

# 彩虹为什么是弧形的

张亮 张敏

彩虹是人们时常看到的一种自然界的光现象。每当五彩缤纷的彩虹当空挂时，人们都会情不自禁地争相观赏这种大自然美景。在古代，彩虹的美丽和神奇无法理解，因此被赋予一些神秘的色彩。古人认为，彩虹是寂寞的嫦娥在云端歌舞挥起的彩绸，亦或是女娲在炼五色石补天时发出的彩光。在西方，希腊神话中，彩虹是沟通天上与人间的使者；印度神话中，彩虹是雷电神的弓，等等。时至今日，彩虹不再神秘，但依然很多人会问：彩虹是怎么形成的？

第一位尝试解释彩虹现象的是亚里士多德。他认为，彩虹是阳光经由云层的一种特殊的发射，光线从固定的角度发射，造成了圆锥形彩虹。亚里士多德因此正确地解释了虹的圆形形状，但并没有注意到光的折射作用。在亚里士多德的论证之后的17个世纪，彩虹理论才有进一步的发展。1304年，德国神父希度力否定了亚里士多德的假想：彩虹是云中水滴的集体反射造成的，他认为，每一个水滴都可以形成彩虹，并且他拿了个放大的水滴（装满水的球形容器）以实验证明了他的看法，而且也画出了形成彩虹的各种光线。但希度力的发现被埋没了近3个世纪，直到1621年，荷兰物理学家威理博·斯涅尔发现了折射定律，1637年，法国科学家笛卡儿采用希度力相同的实验方法，并利用折射定律成功地解释了彩虹的形成。但笛卡儿不能解释虹的颜色和它按一定次序排列的原因。直到1667年，英国物理学家牛顿发现太阳光通过棱镜时的色散现象后，虹的颜色才得以解释。

## 一、彩虹形成的光学原理

光是一种电磁波，光的颜色是由光波的频率决定的。在我们人眼看到的范围内，红光频率最小，紫光的频率最大。光入射到不同介质的界面上会发生反射和折射，入射光和折射光位于同一个平面上，且与法线的夹角满足如下关系： $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ 。其中， $n_1$ 和 $n_2$ 分别是两个介质的折射率， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别是入射光（或折射光）与法线的夹角，叫做入射角

和折射角。这个定律被称为斯涅耳定律。虽然各种频率的光在真空中传播的速度都相同等于 $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ ，但是不同频率的单色光，在介质中传播时由于受到介质的作用，其折射率是不同的，如介质对红光的折射率小，对紫光的折率大（图1）。因此，让一束白光穿射到棱镜的一侧面，通过棱镜后，前进方向改变，在白色光屏上形成彩色光带，顺序是红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种颜色。这与彩虹的颜色很相似（图2）。

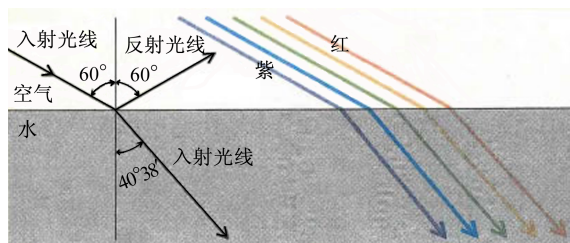


图1

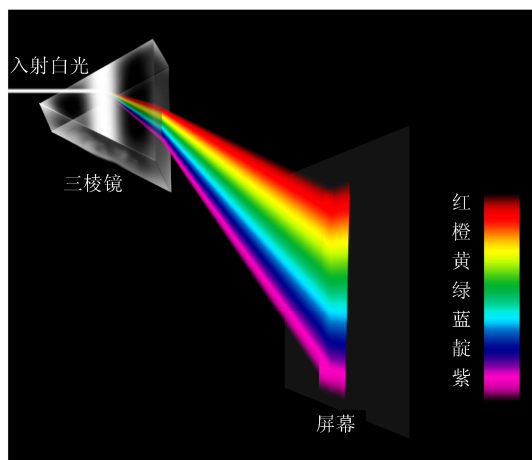


图2

夏天雨过天晴后，天空还漂浮着水汽和小水滴。这些小水滴就像一个个的三棱镜。为了更好的说明这个问题，我们以空中的一个小水滴为例进行光路分析（图3）。阳光射入小水滴，即从空气进入水中，发生第一次折射，由于构成白光的各种单色光的折射率不同，因此，光线在小水滴内产生分光现象。

