

Работа 4.1.1/4.1.2

Геометрическая оптика

Киркича Андрей, Б01-202, МФТИ

Аннотация

В данной работе мы определили фокусные расстояния нескольких линз с помощью подзорной трубы, измерили фокусные расстояния с помощью формулы тонкой линзы, методами Бесселя и Аббе, собрали и изучили подзорную трубу Кеплера, а также исследовали составную оптическую систему.

Теоретическая справка

Для определения фокусного расстояния отрицательной линзы мы воспользовались формулой:

$$f = l - a_0,$$

где l - расстояние между отрицательной и вспомогательной положительной линзами, a_0 - расстояние от положительной линзы до экрана.

Формула тонкой линзы:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{L - s}.$$

Формула Бесселя:

$$f = \frac{L^2 - l^2}{4L}.$$

Расчёт фокусного расстояния по методу Аббе:

$$f = \frac{\Delta x'}{\frac{y_1}{y_0} - \frac{y_2}{y_0}} = \frac{\Delta x}{\frac{y_0}{y_2} - \frac{y_0}{y_1}}.$$

Фокусное расстояние составной системы:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{l}{f_1 f_2}.$$

Оптический интервал системы мы рассчитывали как

$$\delta = l - f_{об} - f_{ок}.$$

Экспериментальная установка

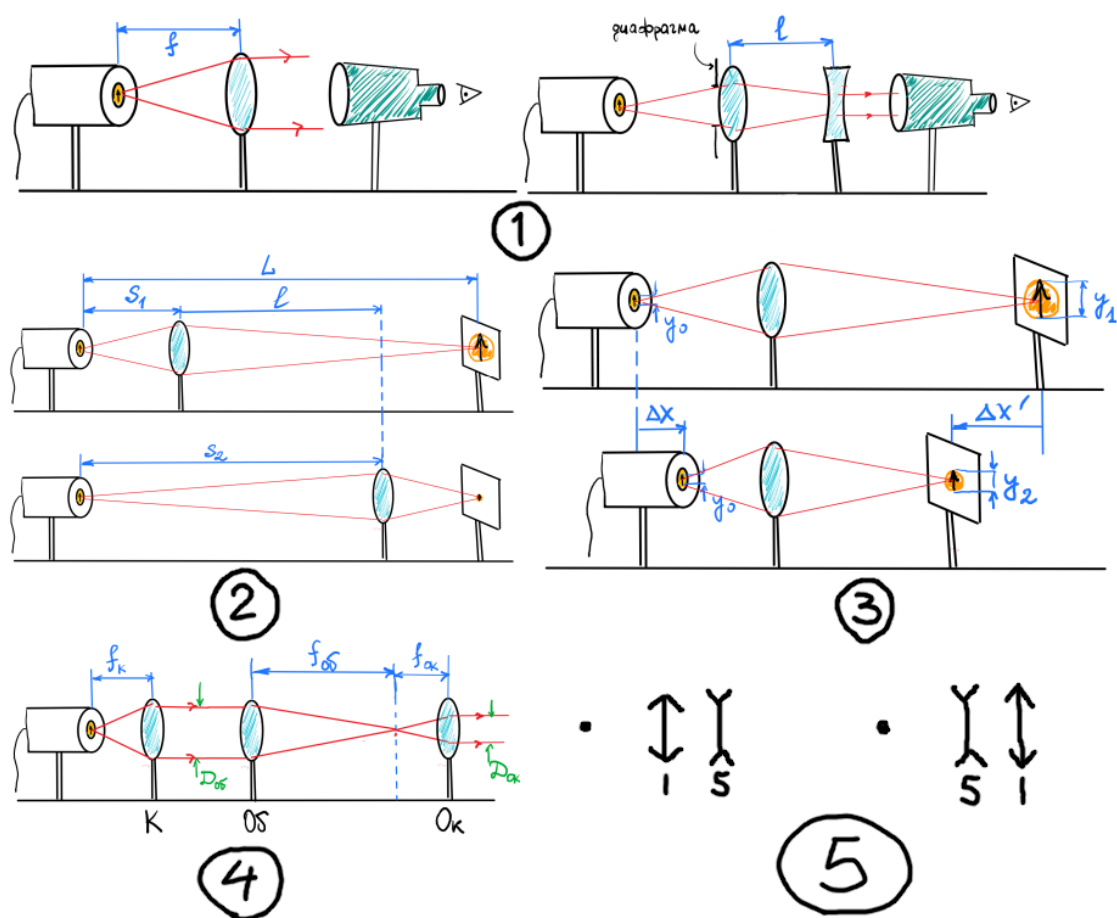


Рис. 1: Схемы экспериментов, 1 - определение фокусных расстояний с помощью подзорной трубы, 2 - метод Бесселя, 3 - метод Аббе, 4 - труба Кеплера, 5 - составная система

Ход работы

Определение фокусных расстояний линз с помощью подзорной трубы

В первом эксперименте мы измеряли фокусные расстояния четырёх положительных и одной отрицательной линз с помощью подзорной трубы, добиваясь чёткого изображения перемещением линзы. Для измерений у отрицательной линзы использовалась вспомогательная короткофокусная положительная. Линзы ставились разными сторонами к источнику. Результаты измерений приведены в таблице.

