# ЗАДАЧА 5

# ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТИВА НА ОПТИЧЕСКОЙ СКАМЬЕ

## *Введение*

Для наблюдения астрономических объектов обычно используются оптические системы, состоящие из нескольких элементов. Система должна строить по возможности более "резкое"и менее искаженное изображение источника или его спектра. Особенно высокие требования предъявляются к объективу телескопа.

Объектив любого телескопа проходит испытание качества оптического изображения, которое он создает. Изображение анализируется и на выходе оптической системы. Угловое разрешение, которое обспечивается системой, зависит от многих факторов - от качества изготовления объектива, наличия аберраций, качества юстировки и фокусировки системы и др.

В настоящей задаче исследуется оптическая система, подобная телескопической: расположенный на оптической скамье коллиматор, в фокусе которого ставится специальная мира(состоящая из стекла с нанесенным на него штриховым или иным изображением), имитирует бесконечно удаленный объект (рис.5.1). Изображение этого объекта строится линзой

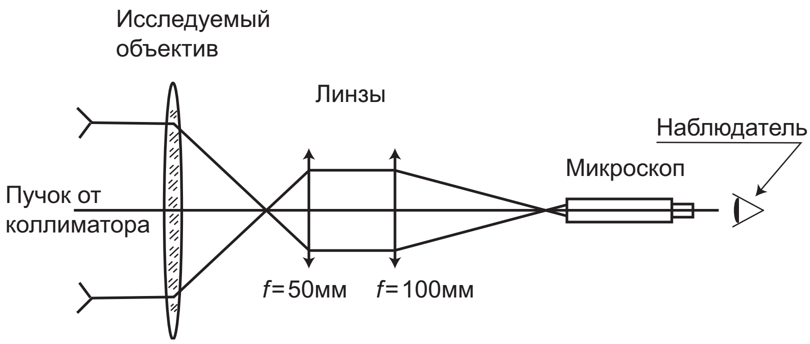


Рис. 5.1. Схема установки

- объективом - и рассматривается в микроскоп. В двух последних упражнениях (IV и V ) используются дополнительные линзы, меняющие масштаб изображения (рис.5.2).

Качество получаемого изображения на "выходе"системы зависит от того, насколько хорошо она отъюстирована. В задаче используется оптическая скамья, на которой установлен

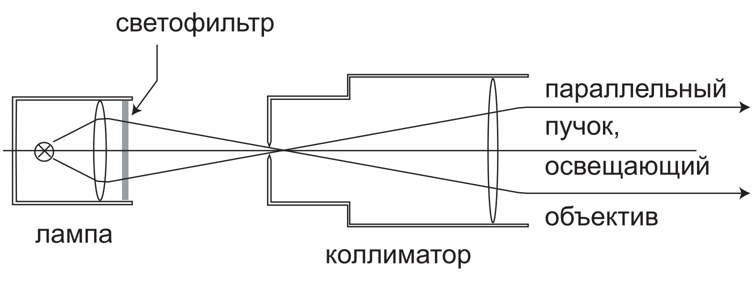


Рис. 5.2. Установка с дополнительными линзами

осветитель, коллиматор, держатель линзы, микроскоп и экран. Для выполнения задачи также требуется: несколько мир, обычная щель, раздвижная двойная щель, ирисовая диафрагма, окуляр Гартмана, плоское зеркало на рейтере, два светофильтра, объектив, две отдельные линзы с рейтерами, а также линейка и лист бумаги.

Перед началом работы необходимо ознакомиться с деталями, установленными на оптической скамье. При этом обратите внимание на следующее (к этим пунктам полезно также обратиться при возникновении каких-либо вопросов технического содержания в процессе выполнения упражнений):

1. Все рейтеры, на которых к рельсу крепятся детали установки, при работе должны быть жестко закреплены винтами.

2. Коллиматор может специальными винтами смещаться как по высоте, так и в направлении, перпендикулярном рельсу. Можно также в небольших пределах менять его наклон. Но не следует менять ориентацию коллиматора без необходимости, иначе впоследствии будет нелегко найти его правильное горизонтальное положение.

3. Линза в держателе закрепляется тремя рычагами. Необходимо убедиться в том, что она закреплена достаточно жестко и не выпадает. Линзу можно поворачивать в оправе вокруг вертикальной оси и смещать в плоскости оправы микрометрическим винтом. Изменение высоты производится поднятием ножки держателя в тубусе рейтера.

4. Микроскоп может вращаться как по оси рейтера, так и вокруг вертикальной оси, не совпадающей с осью рейтера. Поэтому, поворачивая вокруг обоих осей, его можно перемещать в перпендикулярном к рельсу направлении. Высота микроскопа меняется как грубо, так и плавно (с помощью резьбового кольца на ножке рейтера).

