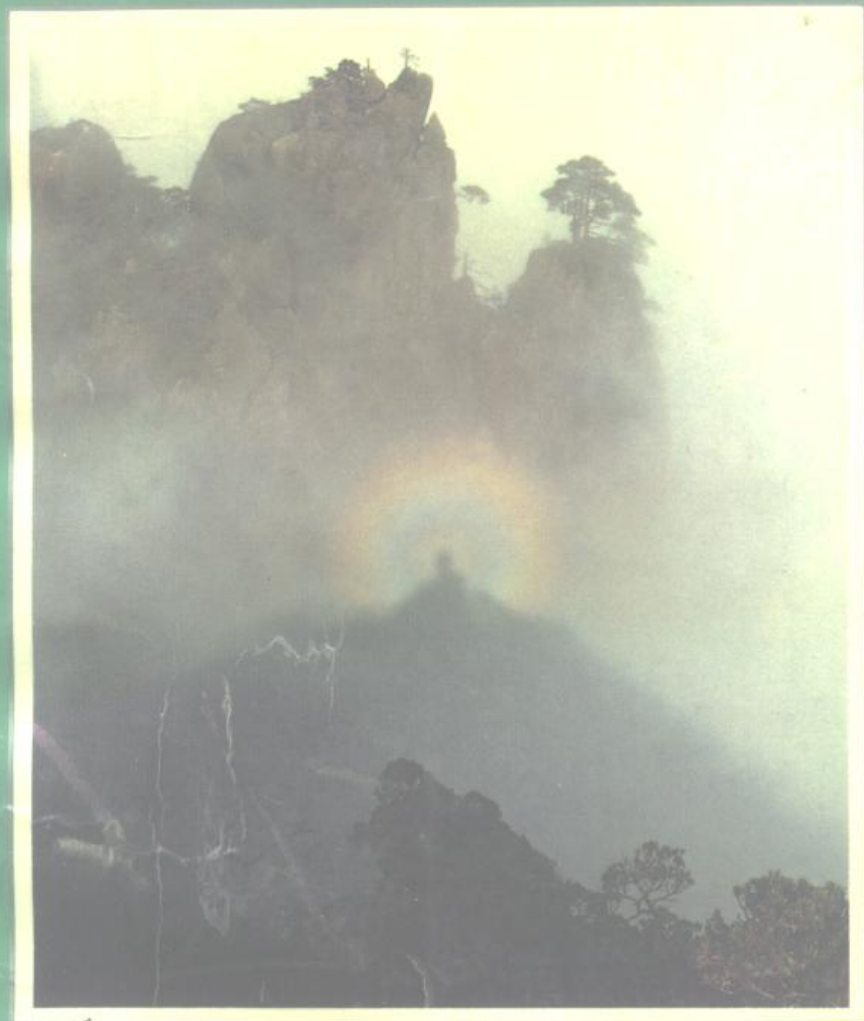




A Study of Optical Phenomena in the Air

胡 波 编 著

大气光象研究

陕西科学技术出版社

P427.1

H B

大气光象研究

胡 波 编著

147 1.1

陕西科学技术出版社

108505

大气光象研究

胡 波 编著

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

新华书店经销 陕西省印刷厂印刷

787×1092 毫米 32 开本 8.625 印张 18.6 万字

1993 年 3 月第 1 版 1993 年 3 月第 1 次印刷

印数: 1—3,000

ISBN 7-5369-1239-0/O·41

定 价:5.00 元

序

大气中的光学现象,自古以来就特别引人注目。古今中外为数众多的学者,对于种种大气光象的规律和成因,坚持不懈地进行探索和研究,不断地揭示出大气光象的奥秘。

大气光象的成因,主要是物理(包括光学)机制。因此,对于大气光象的研究,就不仅是气象工作者的任务,也是物理学工作者的责任。胡波同志的这本著作,就是物理学工作者对大气光象研究的一个贡献。

本书是一本系统地介绍大气光象研究的专著。在这本著作中,作者对种种大气光象的现象、规律和成因作了系统的论述,反映了国内外对大气光象的最新研究成果,包括作者自己的工作。关于宝光和虹的米氏理论、复角动量理论以及艾里理论等,在国内是首次介绍,有相当高的学术价值。作者把色度学应用于大气光象的研究,对天空和太阳的颜色给予了进一步的解释。作者对大气光象研究的现状和动态进行了评述,又收集了大气光象的有关实验资料,具有借鉴意义。书中还回顾了人类探索大气光象的历史,因此本书也是大气光象研究的简明史。

