

# Circle of Light Generated by Cylindrical Wire Obliquely Illuminated by Laser

Guoye Guan, Jiajian Huang, Fang Lin\*

College of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu Sichuan  
Email: \*linfang@scu.edu.cn

Received: Feb. 6<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2017; published: Feb. 28<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

When a laser beam was aimed at a thin copper wire perpendicular to the ground, a circle of light could be observed clearly. In this paper, the three-dimension conical light field induced by laser beam and opaque smooth wire was analyzed both theoretically and experimentally, which has come to a conclusion that the light circle was formed by reflection and diffraction together. Meanwhile, the influence of system relevant parameters has also been studied. In addition, wires with different properties (such as structure, roughness and transparency) have been further investigated as well.

## Keywords

Circle of Light, Thin Wire, Conical Light Field, Reflection, Diffraction

---

# 激光斜向照射圆柱状细丝产生的光环现象

关国业, 黄家坚, 林 方\*

四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都  
Email: \*linfang@scu.edu.cn

收稿日期: 2017年2月6日; 录用日期: 2017年2月23日; 发布日期: 2017年2月28日

---

## 摘 要

将一根圆柱状细铜丝垂直于地面放置, 当激光沿细丝所在平面斜向下照射铜丝时, 在地面上可观察到一个明亮清晰的光环。本文从理论与实验两个方面分析了激光束入射不透明光滑细铜丝时, 在空间中产生的三维锥状光场, 得到光环由激光反射与衍射共同形成的结论, 并讨论了系统参量对光环形态的影响。

\*通讯作者。

此外, 本文还对不同结构、粗糙程度与透明度的多种细丝产生的光环形态进行了探究。

## 关键词

光环, 细丝, 锥状光场, 反射, 衍射

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

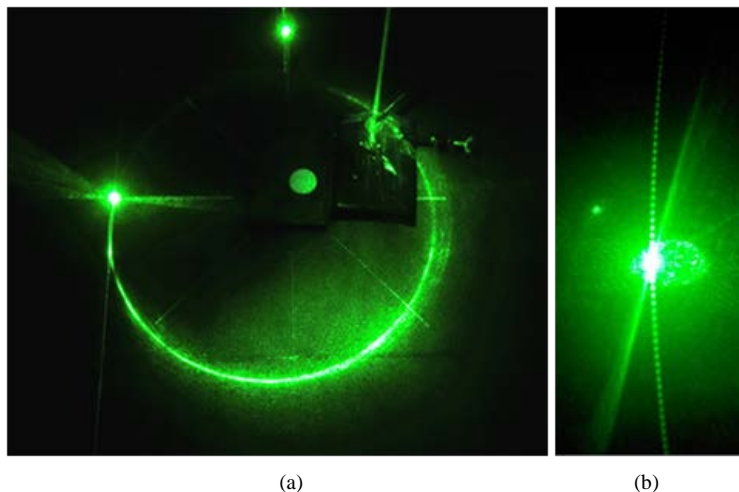
将一根细铜丝垂直于地面放置, 当一束激光沿铜丝所在平面斜向下照射铜丝时, 可在地面上观察到一个清晰明亮的光环, 如图 1 所示。光环整体呈圆形, 与激光源同侧的环面较宽, 异侧较窄; 并且在异侧可观察到一个明亮的直射点。当铜丝直径较小时(小于 0.5 mm), 可在光环极亮点附近观察到等间隔分布的明暗条纹。近年来, 激光斜向下照射细丝产生的光环现象受到了广泛关注。例如, 赵建林等人对不同类型细丝在激光斜向照射下产生的光环形态进行了实验探究, 并通过理论分析得出光环现象由激光的反射、衍射以及在材质透明情况下存在的折射共同形成的结论, 但没有对可能存在的衍射光环进行实验测定[1]。朱俊伊、陈晨等人则通过实验探究了光环的形成原因以及与系统参量的依赖关系, 但由于在实验中没有观察到明暗条纹, 故将光环的产生单一地归因于激光反射[2] [3]。与此相关的问题亦出现在 2015 年第 28 届国际青年物理学家锦标赛(28<sup>th</sup> International Young Physicists' Tournament)上[4]。

激光照射丝状物时产生的衍射现象从 20 世纪下半叶便开始被深入研究。J. B. Keller 等人首先利用几何方法对弯曲细丝的衍射现象进行了理论研究[5] [6]; 后来有更多的研究者对单缝衍射与细丝衍射进行类比, 通过理论与实验对比研究二者的相似性[7] [8] [9]。其中, R. G. Greenler 等人在实验中发现对于直径大于 6  $\mu\text{m}$  的金属细丝, 将细丝衍射类比为单缝衍射所引起的偏差不超过 5%, 而相同情况下把金属丝更换为透明纤维则会引起不可忽略的偏差[8]。值得注意的是, 激光照射细丝发生的光学现象已被应用到多个领域中, 例如丝状物材料参数(包括发丝直径与光滑度等)的测量[9] [10] [11]。

本文通过实验清晰地观察到了光环在极亮点附近的衍射条纹(图 1), 证明了激光照射细丝后发生的衍射效应是光环形成的重要组成部分, 并结合大角度斜入射的夫琅禾费单缝衍射理论对衍射光环进行了理论探究。本文的主要工作如下: 1) 分别对激光照射细铜丝后发生的反射与衍射进行理论分析与实验研究, 发现激光与铜丝作用产生的反射光场与衍射光场皆成圆锥状分布, 二者完全重合, 从而得出光环是由激光反射与衍射共同形成的结论; 2) 进一步研究了光环形态与铜丝参数(直径、粗糙程度)的关系, 以及其他类型的丝状物所产生光环的不同特征; 3) 实验中观察到光环在激光直射点附近存在等间距明暗相间衍射条纹, 本文还对衍射条纹间距进行了讨论, 并解释了部分研究者未观察到衍射条纹的原因。

