

光衍射的定量研究

李嘉轩

北京大学物理学院天文学系, 100871

jiaxuan.li@pku.edu.cn

2017年10月29日

1 测量单缝衍射的光强分布

1.1 实验情况

本实验使用机械位移式光强记录仪测量氦氖激光器发出的激光形成的单缝衍射的光强分布。氦氖激光的波长为 $\lambda = 632.8\text{nm}$ 。在进行实验之前,我们先搭建调整光路,使激光平行于光学平台,垂直于光强测量仪的狭缝。再调整狭缝的位置,使得整个光路满足夫琅和费衍射的远场条件,同时使激光垂直入射狭缝,使狭缝垂直于光学平台。在调整光路的时候,遵循“近调高度,远调仰角”的原则。如果激光不垂直于狭缝,那么测量得到的次极大与主极大的比值就不是标准值4.7%;如果单缝不垂直于光学平台,则测量得到的光强分布不对称。

调整好光路之后,我使用了实验室提供的仪器和软件进行了单缝衍射光强分布的光强测量。

1.2 数据处理

测量得到的原始数据是记录了机械位移式光强记录仪的绝对位置与相对光强值的txt文件以及实验室软件生成的图片。将绝对位置修改为相对光强主极大位置的相对位移之后,绘图得到图1。本次实验中扫描的步长为 0.005mm 。从图中我们可以读出主极大的光强为 $I_0 = 3383$,主极大的位置为 $x_0 = 0.00\text{mm}$,两个次极大的光强分别为 $I_1 = 165$ (左侧次极大)和 $I_2 = 168$ (右侧次极大),两个次极大的位置为 $x_1 = -4.335\text{mm}$ 和 $x_2 = 4.230\text{mm}$ 。读数的方法是,画出峰值附近的图,从而观察出“平台”的中心位置。这样可以避免数据涨落造成的对于峰值位置与高度测量的影响。

我们可以直接从图中看出,曲线的对称性还是比较好的。当然我们还可以对于对称性进行判断。

$$\frac{I_1 - I_2}{(I_1 + I_2)/2} = \frac{3}{166.5} = 1.8\% \quad (1)$$

我们可以看到,这个值小于实验要求,即10%,因此本次实验测得的光强分布是合乎对称性要求的。

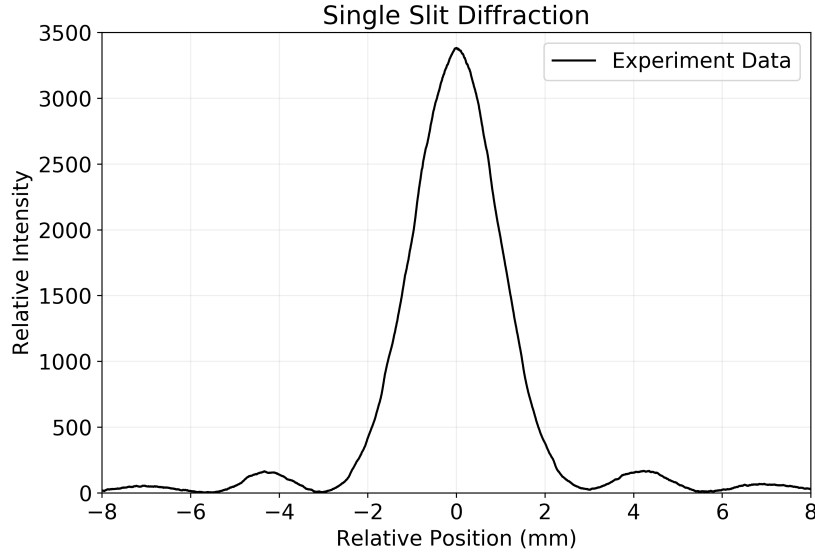


图 1: 单缝衍射光强分布图

本次实验光强测量的暗场(即没有光入射时光强记录仪的值)为 $\Delta = 3$ 。我们可以同时使用 I_1 和 I_2 的值, 并且扣除暗场, 测量单缝衍射的次极大与主极大光强之比 γ :

$$\gamma = \frac{I_1 - \Delta + I_2 - \Delta}{2(I_0 - \Delta)} = 4.84\%. \quad (2)$$