本书可供物理学工作者、光学工作者、气象工作者和大中

学校教师参考,书中的部分内容也可供一般的读者阅读。

这本著作的出版,对于大气光象知识的普及和深入研究,将会起到促进作用。

傅克德

1992年2月

前 言

大气中的光学现象,绚丽多姿,引人入胜。早在公元前 15 世纪殷商时代的甲骨文中,已有虹、晕等大气光象的记载,我国古代对大气光象的研究作出了举世公认贡献。

大气光象是大气光学、物理学和气象学的重要研究内容,近二三十年来,大气光象的研究有了许多新的进展。国内已有介绍大气光象的科普读物,但系统地介绍大气光象理论的书尚未见到。有鉴于此,编者将散见于国内外书刊中的文献资料,编写成这本比较系统地介绍大气光象理论的书。

对于大气光象的研究,涉及物理学、光学、大气物理学、气象学、大气光学、颜色科学和空间物理学等多门学科,因此大气光象学是一门交叉学科。毋庸置疑,形成大气光象需要一定的气象条件,但是,就大气光象的成因来说,主要的还是物理机制,特别是光学机制。

本书共分 8 章。第 1 章介绍了大气物理学、光学和色度学的一些有关的基础理论,也简要介绍了梯度折射率光学、米氏散射和复角动量技术的有关理论。第 2 章至第 7 章对虹、宝光、天空和太阳的颜色、海市蜃楼、华和晕等大气光象的各种理论,均作了比较系统的介绍和评述,并力求反映国内外的最新研究成果;对极光和球状闪电等只作了简要的介绍。第 8 章汇集了大气光象的部分实验资料。书中简述了人类探索大气光象奥秘的历史,还提出了一些尚待探讨的问题。

承蒙陕西师范大学物理系主任傅克德教授和王应宗副教授在百忙中审阅了本书初稿,周衍勋教授和西北大学物理系郭泰运教授审校了本书的部分章节。傅先生给予了作者以热情鼓励和许多具体的指导,并为本书赐序。特向他们致以衷心的感谢!

本书在写作过程中,参考和引用了国内外近百部(篇)各学科的著作、论文和报道。中国科学院安徽光机所大气光学研究室曾宗泳副研究员为作者提供了有关资料。国家气象局气象科学研究院资料室邓志文工程师、外文出版社孙永学主任记者和山东电视台孙玉平主任记者均惠赠了珍贵的照片。陕西机械学院学报编辑部韩星明编辑为本书绘制了全部插图。谨在此一并表示深切的谢意!

由于本书涉及多门学科,而作者的学识和资料有限,加之时间仓促,因此,书中错误和疏漏之处在所难免,请读者批评指正。

胡 波

1992年3月于西安

目 录

序.....	(1)
前言.....	(1)
1 基础理论	(1)
1.1 大气对光的折射	(1)
1.2 光的散射.....	(12)
1.3 光的偏振.....	(21)
1.4 色度学简介.....	(24)
2 天空和太阳的颜色.....	(38)
2.1 天空的颜色.....	(38)
2.2 太阳光盘的颜色.....	(48)
2.3 曙暮光和朝晚霞.....	(53)
2.4 天空光的偏振.....	(60)
3 海市蜃楼和日月变形.....	(65)
3.1 蜃景概论.....	(65)
3.2 上现蜃景.....	(67)
3.3 下现蜃景和侧现蜃景.....	(75)
3.4 复杂蜃景.....	(80)
3.5 解释蜃景的两种新理论.....	(86)
3.6 日月变形和绿色闪光.....	(97)
4 虹	(106)
4.1 概论	(106)

4.2	虹的几何光学理论	(109)
4.3	虹的波动光学理论	(119)
4.4	虹的复角动量理论	(125)
4.5	虹的色彩变化	(132)
4.6	虹霓的偏振	(137)
4.7	各种各样的虹	(140)
5	晕	(145)
5.1	概论	(145)
5.2	冰晶和晕的分类	(147)
5.3	22°、46°和 90°圆晕	(149)
5.4	冰晶反射产生的日晕	(153)
5.5	假日和光弧	(157)
5.6	晕光的偏振	(163)
5.7	日晕要览	(165)
5.8	日晕图荟萃	(174)
6	宝光和华	(184)
6.1	宝光现象和宝光理论概论	(184)
6.2	宝光的米氏理论和 Van de Hulst 理论	(189)
6.3	宝光的复角动量理论	(194)
6.4	形成宝光的物理因素和对宝光理论的 评述	(199)
6.5	露面宝光	(202)
6.6	华和華的形成理论	(205)
7	极光和球状闪电	(219)
7.1	极光现象	(219)
7.2	极光的成因*	(226)

