

参赛队员姓名： 程澄

中学： 华东师范大学第二附属中学

省份： 上海市

国家/地区： 中华人民共和国

指导教师姓名： 王振堂

论文题目： 利用正多边光阑产生类似摄影中的“光芒”现象的实验与理论研究

# 标题：利用正多边光阑产生类似摄影中的“光芒”现象的实验与理论研究

作者：程澄

**摘要：**2018 年国际青年物理学家锦标赛（IYPT）试题第 14 题是关于在夜晚给一个点燃的提灯拍照，照片中可见到有大量从提灯中心发出的光线的有趣现象。类似的现象也出现在对太阳拍照时，照片上会出现太阳周围被一圈“光芒”包围着的现象。为理解该现象并找出其规律，我们采用一个 LED 光源模拟太阳或提灯这样的明亮发光体，让 LED 发出的光穿过一个尺寸可调的正十二边形光阑，最后利用数码相机对 LED 光源进行成像。我们实验表明，在光阑尺寸较小的条件下，可以观测到明显的“光芒”现象。我们利用透镜成像的傅立叶变换公式，模拟了“光芒”的形成，揭示了该现象背后的衍射原理。

**关键词：**衍射、光阑、傅立叶变换光学、透镜、“光芒”效应

**Title:** Experimental and Theoretical Studies on the Generation of the “Sunburst Effect” in Photography with a Dodecagonal Aperture

**Author:** Cheng CHENG

**Abstract:** The work presented below is inspired by the No.14 problem of 2018 IYPT, which is to explain and investigate an interesting phenomenon that when taking a picture of a glowing lantern at night, a number of rays emanating from the centre of the lantern may appear in the pictures. To understand this phenomenon and how it relies on the experimental conditions, we performed an experimental investigation on how a tunable dodecagonal aperture will influence the image of a bright LED light source taken by a digital camera. Our experiment clearly demonstrated that we can produce significant “Sunburst Effect” when the size of aperture is small. Furthermore, based on the Fourier lens optics, we performed numerical simulation on the formation of the sunburst with the dodecagonal aperture, and revealed the role of diffraction effect behind this phenomenon.

**Key Words:** diffraction, aperture, Fourier Transform Optics, lens, “sunburst” effect

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。尽本团队所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。若有不实之处，本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员： 程澄

指导老师： 王振堂

2017年9月8日

## 目录

1. 研究背景 .....	1
2. 实验装置与过程 .....	2
3. 实验结果 .....	3
4. 理论模型 .....	5
4. 1 衍射系统以及衍射系统的屏函数 .....	5
4. 2 透镜的屏函数 .....	5
4. 3 多边形光阑的屏函数 .....	6
4. 4 对于光阑衍射成像的理论分析 .....	7
5. 数值模拟结果 .....	9
6. 结论 .....	11
致谢 .....	12
文献索引 .....	13
附录：用于模拟计算图 4 结果的程序语言 .....	14

# 1. 研究背景

在现代社会中,相机已经成了不可或缺的一种常用工具。手机,平板电脑等新型电子产品也都将摄影功能从原先的附加功能地位提升到了一个基本功能的地位。日出日落是摄影师们最喜欢的场景,在夜晚,随手拍上一张灯火通明的城市照片也是一种别样的意境。

在著名摄影师的名作里,日出是一个最为常见的题材。光芒四射的太阳给人一种充满活力和朝气的感觉。而灯火通明的城市,也给人一种如同繁星般闪闪发光的意境。



图 1. 艺术摄影展现的冬日初升的阳光光芒四射<sup>[1]</sup>

但是,欣赏如图(1)这些照片的时候,我们注意到从树木间隙中出现的阳光,在照片上形成了以太阳本体为对称中心的 12 条发散光线,我们且称为“光芒”<sup>[1]</sup>。应该说,这些发散的光线并不是真实的物体所形成的像,因为显然在这些位置存在着树木,而树木本身不产生这样规则的光线。由此可知,照片中的“光芒”应该是成像过程中所形成的“伪”像,也就是一种由仪器本身的光学效应造成的假像。

类似的问题也出现于 2018 年国际青年物理学家锦标赛 (IYPT) 试题第 14 题<sup>[2]</sup>: Radiant Lantern: When taking a picture of a glowing lantern at night, a number of rays emanating from the centre of the lantern may appear in the pictures. Explain and investigate this phenomenon. (译文: 辐射光的灯笼: 在晚上给一个点燃的提灯拍照, 会有大量从提灯中心发出的光线显示在照片上, 试解释并探究这一现象)。

