

文章编号:1005-4642(2023)06-0036-05

学
生
园
地



再现虹与霓的实验设计

王远鹏,张保花,郭福强

(昌吉学院 物理与材料科学学院,新疆 昌吉 831100)

摘 要:采用玻璃球模拟水滴,并且设计光源角度读取器,在暗箱内演示了白光照射玻璃球后的虹与霓现象. 通过测量入射角和折射角,得到观测虹与霓现象的角度范围,同时观察了玻璃球心与光源等高和非等高情况下的虹与霓现象.

关键词:虹;霓;偏向角

中图分类号:O436.3

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.06.005

彩虹现象常被用来说明光的色散现象^[1-2]. 彩虹的圆弧常出现 2 种情况:红色在外、紫色在内且颜色鲜艳的为虹,虹可以直接被观测;紫色在外、红色在内且颜色较淡的为霓^[3-4],由于环境条件的影响霓难以被观测. 对虹与霓现象的研究^[5],多限于光学原理及偏振度等理论推导^[6-9]. 由于虹与霓现象发生时最小偏向角难以测量,所以本文设计在暗箱内用光照射玻璃球模拟虹与霓现象,通过测量入射角和折射角,推导出观测虹和霓现象的角度范围.

1 虹与霓产生的原理

通过对虹与霓现象的理论分析得知,下雨时看到的彩虹是太阳光经折射进入雨滴,在雨滴内反射后再折射出雨滴,每种波长的光都集中在各自的最小偏向角方向上;由于雨滴对不同波长光的折射率不同,使得不同波长光的最小偏向角不同,从而产生色散,出现彩色的虹与霓.

1.1 虹

由于太阳光为复色光,水对红光的折射率最小,对紫光的折射率最大. 当太阳光射入空气中的雨滴时,光线经过折射—反射—折射后的行进方向不同,色彩排列为内紫外红. 虹现象的原理

图如图 1 所示.

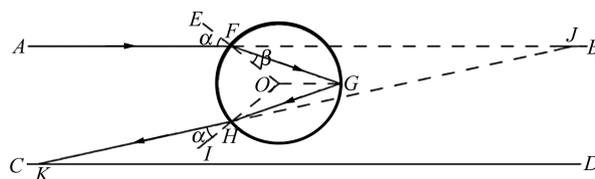


图 1 虹现象的原理图

入射光线 AB 对雨滴的入射点为 F,入射角 $\angle AFE$ 设为 α ,折射角 $\angle OFG$ 为 β ,由几何关系得出 $\angle KHI = \angle AFE = \alpha$, $\angle OFG = \angle OGF = \angle OGH = \angle OHG = \beta$.

以红光为例:由 $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ 可以得到 $\beta = \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right)$,令偏向角 $\angle BJK = t$,则

$$t = \pi - \angle FJH = \pi + 2\alpha - 4\beta =$$

$$\pi + 2\alpha - 4\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right),$$

$$\frac{dt}{d\alpha} = 2 - \frac{4\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}},$$

令 $\frac{dt}{d\alpha} = 0$,则

$$\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 2\cos \alpha,$$

收稿日期:2022-06-18;修改日期:2022-10-14

基金项目:昌吉学院校级一流课程项目

作者简介:王远鹏(1997—),男,江苏徐州人,昌吉学院物理与材料科学学院物理学专业 2019 级本科生. E-mail:wyp_0908@163.com

通信作者:张保花(1981—),女,河南南阳人,昌吉学院物理与材料科学学院教授,博士,主要从事物理实验教学. E-mail:zbhcxjy@163.com

解得

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}$$

当 $n=1.331$ 时, $\cos \alpha \approx 0.5071, \alpha \approx 59.5292^\circ$,

代入 $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$, 得 $\beta \approx 40.3539^\circ, \angle HKD = \angle FJH = 4\beta - 2\alpha = \delta_{\text{虹红}} \approx 42.36^\circ$. 同理, 紫光对水滴的折射率 $n=1.344$, 则 $4\beta - 2\alpha = \delta_{\text{虹紫}} = 40.50^\circ$.