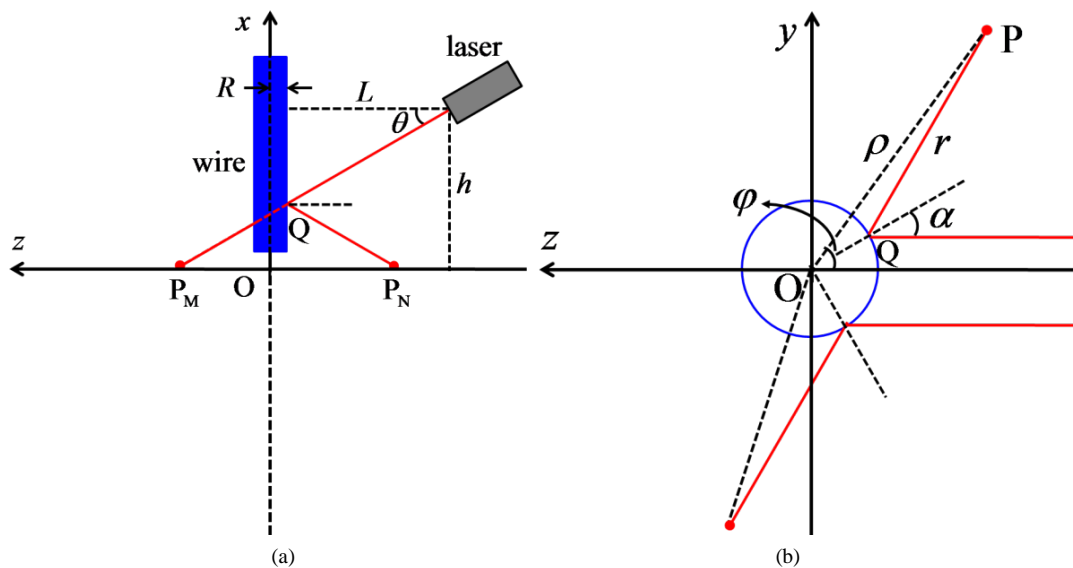
## 2. 理论分析

以表面光滑的圆柱状不透明细铜丝为研究对象, 记半径为  $R$ 。以细丝中心轴线与地面交点为原点  $O$ , 竖直向上为  $x$  轴正方向, 激光出射的水平方向为  $z$  轴正方向, 建立空间直角坐标系  $O-xyz$ , 如图 2 所示。其中, 激光器位于  $xOz$  平面内, 出射口与地面距离为  $h$ , 与细丝轴线距离为  $L$ , 坐标为  $(h, 0, -L)$ ; 激光发射方向与水平面夹角为  $\theta$ ; 激光在地面的直射点为  $P_M$ , 中央反射点为  $P_N$ 。



**Figure 1.** Circle of light generated by cylindrical wire obliquely illuminated by laser. (a) The light intensity distribution was slightly like a crescent, rather than uniform; (b) under specific conditions, diffraction fringes could be observed near the brightest point

**图 1.** 激光斜向下照射细铜丝产生的光环现象；(a) 光环的光强分布并不均匀，略呈月牙形；(b) 特定情况下极亮点附近能观察到等间距明暗分布的衍射条纹



**Figure 2.** The space coordinate system and physical symbols; (a) side view; (b) top view  
**图 2.** 所研究系统的空间坐标系及物理符号；(a) 侧视图；(b) 俯视图

假设选取的细丝半径小于激光束半径，则激光束照射到细丝表面后将分成三部分：1) 与细丝无相互作用的直射光；2) 照射在细丝表面形成的反射光；3) 掠射细丝表面形成的衍射光。如选取的细丝材质具有透光性(如玻璃、聚苯乙烯)，将存在经细丝折射的透射光。由于直射光不受细丝影响直接照射在  $P_M$  点附近，对光环没有影响，故不纳入讨论范围，本文将重点分析反射光与衍射光的对光环形成的作用。

### 2.1. 反射光场

如图 2(b)所示，以  $\alpha$  代表光线在细丝表面反射点的方位角，对于不同的方位角，光线将有不同的反

射情况,  $\alpha < 45^\circ$  时反射点将落在激光源一侧,  $\alpha > 45^\circ$  时则落在另一侧。记光线在细丝表面的直射点为  $Q$ , 对应在地面的照射点为  $P$ ; 以极角  $\varphi$  代表点  $P$  的方位角, 极径  $r$  代表照射点  $P$  与原点  $O$  的距离, 因此光环轨迹可以用极坐标  $(\varphi, r)$  表示,  $\varphi$  取值范围为  $(-\pi, \pi)$ 。

以  $c$  代表空气中的光速, 光线的水平传播速度为  $c \cos \theta$ , 竖传播速度为  $c \sin \theta$ 。光线从出射经反射, 最终到达地面经历的总时间和水平方向的总传播路程分别为:

$$t = \frac{h}{c \sin \theta}, \quad (1)$$

$$l = t \cdot c \cos \theta = \frac{h}{\tan \theta}, \quad (2)$$

因此, 细丝表面反射点  $Q$  与地面照射点  $P$  的水平距离为:

$$r = l - L = \frac{h}{\tan \theta} - L. \quad (3)$$

对三角形  $POQ$  应用正弦定理和余弦定理可以得到:

$$\frac{\rho}{\sin \alpha} = \frac{r}{\sin(\varphi - \alpha)} = \frac{R}{\sin(2\alpha - \varphi)}, \quad (4)$$

$$\rho^2 = \left( \frac{h}{\tan \theta} - L \right)^2 + R^2 + 2R \left( \frac{h}{\tan \theta} - L \right) \cos \alpha. \quad (5)$$

