



〔美〕 ROBERT GREENLER

虹·暈·宝光

气象出版社

虹 · 晕 · 宝 光

[美] R·格林勒 著

黄 必 选 译

气 象 出 版 社

内 容 简 介

本书为美国威斯康逊大学一物理学教授所著。书中描述虹、晕、宝光及其它大气光象，给出了大量的彩色照片资料。同时也追溯了一些历史性的纪录片断。

书中运用光学原理，对大量光象的物理成因作了探讨，并进行计算机模拟。

本书可供大气物理研究人员和有关气象、光学类的大专院校师生使用。也可供一般的气象科技人员和其它的自然科学人员阅读。

ROBERT GREENLER

Rainbows, Halos, and Glories

Cambridge University Press 1980

虹·晕·宝光

[美]R·格林勒著

黄必选译

责任编辑：邹坚峰

气象出版社出版

(北京西郊白石桥路46号)。

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经售

开本：787×1092 1/16 印张：9.5 插页16 字数：218千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷

印数：1—5,000

统一书号：13194·0164 定价：3.65 元

原 序

“谁一提笔，谁就会斐然成章，不管他是有意识的，还是无意识的”。我怀疑怀特(E.B.White)这句话的正确性。我对于本书内容有意识地作了取舍，为的是尽量正确地描述我的亲眼所见，包括我目睹虹时的喜悦，以及我对虹的解释；还为了让读者分享我研究的冰晶晕成果，也分享我在发现过程中的欢欣。

从童年时代开始，我对虹就产生了兴趣。那时，面对美丽的彩虹，我感到惊异。对于自己喜爱的事物，我觉得应该亲身参与，力图对它作出标识。拍摄这些景象，正是我要掌握它们的一种努力；想象并且谋求了解虹的起源，是我亲身参与的行为之一。济慈(Keats)在他写的“女妖”一诗中，曾谈到过这类理解同鉴赏之间的关系。诗中写道：

天空曾出现异乎寻常的虹霓：
人们知晓虹的形态、元素和实质，
把它当作常见的景物，
列在索然无味的清单里。
科学将要斩去安琪儿的肢膀，
准确地揭示出大自然的全部奥秘，
从此天空会不再闹鬼，
那有过妖魔的地库也静寂宁息。

济慈抒情地描绘出某种情景，我对此却持强烈的异议。对我本人说来，理解反而提高了我的欣赏和求知的意识。我愿意写这样一个结尾：

探索与理解使人聪慧、睿智，
晶莹的天空清除了我们的迷妄、猜疑。

此书还关系到开拓视野。大千世界充满着迷离的景物，显而易见的景物明摆在眼前，可是我们大多数人却心不在焉、熟视无睹。我反复得到的印象是，对于我们的确未曾知晓的景物，不管多么明显，也是缺乏识别能力的。但是，珍贵的一瞥往往和新的见解是联系在一起的。我深信这是能够加以培养和发扬的。谁能展宽自己的视域，谁就拥有知识的泉源，这是任何人也不可否认的。

这本书描写的天空瑰丽景物，不需要专门设备，不限于特定地点，任何有视力的人都可看到。因此，希望凡读到本书的人都来关心这丰富多采的天空景象。

过去十二年，我在冰晶景象的研究方面(本书第2、3、4章)，曾经不断取得进展。大部分工作是由在校大学生完成的，他们为了寻求新的知识，而专心一意、兴致勃勃地进行探讨。其中作出过显著贡献的一些论文的合著者，已在参考文献里列出。但我还是要特别提到两位有重大贡献的人，吉姆·缪勒(Jim Mueller)当他还是在校大学生时，就专心从事研究，后来他到别处攻读研究生，但仍继续同我一起工作；吉姆·马尔曼(Jim Mallmann)曾经就教师的研究课题，和我在一道工作过，可是那项课题完全没有涉及天空景象，他在大学毕业后的十年来，在关连到了解天空奇观的工作中，同我进行了富有成效的合作。

对于我称作“我的著作”的许多成果来说，这些人都应当分享声誉。

本书所解释的一些景象，已由我和别人在南极或北极拍摄到照片。那里乃是冰晶奇景的丰富源地，这些奇景在世界其它地区很难看到。人们倘若能够理解天空光象的起源，就有可能利用它们的出现和外观，来获得大气过程的信息，这对于全球范围的大气运动是极为重要的。对于美国“国家科学基金会”的极地规划部来说，这也是感兴趣的问题之一，他们帮助我到地球的两极，以便研究这些景象。谢谢他们的支持。

R · 格林勒

译 者 的 话

晕、华、虹、霓，很早以来一直为我国广大人民注意。在预测风云变化的谚语中，就有不少谈到这些大气光象。

1981年，当我们刚刚收到美国出版的《虹·晕·宝光》一书时，对于书中荟萃有丰富的大气光象照片资料，大家都感到珍奇和喜爱，不少同志希望我能把这本书翻译出来。

1982年夏天，在气象出版社的鼓励下，我开始译这本书，这使我进一步了解到它包含的作者等人探讨天空光象的重要成就，特别是他十多年来在冰晶现象方面的研究成果。作者对种种大气光象进行了计算机模拟，并同实际观测资料认真比较，作出了中肯的论述。尤其发人深思的是，他根据科学推理，预见到天空可能有人眼看不见的虹霓，然后采用红外摄影技术来证实，他终于拍摄到了大自然实际的红外光彩虹。这一创举曾经在科学界引起轰动，受到过广泛重视。

