

Московский Физико-Технический Институт  
(Национальный Исследовательский Университет)

Лабораторная работа 4.1.1  
Изучение центрированных оптических систем



Тимур Селин  
18 мая 2022 г.  
г. Долгопрудный

# Содержание

<b>1</b>	<b>Теория</b>	<b>2</b>
1.1	Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы . . . . .	2
1.2	Определение фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы . . . . .	3
1.3	Экспериментальная установка . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Ход работы</b>	<b>3</b>
2.1	Центрировка элементов оптической системы . . . . .	3
2.2	Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи экрана (Метод Аббе)	4
2.3	Определение фокусных расстояний тонких линз с помощью зрительной трубы . .	4
2.4	Определение фокусного расстояния и положения главных и фокальных плоскостей сложной оптической системы . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Вывод</b>	<b>5</b>

**Цель работы:** В работе изучаются методы определения фокусных расстояний тонких собирающих и рассеивающих линз; определяются характеристики сложной системы, составленной из тонких линз; исследуются недостатки реальных линз — сферические и хроматические аберрации или отклонение световых лучей от гомоцентричности.

**В работе используются:** оптическая скамья с набором рейтеров, положительные и отрицательные линзы, экран, осветитель с ирисовой диафрагмой, зрительная труба, светофильтры, кольцевые диафрагмы, линейка.

## 1 Теория

В большинстве реальных оптических систем содержится несколько преломляющих сферических поверхностей. Оптическую систему называют центрированной, если центры всех поверхностей лежат на одной прямой, которую называют главной оптической осью системы. Идеальной оптической системой называют систему, в которой сохраняется гомоцентричность пучков и изображение геометрически подобно предмету. Как показывает теория, изображение предметов с помощью идеальной оптической системы может быть построено без детального исследования хода лучей внутри системы и требует только знания фокусного расстояния и положения особых, так называемых главных плоскостей. Идеальная оптическая система обладает осью симметрии, которая называется главной оптической осью. Если известно положение фокусов и главных плоскостей, изображение предмета может быть найдено путём простых геометрических построений. Оптическая система называется положительной или собирающей, если лучи, падающие на неё параллельно главной оптической оси, пройдя систему, отклоняются в направлении оси — собираются. Фокусному расстоянию приписывается определённый знак: плюс для положительной системы и минус для отрицательной. Если ввести расстояния от предмета  $a$  и изображения до соответствующих главных плоскостей, то легко установить соотношение между этими расстояниями и фокусным расстоянием системы:

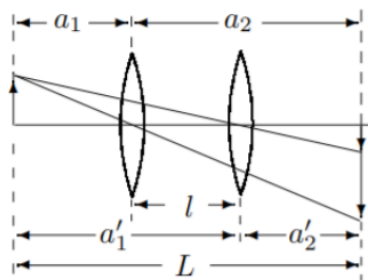
$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

В формуле (1)  $a_1$  считается положительным, если предмет лежит слева от передней главной плоскости,  $a_2$  положительно, если изображение лежит справа от задней плоскости, а фокусное расстояние  $f$  берётся со своим знаком.

### 1.1 Определение фокусного расстояния тонкой положительной линзы

Фокусные расстояния тонких положительных линз можно определять различными способами. При необходимости получить более точные значения  $f$  приходится отбросить «приближение тонкой линзы» и учитывать расстояние между главными плоскостями.

Способ 1. Фокусное расстояние тонкой положительной линзы можно определить, исходя из формулы линзы. Для этого достаточно измерить расстояния  $a_1$  и  $a_2$ .



Проведя измерения при увеличенном и при уменьшенном изображении, а также при различных положениях предмет а и изображения, можно найти среднее значение фокусного расстояния.

Способ 2. Пусть расстояние между предметом и экраном превышает  $4f$ . Нетрудно убедиться, что при этом всегда найдутся два таких положения линзы, при которых на экране получаются отчётливые изображения предмета (в одном случае уменьшенное, в другом — увеличенное).