这里我们取 $\sigma_{I_1} = \sigma_{I_2} = 1$, 所以有

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_1}}{2I_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_2}}{2I_0}\right)^2 + \left(\frac{I_1 + I_2}{2I_0^2}\sigma_{I_1}\right)^2} \quad (3)$$

$$= 0.02\%. \quad (4)$$

因此

$$\gamma = (4.84 \pm 0.02)\%. \quad (5)$$

本次实验要求的测量值为4% ~ 5.5%, 因此这次测量结果在实验要求之内。

根据次极大的位置可以计算出单缝的宽度。次极大的半宽度为

$$\Delta x = \frac{|x_2 - x_1|}{2} = 4.2825 \text{ mm}. \quad (6)$$

进行测量时扫描的步长为0.005mm, 再考虑到确定极值位置的不确定性, 这里取 Δx 的不确定度为 $\sigma_{\Delta x} = 0.005\text{mm}$ 。

光强测量装置到狭缝的距离可以通过光学平台上的直尺进行测量, 再加上感光装置相对仪器的深入量4mm, 得到:

$$z = 81.50 \text{ cm}. \quad (7)$$



量程为1000mm的钢板尺的允差为 $e = 0.2\text{mm}$ ，因此 z 的不确定度 $\sigma_z = \frac{e}{\sqrt{3}} = 0.12\text{mm}$ 。

由几何关系可以算得

$$\sin \theta = \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + z^2}} = 0.005255. \quad (8)$$

$$\sigma_{\sin \theta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{z^2} \sigma_z\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{z}\right)^2} \quad (9)$$

$$= 6 \times 10^{-6}. \quad (10)$$

根据夫琅和费衍射理论，设单缝缝宽为 a ，氦氖激光波长为 $\lambda = 632.8\text{nm}$ ，则有：

$$\sin \theta = 1.43 \frac{\lambda}{a} \quad (11)$$

可以算得：

$$a = 172.2 \mu\text{m}. \quad (12)$$

$$\sigma_a = 1.43 \left| \frac{\lambda}{\sin^2 \theta} \sigma_{\sin \theta} \right| \quad (13)$$

$$= 0.2 \mu\text{m}. \quad (14)$$

因此，单缝缝宽的测量结果为

$$a = (172.2 \pm 0.2) \mu\text{m}. \quad (15)$$

根据测量结果，结合单缝夫琅和费衍射光强分布的理论公式

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2, \quad u = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta, \quad (16)$$

可以使用软件得到理论曲线，如图2中蓝色曲线所示。从图中可以看出，实验曲线与理论曲线吻合得很好。

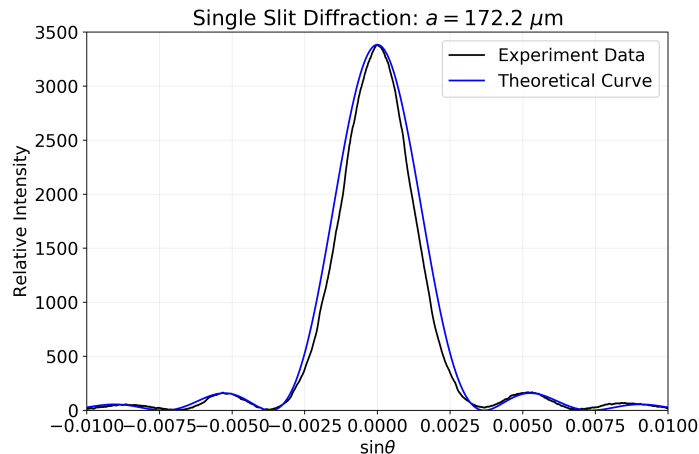


图 2: 单缝衍射的光强分布：理论与实验曲线



2 测量三缝衍射的光强分布

2.1 实验情况

将单缝装置取下，换上带有三缝的衍射装置板，重新调整光路使得光路满足实验要求。然后按照与之前同样的方法，进行三缝衍射光强分布的测量。

2.2 数据处理

实验得到的原始数据仍是一个txt文件。将绝对位置换算成相对主极大的位移之后，进行绘图，得到图3。首先，根据衍射图样很容易判断，该狭缝为三缝装置， $N = 3$ 。按照同样的办法，可以从图和