这本书对于热心自然科学研究的科技人员来说，不但提供大量宝贵的实景资料，而且在思想方法上也给人以许多有益的启发。正如作者所说，面对着天空的晕华、虹霓、宝光、蜃景，不只用眼睛观察，还得开动脑筋。也就是说，要力求知其然，又知其所以然。书中一谈收获二谈猜想(即推论)，逻辑严密，判断正确，而且毫不隐讳地提到自己知识的不足之处，让人感受到实事求是的严谨学风。又如描写作者开初打算用计算机模拟虹霓，却一时不知从何着手；然而有志者事竟成，经过努力，终致克服重重困难，取得累累硕果。

本书又是一本具有一定水平的高级科普读物。全书说古道今，语言流畅；深入浅出，通俗易懂。既阐明形成各种天空光象的物理机制，又引借一些动人的传说，追叙人们的发现。在当前实现我国四个现代化的宏伟时期，把这本书放在我们科普园地的新书架上，谅必也会受到读者的喜爱吧！

我在译读全书的同时，深深觉得我们伟大祖国山河壮丽，气候资源无比丰富。倘若有志于探索的青年们，在自己得天独厚的工作环境里，甚或在假期旅游国内名山大川的时候，留意观察，细心求索，兴许会拍摄或记录到不少多奇的天空景象哩！我的思想飞得更远了，要是有谁也采用红外线之类的先进技术，去拍摄峨眉宝光，那么，除人眼能看到的迷雾薄云宝光之外，是否在湿润空气中也有这类光象呢？在冬季千里冰封的北国，在有世界屋脊之称的青藏高原冰川地带，是否有什么世人未见到的大气光学珍景呢？抑或还有人眼看不见的红外光晕或蜃景？干旱、暴雨、严寒、酷暑等异常气象，在它们酝酿形成的过程中，有否什么蛛丝马迹，兆示在大气之中，就象爱斯基摩人熟悉的“云图”那样？也许有谁能在读过本书以后受到启发和激励，找出某种“不如此就不能知晓”的办法，揭露出大自然里的新奥秘，让科学为人类造福兴利。

趁此书译文出版之际，谨此表示我的期望和祝福。由于自己专业知识有限，外语水平又不高，谬误不当之处，欢迎批评指正。

译者 1983.1.3. 成都

目 录

原序

译者的话

1. 彩虹	(1)
2. 冰晶折射景象——晕、光弧、假日	(16)
3. 冰晶反射景象——光柱、光环、光十字	(50)
4. 复杂晕圈今昔	(.83)
5. 散射——天光与云颜	(98)
6. 衍射——华·宝光·布罗肯幽灵	(109)
7. 大气折射——蜃景、烁星、绿闪光	(117)
附录：趣谜解答	(140)

· 1 · 彩虹

彩虹及天空出现的其它自然景象，很早就引起人们注意。世界上差不多每一种文化，都有文字史料或口头传闻，谈到虹的神话，和彩虹同人们生活有关的趣事。

古代关于天空奇观的传说，试图回答众所关心的两类问题：一、它们名叫什么？从哪里显现出来？怎么会成为它所显示的那个样子？二、这种极其美丽动人的五彩拱桥，其本质是什么？这本书打算讨论彩虹以及天空别的自然奇景的后一类问题。但要是问到为什么人人都关心彩虹之类的景物，那还得回头讲讲前一类问题。

虽然许多神话和传说是那样娓娓动听，但它却不能满足作者的愿望，即更多地了解彩虹的真正性质。

笛卡儿关于虹的理论

依我看来，第一位对虹给出满意解释的人，当推笛卡儿，他的论文发表于1637年。关于彩虹的起源，许多早期的思想家已经知道，当阳光照射到雨滴上时就出现虹。笛卡儿了解到，虹的外貌并不完全取决于雨滴大小，他决心调查光线射过大水滴的情况。实际上，他所考察的大水滴，乃是一个装满水的球形玻璃烧瓶。

笛卡儿结合理论研究而做的实验，引导他推断出：颜色鲜明的虹（主虹，见附图1-1），是太阳光射入球状水沫而形成的；阳光在雨滴内部经过一次反射后，就从雨滴射出。主虹有时伴有一个副虹（又叫霓），它比较暗淡和模糊，出现在主虹的外侧。笛卡儿认为，光线进入水滴后，经过两次内部反射，就会形成副虹。

这个见解比纯理论的认识更深刻。笛卡儿的理论值得详细研究，它可以帮助人们提高对于虹的洞察力。笛卡儿所用的方法，在图1-1里加以说明。他精确地画出了通过球状水滴的许多平行光线（光线来自遥远的太阳）。为了进行这项工作，他不得不了解：当光线跨过空气和水的交界处受到折射时，是怎样偏离其原来方向的。

在笛卡儿发表那篇论文前十六年，有一位德国科学家，名叫斯涅耳，曾经发现精确的折射律。不过，斯涅耳不曾发表他的著作就逝世了。笛卡儿发表的著作中，有他本人提出的折射律及推导，这引起了科学界内部的一次争议。尽管笛卡儿对指责提出了辩驳，但是有些人仍然声称：笛卡儿看到过斯涅耳的手稿，