7.3	大极光和极光声	(234)
7.4	闪电和球状闪电	(237)
8	大气光象实验	(243)
8.1	天空和太阳的颜色实验	(243)
8.2	虹的实验	(247)
8.3	蜃景实验	(251)
8.4	晕的计算机模拟	(255)
8.5	宝光和华的实验	(258)
	参考文献	(261)

1 基础理论

1.1 大气对光的折射

1.1.1 地球周围的大气圈

地球由大气圈、水圈、生物圈、冰雪圈、地壳、地幔和地核等部分构成。大气圈的上界达 2 000~3 000 km;从地面到高空,大气密度按指数规律减小。依温度分布特点并考虑到大气垂直运动情况,可把大气圈分为五层:对流层、平流层、中间层、热层和外逸层。一般认为,大约 80 km 以下的大气层为非电离层,以上的大气层为电离层。本书所论述的种种大气光学现象,都发生于大气圈中。

大气是由多种不同的气体混合组成的。大气中主要的和起重要作用的气体有氮气(N_2 ,按体积占 78%),氧气(O_2 , 21%)、氩气(Ar , 1%)、臭氧(O_3)、二氧化碳和水汽等。一般把不含水汽和尘埃等微粒的大气叫干洁大气,氮、氧、氩 3 种气体是干洁大气的主要成分,其含量比例在 90 km 的高空以下几乎不随时间和地点而改变。

除气体成分外,大气中总是含有大量固态和液态的悬浮粒子。这些粒子有的属于自然源,有的属于工业源和人工源,它们构成了气溶胶分散系统,通常称之为“大气气溶胶”粒子。

气溶胶粒子是低层大气的重要组成部分,它对辐射的吸收与散射、云雾降水的形成、大气污染以及大气光学和大气电学现象的产生具有重要作用。

气溶胶粒子包括水滴、冰晶,悬浮着的固体灰尘微粒、烟粒,各种凝结核及带电离子等,其中由于凝结或冻结而产生的云滴、雾滴、雨滴和冰晶,是产生大气光学现象的物质基础。

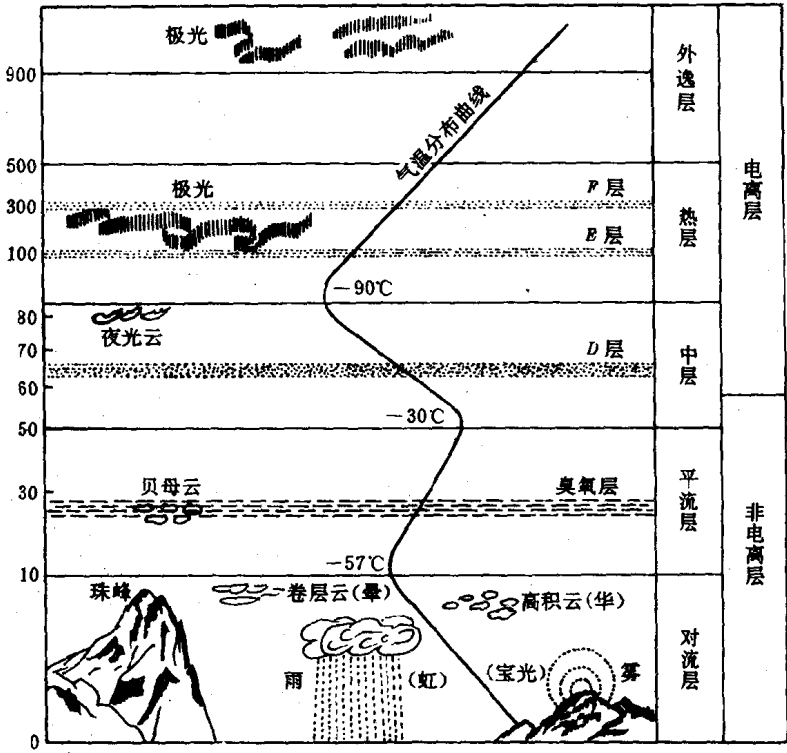


图 1-1 各层大气中的地球物理性质和光学现象

在90 km以上的高空,由于太阳的光化离解作用和重力分离作用,大气各种成分的相对比例随高度发生变化:90 km到500 km的高度,氧原子含量随高度增加而增高;500 km至1 000 km的高度主要是单个氧原子;1 000 km至2 400 km的高度主要是氮原子;到2 400 km以上的高度,则主要是单个的氢原子^[1]。