Из соображений симметрии ясно, что  $a_1 = a'_2$  и  $a_2 = a'_1$ . Обозначая расстояние между предметом и экраном через  $L$ , а расстояние между двумя положениями линзы через  $l$ , получим:  $L = a_1 + a_2$ ,  $l = a'_1 - a_1 = a_2 - a'_2$ . Отсюда

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{L-l}{2}; a_2 = \frac{L+l}{2} \\ f &= \frac{L^2 - l^2}{4L} \end{aligned} \quad (2)$$

## 1.2 Определение фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы

Способ 1. Определение фокусного расстояния отрицательной линзы затруднено тем, что изображение предмета получается мнимым (при действительном источнике) и поэтому не может быть получено на экране. Эту трудность легко обойти с помощью вспомогательной положительной линзы. Сначала с помощью положительной линзы получают на экране действительное изображение предмета. Затем на пути лучей, выходящих из положительной линзы, располагают исследуемую отрицательную линзу и, отодвигая экран, получают четкое изображение предмета а на экране, образованное двумя линзами.

Способ 2. Если расстояние  $a_1$  совпадает с фокусным расстоянием отрицательной линзы, то изображение перемещается в бесконечность, т.е. лучи выходят из линзы параллельным пучком. Параллельность пучка можно установить с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность. Зная расстояние от первой линзы до точки  $S_1$  и расстояние между линзами, нетрудно определить фокусное расстояние тонкой отрицательной линзы. Для толстой отрицательной линзы этот метод позволяет определить только положение главного фокуса.

## 1.3 Экспериментальная установка

Оптическая скамья с осветителем, набор линз, экран и зрительная труба позволяют определить параметры оптических систем всеми описанными способами. Все оптические элементы устанавливаются на скамье при помощи рейтеров. Важную роль играет правильная центрировка элементов системы. Проходя через плохо отцентрированную систему, лучи света могут отклониться и пройти мимо экрана или глаза наблюдателя. Центрировать линзы следует как по высоте, так и в поперечном направлении (для чего линзы установлены на поперечных салазках).

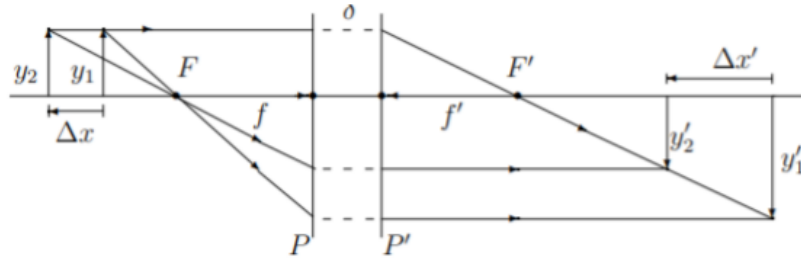
# 2 Ход работы

## 2.1 Центрировка элементов оптической системы

В нашем наборе 4 нумерованные линзы, оценка на глаз дает следующие результаты:  $F_1 = 11$  см,  $F_2 = 17$  см,  $F_3 = 11$  см и четвертая линза является рассеивающей, поэтому на глаз определить фокусное расстояние мы не можем. Для центрирования установки на одной стороне оптической скамьи устанавливаем осветитель со стрелкой, а затем регулируем по высоте и повороту экран и линзы, после чего отставляем их и больше не изменяем данные параметры, чтобы не сбить настройку.

## 2.2 Определение фокусных расстояний тонких линз при помощи экрана (Метод Аббе)

Устанавливаем положительную линзу между осветителем и экраном, а затем получаем изображение предмета, перемещая линзу вдоль скамьи.