通过查阅一批具有类似图（1）中的“光芒”效果的照片，我们注意到如果要产生“光芒”，被摄影的对象应该是距离较远、面积较小的明亮光源。同时，摄影师会选择用较小的光圈孔径，来增强照片中的“光芒”效果。在这样的条件下，光源发出的光进入照相机镜头时接近平面波，遇到边缘锐利的物体（例如相机中的光圈）时可以产生显著的衍射。这就给我们一个启示，“光芒”效果应该是一种衍射效应。在光波的传播中，通常会发生衍射现象。广义而言，偏离几何光学传播规律的现象都称为衍射。衍射理论最初于 1687 年由 Christian Huygens 提出。他设想波动所到达的面上每一点是次波子波源，所有这些次级波的包络面形成新的波前。1818 年 Augustin-Jean Fresnel 提出了干涉的概念补充了 Huygens 提出的理论。1862 年 Gustav Robert Kirchhoff 利用 Green 定理导出了严格的衍射公式<sup>[3]</sup>。

我们认识到，现代照相机是一种结合光学、精密机械、电子技术和化学等技术的复杂产品，具有镜头、光阑、快门、对焦、变焦等系统。其中的光阑通常具有规则的多边形状，当平面波穿过光阑时，可以产生规则的衍射图案。为了确认并理解光阑的衍射效应，我们开展了较为系统的实验研究和理论模拟。

## 2. 实验装置与过程

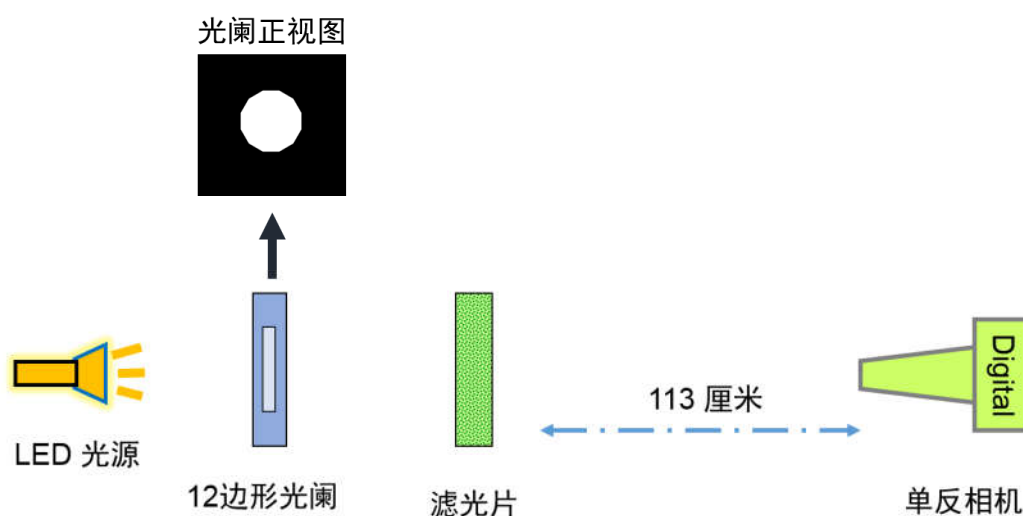


图 2 实验光路示意图

为了模拟相机拍摄“光芒效果”，我们设计了一个简单的光路，如图（2）所示。为了模拟类似于太阳或提灯这样的明亮发光体，我们选了一个白色的 LED 光源，光源的发光尺寸直径大约在 2 厘米左右。在 LED 光源后 5cm 处，放置了半径可调的光阑，该光阑最小的通光尺寸为 2 毫米，最大尺寸 1 厘米。该光阑的作用是模拟透镜中可变光圈的效果。从实验研究的角度而言，选取边数较少的光阑，其衍射产生的光芒的瓣数也较少，容易获得较为清晰的光芒图案。但是边数太少且半径可连续精确调节的光阑，通常在精确的科学研究中较少采用，因为多边形的衍射效应会对光学实验结果带来干扰。由于这个原因，通常难以采购到边数很少，而调节精度又非常高的可变光圈。因此我们选购了既可令边长连续调节，且

边数相对较少的正十二边形光阑用于我们的实验研究(如图 2 中的插图所示)。我们在实验中选取的光阑直径分别为 2mm, 3mm 和 5mm, 可研究随着光阑尺寸变化引起的衍射图案的变化规律。

在距离光阑 113cm 处我们放置了一台数码单反相机。值得注意的是, 我们将光阑放置于距离单反相机镜头较远处的原因是, 在此条件下, 从光阑透射的光线, 进入数码相机的镜头时, 可以被近似认为是沿着光轴传播(即所谓近轴传播条件), 从而便于理论上进行进一步分析。此外我们精心调节了照相机的焦距, 使得光阑平面处的光场能够被成像在单反相机的焦平面。在这样的光路安排下, 我们的理论分析表明, 可以将透镜的成像作用等效于对位于光阑平面的光场作一个傅立叶变换。详细分析可以参考以下第 4 节。