通过以上分析可得: 观察虹现象时, 视线与太阳入射光线的夹角为 $40.50^\circ \sim 42.36^\circ$, 且红光在外紫光在内.

1.2 霓

由于太阳光射入空气中的水滴后, 光线经过折射—反射—反射—折射后的行进方向不同, 色彩排列顺序为内红外紫. 霓现象的原理图如图 2 所示.

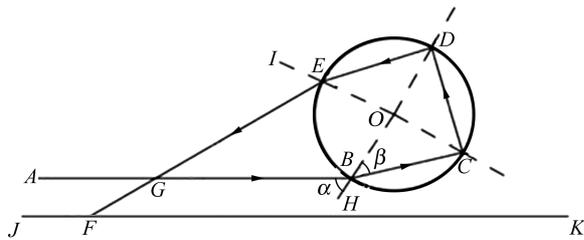


图 2 霓现象的原理图

入射光线 AB 对水滴的射入点为 B , 入射角 $\angle ABH$ 设为 α , 折射角 $\angle OBC$ 为 β , 由几何关系得出 $\angle FEI = \angle ABH = \alpha, \angle OBC = \angle OCB = \angle OCD = \angle ODC = \angle ODE = \angle OED = \beta$.

以红光为例: 由 $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ 可以得到 $\beta = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right)$, 令偏向角 $\angle EGB = t$, 则

$$t = 3\pi - [2(\pi - \alpha + \beta) + 4\beta] = \pi + 2\alpha - 6\beta =$$

$$\pi + 2\alpha - 6\arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right),$$

$$\frac{dt}{d\alpha} = 2 - \frac{6\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}},$$

令 $\frac{dt}{d\alpha} = 0$, 则

$$\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 3\cos \alpha,$$

解得

$$\cos \alpha = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{8}}$$

当 $n=1.331$ 时, $\cos \alpha \approx 0.334, \alpha \approx 70.4883^\circ$,

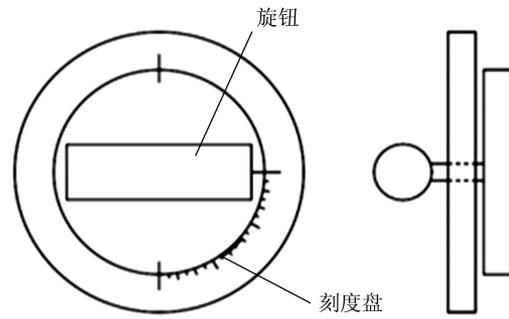
代入 $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \beta \approx 45.0887^\circ, \angle EFK = \angle EGB = \pi + 2\alpha - 6\beta = \delta_{\text{霓红}} \approx 50.44^\circ$. 同理, 紫光对水滴的折射率 $n=1.344$, 则 $\pi + 2\alpha - 6\beta = \delta_{\text{霓紫}} = 54.04^\circ$.

通过以上分析可得: 观察霓现象时, 视线与太阳入射光线的夹角为 $50.44^\circ \sim 54.04^\circ$, 且紫光在外红光在内.

2 实验装置

由于虹与霓现象发生时最小偏向角难以测量, 本实验转变为测量入射角和折射角, 在暗箱内光照射玻璃球发生虹与霓现象, 因此光入射角的变化及测量尤为重要.

结合以上理论分析, 设计测量光线入射角的转轴光源仪器——光源角度读取器, 如图 3 所示. 通过转动光源改变光线射入玻璃球的角度, 在标有刻度的转轴上读出光线的偏转角、入射角和折射角, 从而克服了最小偏向角测量的困难.