联立式(4)(5)得到地面上反射光环理论轨迹在极坐标系的隐性表达式:

$$\rho^2 = \left( \frac{h}{\tan \theta} - L \right)^2 + R^2 + \frac{2R \left( \frac{h}{\tan \theta} - L \right)}{\sqrt{1 + \frac{\rho^2 \sin^2 \varphi}{\rho \left[ \rho \cos \varphi + \left( \frac{h}{\tan \theta} - L \right) \right]}}}. \quad (6)$$

由于本文实验选取的细铜丝半径  $R$  始终保持在 0.05~1.5 mm 内, 而  $h, L$  始终保持在 10 cm 以上,  $\theta$  不超过  $45^\circ$ , 可估算得式(5)等式右边第二项  $R^2$  比  $\left( \frac{h}{\tan \theta} - L \right)^2$  至少小 3 个数量级; 由于  $\cos \alpha$  取值范围为  $[-1, 1]$ ,

可得等式右边第三项比  $\left( \frac{h}{\tan \theta} - L \right)^2$  小 2 个数量级。因此, 当细丝半径远小于仪器间距离, 即  $R \ll h, R \ll l$ ,

且  $R \ll \frac{h}{\tan \theta} - L$  时, 式(5)等式右边第二、三项可以省略, 反射光环的表达式近似为圆形, 即

$$\rho = \frac{h}{\tan \theta} - L. \quad (7)$$

由图 2(a)可知, 式(7)描述的光环半径即为点  $P_M, P_N$  与原点的距离, 激光反射后形成以  $Q$  点为顶点,  $2\theta$  为顶角的圆锥状光场, 而光环为此光锥的一个正截面。

## 2.2. 衍射光场

通过矢量图解法容易证明, 激光掠射细丝发生衍射后形成的空间光场分布与反射光场相似, 同为以衍射点  $Q$  为顶点,  $2\theta$  为顶角, 地面半径为  $\frac{h}{\tan \theta} - L$  的圆锥[1], 衍射条纹的间距可以通过等效模型计算。

基于巴比涅原理, 两个互补的衍射屏在与点光源共轭的平面上, 除了点光源的几何像点外, 两者有

着相同的夫琅禾费衍射图样[12], 本文研究系统中细丝的互补屏为单缝, 因此激光斜入射细铜丝发生的衍射现象与大角度入射的夫琅禾费单缝衍射现象一致, 故可以运用单缝衍射理论进行计算。

将坐标系  $O-xyz$  坐标系沿  $x$  轴平移  $h-L\tan\theta$ , 得到衍射屏坐标系  $Q-xy_Qz_Q$ ; 将坐标系  $Q-xy_Qz_Q$  沿  $z_Q$  轴平移  $z_0$  得到接收屏坐标系  $O'-x'y'_Qz_Q$ , 如图 3 所示。  $S$  为细铜丝的等效衍射屏,  $S'$  为接收屏, 两屏相互平行, 距离为  $z_0$ ;  $Q'$  为衍射不存在时激光的直射点。

当两屏间距离  $z_0$  远大于单缝缝宽  $a=2R$  时, 衍射屏  $S'$  上任意观察点  $P_D$  的光强为[13]:

$$I_{P_D}(x', y'_Q) = \left( \frac{1+\cos\theta'}{2r'} \lambda \right)^2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a y'_Q}{\lambda r'}\right)}{\left(\frac{\pi a y'_Q}{\lambda r'}\right)^2} * \delta\left[\frac{1}{\lambda r'}(x' - r' \sin\theta)\right], \quad (8)$$

式中,  $\frac{1+\cos\theta'}{2}$  为倾角因子,  $\theta'$  为矢量  $\overline{QP_D}$  与  $z_Q$  轴的夹角;  $r'$  为  $P_D$  与  $Q$  的距离;  $\lambda$  为激光波长;  $*$  为卷积符号。不妨以暗条纹为研究对象, 则衍射屏  $S'$  上各级暗条纹中心的  $y'_Q$  方向坐标满足:

$$\frac{\pi a}{\lambda r'} \cdot y'_Q(P_{D-\min}) = k\pi, \quad (9)$$

记  $r_0$  为  $Q, Q'$  的距离, 将  $r' = \sqrt{r_0^2 + (y'_Q)^2}$  代入式(9)可以得到:

$$y'_Q(P_{D-\min}) = k \frac{r_0 \lambda}{\sqrt{a^2 + k^2 \lambda^2}}, \quad (k = \pm 1, \pm 2 \dots), \quad (10)$$

因此, 衍射条纹各级暗纹中心的  $x'$  方向坐标为:

$$x'(P_{D-\min}) = -r' \sin\theta = -r_0 \sin\theta \sqrt{1 + \frac{k^2 \lambda^2}{a^2 + k^2 \lambda^2}}, \quad (k = \pm 1, \pm 2 \dots). \quad (11)$$

亮条纹同理, 故不赘述。值得注意的是, 联立式(10) (11)可得暗条纹中心构成的曲线为:

$$\frac{[x'(P_{D-\min})]^2}{r_0^2 \sin^2\theta} - \frac{[y'_Q(P_{D-\min})]^2}{r_0^2} = 1, \quad (12)$$