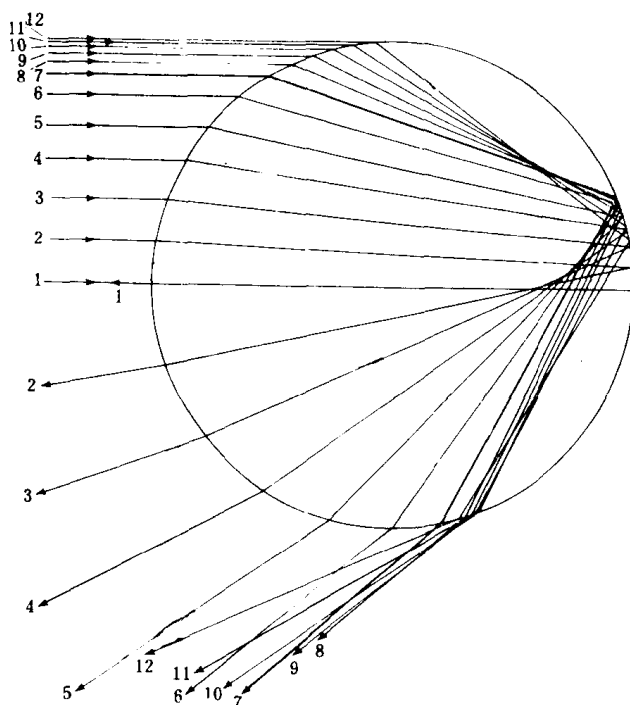


图 1-1 光线通过水滴的路径

而且窃取了斯涅耳的观点。值得注意的是，这个有争议的折射律，在大多数国家被称作斯涅尔定律，在法国却叫做笛卡儿定律。

总之，笛卡儿通晓折射律，因而能够计算出光线进出水滴的路径。由于笛卡儿还知晓反射率，所以，对于进入水滴并在水滴内部反射的任何光线，他都可以计算出来，并描绘出完整的路径。

从图 1-1 可以看到，透射水滴中心的光线，沿其入射路径对直反射回来(图中的光线 1——译者注)。这条路径叫做光轴线。可以看出，在光轴线上方进入水滴的光线，以一定的角度在光轴线下从水滴射出。射入水滴的光线离光轴线越高，则其在光轴线下射出的角度越大；不过，这一现象只维持到图 1-1 里粗线表示的光线位置(图中的光线 7——译者注)。这条光线称作笛卡儿线。再往上，高于笛卡儿线进入水滴的光线，射出时它与光轴线所成的角度就较小了。出射光线的角度(按它与光轴线相交的角度测量)，最大值在笛卡儿线。结果，笛卡儿线附近(无论哪一侧)的射入光线，其出射时的角度，都大致同笛卡儿线的角度一样；这就等于说，从水滴射出的光线，密集在出射角度最大的笛卡儿线附近。

笛卡儿推断说，在与光轴线成 41° 和 42° 之间射出的光线，比在其它任何 1° 间距里射出的光线都多；而且正是由于光线密集在最大角度线附近，这种密集就产生了彩虹(点符为原书斜体字，以下同——译者注)。

这就是说，人们注视天空，观看射入水滴又从水滴反射回来的光线，应当离开“对直回射”(笔直往返)方向 42° 来观察。更准确地解释一下对直回射方向，对于弄明白这一点是有帮助的。要想观察沿着光轴线方向直往直返的光线，人们实际上理应朝着正对太阳的相反方向注视。根据观察者的位置，正对太阳相反方向的地点，叫做对日点。如果太阳在地平线以上，对日点应在地平线以下，通俗地说来，对日点的位置，是由观察者头部在地面上的投影来表明的*。

图 1-2 表示太阳光线的路径，阳光射入水滴，又从水滴反射回来，笔直映入观察者眼中，入射和出射之间的角度是 42° 。从图中可以看到，进入人眼的光线同对日点方向也成 42° 角。人们一旦明白这个概念，就容易领会虹的形态和位置了。要观察虹，可以注

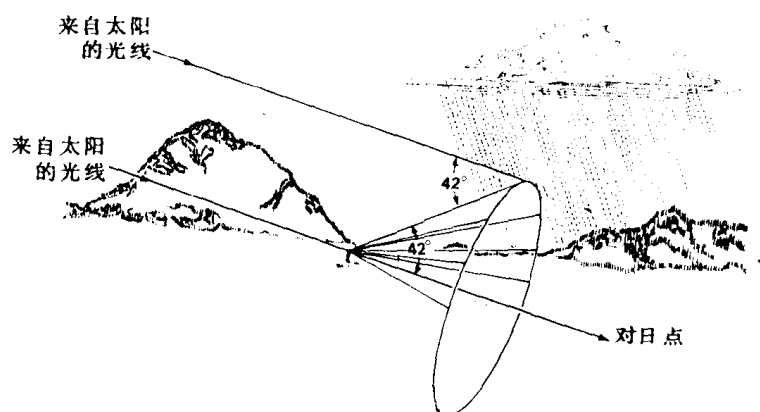


图 1-2 根据笛卡儿作的图推测，虹是以对日点为中心、角半径为 42° 的一个圆

* 译者按：实际上是由相当于观察者的眼睛在地面上的投影位置来表明的；假如用照相机自拍彩虹，相机在地面上的投影也就表明对日点的位置

视偏离对日点方向 42° 的任一方向。那样一来,就可以描画出环绕着对日点的一个彩虹圆圈,人眼指向这个圆心的直线和指向圆周各直线间的夹角为 42° ,因此简要说来,那就是这个圆圈的角半径为 42° 。

于是,笛卡儿根据这个相当简单的假说(我们常把这样的假说——例如,射入球状水滴的光线——当作一种模型),着手对虹是怎样形成的进行探讨。笛卡儿曾不得不用一个经验数字:水的折射率值,来计算光线进入和离开水滴的折射程度。但是,笛卡儿根据这个模型预见到,虹应该位于一个圆圈上,圆的角半径为 42° ,圆心在对日点。对于水滴内部两次反射的光线,笛卡儿进行过同样的计算,并发现出射光线与光轴线相交的最大角度是 51° 。所以,按照同样方式推理,笛卡儿从模型中又预见到:副虹也应位于以对日点为圆心的一个圆圈上,不过,它的角半径是 51° 。这两项预见均已被事实证明是正确的。