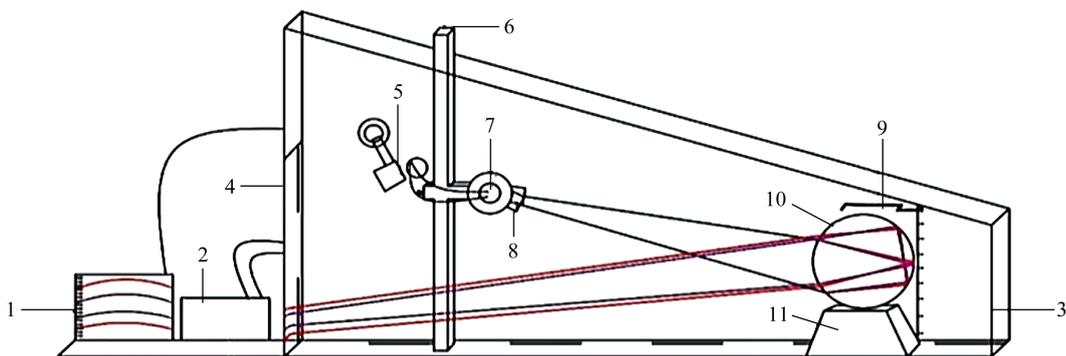
(a) 主视图

(b) 侧视图

图 3 光源角度读取器

实验装置如图 4 所示. 显示器与电源通过导线连接光感传感器, 实验装置在暗箱内, 光感传感器拍摄暗箱后盖底侧接收屏上的实验现象, 并在显示器上显示. 转轴固定在伸缩支架上, 其前端中心点与光源相连, 后端与伸缩支架相连, 转轴可带动光源自由偏转, 伸缩高度. 光源后端通过导线连接电源, 可调节光源的高度. 半径为 R 的透明玻璃球放在托架上, 通过转动光源入射的角度来调节光线进入玻璃球的入射角.

在暗箱内, 光源照射不同半径的玻璃球, 通过调节入射角, 达到最小偏向角, 这时虹与霓实验现象最明显. 因此, 在其他条件不变的条件下, 通过测量入射角和玻璃球球心与光源的距离来确定虹



1. 显示器 2. 电源 3. 暗箱 4. 接收屏 5. 光感传感器 6. 伸缩支架 7. 转轴
8. 平行光源 9. 曲度尺 10. 玻璃球 11. 托架

图4 实验装置示意图

与霓的观测角度,该实验装置能够满足观测虹与霓现象的条件.为使理论分析简单化,采用了假设和近似模型.当调节光源的高度时,会出现2种情况:

1) 等高情况

光源与玻璃球球心在同一高度,通过转动光源入射的角度来调节入射光线进入玻璃球的入射角.如图5(a)所示,玻璃球的半径为 R ,玻璃球的球心与光源的距离为 L ,入射光线与球心和光源组成平面的夹角为 θ ,光线进入玻璃球的入射角为 α ,折射角为 β ,则

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{L}{R}\sin\theta\right), \quad \beta = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right),$$

且 $\theta \in \left[0, \arcsin\left(\frac{R}{L}\right)\right]$,可通过改变入射角来观测虹与霓的实验现象.

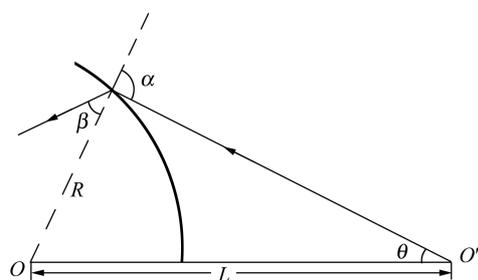
2) 非等高情况

光源与玻璃球的球心不在同一高度,通过转动光源入射的角度来调节光线进入玻璃球的入射角.如图5(b)所示,玻璃球的半径为 R ,玻璃球下顶点与光源的距离为 L ,入射光线与玻璃球下顶点和光源组成平面的夹角为 θ ,光线进入玻璃球的入射角为 α ,折射角为 β ,则