### 3. 实验结果

下图(3a-c)分别显示了在衍射光阑孔径是 2mm, 3mm 和 5mm 的时候, 单反相机上记录的光阑处的光场的像, 即经过对相机调焦, 光阑正好成像在照相机的底片上。

从图 3 的(a)到(c)的变化趋势可以看出, 在光阑尺寸最小的时候(图 3(a)), 所成的像中可以清楚地看到类似“光芒”的结构。光芒的瓣数为 12 瓣, 恰好和我们的 12 边形光阑的边数相同。

随着光阑尺寸增加, 在图 3(b)中还能隐约看到一些衍射条纹的痕迹, 但是已经显得比较凌乱。进一步在图 3(c)中几乎看不到任何衍射的结构。总体趋势是随着光阑尺寸增加, 最后成的像的尺寸也在增加。

值得说明的是, 为了拍摄到明显的衍射图案, 我们在拍摄过程中采取了过曝光, 即我们的曝光时间较长。因此, 对于图案的中心位置, 那里的光强最强, 数码相机的 CCD 探测到的光强已经饱和。采用过曝光条件的原因在于, 由于衍射的效率通常比较有限, 如果曝光量不够, 衍射光斑会被淹没在其它的杂散光背景中, 无法被清晰地观测。为了在照片中获得突出的衍射图案, 我们延长了曝光时间。图 3 中的所有照片中, 中心最亮的亮斑是光阑处光场所成的像, 围绕该亮斑的射线结构是由于光阑的衍射所成的像。



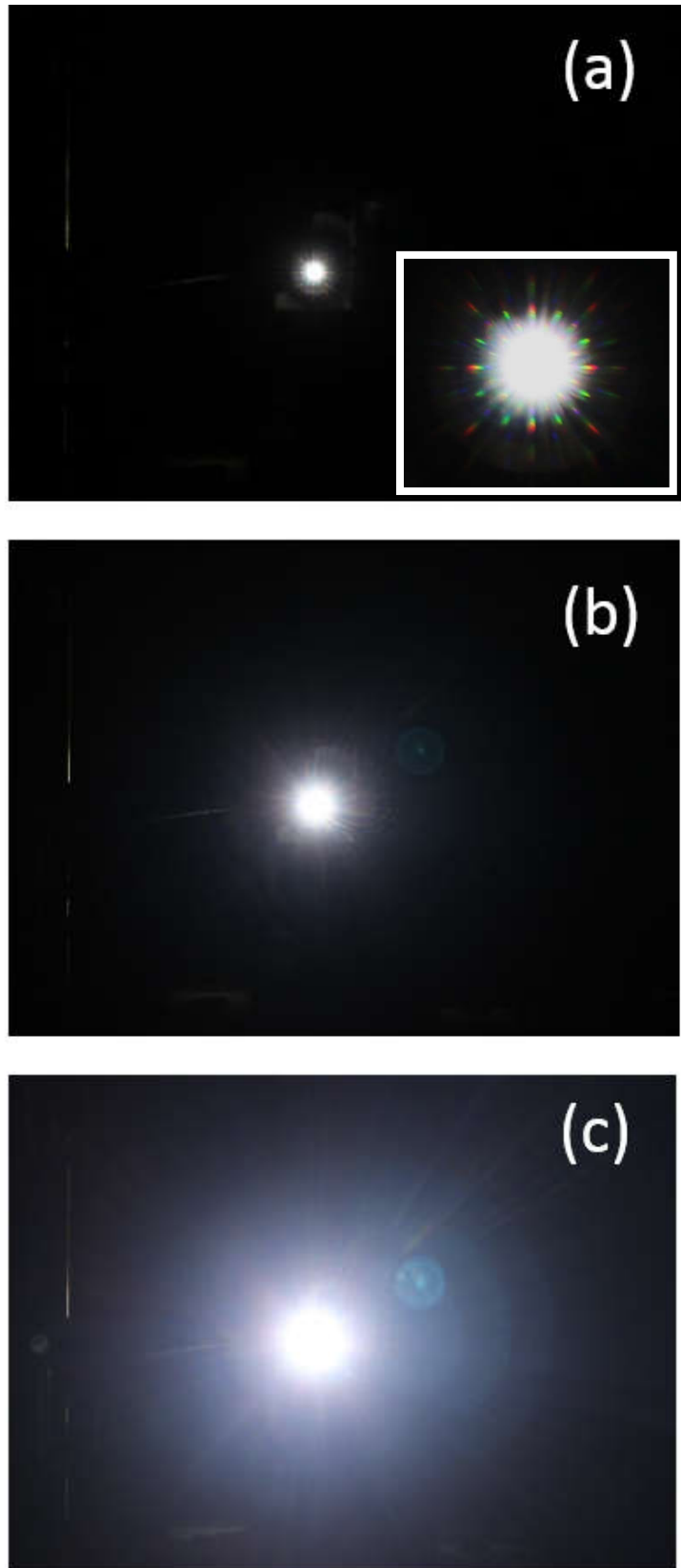


图 3. 单反相机拍摄的被 LED 照亮的光阑的像。(a)光阑直径 2 毫米；(b) 光阑直径 3 毫米；(c) 光阑直径 5 毫米。图(a)中的插图是图(a)中像的放大，能清楚地展现衍射光斑的细节。所有照片图像尺寸与相机获得的原图大小比例一致。

