



吉林大学

国家级物理实验教学示范中心

National Demonstration Center for Experimental  
Physics Education (Jilin University)

实验成绩

教师签字

批改日期

# 实验报告

## 普通物理实验

实验题目：薄透镜焦距的测量

学院：数学学院

学号：10230524

姓名：黎瀚文

组别：A2 实验台号：3

时间：2024 年 10 月 23 日 星期三 晚上

## 1 实验内容

1. 首先调节将物屏、像屏与凹凸透镜放置在光导轨上，并通过粗调和细调使其共轴
2. 物像法测凸透镜焦距：使物与像屏之间的距离稍大于 4 倍焦距，移动待测透镜直至屏呈现清晰的像，同时记录物、像以及透镜位置，计算出焦距  $f$ 。重复 3 次求其平均值
3. 位移法测凸透镜焦距：将物、凸透镜和像屏置于导轨上，调节各元件的主光轴重合，测出物屏与像屏之间的距离  $D$ ，移动透镜，使屏得到清晰的像，记录透镜位置，移动透镜至另一位置，使屏上又得到清晰的像，记录透镜位置，测出  $d$ ，求出焦距  $f$ 。固定  $D$  不变，重复 3 次求平均值
4. 自准直法测凸透镜焦距：将像屏改为平面镜，调节各元件，调节物距使得物与虚像共面，记录物与透镜间的距离即为待测焦距  $f$ 。重复 3 次求平均值
5. 辅助透镜法测凹透镜焦距：调节物与凸透镜、凹透镜共轴，调节适当位置，使屏上出现清晰的像，记录凹透镜位置和像屏位置，取下凹透镜，调节像屏位置使其呈现清晰的像，记录像屏位置，求出焦距  $f$ 。重复 3 次求平均值
6. 自准直法测凹透镜焦距：将各元件按辅助法中最初所测位置摆放，使屏上出现清晰的像，将屏远离透镜，改变凹透镜位置使屏上重新呈现清晰的像，多次操作使像屏移动足够远，取下像屏，用平面镜靠近凹透镜，使物与清晰的虚像共面，测量两透镜所在位置，作差结果即为焦距  $f$ 。测量 3 次求平均值

## 2 原始数据

### 凸透镜焦距的测量

表 1: 物像法测凸透镜焦距 (单位:cm)

组别	物屏	凸透镜	像	焦距
1	120.00	101.20	79.65	10.04
2	120.00	100.51	80.12	9.96
3	120.00	101.52	79.54	10.04

表 2: 位移法测凸透镜焦距 (单位:cm)

组别	物屏	镜位置 1	镜位置 2	像	D	d	焦距
1	120.00	82.91	105.72	70.01	49.99	22.81	9.90
2	120.00	82.83	105.57	70.01	49.99	22.74	9.91
3	120.00	82.81	105.74	70.01	49.99	22.93	9.87

表 3: 自准直法测凸透镜焦距 (单位:cm)

组别	物屏	凸透镜	焦距
1	120.00	109.23	10.77
2	120.00	109.23	10.67
3	120.00	109.28	10.72

凹透镜焦距的测量

表 4: 辅助凸透镜法测凹透镜焦距 (单位:cm)

组别	凸透镜	凹透镜	凸像位置	凹像位置	焦距
1	86.32	78.02	72.94	66.53	-9.11
2	87.01	77.85	73.45	69.35	-9.12
3	86.53	77.84	72.91	67.47	-9.40

表 5: 自准直法测凹透镜焦距 (单位:cm)

组别	凸透镜	凹透镜	像屏	焦距
1	98.52	89.83	80.34	-9.29
2	98.34	89.47	79.83	-9.64
3	98.77	90.03	80.87	-9.16

所测量的数据中导轨刻度的最小分度值为  $\Delta = 0.1\text{cm}$

### 3 数据处理与分析

#### 3.1 物像法测凸透镜焦距不确定度的计算

以凸透镜位置为原点，则记凸透镜到物屏的距离为负值，到像的距离为正值，则  
 $\bar{f} = 10.01 \text{ cm}$

表 6: 物像法测凸透镜焦距 (单位:cm)

组别	物距 $l$	像距 $l'$	分度值 $\Delta$
1	-18.80	21.55	0.1
2	-19.49	20.39	
3	-18.48	21.98	
均值	-18.92	21.31	