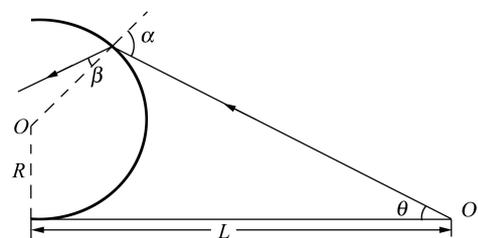
$$\alpha = \arcsin\left[\frac{1}{R}(L\sin\theta - R\cos\theta)\right],$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{\sin\alpha}{n}\right),$$

且 $\theta \in \left[0, 2\arctan\left(\frac{R}{L}\right)\right]$,可通过改变入射角来观测虹与霓的实验现象.



(a) 等高



(b) 非等高

图5 光源与玻璃球球心等高与非等高的原理图

3 实验内容

实验装置如图6所示.透明玻璃球放在托架上,光感传感器后端通过导线连接电源与显示屏.整套实验装置置于暗箱内,通过光感传感器拍摄暗箱后盖底侧接收屏上的现象.

3.1 玻璃球的半径对虹与霓现象的影响

选取半径分别为3.000,5.000,10.000 cm的玻璃球.通过调节 α 和 β ,保证在入射光线与球面夹角 θ 相同,达到最小偏向角,可观测到明显的虹与霓现象,如图7所示.可见同一光源下,半径大的玻璃球,虹与霓现象更加明显.



(a)主视图 (b)侧视图 (c)俯视图

图 6 实验装置实物图



(a)3.000 cm (b)5.000 cm (c)10.000 cm

图 7 用不同半径的玻璃球观测的虹与霓

3.2 入射角对虹与霓现象的影响

当选取半径为 10.000 cm 的玻璃球进行入射角的改变对虹与霓现象的影响实验,玻璃球球心到光心高度差值 H 较大,很难与玻璃球球心到光心距离差值数据契合,表现为较难观察霓现象.选取半径为 5.000 cm 的玻璃球进行后期实验.

等高状态:实验数据如表 1 所示,现象如图 8 所示, $\delta_{\text{虹}} \in [39.72^\circ, 40.36^\circ]$, $\delta_{\text{霓}} \in [50.54^\circ, 50.90^\circ]$,可观察到明显的虹与霓现象. 非等高状态: $L=5.760$ cm,实验数据如表 2 所示,实验现象如图 9 所示, $\delta_{\text{虹}} \in [40.10^\circ, 40.26^\circ]$, $\delta_{\text{霓}} \in [50.44^\circ, 50.56^\circ]$,可观察到明显的虹与霓现象.

表 1 等高状态下观察虹与霓的实验数据

$\theta/(\circ)$	L/cm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\delta_{\text{虹}}/(\circ)$	$\delta_{\text{霓}}/(\circ)$	现象图
28.00	10.000	69.88	44.87	39.72	50.54	图 8(a)
27.90	10.030	69.82	44.84	39.72	50.60	图 8(b)
27.80	10.020	69.17	44.61	40.10	50.68	图 8(c)
27.70	10.040	68.96	44.52	40.16	50.80	图 8(d)
27.60	10.070	68.92	44.51	40.16	50.82	图 8(e)
27.50	10.080	68.56	44.37	40.36	50.90	图 8(f)

表 2 非等高状态下观察虹与霓的实验数据

$\theta/(\circ)$	H/cm	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$\delta_{\text{虹}}/(\circ)$	$\delta_{\text{霓}}/(\circ)$	现象图
78.74	12.504	69.16	44.64	40.24	50.48	图 9(a)
78.75	12.507	69.17	44.65	40.26	50.44	图 9(b)
78.76	12.509	69.22	44.66	40.20	50.48	图 9(c)
78.78	12.512	69.29	44.67	40.10	50.56	图 9(d)
78.79	12.514	69.32	44.70	40.16	50.44	图 9(e)
78.81	12.517	69.39	44.72	40.10	50.46	图 9(f)