№	1	2	3	4	5
$f_{\text{пр}}, \text{ см}$	$7,3 \pm 0,2$	$12,2 \pm 0,2$	$25,5 \pm 0,2$	$17,3 \pm 0,2$	$-9,4 \pm 0,2$
$f_{\text{обр}}, \text{ см}$	$7,3 \pm 0,2$	$12,2 \pm 0,2$	$24,5 \pm 0,2$	$17,5 \pm 0,2$	$-9,7 \pm 0,2$

Измерение фокусных расстояний линз по формуле тонкой линзы и методом Бесселя

Измерения проводились только для одной линзы (под номером 1). Мы находили два положения линзы, при которых на экране возникают чёткие действительные изображения - в одном случае увеличенное, а в другом - уменьшенное. Затем рассчитывали фокусные расстояния по приведённым выше формулам.

L , см	s_1 , см	s_2 , см	l , см	$f_{\text{тонк}}$, см		$f_{\text{Бесс}}$, см
$62,5 \pm 0,1$	$8,4 \pm 0,1$	$53,2 \pm 0,1$	$44,8 \pm 0,2$	$7,2 \pm 0,4$	$7,9 \pm 0,4$	$7,5 \pm 0,5$
	$8,6 \pm 0,1$	$54,2 \pm 0,1$	$45,6 \pm 0,2$	$7,4 \pm 0,4$	$7,1 \pm 0,4$	$7,3 \pm 0,5$
Среднее:				$7,3 \pm 0,4$	$7,5 \pm 0,4$	$7,4 \pm 0,5$

Измерение фокусных расстояний методом Аббе

В этом эксперименте мы отводили осветитель от линзы, а экран - придвигали к линзе. Измеряя соответствующие смещения и размеры изображения на экране, рассчитывали фокусное расстояние.

y_0 , мм	y_1 , мм	y_2 , мм	x_1 , см	x_2 , см	x'_1 , см	x'_2 , см	f' , см	f , см
1 ± 1	3 ± 1	$1,2 \pm 1,0$	$9,5 \pm 0,1$	$12,7 \pm 0,1$	$33,3 \pm 0,1$	$18,2 \pm 0,1$	$8,3 \pm 0,7$	$6,4 \pm 0,7$
1 ± 1	4 ± 1	$0,8 \pm 1,0$	$9,3 \pm 0,1$	$15,5 \pm 0,1$	$36,7 \pm 0,1$	$14,2 \pm 0,1$	$7,0 \pm 0,7$	$6,2 \pm 0,7$
1 ± 1	3 ± 1	$1,2 \pm 1,0$	$9,7 \pm 0,1$	$12,5 \pm 0,1$	$35,3 \pm 0,1$	$18,8 \pm 0,1$	$9,1 \pm 0,7$	$5,6 \pm 0,7$
С р е д н е е :							$8,1 \pm 0,7$	$6,1 \pm 0,7$