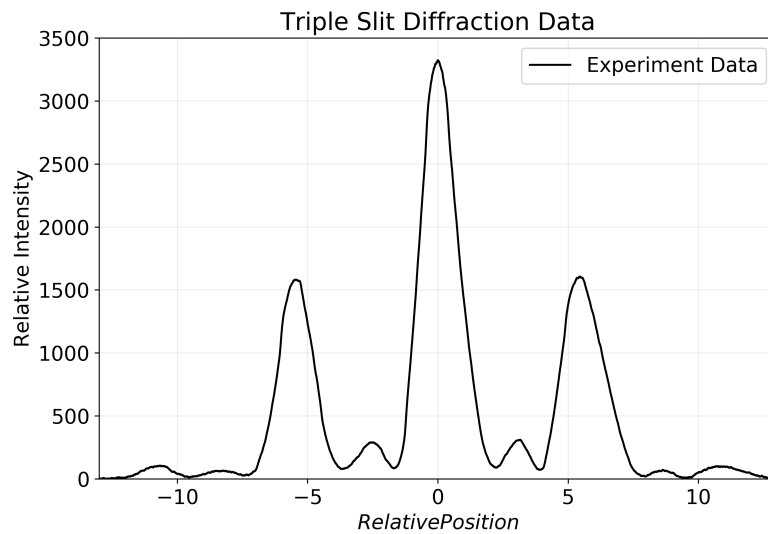


图 3: 三缝衍射的光强分布

原始数据中得到主极大的光强为 $I_0 = 3325$ ，位置为 $x_0 = 0.000\text{mm}$ ，左边次极大的光强为 $I_1 = 1582$ ，位置为 $x_1 = -5.320\text{mm}$ ，右边次极大的光强为 $I_2 = 1607$ ，位置为 $x_2 = 5.445\text{mm}$ 。

根据次极大的位置可以算出次极大的半宽度为

$$\Delta x = \frac{|x_2 - x_1|}{2} = 5.3825 \text{ mm}. \quad (17)$$

光强测量装置到狭缝的距离可以通过光学平台上的直尺进行测量，再加上感光装置相对仪器的深入量4mm，得到：

$$z = 75.7 \text{ cm}. \quad (18)$$

由几何关系可以算得

$$\sin \theta = \frac{\Delta x}{\sqrt{\Delta x^2 + z^2}} = 0.00711. \quad (19)$$



根据三缝衍射的光强分布公式(设缝宽为 b , 缝间距为 d)

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin 3\beta}{\sin \beta} \right)^2 \quad \alpha = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta, \quad \beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta \quad (20)$$

在光强的两个次极大位置, 满足关系

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta = \pi, \quad (21)$$

即

$$d = \frac{\lambda}{\sin \theta} = 89 \mu\text{m}. \quad (22)$$

实验室标准值给出的是缝间距 $d = 90 \mu\text{m}$, 本次测量缝间距的结果在实验允许的误差范围 $\pm 5 \mu\text{m}$ 之内。

为了更加准确地测量缝宽, 我使用了式(20)代入 $d = 89 \mu\text{m}$ 之后用最小二乘法拟合出缝宽 b 。拟合的结果为 $b = 41 \mu\text{m}$, 拟合后的理论图与实验图见图4, 蓝色曲线是代入拟合的 $b = 41 \mu\text{m}$ 后的理论曲线, 黑色曲线是实验曲线, 红色虚线是包络线。从图中看出, 理论与实验曲线吻合较好。至此, 本次三缝衍射实验的测量结果为: 缝宽 $b = 41 \mu\text{m}$, 缝间距 $d = 89 \mu\text{m}$ 。