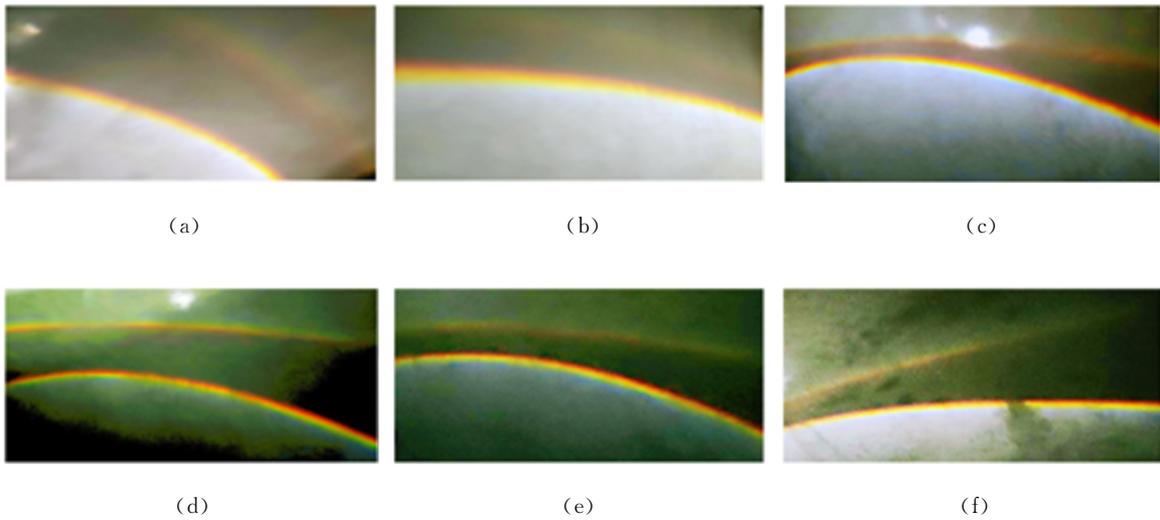


图 8 等高状态下观察虹与霓的实验现象

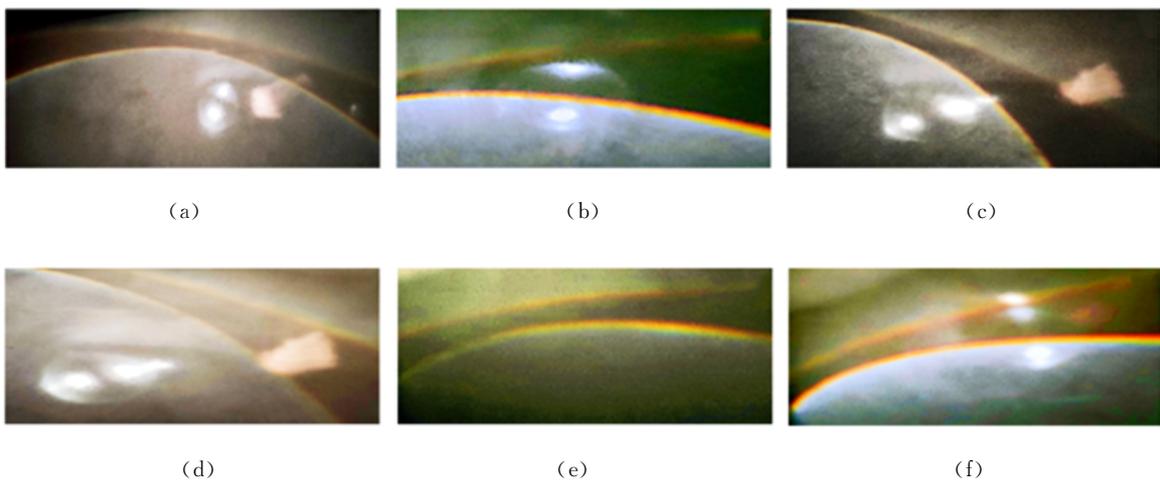


图 9 非等高状态下观察虹与霓的实验现象

4 结束语

演示了白光照射玻璃球后的虹与霓现象,发现半径大的玻璃球呈现虹与霓现象较为明显. 选取半径为 5.000 cm 的玻璃球测量光源等高和非等高情况下光线入射角和偏向角. 利用暗箱减少了光波损失及外界光波的干扰,曲度尺的使用使角度具有可调性. 实验装置中仍存在微弱的光波损失及外界光波的干扰,光源射入角度存在测量误差,光源入射点位置的不确定性等,需要改进.

参考文献:

[1] 顾建元. 人类对虹霓现象认识的探究[J]. 物理教

师,2021,42(7):71-73.

- [2] 金蓉. 虹和霓的角色散[J]. 安庆师范学院学报(自然科学版),2008,14(1):88-90.
- [3] 谭少轩. 虹霓现象的物理本质研究[J]. 西安文理学院学报(自然科学版),2011,14(4):50-54.
- [4] 潘晓明,蓝海江. 虹、霓光的偏振状态和偏振度[J]. 柳州师专学报,2003,18(2):96-99.
- [5] 李志有,孙敬妹,梁浩,等. 彩虹现象的演示[J]. 物理实验,2008,28(3):38-40.
- [6] 谢双运,田彩锁. 关于虹霓的偏振度分析[J]. 物理通报,1994(2):20-21.
- [7] 张之翔. 虹霓的光线在雨点内的反射不是全反射[J]. 物理教师,2005,26(9):45-46.

(下转 47 页)

Measuring thermal conductivity of ice based on steady-state method

Erkhee^a, LIU Qi^b, ZHOU Mengying^c, PENG Wei^d, YUAN Yang^e,
RAN Yujing^f, CHEN Sen^f, PEI Yili^f, WU Ping^a

(a. School of Mathematics and Physics; b. School of Mechanical Engineering;
c. School of Civil and Resource Engineering; d. School of Computer and Communication Engineering;
e. School of Metallurgical and Ecological Engineering; f. Basic Experimental Center of Natural Science,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the prototype of guarded hot plate method, an apparatus for measuring thermal conductivity of ice was designed and constructed by using dry-ice bath based on ethylene glycol mixtures to produce heat transfer between stable low-temperature environments at different