

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИКА

6.1. Цель работы

1. Целью данной работы является практическое ознакомление с основами геометрической оптики.

6.2. Основные теоретические сведения

Перед прочтением данной работы рекомендуется прочитать Введение и пункты №№ 1-7, 16, 27-31 Приложения к сборнику «Оптика. Лабораторный практикум по физике. 11класс», изд. шк. 1580, 2007 г. (есть на сайте школы).

Световой луч в геометрической оптике – линия, вдоль которой переносится световая энергия. Менее чётко, но более наглядно, можно назвать световым лучом пучок света малого поперечного размера.

Понятие светового луча является основным приближением геометрической оптики. В этом определении подразумевается, что направление потока энергии (ход светового луча) не зависит от поперечных размеров пучка света. В силу того, что свет представляет собой волновое явление, имеет место дифракция, то есть явление отклонения света от прямолинейного направления распространения при прохождении вблизи препятствий. Однако в тех случаях, когда характерные поперечные размеры пучков света достаточно велики по сравнению с длиной волны, можно пренебречь расходимостью пучка света и считать, что он распространяется в одном единственном направлении: вдоль светового луча.

В основе геометрической оптики лежат пять законов.

1. Закон прямолинейного распространения света. В однородной среде свет распространяется прямолинейно. Лучи света являются прямыми линиями.

2. Закон независимости световых лучей. Лучи при пересечении не возмущают друг друга. Пересечения лучей не мешают каждому из них распространяться независимо друг от друга.

Другие два закона относятся к случаю падения света на гладкую поверхность. Направив узкий пучок (луч) света на границу раздела двух сред, можно заметить, что частично свет возвращается в первую среду (отражается), а частично проникает во вторую среду (преломляется), меняя при этом направление своего распространения (рис. 6.1).

При распространении света в любой среде всегда имеет место поглощение света, которое зависит от свойств среды. При этом переносимая светом энергия превращается в тепловую, и среда нагревается. Если свет полностью поглощается средой при прохождении малых расстояний, то среда называется непрозрачной. Если свет может проходить в среде большие расстояния, ослабевая незначительно, то среда называется прозрачной.

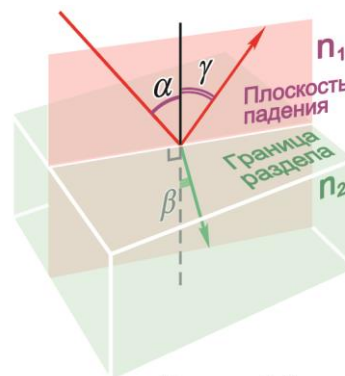


Рисунок 6.1

4. Закон преломления света (закон Снеллиуса) [открыл в 1621 г голландский математик *Willebrord Snel van Royen*]. Падающий луч, преломленный и перпендикуляр к границе раздела двух сред, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости. Отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для этих двух сред:

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

Для изменения направления световых лучей служат зеркала, стеклянные призмы и линзы. При этом используются последние два закона.

6.2.1. Преломление света тонкой призмой (клином)

Рисунок 6.2

Запишем закон преломления света на поверхностях клина:

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \beta, \quad \sin \varepsilon = n \cdot \sin \delta$$

Из треугольников ABC и ABD следует:

$$\varphi = (\alpha - \beta) + (\delta - \varepsilon), \quad \varepsilon = \theta - \beta.$$

$$\alpha = n\beta, \quad \varepsilon = n\delta.$$

Из последних четырёх уравнений найдём

$$\varphi = (n - 1)\theta, \quad (6.1)$$

Бауманская инженерная школа № 1580

6.2.2. Бипризма Френеля

Бипризма Френеля – это оптическое устройство для наблюдения интерференции света, когда необходима пара когерентных источников света (то есть с одинаковой частотой и постоянной разностью фаз их колебаний). Бипризма представляет собой сложенные своими основаниями две одинаковых треугольных прямоугольных призмы с очень малым преломляющим углом θ . На практике бипризму обычно изготавливают из пластинки стекла (рис. 6.3). Обе половинки бипризмы преломляют луч света на одинаковый угол φ , но в противоположных направлениях. Если точечный источник света расположить, как показано на рис. 6.3, то лучи света после преломления в бипризме будут идти также, как если бы они исходили от двух источников света S_i и S_j , находящихся на расстоянии h_1 друг от друга:

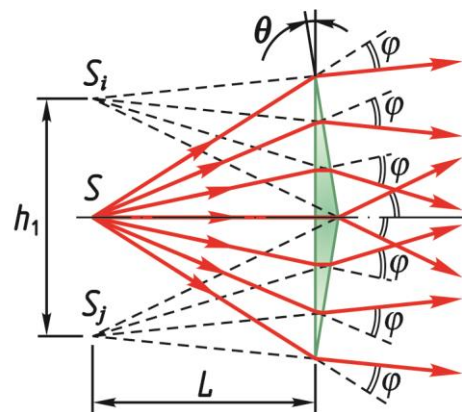


Рисунок 6.3

$$h_1 = 2L \operatorname{tg} \varphi \approx 2L\varphi = 2L(n - 1)\theta. \quad (6.2)$$

Поэтому, если через бипризму посмотреть на источник света, то вместо одного будет видно два источника, но вдвое меньшей яркости.

6.2.3. Тонкая линза

Линза – это прозрачное тело, ограниченное двумя сферическими поверхностями, либо сферической поверхностью и плоскостью. Различают 6 типов линз (рис. 6.4):

- если параллельные лучи сходятся по другую сторону линзы, то линза называется собирающей (в середине должны быть толще (рис. 6.5.), если $n_{\text{линзы}} > n_{\text{среды}}$): выпукло-вогнутая, плоско-выпуклая, двояковыпуклая;

- если параллельные лучи после преломления в линзе становятся расходящимися, то линза называется рассеивающей (в середине тоньше): двояковогнутая, плосковогнутая, вогнуто-выпуклая (рис. 6.6). На рис. 6.4: $R_1 < R_2 < R_3 < R_4$.