## 4. 理论模型

以下，我们借助衍射理论，建立一个发出强光的点光源在屏上产生的衍射条纹光场的振幅分布的数学模型<sup>[4,5]</sup>。基于该模型，我们编写了 Matlab 程序，进行数值模拟并和实验结果进行比较。

### 4. 1 衍射系统以及衍射系统的屏函数

广义而言，光在传播过程中偏离几何光的传播规律的现象成为衍射。当 Huygens-Fresnel 原理运用到各种衍射的情况的时候，我们意识到衍射的发生是由于传播过程中自由波面发生了破损。由此可以给出定义：

衍射：光在传播过程中由于种种原因而改变了波前的复振幅分布，后场不再是自由传播时的光波，这便是衍射；

衍射屏：能使波前上复振幅发生改变的物。

记入射光波前为  $U_1(x, y)$ ，衍射光波前为  $U_2(x, y)$

我们有：

$$t(x, y) = \frac{U_1(x, y)}{U_2(x, y)} \quad (4.1.1)$$

其中  $t(x, y)$  为衍射屏的屏函数。一般情况下， $t(x, y)$  是一个复函数。因为衍射屏不仅可以改变光场的振幅空间分布，还可以改变光场的位相空间分布。

### 4. 2 透镜的屏函数

我们假设一个焦距为  $F$  的透镜，该透镜上的入射波前为：

$$U_1(x, y) = A_1(x, y) \exp[i\phi_1(x, y)]. \quad (4.2.1)$$

透射波前为：

$$U_2(x, y) = A_2(x, y) \exp[i\phi_2(x, y)] \quad (4.2.2)$$

$$r < 0.5D \text{ 时, } t(x, y) = \exp[i\phi_2(x, y) - i\phi_1(x, y)] \quad (4.2.3)$$

$$r > 0.5D \text{ 时, } t(x, y) = 0 \quad (4.2.4)$$

其中,  $D$  是透镜直径,  $r^2=x^2+y^2$

$$\text{记 } \varphi_2(x, y) - \varphi_1(x, y) = \varphi_L(x, y) \quad (4.2.5)$$

我们仅考虑  $r < 0.5D$  的情况, 因为在实际应用中, 超出透镜的范围以外的地方, 一般都没有光场分布。

对于薄透镜, 在傍轴条件下, 穿过透镜后光波获得的额外相位可计算如下:

$$\varphi_L(x, y) = 2\pi[\Delta_1 + \Delta_2 + nd(x, y)]/\lambda = 2\pi nd_0/\lambda - 2\pi(n-1) \cdot (\Delta_1 + \Delta_2)/\lambda \quad (4.2.6)$$

其中,  $n$  为透镜折射率,  $\lambda$  为透镜波长,  $r_1$  为透镜左球面半径,  $r_2$  为透镜右球面半径。此外, 通过简单几何计算, 我们有:

$$\Delta_1(x, y) = r_1 - [r_1^2 - (x^2 + y^2)]^{1/2} \approx (x^2 + y^2)/2r_1 \quad (4.2.7)$$

$$\Delta_2(x, y) = (-r_2) - [(-r_2)^2 - (x^2 + y^2)]^{1/2} \approx -(x^2 + y^2)/2r_2 \quad (4.2.8)$$

略去常数  $2\pi nd_0/\lambda$ , 它对光场传输没有影响。我们可得到:

$$\varphi_L(x, y) = -\frac{2\pi n-1}{\lambda} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) (x^2 + y^2) \quad (4.2.9)$$

由相关几何光学知识可以得知:

$$f = \frac{1}{(n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} \quad (4.2.10)$$

其中  $f$  为透镜焦距。由此推算出透镜的位相变换函数为

$$t_L = \exp \left[ \frac{-i\pi(x^2 + y^2)}{\lambda f} \right] \quad (4.2.11)$$

### 4.3 多边形光阑的屏函数

根据 B. K. Yap 等人的理论, 各类复杂形状的光阑可以通过分解为圆, 三角, 椭圆, 矩形等规则形状的子孔径来获得解析解<sup>[6]</sup>。由几何学常识我们可知: 有  $n$  条边的正多边形可以分解为  $n$  个全等的等腰三角形, 其中任意一个等腰三角形的