temperatures, instead of the traditional heating heat transfer. The thermal conductivity of ice was reliably measured over a wide range of temperatures ($-70 \sim -30$ °C). The data were measured efficiently with the help of the electronic thermometer. The thermal conductivity of the ice at different temperatures and in the cases of containing different impurities was measured. The experimental results were in good agreement with the reference values. The different effects of impurities on the thermal conductivity of ice could be used to adjust the performance of ice.

Key words: thermal conductivity; steady-state method; ice; guarded hot plate method

[责任编辑:任德香]

(上接 40 页)

[8] 刘燕鸣. 虹与霓产生的原理分析[J]. 物理教学探讨, 2008, 26(7): 57-58.

[9] 张文慧, 张协成. 虹的几何光学原理[J]. 物理通报, 2008(8): 5-8.

Experimental study on rainbow and neon

WANG Yuanpeng, ZHANG Baohua, GUO Fuqiang

(School of Physics and Materials Science, Changji College, Changji 831100, China)

Abstract: A glass ball was used to simulate water droplet, and a light source angle reader was designed, then the phenomenons of rainbow and neon were demonstrated when white light irradiated the glass ball in a dark box. By measuring the incidence angle and refraction angle, the angle range of observing rainbow and neon was obtained, and the phenomenons of rainbow and neon were observed in the cases of equal and non-equal heights between the glass ball center and the light source.

Key words: rainbow; neon; deflection angle

[责任编辑:任德香]