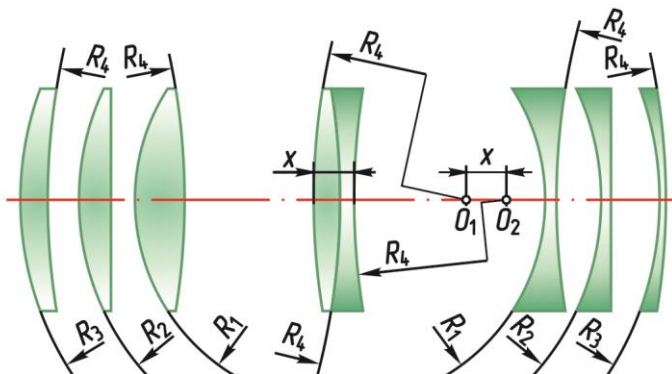


Рисунок 6.4

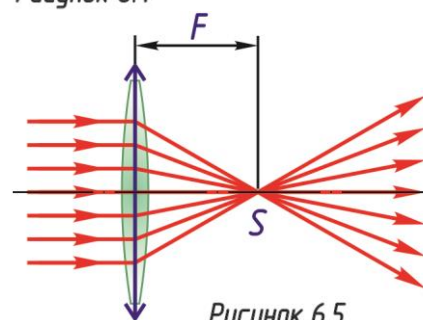


Рисунок 6.5

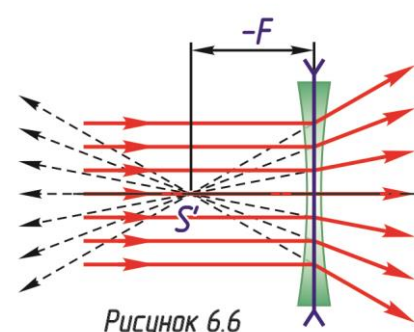


Рисунок 6.6

Прямая, соединяющая центры сферических поверхностей, называется главной оптической осью.

В дальнейшем на ФП мы будем иметь дело только с собирающими линзами и будем их называть просто линзами. А прохождение света через линзу будет рассматриваться в приближении параксиальной оптики. Это означает, что направление распространения света всегда представляет малый угол с оптической осью и лучи пересекают любую поверхность на малом расстоянии от оптической оси.

Рассмотрим линзу (рис. 6.7), ограниченную двумя сферическими поверхностями, с радиусами R_1 и R_2 , выходящих с центров O_1 и O_2 соответственно, и луч, падающий на линзу параллельно её главной оптической оси. Если к поверхностям этой линзы в точках падения луча A и точке выхода преломлённого луча B , провести касательные, то они пересекутся под углом

$$\alpha_1 + \alpha_2 = \arcsin \frac{h_1}{R_1} + \arcsin \frac{h_2}{R_2}.$$

Примечание. На рис. 6.7 для наглядности изображена линза с преувеличенными толщиной и высотами h_1 и h_2 по сравнению с размерами R_1 , R_2 и F ; соответственно и углы α_1 , α_2 и θ на рисунке также излишне велики.

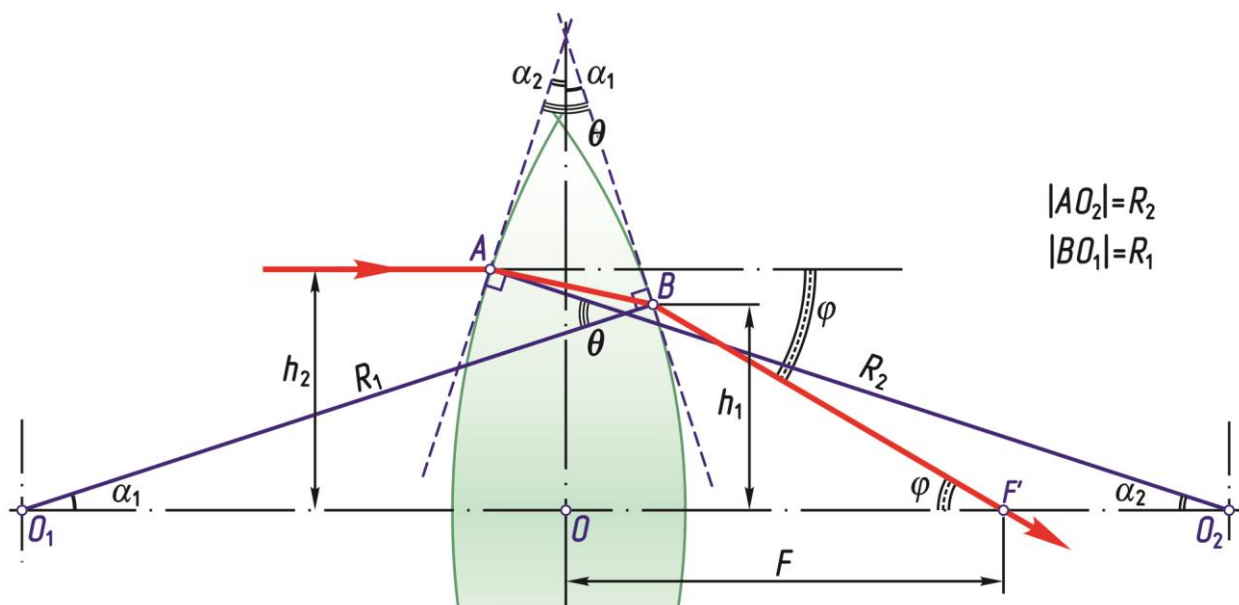


Рисунок 6.7

Эти касательные образуют клин с углом $\theta = \alpha_1 + \alpha_2$, пройдя который луч отклонится на угол φ . То есть для данного части линзы угол отклонения такой же, как в клине, и равен

$$\varphi = (n - 1)\theta = (n - 1)(\alpha_1 + \alpha_2) = (n - 1)\left(\arcsin \frac{h_1}{R_1} + \arcsin \frac{h_2}{R_2}\right).$$