顶角为  $\frac{2\pi}{n}$ 。

由此我们对于如图(4-2)所示的一个等腰三角形光阑进行分析。

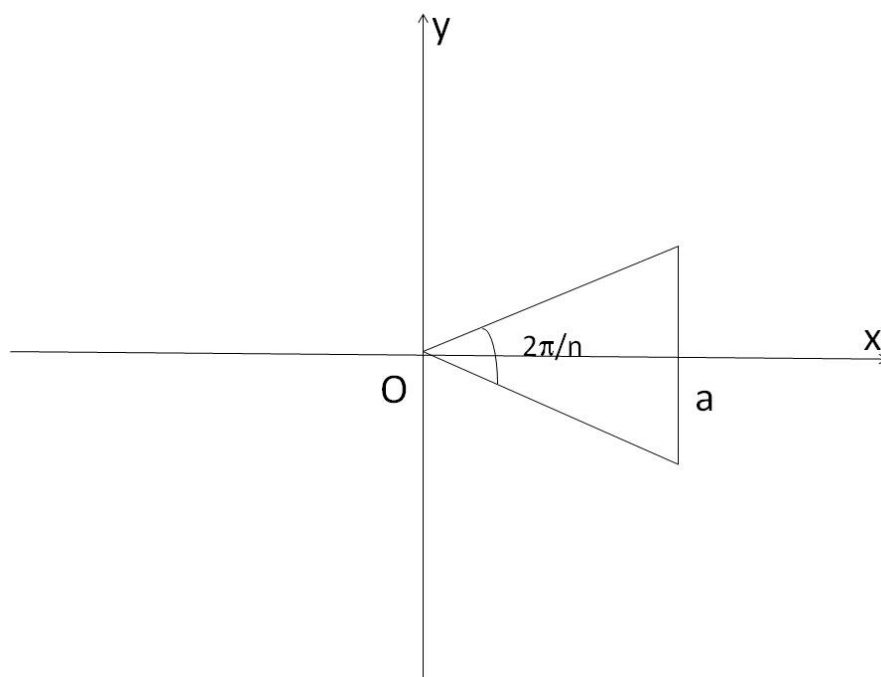


图 4. 组成正多边形的等腰三角形的坐标表示。

如图(4)所示, 该光阑的位相变换函数为:

$$A(x, y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a \text{ 且 } -\tan\left(\frac{x}{n}\right) \leq y \leq \tan\left(\frac{x}{n}\right) \\ 0, & x < 0 \text{ 或 } x > a \text{ 或 } 0 \leq x \leq a \text{ 且 } y < -\tan\left(\frac{x}{n}\right) \text{ 或 } y > \tan\left(\frac{x}{n}\right) \end{cases} \quad (4. 3. 1)$$

#### 4. 4 对于光阑衍射成像的理论分析

根据图 2 的实验光路, 我们可以作出如下图 5 示的成像光路.

12 边光阑所在平面为  $X_1-Y_1$ , 透镜所在位置为  $X_2-Y_2$ , 成像屏为  $X_3-Y_3$ , 由于光阑和透镜距远远大于透镜焦距, 光阑成像的像屏和透镜焦平面近似重合。