各色光同时在小水滴内继续传播，遇到水滴的另一界面时被反射回来，重新经过小水滴内部，出来时再一次发生折射回到空气中。这样，阳光在小水滴中进行了两次折射和一次反射就被分解成红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七种单色光。当空气中的小水滴数量很多时，阳光通过这些小水滴，经过反射和折射作用，射出来的光集中在一起，天空中美丽的彩虹就形成了（图4）。

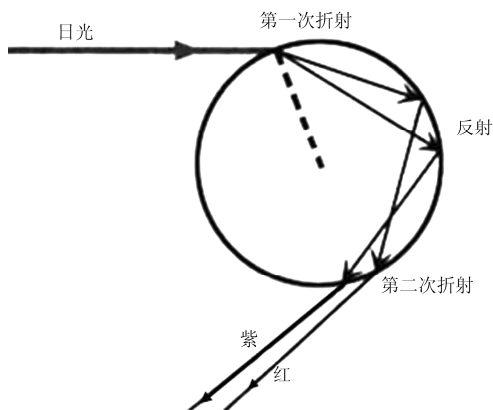


图3

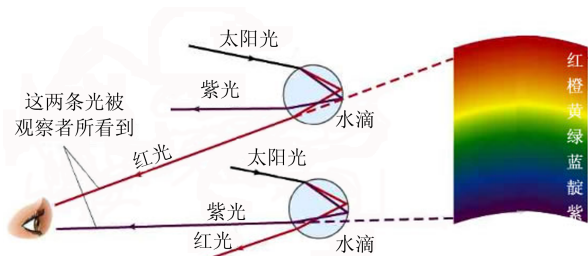


图4

平时，我们看到的多数是一条彩虹，但有时在彩虹的外边还能看到一条颜色顺序与这条彩虹恰好相反，且较暗一些的另一条虹，这条叫副虹，也被称为霓。主虹是内紫外红，副虹是内红外紫，两者为同心的圆弧（图5）。霓的形成过程和虹一样，不同的是太阳光从小水珠下部射入，经历两次折射和两次反射（图6）。这样从同一水滴射出的光线，由



图5

下到上按由紫到红形成彩带，与虹的情况恰好相反。但由于在霓的形成过程中，光线要多经历一次反射，所以途中光能损失多些，自然我们看到霓比虹暗了。

其实，太阳光在水滴内经过三次、四次反射也可以形成彩带而被称为第三虹、第四虹等，但它们的色彩更暗淡，故一般很难被看到。

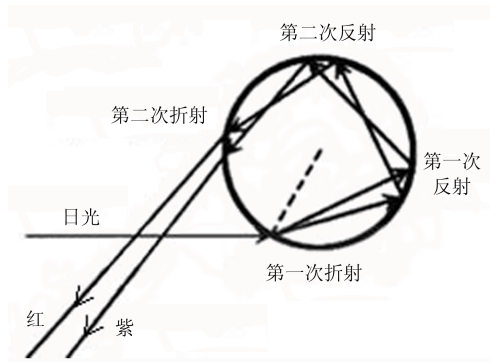


图6

## 二、彩虹为什么是弧形的

在阳光对水滴的照射下，各种入射角都有，因此光线可以向任何的方向散射。虽然要找出形成彩虹的各道光线并不难，但是还有其他的无数条的光线跑到哪里去了呢？为什么散射出的光线强度，只有在彩虹附近才能看见呢？

为了更好的理解这个问题，我们仍然以一个水滴为例来分析。如图7所示，当红单色光以入射角  $i_1$  入射后，经折射-反射-折射，最后射出水滴光线的传播方向由偏向角  $\delta$  决定。