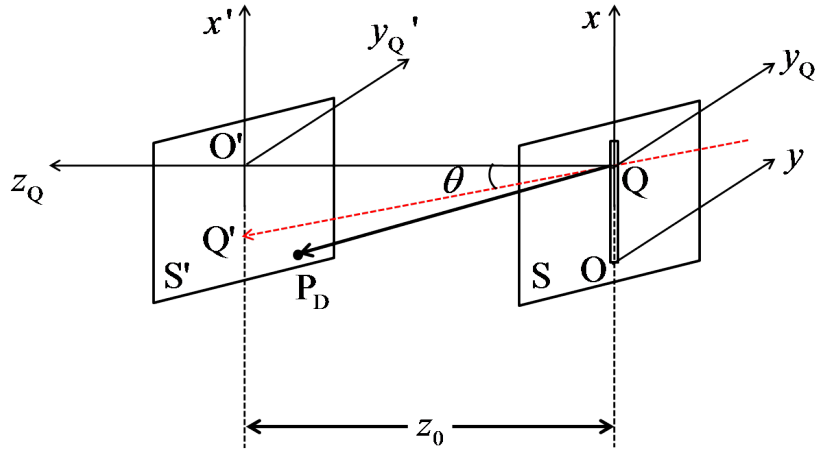
式(12)表示, 衍射屏  $S'$  上的明暗条纹中心分布曲线为双曲线的一支, 即衍射光锥的一个纵截面。在竖直平面  $yOz$  内有  $y'_Q = 0$ , 可以得到对应的衍射条纹中心在  $x'$  方向的坐标为:

$$x' = -r_0 \sin\theta, \quad (13)$$

不难发现双曲线的中心点即为衍射屏不存在时激光在接收屏的直射点  $Q'$ 。将衍射屏移动至激光在地面上的理论直射点  $P_{\max}$ , 即取  $z_0 = \frac{h}{\tan\theta} - L$  时, 衍射屏  $S'$  上双曲线中心  $Q'$  附近曲率基本为零的明暗条纹将落在地面光环的直射点附近。由暗纹表达式(10)可以得到条纹间距为

$$\frac{\Delta y'_Q(P_{D-\min})}{\Delta k} = r_0 \frac{\Delta \sqrt{\frac{k^2 \lambda^2}{a^2 + k^2 \lambda^2}}}{\Delta k} = r_0 \frac{\Delta \left[ \frac{k \lambda}{a} \cdot \left( 1 + \frac{k^2 \lambda^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]}{\Delta k}. \quad (14)$$

由于实验中激光波长  $\lambda$  为 532 nm, 缝宽  $a$  不小于 0.1 mm, 可以估算对于本文选取的实验参数,  $k$  取 0~20 时,  $\frac{k^2 \lambda^2}{a^2}$  始终比 1 小两个数量级。因此对  $\left( 1 + \frac{k^2 \lambda^2}{a^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$  泰勒展开取前两项有:



**Figure 3.** Schematic diagram of large-angle Fraunhofer single slit diffraction  
**图 3.** 大角度夫琅禾费单缝衍射示意图

$$\frac{\Delta y'_Q(P_{D-\min})}{\Delta k} \approx r_0 \frac{\Delta \left[ \frac{k\lambda}{a} \cdot \left( 1 - \frac{k^2 \lambda^2}{2a^2} \right) \right]}{\Delta k} \approx r_0 \frac{\Delta \frac{k\lambda}{a}}{\Delta k} = \frac{z_0}{\cos \theta} \frac{\lambda}{a} \quad (15)$$

当激光水平入射至接收屏，即  $\theta = 0$  时，式(15)可得到衍射条纹角宽度  $\theta \approx \frac{y'_Q(P_{D-\min})}{z_0} = \frac{k\lambda}{a}$ ，与傍轴近似条件下激光水平入射的夫琅禾费单缝衍射结果一致[12]。因此，光环在直射点附近将形成衍射条纹间距为：

$$d \approx \frac{\frac{h}{\tan \theta} - L}{\cos \theta} \frac{\lambda}{a} \quad (16)$$

由于  $\frac{\lambda}{a}$  的数量级为  $10^{-3}$ ，因此  $\frac{\frac{h}{\tan \theta} - L}{\cos \theta}$  需要达到约 1 m 时衍射条纹间距才能达到毫米量级，方能被肉眼所识别。部分研究者实验中激光束半径大于细丝直径，理论上激光应当发生单缝衍射，但由于生成的光环半径太小，衍射条纹过度集中形成亮斑，导致研究者没有发现衍射在该系统中的重要作用。对于不变的细丝与激光器，减小激光出射倾角与增大光环半径皆能更好地观察到衍射光环。

### 3. 实验探究

为了验证激光斜向下照射细丝产生的空间光场确如理论所述的圆锥分布，即地面上的光环半径始终满足式(7)，以下进行光环形状的验证实验；并进一步探究铜丝参数以及其他不同材质丝状物对光环形态的影响。实验装置如图 4 所示，波长为 532 nm、满载功率为 1 mW 的激光笔与直径为 0.209 mm 的细铜丝分别通过 2 个铁架台夹持；实验中在细丝下端连接一个质量为 100 g 的重锤，使细丝尽可能地垂直于地面。

#### 3.1. 对理论模型预测的光环几何形状进行实验验证

采用控制变量法，对式(7)中 3 个自由变量  $h, L, \theta$  分别进行控制变量实验。实验中，方位角每经过  $20^\circ$  记录一个光环落点，由于光环粗细并非绝对均匀，因此测量时选取该方位角上光环环面最亮点作为记录点。结果如图 5~图 7 所示，红色点为实验测量点，蓝色虚线为光环的理论形状。