根据表格数据计算 A 类测量不确定度如下：

$$\begin{aligned} u_A(l) &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}{n \times (n-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(-18.80 + 18.92)^2 + (-19.49 + 18.92)^2 + (-18.48 + 18.92)^2}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.298 \text{ cm} \\ u_A(l') &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l'_i - \bar{l}')^2}{n \times (n-1)}} \\ &= \sqrt{\frac{(21.55 - 21.31)^2 + (20.39 - 21.31)^2 + (21.98 - 21.31)^2}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.475 \text{ cm} \end{aligned}$$

已知其分度值相同，设误差均匀分布则

$$u_B(l') = u_B(l) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ cm} = 0.0577 \text{ cm}$$

其合成标准不确定度

$$u_c(l) = \sqrt{u_A(l)^2 + u_B(l)^2} = \sqrt{0.298^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.303 \text{ cm}$$

$$u_c(l') = \sqrt{u_A(l')^2 + u_B(l')^2} = \sqrt{0.475^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.478 \text{ cm}$$

由不确定度传递公式

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_{c(x_i)}^2}$$

已知  $\frac{1}{f} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l}$ , 得到

$$\frac{u_f}{f} = \sqrt{\left(\frac{u_c(l')}{l'}\right)^2 + \left(\frac{u_c(l)}{(-l)}\right)^2}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.478}{21.31}\right)^2 + \left(\frac{0.303}{18.92}\right)^2}$$

代入  $f = 10.01 \text{ cm}$  得到  $u_f = 0.276 \text{ cm}$ 。由  $p = 0.955$ , 对应的置信概率  $K_p = 2$ 。代入上述数据及公式可得其扩展不确定度如下:

$$U_f = K_p \times u_f = 2 \times 0.276 \text{ cm} = 0.552 \text{ cm}$$

得到焦距的值为  $f = 10.01 \pm 0.552 \text{ cm}$ ,  $p = 0.955$

### 3.2 位移法测凸透镜焦距不确定度的计算

由原始数据得到焦距均值为  $\bar{f} = 9.89 \text{ cm}$

实际实验中, 固定光源 (物屏) 的位置与像 (屏) 的位置, 故由表格测得数据得到  $D$  的合成不确定度

$$u_A(D) = 0, \quad u_B(D) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}}$$

$$u_c(D) = \sqrt{u_A(D)^2 + u_B(D)^2} = u_B(D) = 0.0577 \text{ cm}$$

已知公式

$$l_1 + l'_1 = D$$

$$l_1 = \frac{D - d}{2}$$

$$l'_1 = \frac{D + d}{2}$$

实验中为了简化步骤减小误差，用位移法测得的实际为成缩小实像和放大实像的凸透镜的实际位置 1 和位置 2，设其值为  $l_1$ 、 $l_2$ ，则  $d = l_2 - l_1$

组别	$l_1/cm$	$l_2/cm$	$d/cm$
1	82.91	105.72	22.81
2	82.83	105.57	22.74
3	82.81	105.74	22.93
均值	82.85	105.68	22.83

根据上述表格计算  $l_1$ 、 $l_2$  的 A 类统计不确定度如下：

$$u_A(l_1) = \sqrt{\frac{((82.91 - 82.85)^2 + (82.83 - 82.85)^2 + (82.81 - 82.85)^2)}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.0306 \text{ cm}$$

$$u_A(l_2) = \sqrt{\frac{((105.72 - 105.68)^2 + (105.57 - 105.68)^2 + (105.74 - 105.68)^2)}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.0537 \text{ cm}$$

已知其分度值相同，设误差均匀分布则计算

$$u_B(l_1) = u_B(l_2) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ cm} = 0.0577 \text{ cm}$$

其合成标准不确定度

$$u_c(l_1) = \sqrt{u_A(l_1)^2 + u_B(l_1)^2} = \sqrt{0.0306^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.065 \text{ cm}$$

$$u_c(l_2) = \sqrt{u_A(l_2)^2 + u_B(l_2)^2} = \sqrt{0.0537^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.079 \text{ cm}$$

由不确定度传递公式

$$u_c(d) = \sqrt{u_c(l_1)^2 + u_c(l_2)^2} = \sqrt{0.065^2 + (-0.079)^2} = 0.102 \text{ cm}$$

已知  $f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$  可得

$$\begin{aligned} u_f &= \sqrt{\left(\frac{D^2 + d^2}{4D^2}\right)^2 u_c(D)^2 + \left(\frac{-d}{2D}\right)^2 u_c(d)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{49.99^2 + 22.83^2}{4 \times 49.99^2}\right)^2 \times 0.0577^2 + \left(\frac{-22.83}{2 \times 49.99}\right)^2 \times 0.102^2} = 0.029 \text{ cm} \end{aligned}$$