Линза будет тонкой, если углы α_1 и α_2 малы, то есть можно считать, что:

$$\alpha_1 \approx \sin \alpha_1 = \frac{h_1}{R_1} \quad \text{и} \quad \alpha_2 \approx \sin \alpha_2 = \frac{h_2}{R_2}.$$

Для тонкой линзы также $h_1 \approx h_2 = h$ и соответственно:

$$\varphi \approx \sin \varphi = \frac{h}{F}.$$

Учитывая это, получим:

$$\varphi = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) h = \frac{h}{F}, \quad \text{откуда:}$$

$$F = \frac{1}{n - 1} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (6.3)$$

Поскольку h не входит в эту формулу, то это значит, что любой луч, параллельный главной оптической оси линзы, входящий в линзу на любом, но достаточно малом (по сравнению с R_1 и R_2) расстоянии h от оси, пройдет после преломления через одну и ту же точку F' , которая находится на расстоянии F от оптического центра линзы.

При практическом применении полученных соотношений необходимо помнить о принятых упрощениях для тонких линз, так как они на реальных линзах не выполняются строго, что будет сказываться в виде довольно большой погрешности при визуальных определениях расположения фокуса.

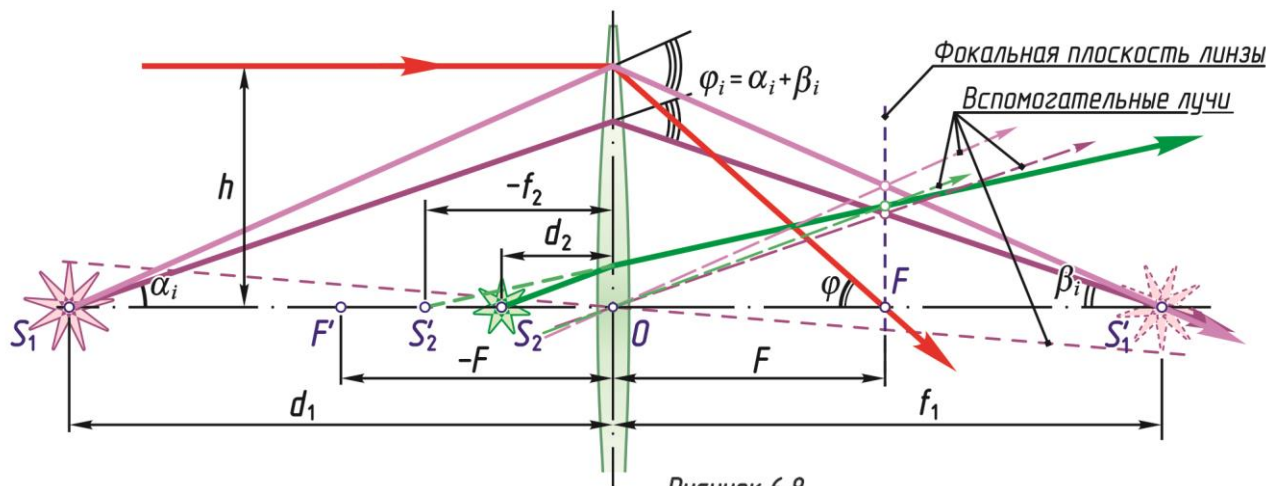


Рисунок 6.8

Теперь на расстоянии d (причём $d > F$) от оптического центра линзы на её оси расположим точечный источник света S_1 . Его i -ые лучи после преломления в ней могут вернуться на главную оптическую ось на расстоянии f за линзой (рис. 6.8). При этом для каждого i -го луча угол отклонения $\varphi = \alpha + \beta$. Подставив сюда $\varphi = h/F$, $\alpha \approx h/d$, $\beta \approx h/f$ и, сократив на h , получим:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}. \quad (6.4)$$

Эта формула называется формулой тонкой линзы. Из неё снова видно, что F не зависит от h , и, следовательно, не зависит от угла $\alpha \approx h/d$. Поэтому все лучи, испускаемые точечным источником, находящимся на расстоянии $d > F$ от линзы, соберутся в точке, находящейся на расстоянии f по другую сторону линзы (рис. 6.8).

Лучи света, параллельные главной оптической оси, после преломления в линзе пересекаются в одной точке, называемой главным фокусом линзы.

Расстояние от центра линзы до её фокуса называется фокусным расстоянием. Оно равно F . Это видно из формулы тонкой линзы: поскольку лучи падают параллельно главной оптической оси, то $d = \infty$, следовательно:

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \text{ и } f = F.$$

Лучи света, проходящие через центр линзы не преломляются. Если на расстоянии d от линзы находится светящийся предмет размером h_1 , то размер изображения этого предмета h_2 на экране Э2, находящемся на расстоянии f с другой стороны линзы, можно найти

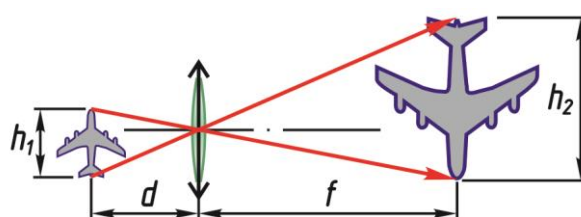


Рисунок 6.9

проведя два луча (рис. 6.9). Линейное (поперечное) увеличение линзы Γ (заглавная буква гамма) равно:

$$\Gamma = \frac{h_2}{h_1} = \frac{f}{d}. \quad (6.5)$$

При этом d и f должны быть связаны соотношением (6.4). В противном случае изображение будет размытым, либо его не будет видно вовсе.