可以发现，上述 9 组实验的光环测量点基本分布于理论值附近，光场的圆锥结构以及光环半径公式 (7) 得到验证。误差来源主要有以下三点：1) 由于激光束和细铜丝皆具有一定的半径，因此形成的光环也具有一定的宽度(如图 1 所示，在激光直接反射点附近呈月牙形)，记录点可能偏离理论圆环；2) 由于细铜丝表面并非绝对光滑，实验中可以观察到明显的漫反射光斑，对测量精度产生影响；3) 不难发现实验测量点构成的圆环都存在某一方向的微小偏移，这是由于被照射的部分细铜丝没有绝对地垂直于地面，导致水平接收屏在三维光锥中的截面由正圆形偏移为椭圆。

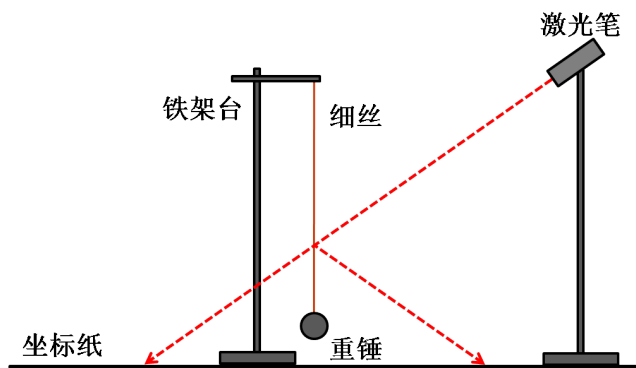


Figure 4. Schematic diagram of the whole experimental installation  
图 4. 实验装置示意图

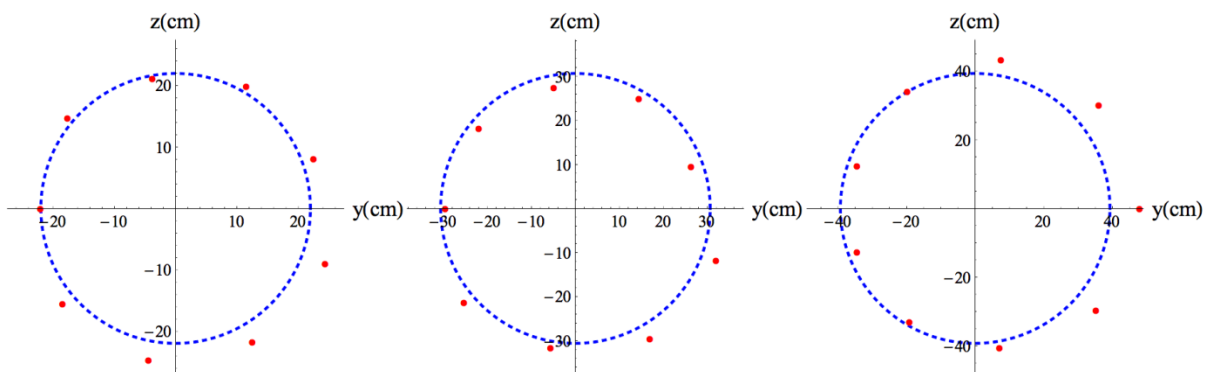


Figure 5.  $\theta = 30^\circ$ ,  $L = 30$  cm. (a)  $h = 30$  cm; (b)  $h = 35$  cm; (c)  $h = 40$  cm

图 5.  $\theta = 30^\circ$ ,  $L = 30$  cm. (a)  $h = 30$  cm; (b)  $h = 35$  cm; (c)  $h = 40$  cm

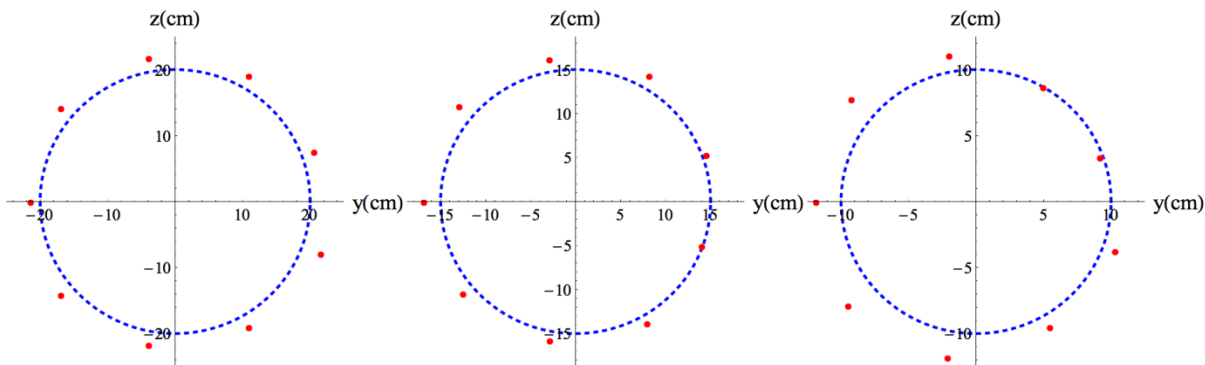


Figure 6.  $\theta = 45^\circ$ ,  $h = 30$  cm. (a)  $L = 10$  cm; (b)  $L = 15$  cm; (c)  $L = 20$  cm

图 6.  $\theta = 45^\circ$ ,  $h = 30$  cm. (a)  $L = 10$  cm; (b)  $L = 15$  cm; (c)  $L = 20$  cm