请仔细看看附图1-2。这是用广角镜头拍摄的一张彩色照片。从照片前景可以看到,田野里有本书作者的身影;还可看出,主虹和副虹都是环绕在作者头影周围的圆,作者的头影就表明对日点。笛卡儿是对的。尽管我们对虹已有了更多的理解,我仍然认为,笛卡儿的解释很令人满意。

彩虹大小

我已经谈到,由观测者眼睛指向彩虹圆圈的直线,与指向圆心直线之间的夹角,可以用来表示彩虹的大小,这看起来似乎是用没证实过的假设作为论据,来辨析彩虹的大小。于是,我们必须研究这样一个问题:无论是在你的庭园里用手高举水管喷雾而形成的虹,还是远在数英里外大片雨水中形成的虹,它们的角度大小是相同的。

从图1-2可以看出,位于圆锥形表面上的所有雨滴,都对形成主虹起了作用;这个圆锥的顶点就在观测者的眼部,圆锥的中心则在对中点方向的延线上,半圆锥角是 42° 。在这样的情形下,采用英尺或者英里来测量虹的大小是没有意义的,因为在虹和能确定其出现位置的观测者之间,并没有特定的远近。角度大小则具有明确的意义,因而是描述彩虹(以及本书将要提到的其它大部分光象)的合适参数。

角度常定不变的事实,在你试图拍摄彩虹全部光弧而失败时,就容易得到证明。一部照相机的视野,有一定的角度限制(35mm相机的标准镜头,所拍照片最大尺寸的取景范围约为 40°)。庭园里手举水管喷雾产生的虹,看上去范围够小了,拍摄应无困难吧!但是,当你通过相机的取景器观察时,却只能看到彩虹的一小部分。于是,你通常的反应就是往后退,想拍到大部分彩虹,但当你一步步后退时,位置局限在庭园水管喷雾里的彩虹却延展了,结果你通过照相机看到的,仍然只不过是同样的一小段虹弧;彩虹的估计直径,象在庭园喷雾中看到的那样,随着距离增加而增大,但是虹的角直径保持不变。

当我们认为只有位于圆锥形表面上的雨滴,才对形成实际看到的虹起作用时(圆锥形顶点就在观测者眼部),却又提出了另一个有意义的观念。显然,两位观测者并肩地欣赏着“彩虹”,可是他们二人实际上看到的,却是不同雨滴折射和反射的不同光线。换句话说,每个人有他自己的彩虹。

彩虹颜色

笛卡儿说明了彩虹的基本性质,却不可能解释虹呈现出的艳丽色彩。直到大约三十

年以后，牛顿理解到：白色光是所有颜色光的混合物；而且，对于不同颜色的光来说，水（或任何透明物质）的折射率略有不同。在从空气通往水的时候，红色光线遭到的折射，要比蓝色光线的折射程度轻，因而红色光线离开细小水滴的方向，也就跟蓝色光线的方向不同。

出射光线的极大角度，变动于 42° （光谱的红端）至 40° （光谱的紫端）之间。每种颜色的虹弧，角度稍有不同。不同角度和不同颜色的虹弧重合在一起，成为一个连续的统一体，结果，呈现出人们熟悉的彩虹生动美景。不过请注意，主虹的颜色顺序是，红色在弧拱外侧，而副虹的色彩顺序与此相反。

高次彩虹

雨后复斜阳，彩练舞当空。这时，每一个球状雨滴，都以种种可能的方式，反射和折射照到它上面的光线。当光线第一次照到水滴上时，其中一小部分受到反射，其余则透射穿入水滴，一直照射到水滴沫的内侧表面。这时，又有一部分光线受到反射并留在水滴内部，其余则离开水滴。就这样，光线同水滴的内侧表面每遭遇一次，便有一部分受到反射，并留在水滴里，其余则逸出水滴。从光线在任何位置进入水滴起，它在经过一次、二次、三次、或更多次的内部反射之后，就可能从水滴射出，而且，光线的路径和出射角度，总是因太阳光含有的不同颜色而有差异。这样的复杂情况，可以通过下面表述而简化——对于一条特定的彩虹来说，人们“看到”的只是进入他眼睛的特定光线。例如，图 1-3 表示的两个水滴，一个对形成主虹起作用，另一个则对形成副虹起作用。两个水滴都有一次反射和二次反射，但这张图只给出进入观测者眼睛的光线。

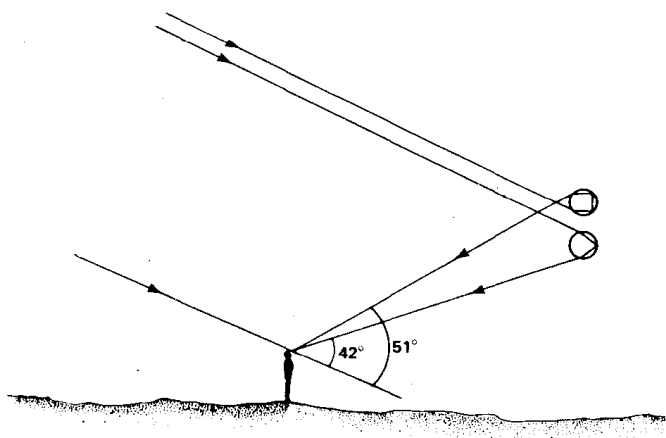


图 1-3 对形成主虹和较大的虹弧(副虹)有贡献的不同雨滴

那么，更多次的内部反射形成的彩虹，又是什么样子呢？在不曾详细了解虹是怎样产生的情况下，人们也许希望看到在副虹外侧有较暗淡的第三条虹弧，更暗淡的第四条虹弧，如此等等。人们显然知道，笛卡儿从来没有把他的方法，推广到经历三次内部反射的光线。