光作为一种电磁波, 对于光场的描述可以由其矢量电场来描述<sup>[7]</sup>。

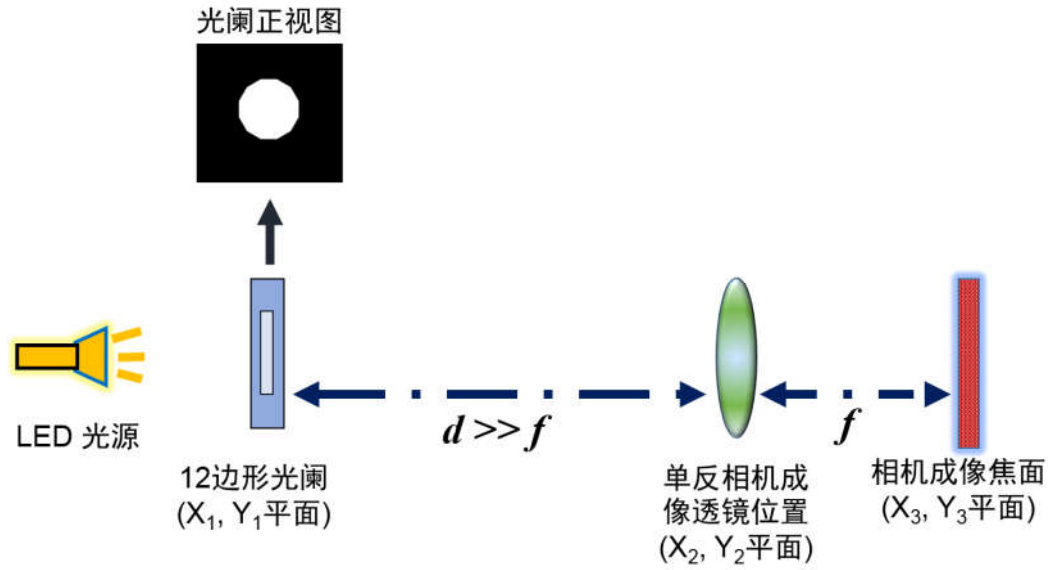


图 5. 和实验光路对应的理论模拟光路图，其中的相机被简化为透镜和处于成像焦平面的记录底片。

根据 Huygens-Fresnel 原理以及 Kirchhoff 边界条件，如图 5 所示，我们得出在透镜所在位置的  $X_2$ - $Y_2$  平面上，衍射光波的电场公式：

$$E(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda} \iint \frac{E(x_1, y_1)}{r} \cos\phi \exp\left(\frac{2i\pi r}{\lambda}\right) dx_1 dy_1 \quad (4.4.1)$$

$r$  为光阑里任意一点到成像屏上任意一点的距离， $\phi$  为连接  $X_1$ - $Y_1$  平面上任意一点到  $X_2$ - $Y_2$  平面上任意一点的直线与光轴的夹角。由于两平面距离  $d$  远远大于透镜的焦距，也即  $d$  远远大于透镜孔径，因此通过近轴条件我们有  $\cos\phi \approx 1$ 。因此 (4.4.1) 可以简化为：

$$E(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda} \iint \frac{E(x_1, y_1)}{d} \exp\left(\frac{i\pi[(x_2-x_1)^2+(y_2-y_1)^2]}{\lambda d}\right) dx_1 dy_1 \quad (4.4.2)$$

我们可以把以上公式进一步得出：

$$E(x_2, y_2) = \frac{\exp\left(\frac{i\pi[d+(x_2)^2+(y_2)^2]}{\lambda d}\right)}{i\lambda d} \iint \frac{E(x_1, y_1)}{d} \exp\left(\frac{i\pi[x_2 \cdot x_1 + y_2 \cdot y_1]}{\lambda d}\right) dx_1 dy_1 \quad (4.4.3)$$

利用第 4.2 节中得到的透镜的屏函数 (4.2.1)，结合公式 (4.4.3)，我们知道穿过薄透镜的光场函数是：

$$E'(x_2, y_2) = E(x_2, y_2) \cdot t_1 = \frac{\exp\left(\frac{i\pi[d+(x_2)^2+(y_2)^2]}{\lambda d}\right)}{i\lambda d} \iint \frac{E(x_1, y_1)}{d} \exp\left(\frac{i\pi[x_2 \cdot x_1 + y_2 \cdot y_1]}{\lambda d}\right) dx_1 dy_1 \cdot \exp\left[\frac{-i\pi(x_2)^2 + (y_2)^2}{\lambda f}\right] \quad (4.4.4)$$

最后，传到透镜的聚焦屏上以后，形成的光场分布公式推导过程和(4.4.3)相似，为：

$$E(x_3, y_3) = \frac{1}{i\lambda} \iint \frac{E'(x_2, y_2)}{f} \exp\left(\frac{i\pi[(x_3-x_2)^2+(y_3-y_2)^2]}{\lambda f}\right) dx_2 dy_2 \quad (4.4.5)$$

结合公式(4.4.4)和(4.4.5)，我们得到如下关系：

$$E(x_3, y_3) = \frac{\exp\left(\frac{i\pi[f+(x_3)^2+(y_3)^2]}{\lambda f}\right)}{i\lambda f} \iint \frac{E(x_2, y_2)}{f} \exp\left(\frac{i\pi[x_2 \cdot x_3 + y_2 \cdot y_3]}{\lambda f}\right) dx_2 dy_2 \quad (4.4.6)$$

最后，利用近轴传播公式，我们可以将以上公式对  $x_2, y_2$  进行积分计算，进而得到如下公式(4.4.7)：

$$E(x_3, y_3) \propto \exp\left(\frac{-i2\pi[(x_3)^2+(y_3)^2]}{\lambda f}\right) \cdot \iint \frac{E(x_2, y_2)}{f} \exp\left(\frac{-i2\pi[x_2 \cdot x_3 + y_2 \cdot y_3]}{\lambda f}\right) dx_2 dy_2 \quad (4.4.7)$$

由于我们探测的是光强，也就是公式(4.4.7)中的  $E(x_3, y_3)$  的模的平方，因此公式(4.4.7)前的纯虚数系数对探测结果没有影响。由以上可见，对于物体在远处的透镜成像，且成像屏放在透镜焦平面上面，以上公式实际上相当于光阑所在的  $X_1-Y_1$  平面做了一个傅里叶变换<sup>[5]</sup>。(4.4.7)可以进一步表示为：

$$I(x_3, y_3) \propto \left| FFT\left[E\left(\frac{x_1}{\lambda f}, \frac{y_1}{\lambda f}\right)\right] \right|^2 \quad (4.4.8)$$