得到  $u_f = 0.029 \text{ cm}$ 。由  $p = 0.955$ ，对应的置信概率  $K_p = 2$ 。代入上述数据及公式可得其扩展不确定度如下：

$$U_f = K_p \times u_f = 2 \times 0.029 \text{ cm} = 0.058 \text{ cm}$$

得到焦距的值为  $f = 9.89 \pm 0.058 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$

### 3.3 辅助透镜法测凹透镜焦距不确定度的计算

由原始数据得到焦距均值为  $\bar{f} = -9.21 \text{ cm}$

组别	$l$	$l'$	分度值 $\Delta$
1	5.08	11.49	0.1
2	4.40	8.50	
3	4.93	10.37	
均值	4.80	10.12	

根据上述表格计算  $l$ 、 $l'$  的 A 类统计不确定度如下：

$$u_A(l) = \sqrt{\frac{(5.08 - 4.80)^2 + (4.40 - 4.80)^2 + (4.93 - 4.80)^2}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.206 \text{ cm}$$

$$u_A(l') = \sqrt{\frac{(11.49 - 10.12)^2 + (8.50 - 10.12)^2 + (10.37 - 10.12)^2}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.872 \text{ cm}$$

已知其分度值相同，设误差均匀分布则

$$u_B(l') = u_B(l) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ cm} = 0.0577 \text{ cm}$$

其合成标准不确定度

$$u_c(l) = \sqrt{u_A(l)^2 + u_B(l)^2} = \sqrt{0.206^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.214 \text{ cm}$$

$$u_c(l') = \sqrt{u_A(l')^2 + u_B(l')^2} = \sqrt{0.872^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.874 \text{ cm}$$

已知公式  $\frac{1}{f} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l}$ ，由不确定度传递公式得到：

$$\begin{aligned} \frac{u_f}{f} &= \sqrt{\left(\frac{u_c(l')}{l'}\right)^2 + \left(\frac{u_c(l)}{l}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.872}{10.12}\right)^2 + \left(\frac{0.214}{4.80}\right)^2} \end{aligned}$$

代入  $f = -9.21 \text{ cm}$  得到  $u_f = -0.894 \text{ cm}$ 。由  $p = 0.955$ ，对应的置信概率  $K_p = 2$ 。代入上述数据及公式可得其扩展不确定度如下：

$$U_f = K_p \times u_f = 2 \times (-0.894) \text{ cm} = -1.788 \text{ cm}$$

得到焦距的值为  $f = -9.21 \pm 1.788 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$

### 3.4 自准直法测凸透镜和凹透镜焦距不确定度的计算

记测凸透镜焦距时凸透镜位置为  $x_1$ ，物屏位置为  $x_2$ ，测得焦距为  $f_1$ 。同时记测凹透镜焦距时像屏位置为  $x_3$ ，凹透镜位置为  $x_4$ ，测得焦距为  $f_2$

组别	$x_1/cm$	$x_2/cm$	$f_1/cm$	$x_3/cm$	$x_4/cm$	$f_2/cm$
1	109.23	120.00	10.77	80.34	89.83	-9.29
2	109.23	120.00	10.67	79.83	89.47	-9.64
3	109.28	120.00	10.72	80.87	90.03	-9.16
均值	109.25	120.00	10.72	80.35	89.78	-9.36

A 类统计不确定度的计算

$$u_A(x_1) = \sqrt{\frac{((109.23 - 109.25)^2 + (109.23 - 109.25)^2 + (109.28 - 109.25)^2)}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.0168 \text{ cm}$$

$$u_A(x_2) = 0 \text{ cm}$$

$$u_A(x_3) = \sqrt{\frac{((80.34 - 80.35)^2 + (79.83 - 80.35)^2 + (80.87 - 80.35)^2)}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.3002 \text{ cm}$$

$$u_A(x_4) = \sqrt{\frac{((89.83 - 89.78)^2 + (89.47 - 89.78)^2 + (90.03 - 89.78)^2)}{3 \times 2}} \text{ cm} = 0.1639 \text{ cm}$$

已知其分度值相同，设误差均匀分布则

$$u_B(x_1) = u_B(x_2) = u_B(x_3) = u_B(x_4) = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ cm} = 0.0577 \text{ cm}$$