$y_2$ , см	$y_1$ , см	$y'_2$ , см	$y'_1$ , см	$x_2$ , см	$x_1$ , см	$x'_2$ , см	$x'_1$ , см	$\Delta x'$ , см	$\Delta x$ , см
2	2	4,2	2,1	14,3	18,9	28,5	17,9	4,6	10,6

Используя данные таблицы, мы можем вычислить фокусное расстояние:

$$\begin{aligned}
 f_I &= \frac{\Delta x}{\Delta(y/y')} = 9,66 \text{ см}, \\
 f_{II} &= \frac{-\Delta x'}{\Delta(y'/y)} = 10,1 \text{ см}, \\
 f_C &= 9,88 \text{ см}.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Для определения фокусного расстояния тонкой отрицательной линзы сначала с помощью одной собирающей линзы получим на экране увеличенное изображение и измерим расстояние от центра линзы до экрана, затем размещаем рассеивающую линзу. Измерения:  $a_0 = 31,5$  см,  $a' = 10,7$  см,  $l = 26,1$  см,  $a = a_0 - l = 5,4$  см. Вычислим фокусное расстояние:

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} &= \frac{1}{f} \\
 f_P &= -10,9 \text{ см}
 \end{aligned} \tag{4}$$

## 2.3 Определение фокусных расстояний тонких линз с помощью зрительной трубы

Измерим фокусное расстояние первой линзы с двух сторон с помощью зрительной трубы, настроенной на бесконечность:  $F_{1I} = 11,3$  см,  $F_{1II} = 10,2$  см. Полученные фокусные расстояния не равны друг другу, поэтому мы можем сделать вывод, что линза №1 не является тонкой. Аналогичные измерения проводим для второй линзы:  $F_{2I} = 14,0$  см,  $F_{2II} = 14,2$  см. Для определения фокусного расстояния рассеивающей линзы используем схему из предыдущего пункта. Расстояние между линзой и экраном —  $a_0 = 36,1$  см, расстояние между линзами —  $l = 25,0$  см, тогда фокусное расстояние рассеивающей линзы можно найти по формуле:

$$f_P = l - a_0 = -11,1 \text{ см}. \tag{5}$$

## 2.4 Определение фокусного расстояния и положения главных и фокальных плоскостей сложной оптической системы

Устанавливаем в центре скамьи две тонких собирающих линзы, сблизив их на минимальное расстояние. Расстояние между центрами линз составляет  $l_{12} = 6,4$  см. Расстояние от предмета

до первой линзы —  $x_1 = 12,7$  см , величина изображения —  $y'_1 = 1,6$  см , расстояние от второй линзы до экрана —  $x'_1 = 9,9$  см . Аналогично расстояние от предмета до первой линзы —  $x_2 = 5,3$  см , величина изображения —  $y'_2 = 9,2$  см , расстояние от второй линзы до экрана —  $x'_2 = 38,5$  см . Получим  $\Delta x = 7,4$  см и  $\Delta x' = 28,6$  см.

Фокусное расстояние системы вычисляется так:

$$\begin{aligned} f_{\Sigma I} &= \frac{\Delta x}{\Delta(y/y')} = 7,2 \text{ см} \\ f_{\Sigma II} &= \frac{-\Delta x'}{\Delta(y'/y)} = 7,5 \text{ см} \\ f_{\Sigma} &= 7,4 \text{ см} \end{aligned} \tag{6}$$

Главные фокусы системы:

$$\begin{aligned} F_{\Sigma I} &= 3,8 \text{ см} \\ F_{\Sigma II} &= 3,9 \text{ см} \end{aligned} \tag{7}$$

### 3 Вывод

Научились применять различные методы определения фокусных расстояний линз и сложных оптических систем, изучили методы Аббе и Бесселя. Полученные фокусные расстояния составляют: для первой линзы —  $f_I = 9,9 \pm 0,5$  см , второй —  $f_{II} = 14,1 \pm 0,7$  см , четвертой —  $f_{IV} = -11,0 \pm 0,6$  см .