Общая таблица наглядно отражает результаты измерений фокусного расстояния всеми методами:

	Ф.Т.Л. (s_1)	Ф.Т.Л. (s_2)	Бессель	Аббе (Δx)	Аббе ($\Delta x'$)
f , см	$7,3 \pm 0,4$	$7,5 \pm 0,4$	$7,4 \pm 0,5$	$6,1 \pm 0,7$	$8,1 \pm 0,7$

Сборка и изучение подзорной трубы Кеплера

С помощью подзорной трубы мы определили, что в поле зрения на размере окулярной риски укладывается 1.5 ячейки сетки изображения. Затем мы собрали схему из коллиматора (линза 4), объектива (линза 3) и окуляра (линза 1). Снова измерив угловой размер изображения ячейки, мы нашли угловое увеличение трубы: $\gamma_{\text{экср}} = \frac{\alpha}{\alpha_0} = 3 \pm 1$. Мы также рассчитали увеличение отношением диаметров светового пятна перед объективом и за окуляром: $\gamma = \frac{D_{\text{об}}}{D_{\text{ок}}} = \frac{4,5 \text{ см}}{3 \text{ см}} = 1.5 \pm 0.9$.

Изучение составной оптической системы

В качестве составной оптической схемы мы использовали две линзы (1 и 5), расположенные на фиксированном расстоянии друг от друга (4.2 см). Фокусное расстояние системы оценивали по формуле, приведённой в теоретической справке:

$f \approx 10.8$ см. Затем провели расчёт фокусного расстояния и оптического интервала по методу Бесселя.

x_1 , см	x_2 , см	L , см	l , см	f , см
$18,5 \pm 0,1$	$77,5 \pm 0,1$	$90,0 \pm 0,1$	$59,0 \pm 0,1$	$12,8 \pm 0,5$
$19,7 \pm 0,1$	$68,3 \pm 0,1$	$81,0 \pm 0,1$	$48,6 \pm 0,1$	$12,9 \pm 0,5$
$21,2 \pm 0,1$	$53,2 \pm 0,1$	$67,5 \pm 0,1$	$32,0 \pm 0,1$	$13,0 \pm 0,5$
$11,8 \pm 0,1$	$44,5 \pm 0,1$	$60,0 \pm 0,1$	$32,7 \pm 0,1$	$10,5 \pm 0,5$
$23,5 \pm 0,1$	$38,7 \pm 0,1$	$55,5 \pm 0,1$	$15,2 \pm 0,1$	$12,8 \pm 0,5$

Оптический интервал равен $\delta = 6.4 \pm 0.3$ см.

В переменных $(\frac{l^2}{L-\delta}, L - \delta - 4f)$ расчётная формула для метода Бесселя $l^2 = (L - \delta)(L - \delta - 4f)$ даёт линейную зависимость:

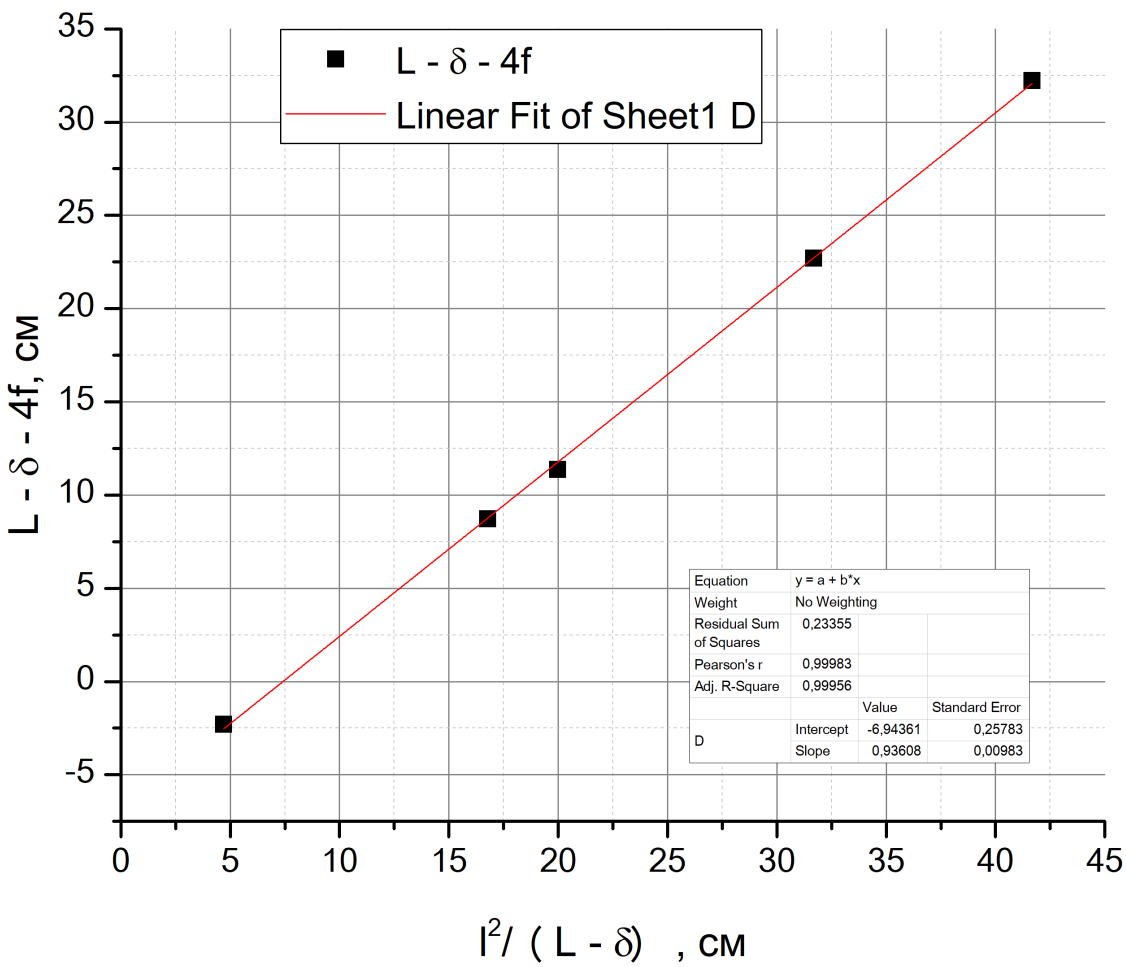


Рис. 2: График, отражающий зависимость в формуле метода Бесселя

Выводы

Фокусные расстояния, определённые разными способами, сильно разнятся. Метод Аббе даёт наименьшую точность. Это связано с тем, что в методе Аббе мы оценивали чёткость маленькой картинки на экране на глаз, а смещение могло сильно варьироваться. Метод Бесселя даёт значения, хорошо приближенные к теоретическим расчётам по формуле тонкой линзы. Формулу тонкой линзы в этом опыте действительно можно применять, потому что фокусные расстояния с обеих сторон выбранной нами линзы одинаковы.

Собранная нами труба Кеплера давала увеличение порядка $\gamma \approx 3$, исходя из оценки угловых размеров ячеек. Это немного расходится с теоретическим расчётом ($\gamma_{\text{теор}} \approx 3.42$). Это можно связать с двумя причинами: во-первых, неточное определение фокусных расстояний составляющих линз (которое производилось на глаз) и, как следствие, отклонение в теоретическом значении; во-вторых, неточная оценка угловых размеров объекта (которая тоже производилась на глаз). Существенный вклад в качество эксперимента привнесла бы аппаратная оценка этих параметров. Также мы рассчитали увеличение на основе диаметров светового пятна перед объективом и за окуляром: $\gamma = 1.5$. Такое сильное расхождение с полученными данными связано с очень грубой оценкой диаметров: край световых пятен был размыт.

В последней части эксперимента мы изучали составную оптическую систему. Теоретическая оценка фокусного расстояния такой системы расходится с экспериментальными данными. Вероятно, это связано с относительно большим расстоянием между двумя линзами, составляющими систему.