Если известны увеличение линзы и расстояние между предметом и его изображением

$$L = d + f, \quad (6.6)$$

то по ним можно определить фокусное расстояние линзы.

Исключив d и f из (6.4), (6.5) и (6.6), получим:

$$F = \frac{\Gamma L}{(1 + \Gamma)^2}. \quad (6.7)$$

6.3. Описание экспериментальной установки

В данной работе в качестве источника света используется лазер, луч которого, отражаясь от двух зеркал (3) (рис. 6.10), направляется вдоль оптической скамьи. На оптической скамье имеется линейка, по которой можно отсчитывать расстояния. Оптические элементы, необходимые для работы, в держателях на подвижных рейтерах, устанавливаются на скамью по необходимости. На рейтерах со стороны линейки нанесены риски, указывающие характерные точки закреплённых в держателях элементов.

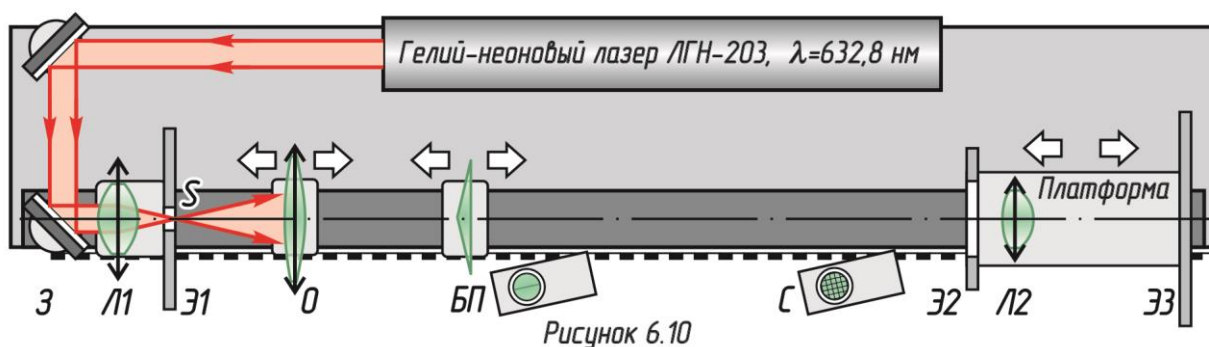


Рисунок 6.10

Так как расходимость лазерного луча достаточно мала, то его можно рассматривать как пучок параллельных лучей. Для выполнения всех заданий понадобится точечный источник света, который можно получить из лазерного луча с помощью собирающей линзы. После прохождения через эту линзу лучи соберутся в её фокусе и можно считать, что свет исходит из точечного источника S , находящегося в фокусе этой линзы.

В качестве точечного источника используется лупа, то есть короткофокусная собирающая линза Л1 (рис. 6.10), установленная на рейтере в начале скамьи, а в её фокальной плоскости на этом же держателе установлен круглый экран Э1. Риску экрана Э1 на рейтере Л1, указывающую положение фокуса линзы, размещают на отметке линейки 10 см и всю работу это положение не меняют.

В конце скамьи установлена платформа, на ближнем к источнику торце которой установлена лупа Л2 со съёмным экраном Э2, а на дальнем торце –

большой экран Э3. Положения Э2 и Э3 отмечены рисками для определения координат по линейке. Платформа может перемещаться вдоль скамьи.

Оптические элементы (сетка *С*, бипризма Френеля *БП*, которые устанавливаются в экран Э2 или другой подобный ему держатель), вставляются окантовочными кольцами навстречу лучу света.