其合成标准不确定度

$$u_c(x_1) = \sqrt{u_A(x_1)^2 + u_B(x_1)^2} = \sqrt{0.0168^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.060 \text{ cm}$$

$$u_c(x_2) = \sqrt{u_A(x_2)^2 + u_B(x_2)^2} = u_B(x_2) = 0.0577 \text{ cm}$$

$$u_c(x_3) = \sqrt{u_A(x_3)^2 + u_B(x_3)^2} = \sqrt{0.3002^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.306 \text{ cm}$$

$$u_c(x_4) = \sqrt{u_A(x_4)^2 + u_B(x_4)^2} = \sqrt{0.1639^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.174 \text{ cm}$$

对于凸透镜而言，焦距  $f_1 = x_2 - x_1$ ；对于凹透镜而言，焦距  $f_2 = x_3 - x_4$ 。故由不确定度传递公式得到

$$u_{f_1} = \sqrt{u_c(x_1)^2 + u_c(x_2)^2} = \sqrt{0.060^2 + 0.0577^2} \text{ cm} = 0.083 \text{ cm}$$

$$u_{f_2} = \sqrt{u_c(x_3)^2 + u_c(x_4)^2} = \sqrt{0.306^2 + 0.174^2} \text{ cm} = 0.352 \text{ cm}$$

由  $p = 0.955$ ，对应的置信概率  $K_p = 2$ 。代入上述数据及公式可得其扩展不确定度如下：

$$U_{f_1} = K_p \times u_{f_1} = 2 \times 0.083 \text{ cm} = 0.166 \text{ cm}$$

$$U_{f_2} = K_p \times u_{f_2} = 2 \times 0.352 \text{ cm} = 0.704 \text{ cm}$$

得到凸透镜焦距的值为  $f_1 = 10.72 \pm 0.166 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$

凹透镜焦距的值为  $f_2 = -9.36 \pm 0.704 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$

#### 4 实验结果讨论

1. 物像法测凸透镜焦距得到  $f = 10.01 \pm 0.552 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$ ，误差不符合预期。

推测原因如下：测量  $L$  和  $L'$  时容易对透镜的重心估计不准，在测定使像屏呈现最清晰像时的位置确定不准确，测量出的像屏到透镜间的距离偏大，导致计算得出的焦距误差偏大。

2. 位移法测凸透镜焦距得到  $f = 9.89 \pm 0.058 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$ ，误差符合预期
3. 自准直法测凸透镜焦距得到  $f = 10.72 \pm 0.166 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$ ，误差在允许范围内，符合预期。
4. 辅助透镜法测凹透镜焦距，得到  $f = -9.21 \pm 1.788 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$ ，误差较大不符合预期。

推测原因如下：像屏与凹透镜间的距离选取的比较小，对位置的测量存在细微误差时，对结果的影响就会很大。同时测量凹透镜焦距时难以判别在哪个确切位置成最清晰的像，导致第二次成像点位置的测量与实际情况存在较大误差，本次实验中计算出凹透镜与第二次成像点的距离偏小，导致计算出的焦距偏大。

5. 自准直法测凹透镜焦距，得到  $f_2 = -9.36 \pm 0.704 \text{ cm}$ ， $p = 0.955$ ，误差偏大不符合预期。

推测原因如下：固定凸透镜后，凸透镜与像的距离较小，导致凹透镜可移动范围过小，故导致测量出现偏差较大，从而误差较大。

## 5 实验心得

经过亲自到实验室进行实验测量薄透镜焦距使我对光路和透镜所呈现的物理现象有了更深入的了解。实验过程中要注意共轴，并且需要调整平面反射镜以修正过于共轴的现象。同时体会到读取数据与实际采集数据、调整透镜等操作对整体数值的较大影响程度。

## 6 思考题

### 6.1 观察成像边缘颜色改变时像距数值的比较

$l'$  更大。由于红光折射率小于紫光，要使成像边缘呈紫光必须靠近透镜。所以边缘呈色波长越小离透镜越近。

### 6.2 确定透镜成像正确位置的方法

调节光具座上的元件，使像“1”中拐角处最清晰即为正确的位置

### 6.3 比较各种方法的优缺点

1. 物像法测焦距操作比较简便，但容易因为测量物距与像距时由于对中心估计不准所带来的误差
2. 位移法测透镜焦距操作比物像法复杂，但能避免上述误差。
3. 自准法测透镜焦距操作也简便，但成像不宜判断，其结果受透镜自身结构影响比较大，从正反两面分别测量后取平均值才能得到较为可靠的数据，否则测得的焦距容易偏大或偏小。