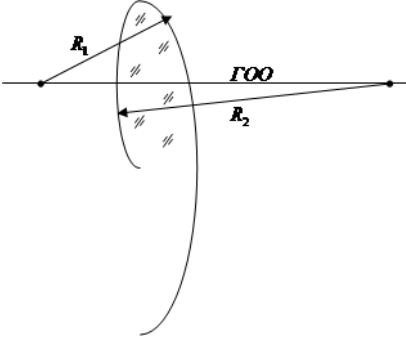
Договоримся обозначать:

$d$  – расстояние от предмета до поверхности линзы,  
 $f$  – расстояние от поверхности линзы до изображения.

$$D = \frac{1}{F} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad - \text{оптическая сила линзы,}$$

$$[D] = 1 \text{ дптр} = \frac{1}{\text{м}} = 1 \text{ диоптрия.}$$

$R_1$  и  $R_2$  - радиусы кривизны поверхностей линзы (индексы 1 и 2 по ходу луча света),



$n$  — показатель преломления материала линзы (вокруг линзы — вакуум).

В простейшем варианте формула тонкой линзы будет иметь вид:

$$\boxed{\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}}$$
 - формула тонкой линзы

### 4.3. ПОСТРОЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ РАССЕЙВАЮЩЕЙ ЛИНЫ

#### **Правила знаков**

Для правильного применения формулы необходимо знать правила знаков в этой формуле:

- $d > 0$  – предмет действительный,
- $d < 0$  – предмет мнимый,
- $f > 0$  – изображение действительное,
- $f < 0$  – изображение мнимое,
- $F > 0$  – линза собирающая,
- $F < 0$  – линза рассеивающая.