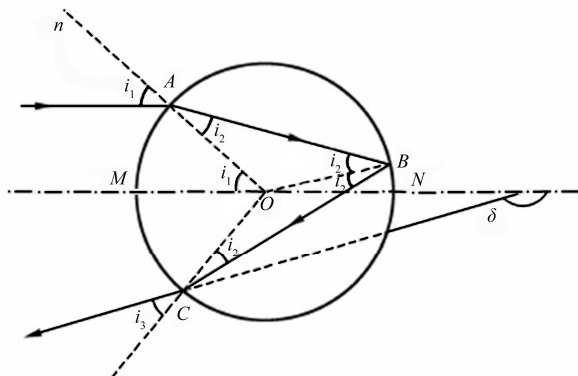


图7

由几何关系得到： $i_1 = i_3$

$$\delta = 180^\circ + 2i_1 - 4i_2 \quad (1)$$

$$n_{\text{空}} \sin i_1 = n_{\text{水}} \sin i_2 \quad (2)$$

由(1)(2)可以得到偏向角 $\delta$ 与入射角 $i_1$ 之间的函数关系为:

$$\delta(i_1) = 180^\circ - 4 \arcsin\left(\frac{n_{\text{空}}}{n_{\text{水}}}\right) \sin i_1 + 2i_1$$

其中,  $n_{\text{空}}$ 、 $n_{\text{水}}$  是红光在空气和水中的折射率 ( $n_{\text{空}} = 1$ 、 $n_{\text{水}} = 1.33$ ), 绘制的函数图象如图 8 所示。从函数图中我们可以看到, 当入射角  $i_1$  范围变化相等时 ( $\Delta i_1 = \Delta i_2$ ), 最后出射光线偏移量变化范围  $\Delta J_1$  比  $\Delta J_2$  小, 也就是说入射角在  $\Delta i_1$  范围内的入射光线偏移量的范围更小, 即两次折射后的光线发散量最小, 光线更加密集, 也即亮度相对最强。故形成彩虹的光线, 就是满足  $\delta(i_1)$  为最小值时的光线。

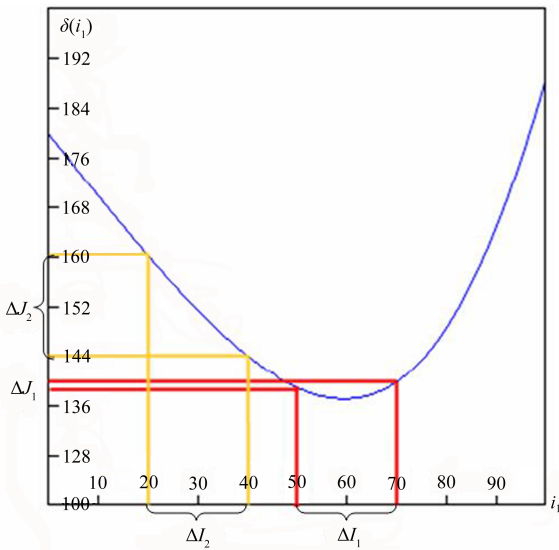


图 8

因此, 通过求导计算, 即  $\frac{d\delta(i_1)}{di_1} = 0$ , 当  $i_1 = 59.47^\circ$

时, 有最小值  $\delta(i_1) = 137.48^\circ$ 。计算结果表明, 以  $59.47^\circ$  的入射角射入水滴的光线 (该光线也称为成虹光线), 其附近的其他光线从水滴射出时都接近成虹光线的偏向角 (图 9)。可见, 大多数出射光线密集在成虹光线的出射线的方向, 正是由于光线密集, 人们才可以看到彩虹现象。且此时最终的折射光线和入射光线的夹角  $180^\circ - 137.48^\circ = 42.52^\circ$ , 这个角度被称为红光的“彩虹角”。我们所看到的彩虹中红色部分均来在这一角度附近。另外, 由于水滴对不同色光的折射率不同, 从而各色光的彩虹角略有不同。如对紫光,  $n_{\text{紫}} = 1.3435$ , 可计算其彩虹角为  $40.60^\circ$ 。彩虹中不同