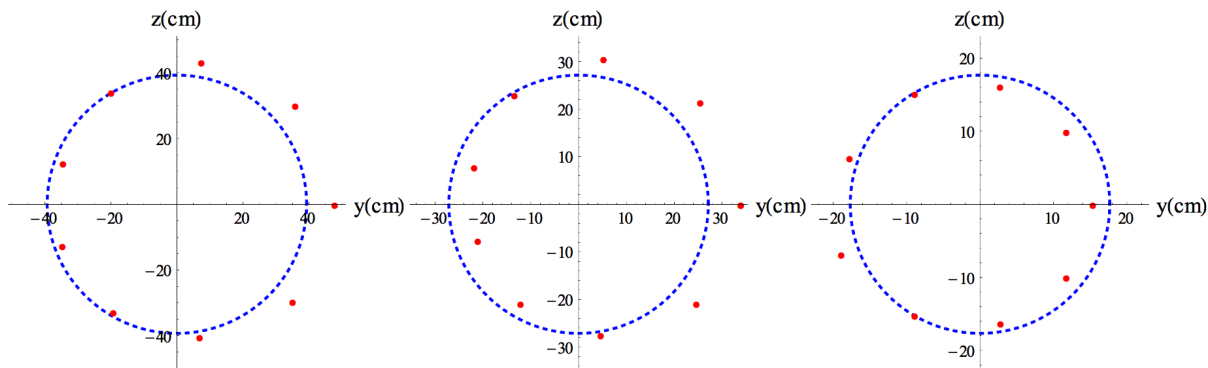


Figure 7.  $h = 40$  cm,  $L = 30$  cm. (a)  $\theta = 30^\circ$ ; (b)  $\theta = 35^\circ$ ; (c)  $\theta = 40^\circ$

图 7.  $h = 40$  cm,  $L = 30$  cm. (a)  $\theta = 30^\circ$ ; (b)  $\theta = 35^\circ$ ; (c)  $\theta = 40^\circ$

值得注意的是，由于激光的准直性、高能性、聚光性，上述 3 点误差来源可以作为判断细丝表面是否均匀、光滑的标准：对于一根粗细均匀、表面光滑的细丝，激光斜向下照射其轴线任意一点后在垂直于该细丝的接收屏上应形成亮度集中、清晰的光环，且光环呈严格的圆形。因此，上述现象在丝状材料的质量检测等方面具有重要的应用价值。

### 3.2. 铜丝直径对光环形态的影响

铜丝直径对光环形态的影响。控制激光源位置与激光发射方向不变，选取 4 种直径不同的细铜丝，对光环形态进行拍摄。实验参数如下： $h = 35$  cm,  $L = 10$  cm,  $\theta = 30^\circ$ 。

如图 8 所示，当细铜丝直径较小时，光环分布均匀，亮度高且集中；随着细铜丝直径增大，对准细丝轴线的激光将主要反射在激光源一侧，光环的亮度与均匀度皆逐渐下降。未被细丝阻挡的部分激光依然形成亮斑，但相比直径较小的细铜丝，此时亮斑变得十分黯淡，由于光线被阻挡而产生缺口。值得注意的是，随着细铜丝直径的增大，衍射条纹间距逐渐减小，最终即使衍射存在，肉眼也无法观察到，如图 9(c)所示。

### 3.3. 铜丝表面粗糙度对光环形态的影响

细铜丝表面粗糙程度对光环形态的影响。对于同一根表面光滑的细铜丝，依次使用粗糙的砂纸对其表面进行打磨，每经过一次打磨立即进行实验拍摄，观察光环形态的改变，每次打磨后细铜丝的粗糙程度的改变可通过显微镜观察，如图 10 所示。实验参数如下： $h = 35$  cm,  $L = 10$  cm,  $\theta = 30^\circ$ 。

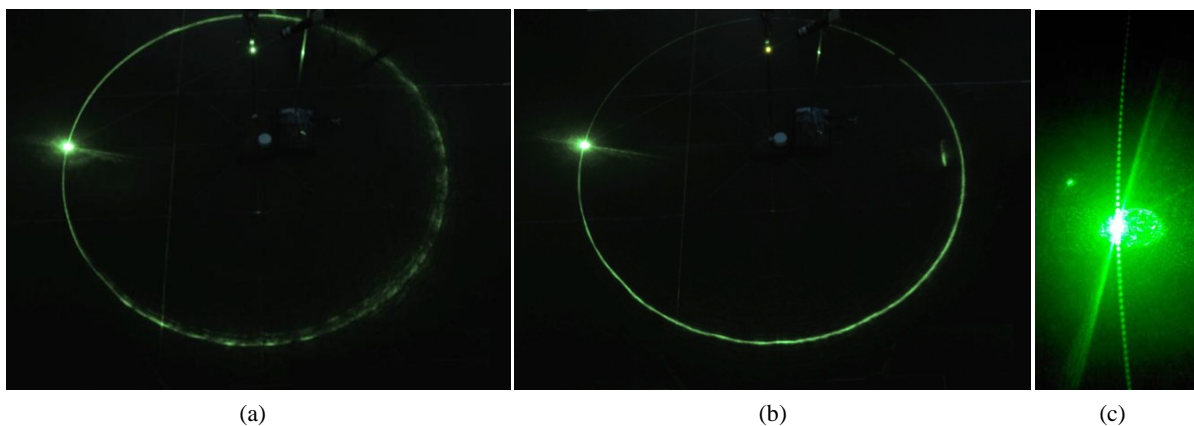
细铜丝表面未经打磨时，激光主要发生镜面反射，因此产生的光环明亮、完整，且基本不存在杂光。随着表面粗糙程度增大，漫反射增强，地面上形成的光环亮度逐渐下降，变得模糊。然而不管细铜丝表面粗糙程度如何，只要细丝直径小于激光束直径，未被阻挡的光线总能在地面直射点形成亮斑，如图 11 所示。