牛顿的许多显著成就之一，就是他提出了一种极其有效的数学方法——微积分。事实证明，在简化笛卡儿过去所作的冗长而乏味的一系列计算方面，微积分是一种极好的方法。牛顿利用微积分推导出的数学表达式，可以表明先后经过 N 次反射后的彩虹角度大小（ N 为任意的自然数）。牛顿的表达式给出的结果是：当 $N = 1$ 时，角度为 42° 左右； $N = 2$ ， 51° 左右。我在这里说的左右，是因为其精确值取决于代入公式的折射率，也就是取决于颜色（见上节，不同颜色的光线，折射率略有不同——译者注）。令人很难理解的是，在牛顿的著述中，任何地方都没有把 $N = 3$ 列入他的方程式。在《光学》^[1]一书中，牛顿未作进一步解释就写道：“通过雨滴的光线，在经过二次折射和三次（或以上）反射之后，强度已不足以形成可以觉察到的虹弧”。

博耶（Boyer）写过一本关于彩虹史的卓越书册^[2]，他引证牛顿的同时代人柏努利

(J·Bernoulli)的话,暗示出也许对于鹰和猢猻来说,第三条虹^[3]是可察觉的,然而人的眼睛则无法看到。博耶接下去的描述,把彩虹问题和因发现慧星而闻名的哈利(E·Halley)联系到一起:

看来哈利是最早自始至终计算第三虹的人,其结果应当说是曾经令人大吃一惊的。他认为第三条虹弧的角半径是 $40^{\circ}20'$,而且居然不出现在太阳对面的天空,仅仅好象是一个围绕在太阳四周的光环。至少有二千年,人们曾经在太阳对面的天空,一直寻找着这一虹弧。

道理虽然还不明白,但正如牛顿和柏努利揭示的那样,第三条虹实际上也许并不那么暗淡,而宁可说是因为它出现在耀眼的太阳附近,那里平常的天空底色,要比对面天空亮得多;结果,它被天光淹没了。

四次虹的光弧,大概也是环绕太阳的一个光环,角半径为 46° ;直到考虑光线继续五次内部反射,这时人们才又指望在远离太阳的天空里,会出现某种虹弧。可是,在第五次反射以后,很可能因为光线太淡,甚至连柏努利提到过的鹰和猢猻,也什么都看不见了。在实验室里,沃克(Walker)^[3]曾用激光束照射过一滴水滴,观测到对应于所有彩虹级次的出射光线(直到第十三次),而且认为它们所在的位置,同笛卡儿的彩虹模型几乎一致。

尽管有许多人曾对我说,他们看到过同时出现的三条彩虹,但是,我并不相信在自然界里,已经观测到任何高于二次的虹的彩弧。这些人当中的一些观察,可能属于某条反射虹弧的一部分;另一些则可能牵连到干涉虹(这两者将在后面讨论)。有的则是一种不合格的观测,对于这种观测,有待我们去识别,去伪存真,可是大多数人仍容易偏信。不过,有的报导看起来是如此详细,使得连我也奇怪起来,是否那里偶尔出现了某种我们的确不了解的虹弧呢?

彩虹附近天空亮度

根据笛卡儿绘制的素描图(图1-1),可以了解到彩虹的又一个有趣特征。请记住前面讲过的话:从水滴射出的光线,在最大角度线附近密集,因而形成彩虹。可是,光线还以较小的角度从水滴发射出来。为了弄明白离开水滴对直回射的光线,你应该注视对日点;而要弄清同对直回射方向成小角度的其它光线,就应当偏离对日点某个小角度来观察。到达你眼睛的所有这些“额外的”光线,理应来自主虹内侧的水滴。现在,请再看几张彩虹照片(这或许比看几次彩虹还好)。正如你从附图1-1和1-2看到的那样,虹弧内侧的天空底色,要比外侧亮一些。尤其是附图1-3里的彩虹,景象华丽,引人注目,效果难得。尽管如此,这样的情景通常总是看得到的。大多数彩虹现象仿佛是着了色的光弧,这正是彩虹的基本特征。

附图1-4的照片,用廉价而带有立体感透镜的相机拍得,它展现出停留在山前的虹霓片断,主虹内侧的天空较明亮。但是就我的阅历来看,这张照片还展示出一种相当罕见的特征。如果我们对副虹(两次内部反射)采用笛卡儿的光轨迹手法,那就可以认为,对形成副虹不起作用的“额外”光线,理应在副虹外侧看到。这一效果实际可在附图1-4找到,照片里的主虹内侧和副虹外侧的天空,就比两者之间的天空明亮一些。

附属虹(干涉虹)

