

多重彩虹演示实验

王思慧¹, 王宁悦², 周惠君¹

(1. 南京大学 物理学院, 江苏 南京 210093; 2. 艾姆赫斯特学院, 美国 麻省 01002-5000)

摘要:这是为大一新生设计的研究性实验. 本文搭建了简单的实验光路, 利用 He-Ne(632.8 nm) 激光观察到了 9 级虹, 以及霓、虹之间的亚历山大带, 清晰地演示了多重彩虹形成的原理. 实验测量的彩虹位置与理论计算一致.

关键词:多重彩虹; 亚历山大带; 最小偏向角

中图分类号: O 43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0712(2012)10-0022-03

彩虹是大自然中经常观察到的景象. 教科书对于彩虹的原理少有提及, 通常见到的解释仅限于科普层面, 即阳光射到空中圆形水珠上, 经过折射以及水珠内的一次反射形成彩虹, 彩色的形成原因是阳光的色散, 虹(主虹)出现在 $40^\circ \sim 42^\circ$. 如果光线在水珠内反射两次, 便形成霓(副虹), 出现在 $50^\circ \sim 53^\circ$, 所以副虹位置在主虹之外^[1]. 然而, 这样的解释是不能令人满意的. 比如说, 为什么阳光通过三菱镜只需要两次折射就可以形成彩色光谱, 而彩虹一定要在水珠里反射一次或多次? 自然界里很少观察到三级以上的彩虹, 为了使得多次反射以后依然有足够的光强, 经常用激光产生多重彩虹(多次反射的彩虹), 例如文献[2]用激光实现了多达 200 多重彩虹. 那么, 既然激光是单色光, 怎么会有彩虹呢? 本文通过简单的演示实验可以较直观地理解彩虹形成的物理原理.

1 彩虹的理论公式

假设水珠呈球形, 照射到水珠上的光线可以直接经外表面反射而形成光点, 这个光点没有色散, 也很容易识别, 以下不予考虑. 但是在实验中应该遮挡, 以免干扰对彩虹的观察. 进入水珠的一部分光线直接经过折射而从水珠出射, 我们称之为 0 级光; 此外还有经过 1 次反射的出射光, 同理, 还有 2 次以及更多次反射的出射光. 图 1 画出了 0 级和 1 级出射光. 设光线在水珠外表面的入射角为 i , 折射角为 r , 出射光与入射光方向之间的夹角为偏向角, 则 0 级

光的偏向角为 $2(i-r)$, 每经过 1 次反射, 光线偏折的角度为 $\pi-2r$, 所以 1 级出射光的偏向角为

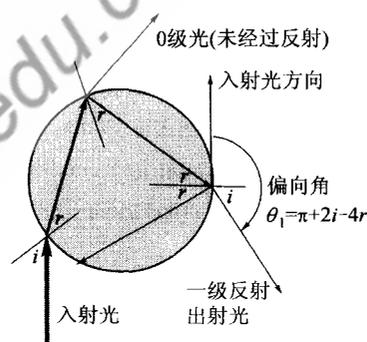


图 1

$$\theta_1 = \pi + 2i - 4r \quad (1)$$

经过 k 次反射的偏折角度为 $k(\pi-2r)$, 所以 k 级出射光的偏向角为

$$\theta_k = 2(i-r) + k(\pi-2r) = k\pi + 2i - 2(k+1)r, \quad k=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

取空气的折射率为 1, 水的折射率为 n , 根据折射定律; $\sin i = n \sin r$, 式(2)可改写为

$$\theta_k = k\pi + 2i - 2(k+1) \arcsin\left(\frac{1}{n} \sin i\right) \quad (3)$$

如果水珠足够大或者光束非常细, 可以视为一根光线, 则式(3)给出了所有出射光的角位置, 它由入射角和水的折射率决定. 但是实际情况是, 任何光束都有一定宽度, 相对于水珠来说, 它照射到一个区域而不是一个几何点, 所以入射角 i 有一个变化范围, 每

收稿日期: 2012-03-26; 修回日期: 2012-05-22

基金项目: 南京大学 985 三期“新生研究性物理实验”项目资助

作者简介: 王思慧(1964—), 女, 江苏南京人, 南京大学物理学院教授, 博士, 主要从事物理实验及理论教学.