### 3.4. 细丝材质对光环形态的影响

前文从理论与实验两个方面研究了圆柱状不透明光滑细铜丝在激光斜向下照射时产生的光环形态。对于其他类型的细丝，比如透明光滑的玻璃丝、由透明胶层包裹铝丝构成的胶包线、由多根铁丝绕拧而成的螺旋铁丝等，它们生成的光环将存在更多不同的形态。

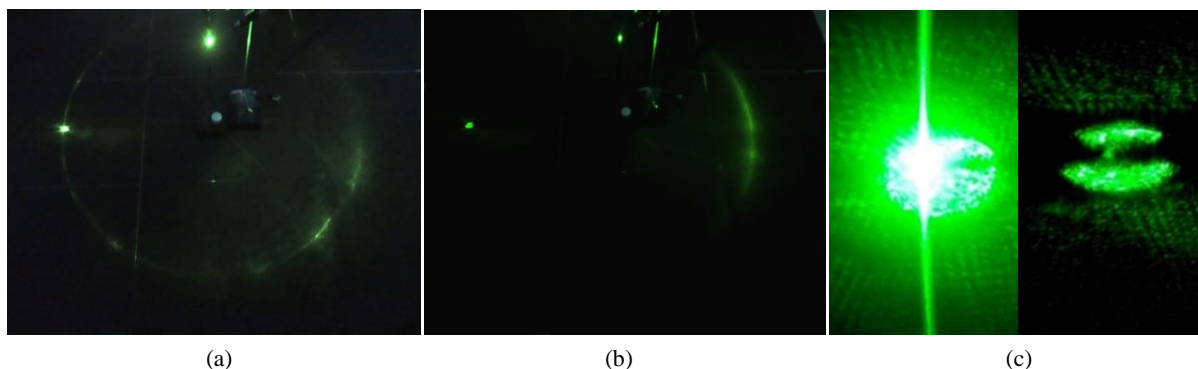
对于胶包线，大部分的光都被透明胶层与内层铝丝反射，光环分布呈月牙状，未被阻挡的光线与部分经胶层折射的光线在直射点处形成较暗的亮斑，如图 12(a)所示；对于透明光滑的玻璃丝，光环清晰，





**Figure 8.** Shape of light circle when the wire diameter was small. (a)  $a = 0.128$  mm; (b)  $a = 0.209$  mm; (c) diffraction stripes near the brightest point ( $a = 0.209$  mm)

**图 8.** 细铜丝直径较小时的光环形态。(a)  $a = 0.128$  mm; (b)  $a = 0.209$  mm; (c) 直径 0.209 mm 的铜丝在直射点附近产生的衍射条纹



**Figure 9.** Shape of light circle when the wire diameter was larger. (a)  $a = 1.009$  mm; (b)  $a = 2.699$  mm; (c) the shape of brightest point, left:  $a = 1.009$  mm; right:  $a = 2.699$  mm

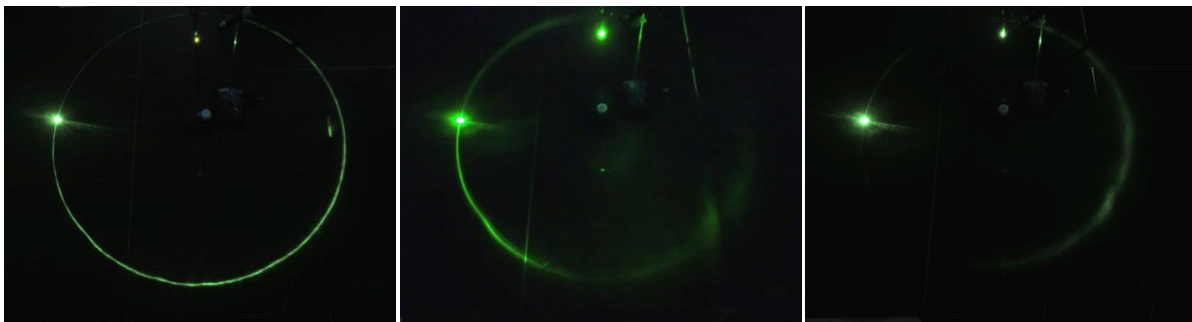
**图 9.** 细铜丝直径较大时的光环形态。(a)  $a = 1.009$  mm; (b)  $a = 2.699$  mm; (c) 直射点形态, 左图直径 1.009 mm, 右图直径 2.699 mm



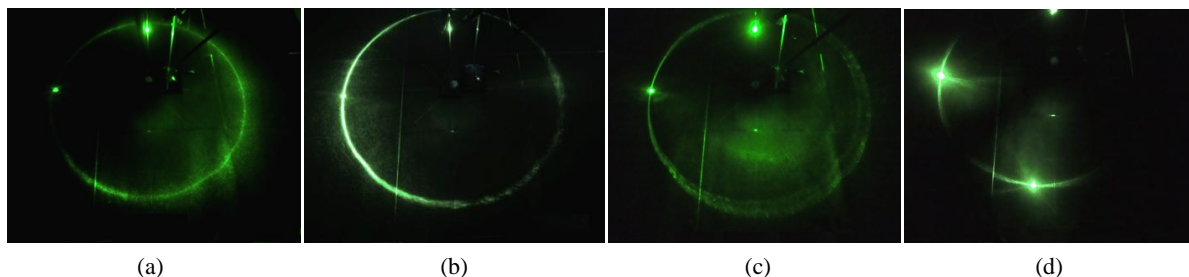
**Figure 10.** The micrographs of copper wire after sanding. From left to right: sanding 0, 1, 2 time (s)