我们以下的数值模拟即以公式(4.4.8)为基础。

## 5. 数值模拟结果

我们利用第4.4节中建立的理论模型，通过 Matlab 编程<sup>[8]</sup>，来对图3中获得的实验结果进行模拟。程序作为附录附于文后。模拟结果如下图6(a-c)所示。

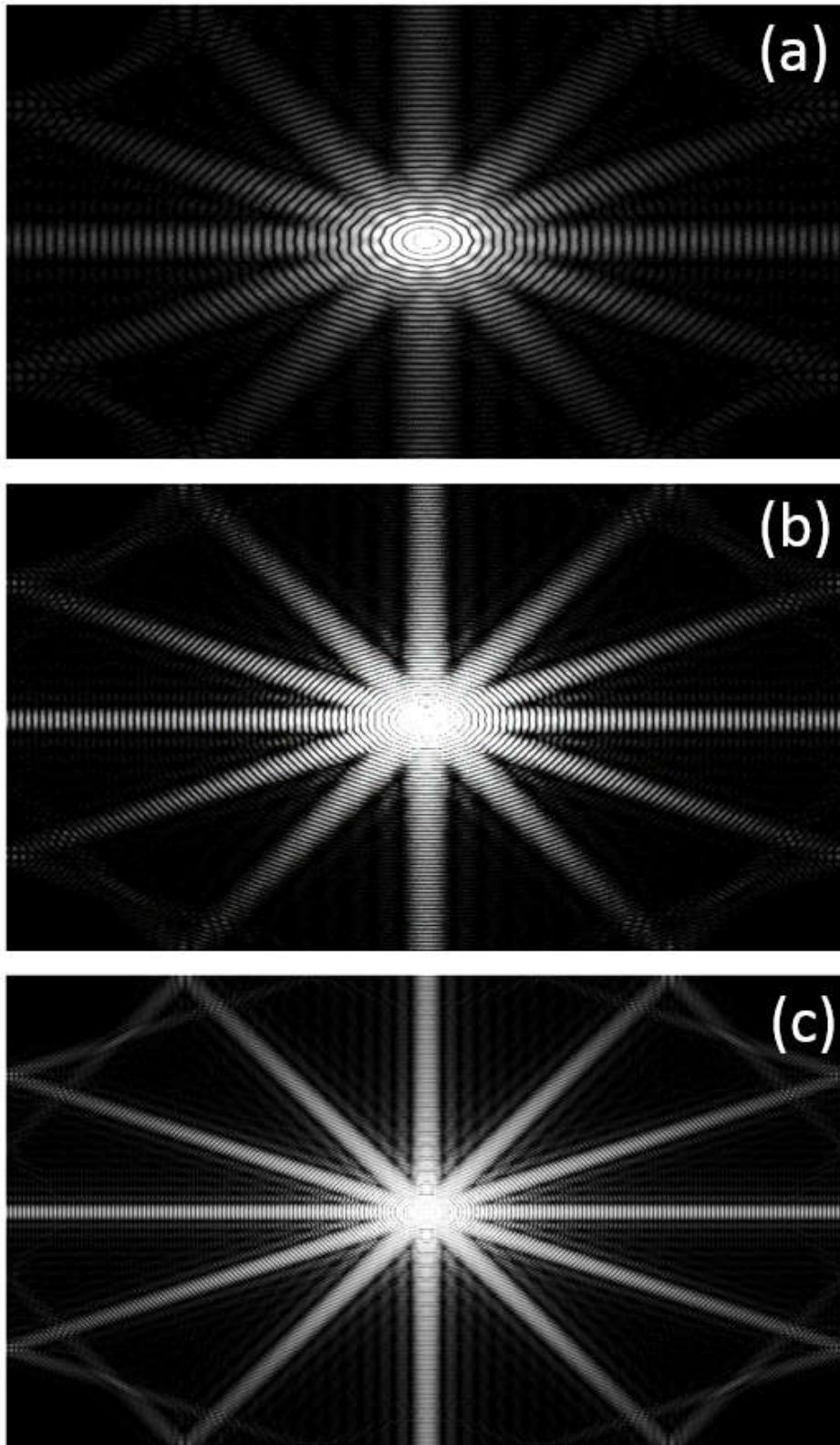


图 6. 利用傅里叶变换，对图 3 中的三种成像结果进行模拟的结果。(a) 光阑直径 2 毫米；(b) 光阑直径 3 毫米；(c) 光阑直径 5 毫米。

我们发现所有的模拟结果都显示，衍射图案有 12 个旁瓣围绕在中心的亮斑周围。这一点和图 3(a)一致。此外，随着光阑尺寸变大，衍射图案也不断向外延伸，这点趋势也和图 3 的结果一致。因此，模拟结果较好的重复了实验结果。