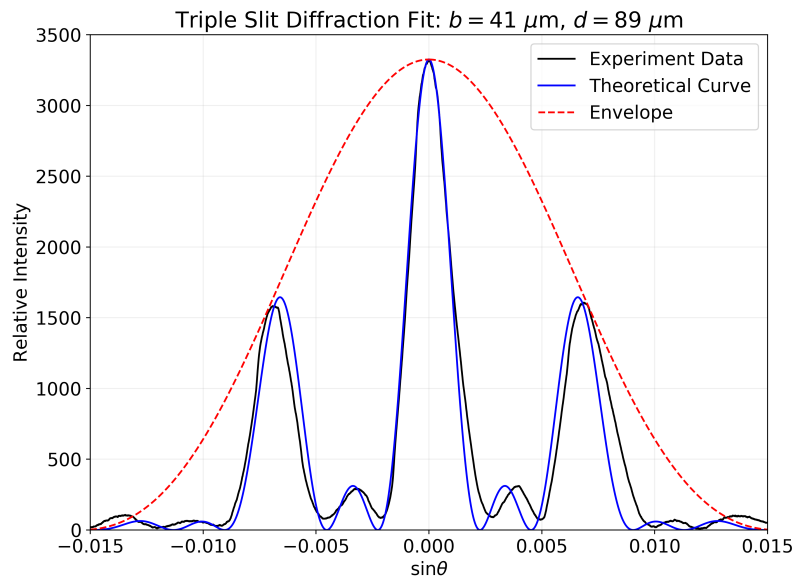


图 4: 三缝衍射的光强分布: 理论与实验曲线

3 不同衍射结构的衍射图样

按照老师的安排, 我分别观察了10个不同衍射结构的衍射图样, 如下面的十幅图所示。

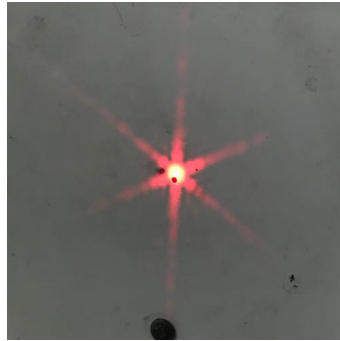


图 5: 等边三角形

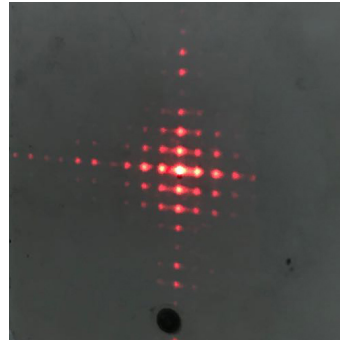


图 6: 方孔方阵

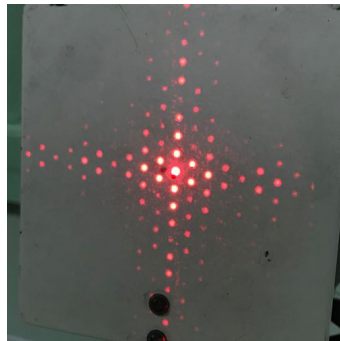


图 7: 方孔密排

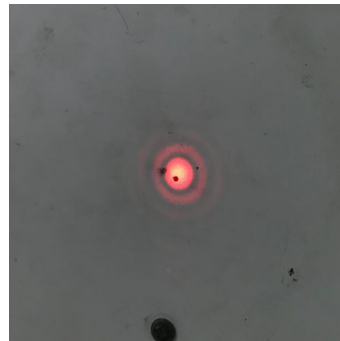


图 8: 单圆孔

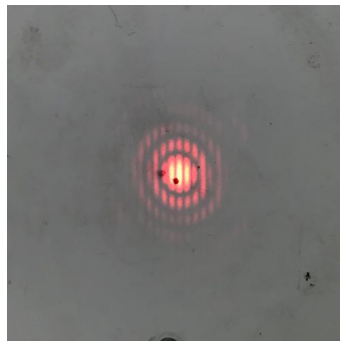


图 9: 双圆孔

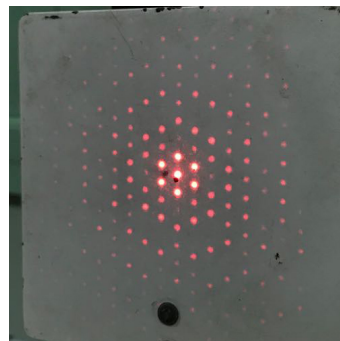


图 10: 圆孔密排

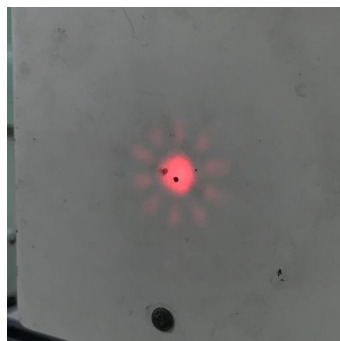


图 11: 五角星

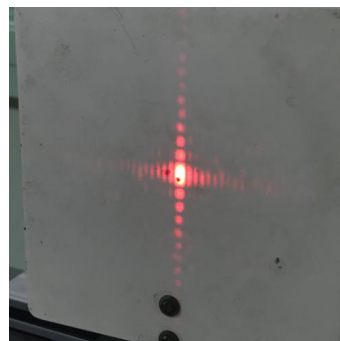


图 12: 矩形方孔

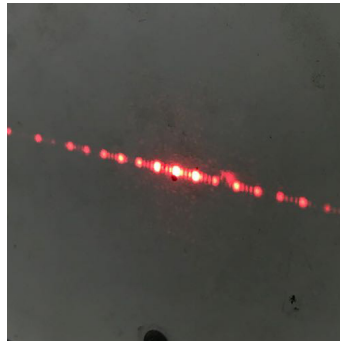


图 13: 五缝

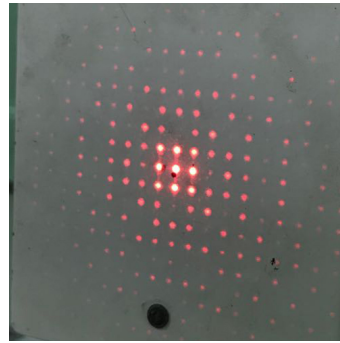


图 14: 圆孔方阵

4 思考题

1. 实验中测量误差的来源分析，缝宽和缝间距结果的不确定度的计算

答：本实验的误差来源主要有：

- 光路的搭建与调整是否满足实验要求；
- 测量屏到衍射缝间距 z 时的测量误差；
- 确定光强极大值位置的误差。

本实验中要测量的物理量的不确定度已经在上文中计算过了，具体见式(13)。