在讨论过的几张彩虹照片中,恰好就在主虹内侧,可以看到另外一条或一系列微弱

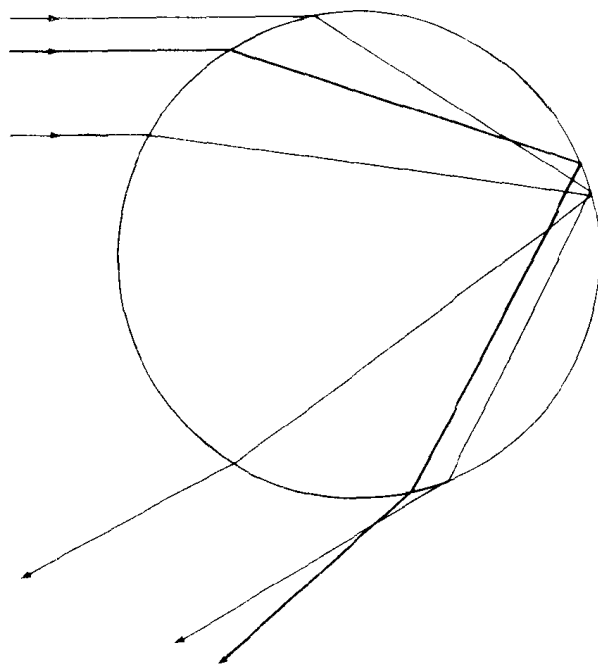


图 1-4 对形成主虹内侧干涉虹起作用的一对光线

的光弧，通常虹顶附近内侧较底部内侧明显。这是光的波动性质造成的，叫做干涉虹，也叫附属虹。笛卡儿绘制的素描图，再次为我们理解附属虹提供良好的开端。在图1-4里，只着重画出图1-1里的三条光线。粗线即笛卡儿线，也就是以最大角度从水滴射出的那条光线。其它两条光线，是在射入水滴的那些光线当中，从笛卡儿线上方和下方各选出一条；选择的依据是，两条光线各以不同的路径通过水滴内部，然后在从水滴内射出时，都按同一个方向进入观测者眼中。

现在，让我们想象光线具有波动特性的后果。事实上，跟射入水滴的光线一致的波动，是完全同位相的（那就是说，它们彼此同步，槽和槽、脊和脊互相对应）。不过，离开水滴时互相平行的两条光线，在通过水滴时却各有长短不同的旅程。假定两条光线在水滴内的旅程长度，正好相差半个波长，那末，离开水滴后，两者就可能是反相的了（两条光线彼此不同步，以致一个波的脊，同另一个波的槽对应）。在这样的形势下，各个波就相互抵销，彼此削弱对方，结果，朝那个特定方向观察的人，看到的就是强度减弱了的光象。

进入水滴内的一对光线，它们偏离笛卡儿线的间距越宽，其射出角度越小（按与光轴线所成角度测量）。如果我挑选出的一对光线，通过水滴内部的旅程相差一个完整波长，那它们又会是同位相的，并且总是互相补足，使得按那个角度射离水滴的光线增强。假如我继续接连地选取间距更宽的入射光线，我就还可以找到那些旅程相差1.5个波长（光强度削弱）、2个波长（光强度增强）、2.5个波长（光强度削弱）……的成对光线。正如观测者所见，这些成对的光束，其净干涉效果乃是一系列明暗光带，正好位于主虹的内侧。

光束的干涉作用，使得光的强度增强或削减，对于彩虹来说并不是异常现象。许多不同的实验，即表明相长干涉和相消干涉的实验，已使得我们确实相信了光的波动性质。

干涉虹（即附属虹）的间距，取决于水滴的粒径，小的水滴产生的间距较大。人们有

可能看到三条或四条附属虹，但你通常是一条也看不到。倘若天空出现了多种粒径的水滴，那样一来，不同间距的干涉虹弧就会部分重合，以抵销粒径完全相同的细小水滴沫造成的光强度鲜明变化。从我的观测资料来看，附属虹并不显示出鲜灿的光谱色，通常看起来时而呈淡蓝色或紫色，时而又呈淡绿色。

地面附近彩虹的亮度

弗雷泽(Fraser)^[4]曾提出一个有意义的想法，也许可以解释两种常见的彩虹特征。当太阳在地平线附近时，接地的彩虹尾端通常比虹弧其余部分更明亮。彩虹的附属部分则相反，往往是在较高部分更明显，接地的附属虹则消失不见。弗雷泽认为，以上两种特征，是大、小水滴混合出现时引起的。

水滴的表面张力，有使表层绷紧的作用，容易把水滴沫压挤成圆球形；直径不到十分之几毫米的水滴在空气中降落时，表面张力完全能使它保持完整的球形。不过，由于空气阻力的影响，降落中的大水滴就会变形，不能保持球状。变形后的大水滴呈压扁了的圆枕状，除垂直范围减小外，并带有水平面的环形截面（注意：这种情况跟通常带有竖直尾部之泪珠状动画表现大不相同）。

当太阳在地平线附近时，射向观测者眼睛的光线，途中通过大水滴形成下部虹弧，它同观测者的眼睛在一个水平面上。在这个水平面里的许多水滴，具有形成彩虹的环形截面。因为它们都是些大水滴，理应对虹弧光强有明显贡献。

光线形成上部虹弧的情形就不同了。射入观测者眼睛的光线，途中通过的乃是垂直断面，它们不呈圆环形，因而对彩虹光强也就没有贡献。

平常我们就知道，所有各种粒径的水滴，都可以对地平线附近的那部分彩虹有贡献；而不同粒径的每一种水滴，则对形成一系列附属虹的不同间距的虹弧起作用，那样一来，在地平线附近，种种粒径的水滴就使得任何干涉结构变模糊，倒是产生出明亮的虹弧。至于在天空较高处，只有较小的水滴才能对形成虹弧起作用，而那些细小的小水滴的粒径可能十分接近，因而适于产生附属虹结构。

白色的虹

在轮到谈这个题目以前，我们已主要从光学上讨论过虹霓。我们假定阳光呈直线照射，用折射律和反射律作出适当描述。我援引过光的波动特性来解释附属虹，下面我将不得不考虑光波特性的另一种表现——衍射（也有的译为绕射），以便更细致地论述彩虹。

如果有从小光源发出的光线，照射到有一个圆孔的卡片上，则在远离卡片的墙壁上面，可看到光线的圆形斑点，而且，随着把圆孔弄小，光斑点也变小。这是我们日常试验的一部分。可是，如果把卡片上的圆孔进一步缩小，一直到非常小之前，却出现了下面的特点：光斑点变得模糊，并且边缘不清楚；然后，随着把圆孔进一步继续缩小，光斑点却实际上在增大。光束射过细小孔眼而散布，这样的散布就叫做衍射。各类波动的传播都有衍射特性，这是人们早已了解的。