5. Две отдельные линзы на рейтерах могут менять свой наклон с помощью небольших винтов снизу под оправой.

6. Прежде, чем производить повороты или перемещения микроскопа и линз, установленных на рельсе, необходимо проверить, раскреплены ли стопорные винты этого движения, если они имеются.

Целью задачи является исследование линзы (объектива), юстировка оптической системы и оценка качества изображения, даваемого ею.

Задача состоит из нескольких, связанных друг с другом упражнений.

**I. Получение параллельного пучка лучей** Фокусировка коллиматора на бесконечность, необходимая для получения параллельного пучка света, исходящего из любой точки миры, производится с помощью окуляра Гартмана и плоского зеркала. Окуляр Гартмана содержит пластинку с крестом нитей, наклоненную под углом $45^\circ$ , и лампочку, помещенную сбоку. Окуляр вставляется в свободный конец трубы коллиматора. Свет от лампочки отражается от пластинки, проходит через объектив коллиматора и отражается от плоского зеркала. Если крест нитей находится в плоскости коллиматора, то и его изображение после отражения света от зеркала также будет находиться в фокусе. В окуляр Гартмана при этом будут одновременно видны резкие изображения креста нитей, одно из которых построено светом, дважды прошедшим через объектив коллиматора.

**Порядок выполнения работы**

1. Окуляр сфокусировать на крест нитей, подсвечиваемый лампочкой, после чего перед коллиматором установить плоское зеркало.

2. Медленным поворотом зеркала добиться того, чтобы в окуляр было видно второе изображение креста. Поймать второе изображение обычно сразу не удается: чтобы оно было видно в окуляр, плоскость зеркала должна быть строго перпендикулярной оптической

оси коллиматора. Облегчить задачу правильного наведения зеркала можно с помощью листа бумаги. В затемненном помещении пучок лучей, выходящих из коллиматора, образует на листе, поставленном на его пути, светлое пятно. Загораживая сверху или сбоку объектив коллиматора, можно на листе бумаги, как на экране, видеть, куда уходит отраженный от зеркала свет. Если зеркало не строго перпендикулярно оптической оси коллиматора, на листе бумаги, частично закрывающем объектив, будет видна светлая полоска, образованная отраженным от зеркала светом. Двигая зеркало микрометрическим винтом, "загнать"зайчик в открытую часть объектива. Процедуру повторять до получения отраженного изображения креста нитей, после чего сделать изображение резким, перемещая тубус коллиматора фокусировочным винтом. При правильном положении зеркала отраженный свет должен наблюдаться в окуляр как небольшое(порядка поля зрения или чуть больше) пятно повышенной яркости, причем отраженное изображение креста нитей может и не наблюдаться из-за сильной расфокусированности коллиматора. Это упражнение особенно удобно делать вдвоем(один смотрит в окуляр, второй вращает зеркало).

*Примечание.* При сильно расфокусированном коллиматоре найти отраженное изображение креста сложно. Правильный отчет трубы коллиматора, при котором мира будет находиться в фокусе, лежит в интервале 45-60.

## II. Определение фокусного расстояния объектива

### Порядок выполнения работы

1. На коллиматор надеть ирисовую диафрагму. В тубус коллиматора вставить миру N 2. На рельсе укрепить экран, так, чтобы окошечко с риской на рейтере экрана находилось по ту же сторону от оси, что и на рейтере держателя. Тогда разность отсчетов на линейке рельса скамьи будет равно расстоянию между элементами установки, укрепленными на рейтерах. В держателе осторожно укрепить линзу-объектив. Включить осветитель.

2. Проверить правильность положения линзы относительно оптической оси коллиматора. Это делается следующим образом:

   (a) Задиафрагмировав коллиматор до предела, придвинуть к нему линзу и установить центр линзы на одной высоте с центром объектива коллиматора. При этом в центре линзы должно быть заметно освещенное пятно.

   (b) Снять диафрагму с коллиматора. Двигая вдоль рельса линзу-объектив вместе с экраном, добиться того, чтобы изображение миры, создаваемое объективом, приходилось все время на одно и то же место экрана. Если это не удастся с помощью небольших поворотов объектива, то это означает, что оптическая ось коллиматора не идет параллельно рельсу. В таком случае необходимо с помощью винтов на любом из рейтеров коллиматора добиться параллельности. При правильном положении коллиматора выходящий из него пучок идет точно вдоль рельса.

3. В тубус коллиматора вставить щель. Сначала установить щель широко открытой. Впоследствии степень раскрытия щели выбирается экспериментально. Добиться равномерного освещения щели, при необходимости центрируя лампу осветителя, находящуюся под металлическим кожухом.