2. 夫琅和费衍射图样与衍射结构之间的关系

答：从本实验中做的12个不同衍射结构的衍射实验中可以定性总结出一些结论，如：

- 衍射结构越小，光的衍射效应越明显，光在光屏上的衍射斑扩展越大。在矩形方孔衍射中，越窄的边衍射后的展宽越宽。这里充分显示出了光的波动性。
- 衍射图样可以反映衍射结构的性质，如圆孔的衍射图样是圆对称的，五角星的旋转图样是旋转 $\pi/5$ 对称的，等边三角形的衍射图样是旋转 $\pi/3$ 对称的……衍射图样就像是衍射结构的一个指纹，通过衍射图样可以推测衍射结构，这一点在上世纪生物大发现——DNA双螺旋结构的发现上起到了至关重要的作用。
- 在双圆孔衍射中，除了一圈一圈的圆形条纹之外还可以观察到纵向明暗相间的条纹，这是光经过两个圆孔衍射之后的光场相干叠加的结果。这里也体现出光与经典粒子不同的特征：相干叠加性。根据这些物理现象的启示，德布罗意提出了物质波的概念，薛定谔等人建立起了波动力学，波恩提出了波函数几率解释……看似寻常的物理现象，蕴含着耐人寻味的道理。

5 分析讨论与感想

本次实验进一步锻炼了我调整光路、进行光学实验的能力。衍射是一个非常非常神奇的自然现象，历史上关于衍射的讨论一直推动着物理学的发展。光究竟是粒子还是波？在这个问题的指引下，上世纪的物理学大师们建立起了量子力学。从简单的物理现象出发，洞察物理本质，是大师们最为宝贵的



能力。通过这次实验，我更加深刻地理解了衍射这个物理现象，也希望能够对今后的科研工作有所启发。最后，感谢史俊杰教授对在实验过程中给予的帮助和对实验结果的检查。

参考文献

- [1] 吕斯骅, 段家祗, 张朝晖. 新编基础物理实验. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [2] 钟锡华. 现代光学基础. 第2版. 北京: 北京大学出版社, 2012.