但是，模拟结果中对三种尺寸的孔径，都观测到了明显的衍射图案，而实验结果中仅仅在光阑尺寸最小的 2 毫米情况下拍摄到了明显衍射图案，其它两种情况下，衍射的图案都非常模糊。我们认为这是因为当光阑尺寸变大，从 LED 灯过来的光已经不可以被近似认为是平面波的，因为 LED 灯是由多个 LED 点光源构成的阵列组成。我们的实验将光阑贴近 LED 光源。此时，在光阑尺寸很小的情况下，光阑仅仅允许单个 LED 点光源的光透过，可以近似为平面波（类似于利用小孔对灯泡或蜡烛发出的光选出平面波）。当光阑尺寸变大，透过光阑的光由多个点光源组成。不同的点光源产生的衍射光波位相和空间分布都不同。因此这些复杂的衍射图叠加以后，会将各自的衍射图案抹去，形成模糊的分布。这是我们在大尺寸光阑条件下无法看到清楚衍射图案的主要原因。

## 6. 结论

我们针对摄影中常见的“光芒”现象背后的波动光学效应进行了研究。实际应用中，不同的情况对于该效应的处理方式存在着差异：在追求成像准确度时，需要减弱这种现象，而在追求艺术效果时，需要增强这种效果。因此理解这个现象有着现实意义。

我们认识到该现象应该是来自照相机中的机械光圈对入射平面波的衍射造成的。我们利用一个多边形可变光阑对此进行了实验和理论研究，证实了我们的猜测。我们的研究表明，要产生显著的衍射效应，光阑的尺寸和曝光时间都很重要。这一点和摄影师在拍摄“光芒”效果时，往往选择明亮的物体、合适的光圈恰好吻合。明亮的物体如太阳等，即使衍射效率有限，仍然能够保证产生出足够的衍射光强，使得“光芒”这样的衍射图案可以被底片记录下来。此外，合适的光圈大小可以保证进入光圈的光为近平面波。这些都对衍射图案的拍摄有利。



## 致谢:

作者感谢华东师范大学第二附属中学王振堂老师全程给予的指导。同时也感谢中国科学院上海光学精密机械研究所在 2017 年 7 月中旬至 8 月初期间, 为我们提供的实验室场地和若干实验器材。感谢上海光学精密机械研究所研究生刘招祥在 Matlab 程序编写方面的指导。

在本项目的研究中, 作者负责设计, 进行试验, 进行理论分析和建立模型; 作者的中学指导老师向作者详细讲解了本文所需要的相关理论知识; 中科院的研究生刘招祥向本人提供了 Matlab 软件, 并介绍了利用该软件编写程序的方法。作者在此对于所有向本项目研究提供帮助的个人和单位表示诚挚的感谢。

## 文献索引:

1. <http://blog.sina.com.cn/hangdafld77>
2. <http://www.iypt.org/Problems>
3. 赵凯华、钟锡华,《光学》上册[M],第一版,北京:北京大学出版社,1984.1
4. 赵凯华、钟锡华,《光学》下册[M],第一版,北京:北京大学出版社,1984.1
5. 陈秉坤、王稼军,《大学物理通用教程:电磁学》[M],第二版,北京:北京大学出版社,2012.2
6. B. K. Yap and S. D. Fantone, Application of a sunburst aperture to diffraction suppression, J. Opt. Soc. Am.64, 978 (1974)
7. 李忠、周建莹,《高等数学》下册[M],第二版,北京:北京大学出版社,2009.8
8. Duane Hanselman and Bruce Littlefield 著,朱仁峰译,《精通 Matlab7》[M],第一版,北京:清华大学出版社,2006.5.

## 附录：用于模拟计算图 4 结果的程序语言<sup>[8]</sup>

```
clc;%命令行窗口
clear;%工作区
I0=imread('aperture3.tif');%读取文件
I=I0(:, :, 1);
I=im2double(I);%类型转换
I=I/max(max(I));%归一化
F1=fft2(I);%二维离散傅里叶变换
F=fftshift(F1);%低频成分移动至中央
F=abs(F);%取模
T=log(F+1);%降梯度
% figure;%作图
% imshow(T, []);%显示变换后的图
z=4331.67;
% lamda=0.019167;%波长对应像素格数 lamda=500nm
for x=0:1279
    for y=0:719
E(y+1, x+1)=(1/(i*lamda*z))*exp(i*pi*(x^2+y^2)/(z*lamda))*F1(y+1, x+1);
    end
end
E=fftshift(E);%低频成分移动至中央
E=abs(E);%取模
T2=log(E+1);%降梯度
figure;%作图
imshow(T2, []);%显示变换后的图
```