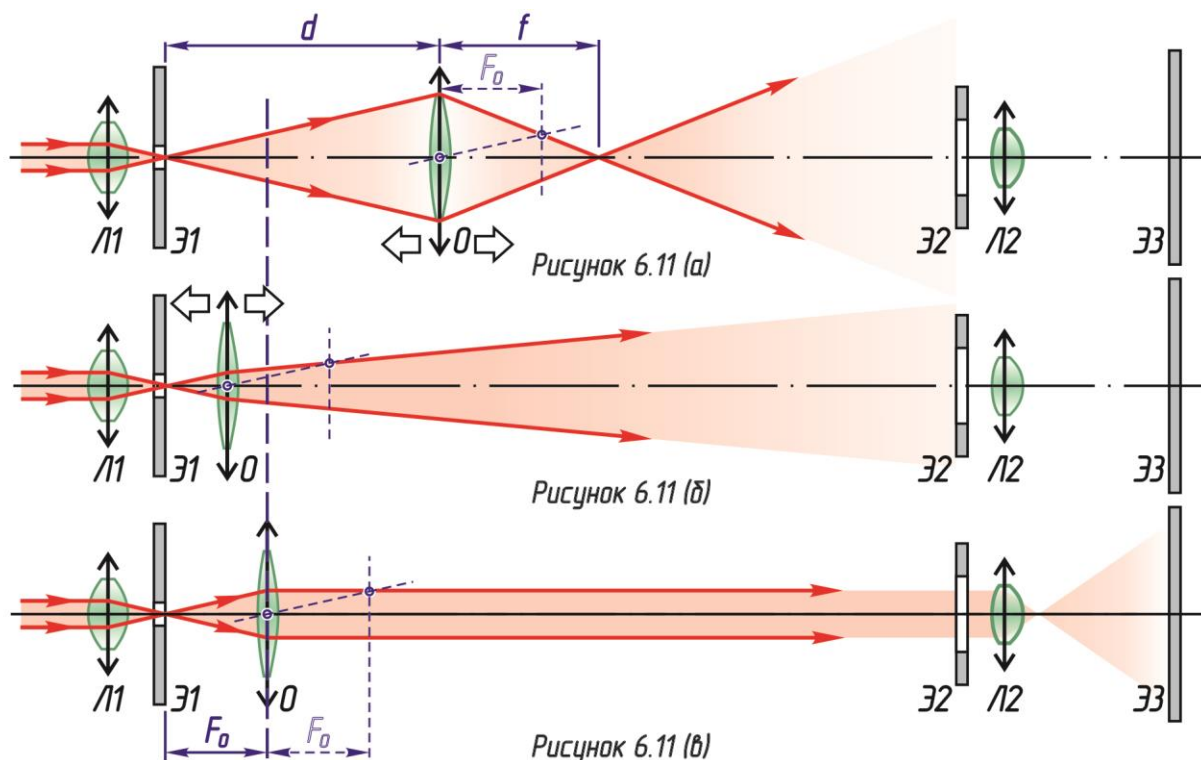
Внимание! Большинство держателей заранееотрегулированы инженером и на них наклеены цветные ленты, чтобы не сбить регулировки – во время выполнения лабораторной работы снимать их или крутить регулировочные винты под ними не нужно.

Будьте осторожны! Избегайте попадания излучения лазера в глаза!

6.4. Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение фокусного расстояния объектива *О* (способ-1)

Схема задания показана на рис. 6.11:



1. Включите лазер. Платформа с экранами Э2 и Э3 должна находиться в правом конце скамьи.

2. Проследите ход луча лазера от Л1. Для этого перекройте луч экраном из листа бумаги и плавно пронесите его от Л1 вдоль скамьи.

3. Поставьте на скамью после линзы Л1 рейтер с объективом *О*, который используется в качестве второй линзы. Риска на его рейтере находится напротив главной плоскости линзы объектива. Ещё раз плавно пронесите бумажный экран вдоль скамьи, но теперь от объектива, меняя каждый раз расстояние между линзой Л1 и объективом *О*.

На этом экране будет видно, что помощью двух линз Л1 и *О* из узкого пучка параллельных лучей можно получить разные варианты пучков: сходящийся и сразу расходящийся, только расходящийся и пучок параллельных лучей (рис. 6.11). Форма пучка зависит от расстояния *d* между точечным источником света (фокальной плоскостью линзы Л1) и линзой *О* (объективом).

Если $d > F_0$ – фокусного расстояния линзы объектива О, то на расстоянии f от линзы О получится сходящийся пучок (рис. 6.11 (а)), а дальше он будет расходящимся. Расстояние f определяется из формулы тонкой линзы (6.4).

Если $d < F_0$, то получится пучок расходящихся лучей (рис. 6.11 (б)). Эти лучи будут как бы исходить из точечного источника S_2 , находящегося на расстоянии b от линзы О. При этом из (6.4) подтвердится, что $b < 0$.

Если $d = F_0$, то получится пучок параллельных лучей (рис. 6.11 (в)).

4. Измерьте расстояние между рисками Э1 и линзой объектива О, когда пучок лучей получится параллельным, то есть, когда оно равно фокусному расстоянию объектива F_{0_1} . Запишите результат в журнал с учётом погрешности измерения линейкой или операторской погрешности, которую вы сами для себя считаете достоверной, если она больше.

Задание 2. **Определение увеличения и фокусного расстояния лупы Л2**

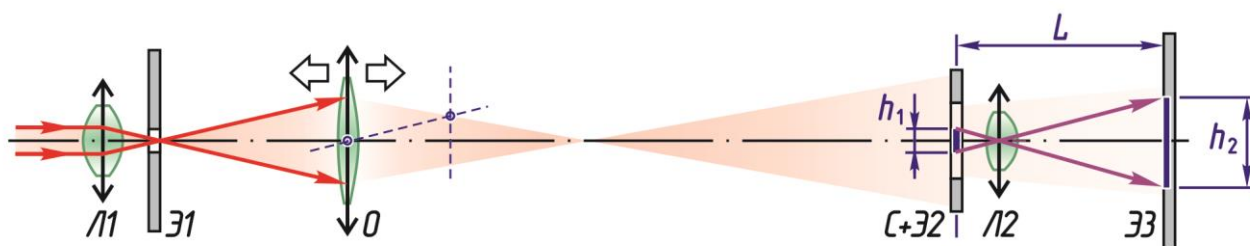


Рисунок 6.12

1. Установите в держатель Э2 вставку с круглым стеклом, на которое нанесена тонкая калибровочная сетка. Шаг сетки $h_1 = 1$ мм.
2. Перемещая объектив О и изменяя тем самым освещённость экрана Э2, добейтесь чёткого изображения сетки на экране Э3.
3. На экране Э3 с помощью линейки измерьте шаг h_2 изображения сетки (рис.6.12) и занесите его в журнал.
4. По формуле (6.5) определите увеличение Γ лупы Л2.
5. Измерьте линейкой расстояние L между рисками экранов Э2 и Э3 (рис.6.12).
6. Из формулы (6.7) найдите фокусное расстояние $F_{Л2}$ лупы Л2.
7. Удалите калибровочную сетку из держателя Э2.