光线并不是一定要射过圆孔才能产生衍射，但需要通过限制光束宽度的一些东西，如象一片非常小的透镜，或者一滴非常小的水珠。举例来说，由于彩虹光线射过细小水沫产生的衍射作用，使出射的绿色光的角度域扩大，结果，绿色光域重合在扩大了红色光域和蓝色光域上面。在极端情形下，所有颜色重合在一起，竟会形成一种宽阔的白色虹，简称白虹。

附图 1-5 展示出白虹，有时也叫它为云虹或雾虹。因为形成云和雾的细小水滴，正适合产生白虹景象。在我拍摄到这张照片以后，一连几个月，我看了又看，反复捉摸。面对这张照片，我总觉得还有什么不明白的地方，一直到弄清楚在宽阔的白虹内侧，还有另外一条暗淡虹弧，我的这种烦恼才终于消除。

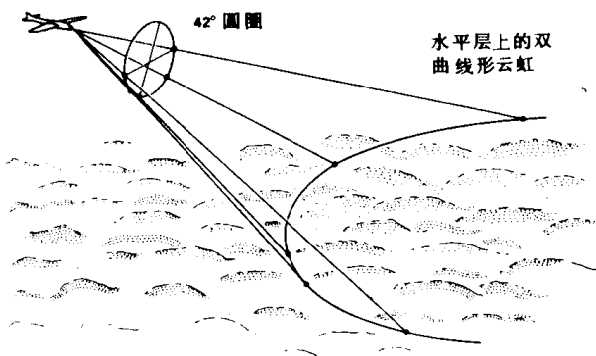


图 1-5 水平云层上的双曲线形云虹

附图 1-5 是复制品，用它来了解白虹，也许有一定的困难。不过，经过我的辨认，在原来拍摄的幻灯片上，白虹的确明显可见；甚至可以说，经我一指点，任何人都能够清楚地看出白虹。

在人们不了解而感到茫然的许多景物中，又有另外一个事例。你看，那附图 1-5 里明亮的白虹的内侧，在相隔若干度的地方，似乎有一条特别的虹弧。当我试图辨明这种特别虹弧的时候，考虑过它是否有可能是附属虹（前面说过，附属虹的虹弧，

其间距取决于水滴粒径，而且通常取决于较小的水滴）。现在，我针对讨论的题目提个问题：倘若这条特别虹弧就是第一附属虹，它跟主虹彼此隔得如此远，那么，产生它的水沫直径应该是多大呢？计算得到的解答是，水沫直径必须有 10 微米左右（一米的十万分之一左右），这正是形成云、雾的水沫标准直径。所以说，看来白虹有一个附属伙伴。

当我乘飞机翱翔在坦荡而平凡的云层上空，总要看看白虹。寻找白虹的办法是，根据阳光射入飞机窗口的相反方向，确定好对日点的位置。这时，对日点周围完全可能有彩色光圈环境（宝光，在第 6 章里讨论）。请在离开这个对日点大约 40° 的地方，去留心寻找一条白色光带。在云层合乎要求的情况下，你就可以得到对白虹的清晰印象，它正位于这一水平云层的表面上。这种水平彩虹的形状，实际上是显示彩虹的角锥形光线（半圆锥角大约是 42° ；见图 1-2），跟水平面云层相交的横切部分。图 1-5 的说明指出，这个横切部分呈双曲线形状。如果太阳高度角大于 42° ，云虹的形状总是呈椭圆形；而仅仅在太阳当顶时，它才会呈圆形。从飞机上寻找这类景象的人们，通过大部分民用客机的窗口观察，视野有限，常常一无所获。即使水平云虹完整地出现，人们通常也只能看到它的一部分。

附图 1-6 展示的，是从一架飞机上看到的部分云虹。

赤色的虹

附图 1-7 是一张赤色虹的照片。注意彩虹出现在天空较高位置，意味着太阳是在对面天空的地平线附近。这种虹弧是阳光照射到细小水滴上形成的；这些细小水滴常形成云。云虹总是呈白色，但是下述情况除外。那是因为太阳快落山时，阳光在到达照片所示的云层之前，要经过很长的路程穿过地球大气，阳光受到散射作用，就会有选择地失去光谱终端的蓝色光部分，于是，白色的阳光就显现出淡红色，象人们在赤色云虹中所见到的那样。