的颜色来自于不同的水滴 (图 10), 且主虹的色彩为红光在最上面, 紫光在最下面。

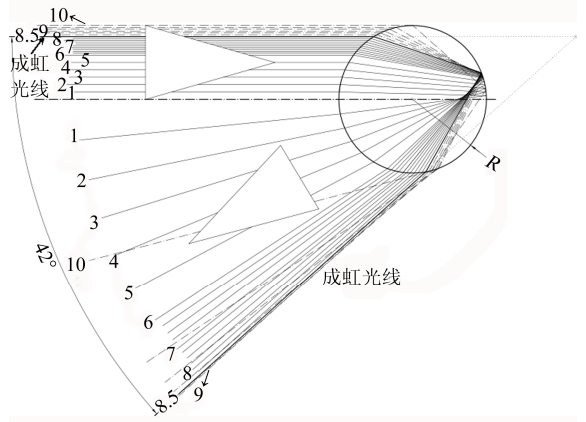


图 9

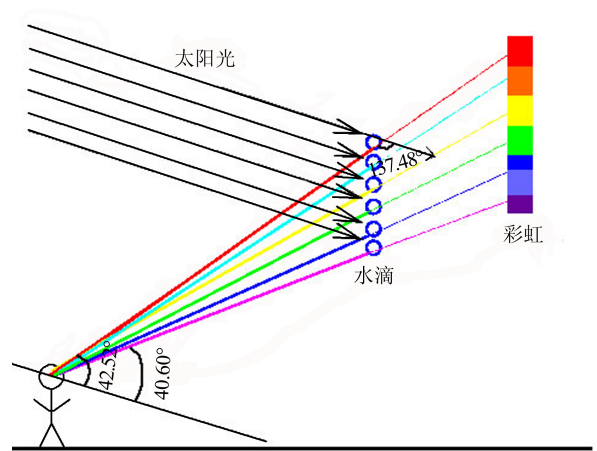


图 10

有趣的是, 彩虹出现在半空中的位置不是特定的, 它会随着观察者而改变。虽然每一个人看到的彩虹的仰角相同, 但他们看到的不是同一条彩虹, 因为他们所看到的彩虹的光线来自不同的位置, 不同的水滴。可以说每个人都看到专属于自己的彩虹。

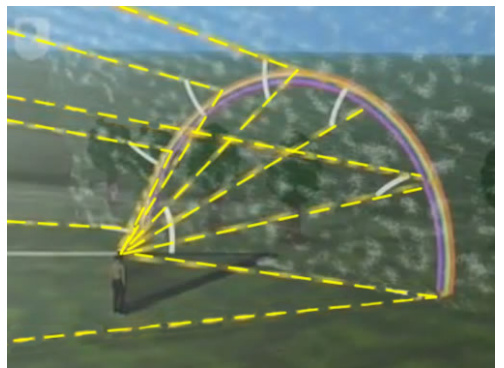


图 11

当以人的眼睛为顶点，把所有与平行入射光线成 $42.52^\circ$ 的彩虹角的光束连接起来，就形成一个圆锥体。圆锥底面的圆弧就是彩虹。而实际上，在地平面上，我们看到的主虹与霓是半圆形的，那是因为它们下半部分被地面遮住了（图 11）。只有在晴朗的天气，站在高山顶上或飞机舱中向下看，才能看到主虹与霓的全貌，即完整圆环（图 12）。到这里，我们就成功解决了彩虹为什么是弧形的这个让无数人困惑的难题。



图 12 飞机上的乘客看的彩虹，其中的阴影是飞机在太阳下的投影

### 三、几个关于彩虹的问题

#### 1. 霓为什么出现在夏季后

由于夏天常常下雷阵雨，雨后半边天空露出太阳，此时地面温度较高，蒸发很快，雨后天空还漂浮着水汽和小水滴，就被折射出七彩霓虹。冬天大多是连绵不断的小雨，而且雨后太阳不会立即出现，同时，冬天温度较低，蒸发较慢，雨后天空中不会像夏天那样充满水汽和小水滴，所以冬天不容易出现霓虹。

#### 2. 为什么在中午看不到彩虹

从图 11 中我们可以看到，虹的半径的视角大约是 $42^\circ$ 。它的中心，必定在太阳和人眼连线的延长段上。很显然的，太阳高出地平线的角度，必定和虹弧中心低于地平的角度相等。所以只有太阳近地平的时候，半圆的虹方能全见。而太阳越高，彩虹的圆心将越往地平线以下偏移，这使得彩虹整体下移（图 13）。如果太阳高出地平 $42^\circ$ 以上，在平常环境之中，是看不见彩虹的。当然如果从飞机或站在视野开阔的高山之巅从空中俯瞰的话，还是可以观察到完整的圆形彩虹。