一出射光也不是光点,而是发散成一个光斑或者光带,光斑(光带)的位置依然由式(3)给出.显然,反射次数越高,光斑(光带)范围应该更宽,亮度也更弱.

考虑一个情况,即水珠较小或者光束较宽,整个水珠都被照亮的情形.入射角可以是 $0 \sim 90^\circ$ 之间的任何角度,那么出射光分布范围是怎样的呢?可以证明, $k=1$ 以上的各级出射光都存在最小偏向角,而0级则不存在极值.证明如下:存在极值的条件是 $d\theta/di=0$,即

$$d\theta/di=2-2(k+1)dr/di=0 \quad (4)$$

根据折射定律和式(4)可得

$$\cos i = \sqrt{\frac{n^2-1}{k(k+2)}} \quad (5)$$

当 $k=1,2,3,\dots$ 时,式(5)中入射角 i 有解,它对应于出射光 θ_k 的极小值.所以,经过1次或多次反射的出射光形成光带,并且对于单色光,光带有一个清晰的明暗分界线;对于白光,由于色散的原因,蓝光的折射率大于红光,偏向角更大,不同波长的光带明暗分界线稍许错开,就形成了彩虹.单色光的明暗分界线也称作虹,它刚好对应于该级次反射光强的极大值处^[3].而对于0级出射光,式(5)无解,不存在极小值.事实上,0级光的偏向角的最小值为 0 ,对应于 0° 入射角(穿过直径出射的光线),这个角度恰恰是光强最亮的位置,并且没有色散,因此不存在0级彩虹,只是一个明亮的光斑.

式(5)与式(3)给出了各级彩虹出现的位置,理想的彩虹应该是圆环状的.彩虹是否完整还取决于水珠有多大面积被照亮.例如水珠的左半边被照亮,则会产生一套顺时针的彩虹,如图2所示.每一级只是圆弧状,不是一个完整的圆环.并且1级虹(虹)和2级虹(霓)处于入射光的左右两侧.只有当整个水珠被照亮时,才会产生顺时针和逆时针两套彩虹,图3中带撇的一套是右边入射光产生的

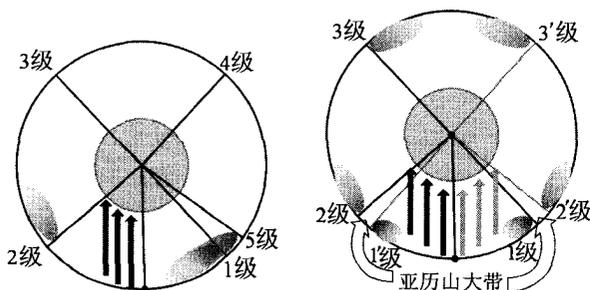


图 2

图 3

虹(逆时针),不带撇的是左边入射光产生的虹(顺时针),由于两者是反向的,所以霓、虹之间形成黑暗的亚历山大带.

2 实验现象

实验装置如图4所示.器材:He-Ne(632.8 nm, 5 mW)激光器(可以用激光笔取代),带有开孔的环形光屏(圆形蛋糕盒子亦可)、注射器、净水、支架、刻度纸.



图 4

注射器吸入少量净水固定在支架上,用注射器轻轻推出一个接近于球形的水珠,使之处于环形光屏底座中心的正上方.打开激光器,使入射光经过光屏的开孔水平入射到水珠上.光屏内衬有一圈刻度纸用于测量角度.