Задание 3. **Определение фокусного расстояния объектива О (способ-2)**

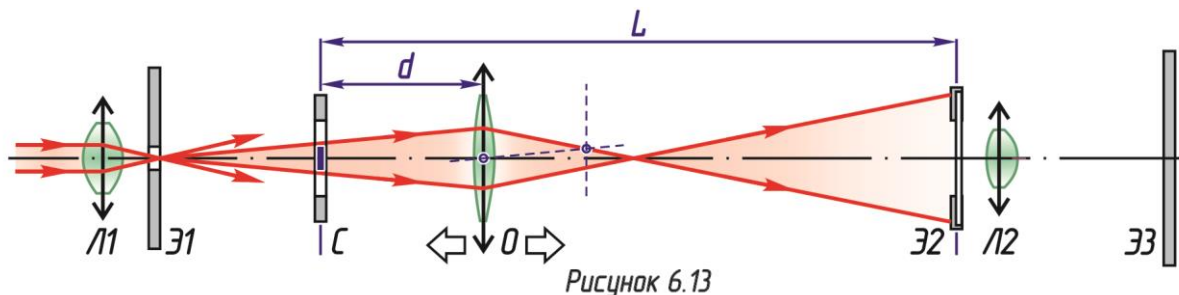


Рисунок 6.13

1. Поставьте на скамью перед объективом О рейтер (рис. 6.13), в держатель которого установите вставку с калибровочной сеткой С. Вставьте в держатель Э2 белый картон. Платформа с Э2 должна постоянно находиться в правом конце скамьи на одном месте.

2. Установите сетку С от Э2 на расстояние $L = 60$ см. Перемещая между сеткой и Э2 объектив О, добейтесь чёткого изображения сетки на экране Э2. Измерьте значения расстояния d , измерьте или вычислите $f = L - d$.

3. Повторите п. 2 ещё для двух других меньших значений L . *Устанавливать L меньше 35 см не нужно, потому что изображения сетки будет уже не видно.* Запишите в журнал соответствующие значения расстояний f и d .

4. Используя формулу (6.4), найдите среднее значение фокусного расстояния объектива $\langle F_{0_2} \rangle$ по трём замеренным положениям.

5. Удалите со скамьи рейтер с калибровочной сеткой.

Задание 4. *Определение фокусного расстояния объектива О (способ-3)*

1. Установите платформу с экранами Э2 и Э3 в крайнее правое положение запишите в журнал значение L – расстояния между Э1 и Э2.

2. Перемещая объектив О по скамье от Л1 в сторону Л2, можно дважды добиться отчётливого изображения точечного источника на экране Э3. Установите объектив О в одном из таких положений, когда он находится поблизости у точечного источника света (рис. 6.14 (а)). Проверьте, выходит ли при этом из объектива О и линзы Л2 параллельный пучок лучей?

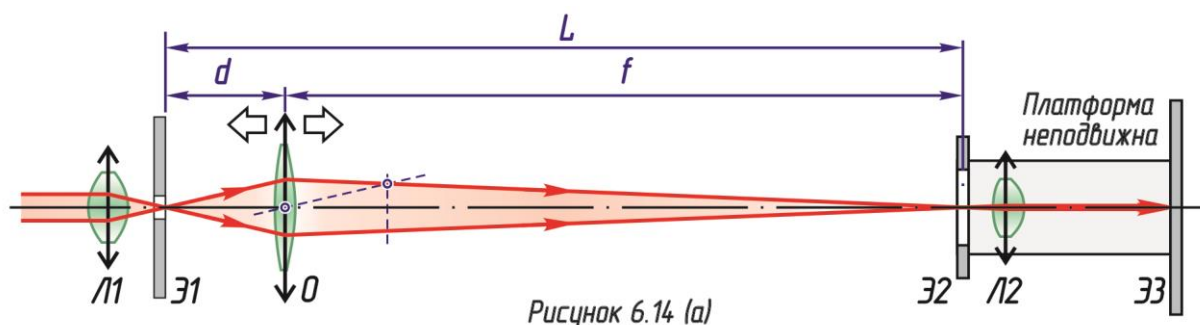


Рисунок 6.14 (а)

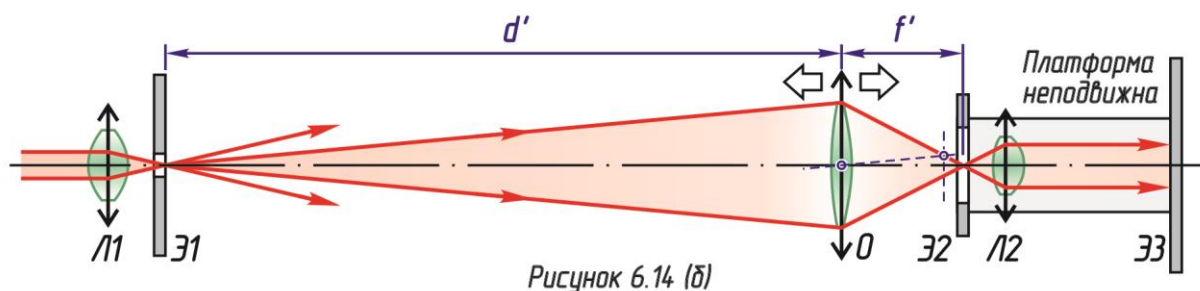


Рисунок 6.14 (б)

2. Измерьте расстояния d и f .

3. Найдите другое положение объектива, на большем удалении от точечного источника, при котором получается чёткое изображение источника на экране Э3 (в этом и следующих заданиях все размерные значения для другого положения объектива О обозначаются со штрихом) (рис. 6.14 (б)). Проверьте, не выходит ли при этом из объектива О и Л2 параллельный пучок лучей?