**图 10.** 砂纸打磨后细铜丝的显微照片, 从左至右依次为打磨 0、1、2 次的情形

大部分光通过细丝折射与透射, 少部分发生反射, 因此光环亮度在直射点一侧较高, 另一侧较暗, 如图 12(b)所示; 对于螺旋铁线, 由于表面粗糙不平, 因此形成的光环附近存在因漫反射而产生的大面积光斑, 如图 12(c)所示; 对于透明的塑料薄片, 激光在照射点上将同时发生反射与透射(经折射后出射), 因此地面接收屏上形成两个极亮点, 由于该薄片在激光照射的区域内表面曲率仅有极小幅度的变化, 因此光线



**Figure 11.** Effect of wire surface roughness on the shape of light circle. From left to right: sanding 0, 1, 2 time (s)  
**图 11.** 细铜丝表面粗糙程度对光环形态的影响，从左至右依次为打磨 0、1、2 次的实验照片



**Figure 12.** The morphology of light circles generated by various types of filaments. (a) Covered wire; (b) glass fiber; (c) spiral wire; (d) transparent plastic sheet  
**图 12.** 不同类型细丝对光环形态的影响。(a) 胶包线；(b) 玻璃丝；(c) 螺旋铁线；(d) 透明塑料薄片

无法反射至每一个方位角，完整的光环无法形成，仅在极亮点附近形成部分圆弧状结构，如图 12(d)所示。

值得注意的是，不管选用的细丝是何种类型，光环现象始终存在，这与产生光环的物理成因有关。只要激光照射处存在曲率变化，地面上就有由于光线反射而形成的光弧。随着细丝的透光度、粗糙程度、结构等参数不同，光环也将拥有更丰富的结构。

#### 4. 总结

本文通过理论分析与实验探究，证明了激光斜向下照射细铜丝产生的光环由激光与铜丝表面作用产生的反射光与衍射光共同构成，并得到了光环半径公式(7)和激光直射点附近衍射条纹间距公式(16)。此外，本文通过实验探究了细铜丝直径与表面粗糙程度对光环形态的影响：随着直径的增大，光环的亮度、清晰度与均匀度逐渐下降，直射点附近的亮斑变得暗淡并出现空缺，衍射条纹逐渐消失；随着表面粗糙程度的增大，光环亮度逐渐下降并变得模糊，大面积的漫反射光斑逐渐出现。本文还进一步将实验用细丝更换为具有不同表面性质、透光度以及结构的材料，分析了不同材质的细丝对光环形态的影响。对于不同类型的细丝，光环现象是始终存在的。

激光斜入射细丝产生的光环现象实质为一维激光束经反射与衍射后扩束为空间光锥的结果，地面接收屏上形成的光环为光锥的其中一个截面。由于光环形态对细丝直径、粗糙程度、表面曲率等材料性质都有很高的敏感度，本研究可用于材料性质检测、三维面形探测等工程问题，具有较高的实用价值。

#### 参考文献 (References)

[1] 赵建林, 杨德兴. 圆柱体的空间圆锥光反射, 折射与衍射[J]. 物理学报, 2002, 51(9): 1972-1977.  
 [2] 朱俊伊, 朱亚彬. 环形光的形成与参量的依赖关系[J]. 物理实验, 2015, 35(9): 37-41.  
 [3] 陈晨. 三维空间中光反射的趣味实验探究[J]. 物理教师, 2015, 36(8): 45-47.

- [4] Problems of IYPT. <http://archive.iypt.org/problems/>
- [5] Keller, J.B. (1962) Geometrical Theory of Diffraction. *Journal of the Optical Society of America*, **52**, 116-130. <https://doi.org/10.1364/JOSA.52.000116>
- [6] Keller, J.B. and Ahluwalia, D.S. (1971) Diffraction by a Curved Wire. *Siam Journal on Applied Mathematics*, **20**, 390-405. <https://doi.org/10.1137/0120043>
- [7] Gilliar, W., Bickel, W.S., Videen, G. and Hoar, D. (1987) Light Scattering from Fibers: An Extension of a Single-Slit Diffraction Experiment. *American Journal of Physics*, **55**, 555-559. <https://doi.org/10.1119/1.15115>
- [8] Greenler, R.G., Hable, J.W. and Slane, P.O. (1990) Diffraction around a Fine Wire: How Good Is the Single-Slit Approximation? *American Journal of Physics*, **58**, 330-331. <https://doi.org/10.1119/1.16164>
- [9] Tang, W., Zhou, Y. and Zhang, J. (1999) Improvement on Theoretical Model for Thin-Wire and Slot Measurement by Optical Diffraction. *Measurement Science & Technology*, **10**, N119-N123. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/11/401>
- [10] Curry, S.M. and Schawlow, A.L. (1974) Measuring the Diameter of a Hair by Diffraction. *American Journal of Physics*, **42**, 412-413. <https://doi.org/10.1119/1.1987713>
- [11] Marschner, S.R., Jensen, H.W., Cammarano, M., Worley, S. and Hanrahan, P. (2003) Light Scattering from Human Hair Fibers. *ACM Transactions on Graphics*, **22**, 780-791. <https://doi.org/10.1145/882262.882345>
- [12] 郭永康. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [13] 庄梅英, 徐哲惠. 对夫琅禾费衍射的再认识[J]. 大学物理, 1994, 13(7): 24-27.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)