如果入射光正对水珠的球心,这时的光线以透射为主,偏向角也很小,水珠的正前方形成一个亮斑,为0级光,它与彩虹无关.稍许调节水珠的水平位置,使得入射光照在水珠略偏一些的位置上,这时可以发现0级光向另一侧移动,直到入射光照到某个位置会发现水珠的后方出现一个明亮的光带,它一端是渐暗的,另一端光强渐增直到一个圆弧状明暗边界,这就是最小偏向角,即彩虹出现的位置,如图5所示.使用适当的注射器针头并调节水珠大小,同时轻微调节水珠的受光位置,可以同时看到多重彩虹,见图5、图6.取水的折射率为1.331,利用式(5)和式(3)容易求出各级彩虹的角位置,笔者在实验中测量了前9级彩虹的角度,两者符合很好,见图7.我们将图4光路的激光器与小孔之间增加扩束透镜,使得入射光照到整个水珠上,这时出现了完整的亚历山大带,见图8.

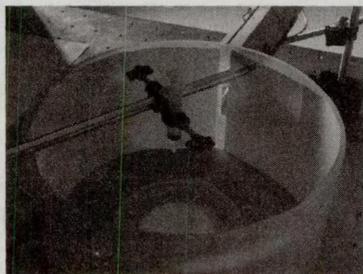


图 5

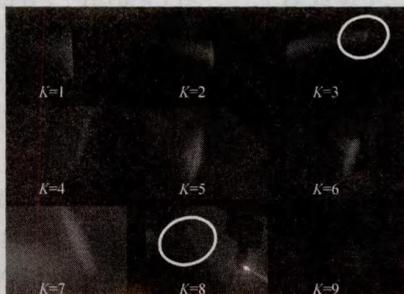


图 6

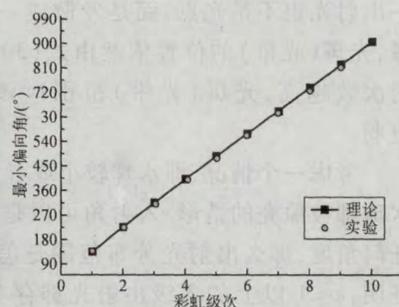


图 7



图 8

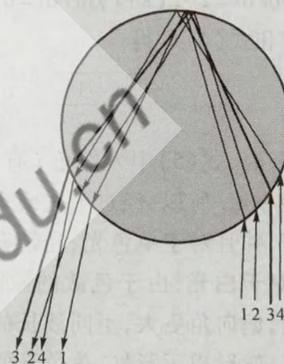


图 9

由图 6 还可以发现,每一级虹内部都有明暗相间的条纹结构,这是由于最小偏向角附近的光路的交叠干涉造成的,其示意图见图 9. 文献表明^[3],水珠越大、级次越低,条纹越密,这与我们观察到的现象一致.

本实验是为大学一年级开设的新生研究性物理实验课程设计的,文理科学学生都可以适用,目的是以简单的装置、直观的现象、丰富的实验内容激发学生对物理和实验科目的兴趣.

参考文献:

- [1] baike. baidu. com/view/10270. htm
- [2] Ng P. H., M. Y. Tse, W. K. Lee. Observation of high-order rainbows formed by apendant drop [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1998, 15(11): 2782-2787.
- [3] Walker D. Multiple rainbows from single drops of water and other liquids [J]. Am J Phys, 1976, 44(5): 421-433.

Demonstration experiment of multiple rainbows

WANG Si-hui¹, WANG Ning-yue², ZHOU Hui-jun¹

(1. School of Physics, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China;

2. Amherst College, MA 01002-5000, USA)

Abstract: An experiment is designed for freshmen physics laboratory course. Using a student He-Ne (632.8 nm) laser and simple experimental setup, we observe up to 9th order rainbows and the Alexander's dark band between the primary and secondary rainbows. The formation of multiple rainbows is demonstrated vividly. The position of higher-order rainbows is in good agreement with the theory.

Key words: multiple rainbows; Alexander's dark band; minimum deviation angle