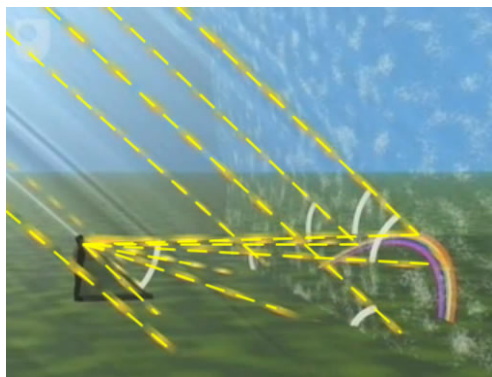


图 13

#### 3. 身边的彩虹

其实，彩虹并不是只有在雨过天晴后才能看到。通过前面的叙述，我们知道只要空气中有水滴，而阳光正在观察者的背后以低角度照射，便可能产生可以观察到的彩虹现象。正因为如此，我们可以在瀑布、喷泉附近看到彩虹。在晴朗的天气下背对阳光在空中洒水或喷洒水雾，亦可以人工制造彩虹（图 14）。



图 14

#### 4. 彩虹与气象

几千年来，我国劳动人民在长期的生活和生产实践中，积累并流传了许多与彩虹相关的看天经验，并用简洁语言编成谚语。这些谚语反映了天气变化的客观规律，已成为人们推测未来天气变化的依据之一。例如“朝虹满江水，夜虹草头枯”，“东虹日头、西虹雨”。这些农谚虽然只是劳动人民从生产劳动中总结出来的一些经验，但事实上它们都是有科学依据的。

我国大部分地区处于中纬度，系统性降水天气大多由西向东移动。虹的方位与太阳方位相反，如果早上在西方天空出现虹，表明西方雨区正在东移，天气将变坏，如果在傍晚看到东方出现虹，表明西方已经转晴，雨区已移过当地，天气将变好。其他的又如“虹高日头低，明朝着蓑衣；虹低日头高，明日晒得背皮

# 她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔

和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中心插页。

2012 年《现代物理知识》彩页进一步增加，每期待价 9 元，全年 6 期 54 元，欢迎新老读者订阅。邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007~2011 年单行本每期 8 元；2007~2011 年合订本每本 50 元。

焦。”“有虹在东，有雨落空；有虹在西，人披蓑衣。”等等。

另外，由于彩虹是太阳光在大气水滴里折射与反射而成，所以空气里小水滴的大小也会影响彩虹的外观。雨滴越大，彩虹带越窄，色彩越鲜明；雨滴越小，分光和反射越不明显，彩虹带越宽，色彩越黯淡。因此，如果彩虹的色彩从鲜艳变为暗淡，宽度从狭窄变为宽大，都说明空气中雨滴由大逐渐变小，由此，我们可以推测空气可能逐渐转向稳定，天气情况渐趋稳定，反之，天气可能会变坏。

#### 四、总结

本文对虹霓现象作了一些简单光学分析，且只涉及几何光学。事实上，虹霓是一种复杂的气象奇观，本文只讨论了彩虹现象其中极小的一部分。令人满意

的有关彩虹定量理论还需要涉及我们所知的各种波动光学的性质，诸如干涉、衍射和偏振等波动的性质，同时，甚至涉足于量子力学与混沌动力学的领域。

其实，很多有用的物理数学工具是为了处理彩虹及其相关问题时，才设想出来的，彩虹本身也早被用来作光学理论的试金石。笛卡儿就曾这样说过“彩虹这种大自然的奇迹……，我无法找到比这更适用我的科学方法的例子”。也由于这些理论能有进一步的成功，我们才能利用数学来描述彩虹。但是，科学的见解，并非是无往不利的。我们相信，对虹霓现象的理论解释也随物理学、数学的发展而日益完善。

（江苏南京晓庄学院物理与电子工程学院 211171）