4. Держатель с объективом установить на расстоянии около 30 см от объектива коллиматора. Затем надеть на объектив коллиматора раздвижную щель (диафрагму с двумя окошечками со щелевыми прорезями). Перемещая окошечки вдоль диаметра коллиматора, проверить центральность положения исследуемой линзы относительно обеих щелей. Если одна из щелей раньше "сходит"с поверхности линзы, линзу можно переместить микрометрическим винтом перпендикулярно рельсу.

5. Поставить перед осветителем красный или оранжевый светофильтр. Оставив щели в таком положении, при котором они проектируются на линзу примерно на расстоянии в половину радиуса от ее центра , в фокальную плоскость линзы поместить экран. При этом изображения щелей на экране сливаются. Сняв отсчеты со шкалы, идущей вдоль рельса, по рискам на рейтерах экрана и держателя, определить расстояние между ними. Если бы линза находилась в точности на вертикальной оси держателя, фокусное расстояние было бы тем самым найдено. Но линза может быть немного смещена относительно оси вращения держателя. Поэтому ее следует повернуть вокруг вертикальной оси на $180°$, вновь поставить экран в фокус линзы и определить расстояние между экраном и держателем. Среднее арифметическое значение этих расстояний и даст нам фокусное расстояние.

6. Из-за сферической аберрации различные зоны линзы имеют неодинаковое фокусное расстояние. Для определения сферической аберрации определить, на сколько миллиметров меняется фокусное расстояние линзы в зависимости от расстояния между щелями. Сдвигая или раздвигая щели, проследить за изменением фокусного расстояния линзы. Построить график зависимости фокусного расстояния объектива от расстояния между щелями. Диапазон изменения фокусного расстояния будет представлять собой оценку сферической аберрации.

### III. Анализ изображения миры

#### Порядок выполнения работы

1. На объектив коллиматора надеть ирисовую диафрагму и задиафрагмировать его до диаметра $3-4$ см. В тубус коллиматора вставить миру ©2. С помощью листа бумаги найти изображение миры, построенное линзой в держателе. К изображению "подвести"микроскоп так, чтобы оно было на расстоянии $1-2$ см от объектива микроскопа. Глядя в окуляр микроскопа, найти изображение. Затем в осветитель вставить синий (или оранжевый) светофильтр и сфокусировать изображение миры более точно. Мира состоит из 25 квадратов, каждый из которых содержит по четыре маленьких квадратика, состоящих из параллельных светлых полос, идущих в разных направлении. Крайние квадраты в каждом ряду пронумерованы.

2. Найти оптимальный размер диафрагмы, при котором изображение выглядит наиболее резким. (Объяснить, почему качество изображения ухудшается как при уменьшении, так и при увеличении сечения светового пучка).

   Всю дальнейшую работу проводить с коллиматором, задиафрагмированным до оптимального размера.

3. Определить наибольший номер квадрата, в котором уверенно различаются полоски с различной ориентацией. По таблице, прилагаемой к описанию, найти расстояние между штрихами квадрата с данным номером. Разделив на фокусное расстояние коллиматора (800 мм), получить оценку разрешающей способности объектива (в радианах). Эта величина должна быть близка к разрешающей способности объектива, определяемой по наблюдениям точечных объектов. Найденный угол необходимо сравнить с теоретической ("дифракционной") разрешающей способностью.

4. По шкале, расположенной на держателе микроскопа, определить, на сколько миллиметров меняется фокусное расстояние линзы при смене светофильтров с синего на оранжевый (или красный). Эта величина будет характеризовать продольную хроматическую аберрацию.

5. Поворачивая линзу в держателе вокруг вертикальной оси, найти тот угловой диапазон, в пределах которого остаются заметными полосы миры, разрешавшиеся до поворота линзы. Тем самым будет измерено поле зрения объектива. Учесть, что при повороте линзы меняется расстояние, на котором возникает изображение, поэтому микроскоп необходимо "подфокусировывать"в процессе поворота линзы.

6. С помощью микрометра, установленного на микроскопе, измерить по шкале барабанчика длину полос в изображении миры. Полученный результат будет использован в упражнении V.

## IV. Получение выходного зрачка

### Порядок выполнения работ

1. Поставить на рельс за линзой, находящейся в держателе, другую линзу, фокусное расстояние которой известно (50 мм), либо (по указанию преподавателя) предварительно измеряется, как это описано в упражнении II. Эта линза будет играть роль окуляра в телескопической системе. Совместить фокальные плоскости двух линз. Для этого на входе коллиматора ставится мира ©2, которая рассматривается в окуляр, а перед осветителем - синий (или оранжевый) светофильтр. Мира должна быть резко и хорошо видна глазом в "окуляр". Поставив за ним экран, найти выходной зрачок - изображение объектива, даваемое окуляром. Выходной зрачок перехватывает все пучки света, проходящие через обе линзы, под каким бы углом они ни входили в объектив. Положение выходного зрачка легко найти, сфокусировав на экране изображение края бумажного листа, прижатого к объективу. При визуальных телескопических наблюдениях с выходным зрачком совмещается зрачок глаза.