4. Измерьте расстояния d' и f' . Проверьте, выполняются ли равенства $d = f'$ и $d' = f$.

5. Используя формулу (6.4) вычислите среднее значение фокусного расстояния объектива $\langle F_{0_3} \rangle$ по двум замеренным положениям.

6. Сравните значения F_{0_1} , F_{0_2} и F_{0_3} , полученных тремя способами. Какой погрешностью можно объяснить расхождение результатов?

7. Сделайте вывод по заданию: подтверждается ли закон обратимости световых лучей?

8* (для будущих учёных и инженеров).

Можно найти такое место на скамье, когда $d = f = 2F_0$. Для этого, постепенно придвигая платформу с экранами Э2 и Э3 в сторону Э1 и передвигая между ними объектив О, найдите такое их взаимное положение, когда чёткое изображение точечного источника получается только один раз (рис. 6.15). Проверьте линейкой, выполняется ли равенство $d^* = f^*$ и выходит ли из Л2 параллельный пучок лучей. По формуле (6.4) проверьте фокусное расстояние объектива $F_{0.3}^*$. Сравнив все пары d и f , полученные в задании 3, можно ли достоверно утверждать, что фокус лупы Л2 находится в плоскости экрана Э2?

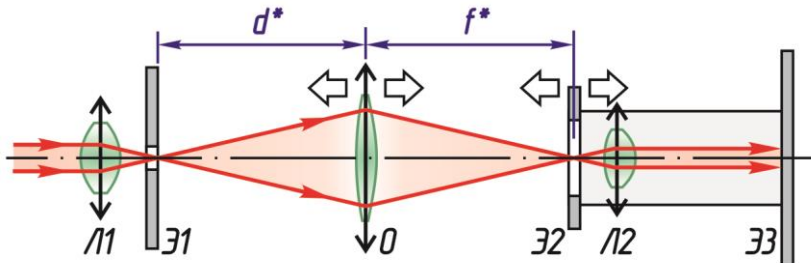


Рисунок 6.15

Задание 5. Определение преломляющего угла бипризмы Френеля по изображениям мнимых источников (для физмат групп**)

Схема задания показана на рис. 6.16.

Для наглядности расстояния между мнимыми источниками и, соответственно, их изображениями преувеличены. Изображены только лучи, проходящие через оптические центры линз О и Л2.

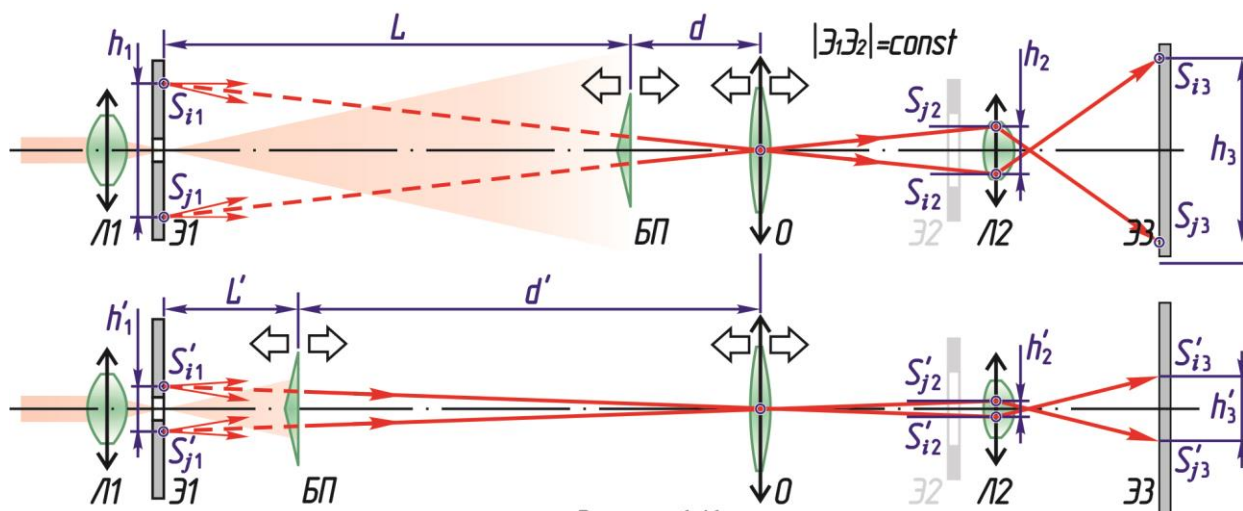


Рисунок 6.16

Луч от точечного источника из Э1 направляется точно на грань бипризмы БП. Каждая из половинок бипризмы преломляет лучи света на одинаковый угол $\varphi = (n - 1)\theta$, но в противоположных направлениях. То есть преломленные бипризмой лучи света как бы исходят от двух источников света S_{i1} и S_{j1} (рис. 6.3), называемых мнимыми источниками.

За бипризмой на скамье располагается объектив О. При определённом положении объектива О, если между Э1 и Э2 расстояние не меняется, в главной плоскости лупы Л2 сформируются изображения мнимых источников S_{i2} и S_{j2} .

Поскольку измерить расстояние h_2 между этими изображениями на Л2 сложно, то лучи через лупу Л2 направляются дальше на экран Э3, где формируются их увеличенные в Γ раз изображения S_{i3} и S_{j3} , расстояние h_3 между которыми будет также в Γ раз больше расстояния h_2 между S_{i2} и S_{j2} .