彩虹东升

附图 1-8 的三张照片，按时间顺序，连续摄于夏威夷海滨。

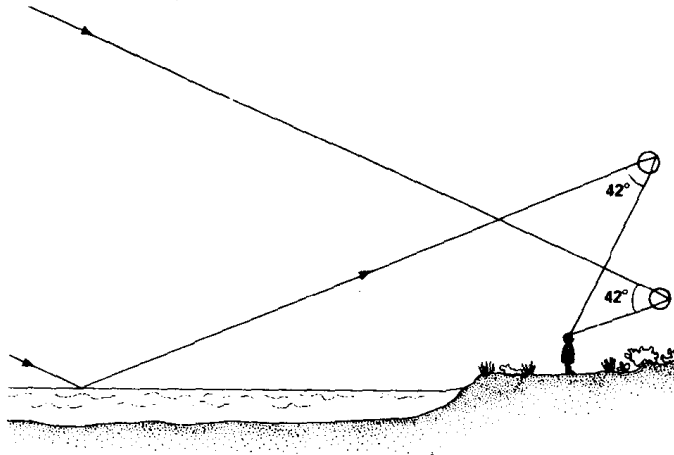


图 1-6 对形成彩虹和反照光彩虹起作用的光线

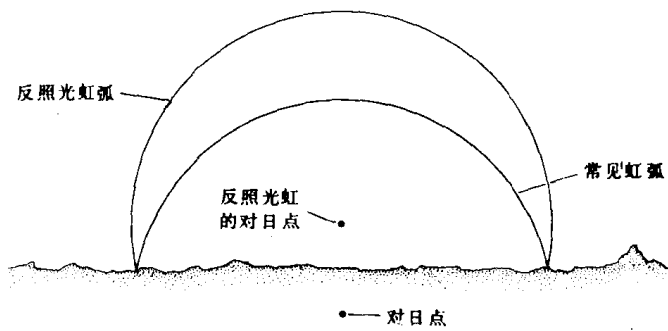


图 1-7 常见虹弧以对日点为中心；反照光虹的对日点，在地平线以上，和太阳同样高

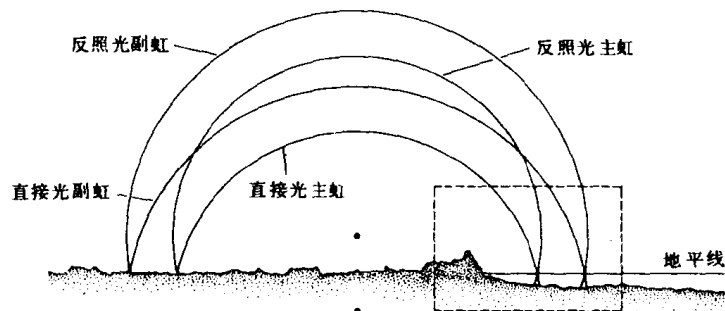


图 1-8 直接光虹霓和反照光虹霓的预测形状

第一张的拍摄时间是在下午中段时间，摄影师看到了地平线附近的红色光带，而且不知出于什么原因，他拍下了这张照片；后来，每隔10~15分钟，他又拍摄了另外两张照片，并把三张照片一起带给我要求解释。他看到的是彩虹东升现象。

第一张照片的对日点，大约在地平线以下 40° 的地方，以致彩虹最高顶部的边缘，刚好露出地平线。这种情形意味着对面天空的太阳，必定位于地平线以上 40° 左右。

随着夕阳西下，对日点抬高，于是彩虹东升。

反照光彩虹

附图 1-9 的彩色照片，绚丽奇异，逗人喜爱。这是黄昏时刻在加利福尼亚海边拍摄到的。既然落日总是出现在西方，那么，黄昏时分眺望彩虹，观测人员理当背朝大海和落日。拍照的那天，海上必然是风平浪静，因为照片上右边的第二组彩虹，乃是阳光照射到海面上，再经过那平稳如镜的海水反照而形成的。让我们仔细想一想，在什么场合下，才可能看到这种由反照光线（也可通称为反射光线——译者）造成的虹弧。图 1-6 表明从彩虹的雨滴射回来的光线，彩虹的角半径是 42° 。图中的两条光线，一条直接照射在雨滴上；另一条先照射到海洋上，经过水面反照后，再照射在雨滴上。从图 1-6 可以看出，反照光线所形成的虹弧，必然高于直接光线形成的虹弧。

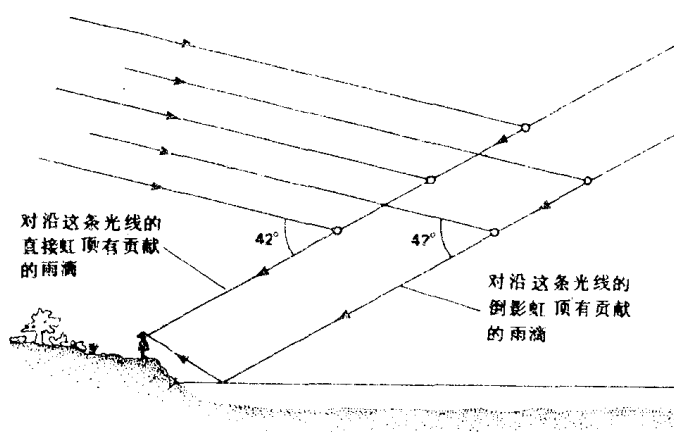


图 1-9 一组雨滴产生常见虹弧；位置与此不同的另一组雨滴，形成倒影彩虹

图 1-7 是一张示意图，表明由同一位观测者看到的上述两种不同虹弧。要描绘一条彩虹，只需要确定出对日点的位置，再在它周围画出一个 42° 的圆圈。如象图 1-7 所示，太阳在地平线以上，对日点总是在地平线以下。海面反照的光线，就仿佛是地平线下的太阳在起作用。事实上，你只要转过身来，并面对那条海面反照光线，你理应看到水中的日影，即地平线下的太阳。

如此说来，反照光虹的对日点，其位置是在地平线以上，虹弧理应环绕在它的周围。显然，人们有可能看到反照光虹的大半个彩虹圆圈。平面几何学的一些习题可以帮助你相信，上述两类虹弧应当在地平线上相交，至于太阳高度角怎样则无关紧要。对于副虹，只需要在前述两个对日点周围，各画出 51° 的圆圈。要了解反照光的虹和霓，人们不一定要站在看得见反照水面的地方，在太阳高度角较低时，这样的水面可以远在好几英里之外。

为了把这一理论同实际观测资料相比较（本例为附图 1-9 的照片），我曾画出直接光虹霓和反照光虹霓的图，太阳高度角为 11° （图 1-8）。图中断线标出的长方形，表明那张照片的大致取景范围。而且，我还应当强调指明，照片上的两组虹霓，它们在外形上的一致，使得上面的解释很有说服力。这里谈到的反照光效应，甚至可以解释另外的一些报导，即天空出现过三条彩虹。

倒影彩虹

出现在地平线以上、通过观测者身后水面的反照作用而形成的彩虹，我已经把它称