2. Измерить линейкой диаметр выходного зрачка и убедиться, что отношение диаметров объектива и выходного зрачка равно отношению фокусных расстояний объектива и окуляра
$$D/d = F/f \qquad (1).$$
Если они получились не совпадающими, то это означает, что фокальные плоскости линз не совмещены и положение окуляра следует изменить. Отношение диаметров объектива и выходного зрачка равно угловому увеличению оптической системы.

3. Установить ирисовую диафрагму, и непосредственным изменением ее диаметра, выяснить влияние последнего на диаметр выходного зрачка. Этот результат необходимо учесть при интерпретации и численной проверке формулы (1).

**Мира N2. Длина полос - 0.36 мм**

| Номер элемент | Число полос на мм | Номер элемента | Число полос на мм |
|---|---|---|---|
| 1 | 12.5 | 14 | 26 |
| 2 | 13 | 15 | 28 |
| 3 | 14 | 16 | 30 |
| 4 | 15 | 17 | 32 |
| 5 | 16 | 18 | 33 |
| 6 | 17 | 19 | 35 |
| 7 | 18 | 20 | 38 |
| 8 | 19 | 21 | 40 |
| 9 | 20 | 22 | 42 |
| 10 | 21 | 23 | 45 |
| 11 | 22 | 24 | 47 |
| 12 | 24 | 25 | 50 |
| 13 | 25 | | |

## V. Изменение масштаба изображения

### Порядок выполнения работы

1. За линзой - окуляром - укрепить вторую, более длиннофокусную линзу(110 мм). При этом схема установки будет следующей: исследуемый объектив-линза 50 мм-линза 110 мм-микроскоп (рис.2). В коллиматор вставить миру ©2 и проверить юстировку всей системы. Добиться того, чтобы центры всех линз, а также изображения миры в фокусе первой и последней линзы, находились на одной высоте над рельсом. При этом световой пучок, выходящий из сильно задиафрагмированного объектива коллиматора, должен образовывать светлое пятно в центре каждой линзы.

2. После проверки юстировки системы поставить синий (или оранжевый) фильтр и сфокусировать микроскоп на изображение миры в фокальной плоскости последней линзы. Как и в упражнении III, оценить угловое разрешение оптической системы. Определить количественно, насколько оно ухудшилось по сравнению с разрешающей способностью линзы-объектива, измеренной в упражнении III.

   *Примечание.* Если при гарантированном попадании светового пучка в объектив микроскопа(в чем легко убедиться при помощи листа белой бумаги, установив его перед микроскопом) наблюдать изображение в окуляр не удается, причина скорее всего в его низкой яркости при наличии посторонних источников света. Попробуйте выключить свет и закрыть шторами окно. Если, несмотря на это, желаемый результат не будет достигнут, поменяйте две линзы местами, чтобы ближе к объективу располагалась более длиннофокусная. При такой последовательности изображение должно уверенно наблюдаться в микроскоп даже при отсутствии затемнения.

Микрометром микроскопа измерить длину полос в изображении миры. Отношение этой величины к длине полос в изображении, построенном объективом, даст нам коэффициент изменения масштаба изображения. Изменение масштаба часто используется для согласования углового разрешения телескопа или ширины щели спектрографа с размерами элементов изображения детектора. В спектрографах роль первой линзы играет коллиматор, а второй - объектив камеры.

**Результаты** Должны быть получены следующие оценки:

- фокусного расстояния линзы
- сферической и хроматической аберрации
- поля зрения (в градусах), не искаженного внеосевыми аберрациями
- разрешающей способности объектива
- минимального и максимального полезного увеличения телескопа с данным объективом
- изменения масштаба изображения и разрешающей способности при введении двух дополнительных линз.

*Повторить:* принципы работы оптических телескопов; аберрации и способы их уменьшения.

**Примеры контрольных вопросов**

1. Чем определяется угловая разрешающая способность линзы? Телескопа?
2. Как устраняются (или минимизируются) аберрации объективов телескопов на практике?
3. Что такое внеосевые аберрации? Как они сказываются на изображениии?
4. Что такое выходной зрачок и как его размер связан с оптическими характеристиками системы?

**Литература** Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. М.: Наука, 1977, гл.1, с.18-19, 24-27, 45-56.

Курс астрофизики и звездной астрономии. Под ред. Михайлова А.А. Т.1. М.: Наука, 1973, с.14-20, 38-42.