Дистанция L между точечным источником и бипризмой может быть разной и выбирается для удобства измерений так, чтобы расстояние между S_{i1} и S_{j1} позволило их увеличенным изображениям S_{i2} и S_{j2} уместиться в границах линзы Л2, для проекции на Э3. Рекомендуется произвести до пяти измерений на разных дистанциях L .

Значения L, d, h_3 и расстояния между экранами Э1 и Э2 можно измерить линейкой. А усреднённое фокусное расстояние объектива О и увеличение Γ лупы Л2 вам известны из выполнения предыдущих заданий.

1. Установите платформу с Э3 в дальнее крайнее правое положение и не двигайте её во время выполнения.

2. Поставьте на скамью перед объективом О рейтер (рис. 6.13), в держатель которого установите вставку с бипризмой БП.

3. Установите бипризму на дистанцию $L = 500$ мм от Э1. Убедитесь, что луч направлен точно в её грань (можно немного повернуть регулировочные винты в держателе с БП). Найдите такое положение объектива О, чтобы на Э3 появились две чёткие точки – изображения мнимых источников.

Измерьте расстояние h_3 между ними, а также расстояние d между рисками, соответствующих главной плоскостью объектива О и плоскости бипризмы БП (рис. 6.16). Запишите полученные значения в табл. 6.1.

Для выравнивания луча вдоль оси скамьи можно немного повернуть регулировочные винты в держателе объектива О. А если надо выровнять изображение по крену (относительно горизонтальной оси экрана Э3), то поверните вокруг оси держатель с вставкой-бипризмой. Зовите инженера, если не получается.

Таблица 6.1

L , мм	500	400	300	200	100
d , мм					
h_3 , мм					
φ , град					
$\langle \varphi \rangle$, град					
θ , град					

4. Повторите п. 3 для других дистанций L' из табл. 6.1 (рис. 6.16(б)).

5. Используя приведённые в п. 6.2 формулы найдите для каждого положения угол преломления φ .

6. По усреднённому значению φ определите клиновидность θ лабораторной бипризмы Френеля, приняв показатель преломления $n=1,56$.

7. Сделайте выводы.

6.5. Контрольные вопросы

1. Какую форму имеет волновой фронт точечного источника волн? Как будут распространяться лучи от такого источника?
2. Какие законы геометрической оптики вы знаете?
3. Что такое угол отклонения призмы? Как он связан с преломляющим углом призмы?
4. Каковы на ваш взгляд причины появления радуги?

5. Если вы хотите рассмотреть детали мелкого предмета, почему бы не держать его на расстоянии всего около 1 см от глаза (при условиях, что вы не близоруки)?
6. Какова формула тонкой линзы? Как она изменится в случае, если объект удален в бесконечность?

6.6. Задачи для самостоятельного решения

1. Фокусное расстояние линзы $F = 10$ см. С учётом разных условий:
 - расстояние от линзы до объекта $d = 40$ см, то есть $2F < d < \infty$;
 - объект находится на расстоянии $2F$ от линзы;
 - объект находится на расстоянии $d = 5$ см от линзы, то есть $d < F$,ответьте на следующие вопросы:
 - 1) на каком расстоянии от линзы будет находится изображение объекта?
 - 2) будет оно действительным или мнимым, прямым или перевернутым?
 - 3) определите соотношение размеров изображения и объекта.
2. Луч падает на стеклянную поверхность под углом 30° , $n = 1,5$. Найдите угол преломления луча.

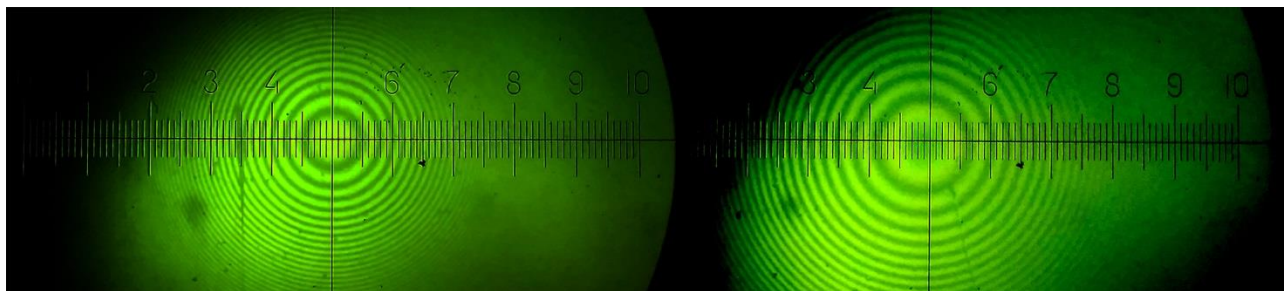
6.7. Литература для изучения

1. Г.С. Ландберг «Элементарный учебник физики» т. 3, гл. 9-10, (гл. 11-12 – для дополнительного чтения).
2. «Оптика. Лабораторный практикум по физике. 11класс», изд. shk. 1580, 2007 г. (есть на сайте школы): введение и пункты 1-7, 16, 27-31.

6.8. Вопросы от инженера

1. Почему в данной лабработе используется луч лазера, а не какой-нибудь галогеновой лампы?

2. Если вы уже делали лабработу О-5 «Кольца Ньютона» (или будете делать её позже), то по формуле (6.3) можете проверить точность определения радиусов кривизны сферических поверхностей на примере линзы объектива О, кольца с обеих поверхностей которой при длине световой волны 478 нм представлены ниже на фотографии, а её фокусное расстояние известно вам по этой лабработе :) Удачи!



Текст технологической части и иллюстрации: И.В. Воронин
Корректировка: А.А. Калашикова
кафедра «Основы физики» СУНЦ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021 г.