图1-1给出了某些地球物理现象,包括光学现象。彩虹、晕、宝光和华等光象出现于低层大气中,而高层大气中以极光现象最为美丽壮观。

1.1.2 光的折射和最小偏向角

如图1-2所示,当光射向两种媒质的分界面时,会发生反射和折射现象。反射角 i' 等于入射角 i ,折射角 r 和入射角 i 之间的关系服从折射定律,即斯涅耳(Snell)定律

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \quad (1-1)$$

当入射角等于或大于临界角时,则发生全反射。

如图1-3所示,三角形 abc 表示三棱镜的横截面, ab 和 ac 是折射面,其夹角 A 称为三棱镜的顶角, bc 为三棱镜的底面。假设有一束单色光 LD 入射到棱镜上,经过两次折射后沿 ER 方向射出,则入射线 LD 与出射线 ER 的夹角 θ 称为偏向角。根据图中的几何关系,偏向角 $\theta = (i_1 - r_1) + (r_2 - i_2)$,因顶角 $A = r_1 + i_2$,得到

$$\theta = (i_1 + r_2) - A$$

设 n 为棱镜的折射率,因为 $\sin i_1 = n \sin r_1$,又 $n \sin i_2 = \sin r_2$,因此

$$\theta = i_1 + \sin^{-1}(n \sin i_2) - A$$

$$= i_1 + \sin^{-1} \left\{ n \sin \left[A - \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin i_1 \right) \right] \right\} - A \quad (1-2)$$

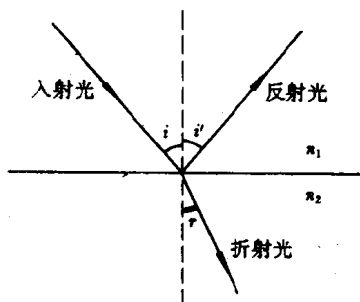


图 1-2 光在两媒质界面上的反射和折射

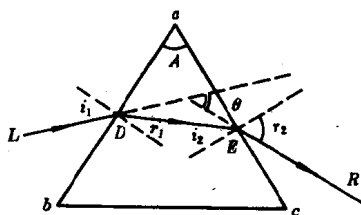


图 1-3 三棱镜的偏向角

当 i_1 从小变大时, θ 随之变小, 当 i_1 增大到某一值时, θ 达到最小值, 当 i_1 再进一步增大时, θ 反而变大。可见, θ 有一极小值, 称为最小偏向角 $\theta_{\min}$ 。由图 1-4 可以看出, 当 i_1 变化

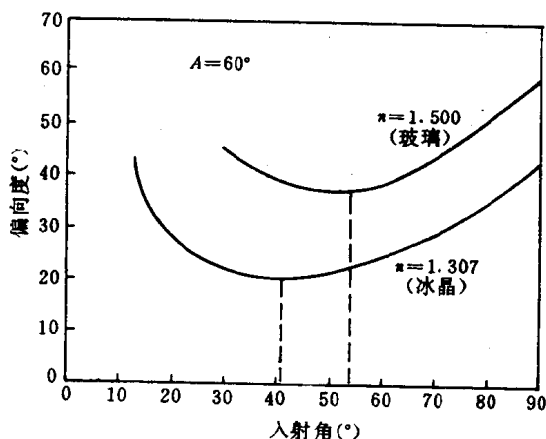


图 1-4 三棱镜的偏向角 θ 和入射角 i_1 的关系曲线

时, θ 确实有一极小值, 这一现象在实验中很容易观察到。

最小偏向角现象在虹霓的形成和 22° 晕圈等晕象的形成中具有十分重要的意义。

1.1.3 梯度折射率媒质中光线的弯曲

当媒质的折射率在空间中连续变化时, 光线的路径就不是直线而是曲线。

设媒质的折射率梯度为 $\frac{\partial n}{\partial y}$, 且折射率 n 沿 Y 轴正方向递减。如图 1-5 所示, 一光线沿曲线路径穿过媒质, 光线径迹上任意一点 P 的切线方向与梯度负方向(即等折射率的法线方向)的夹角 θ 为折射角。根据折射定律有

$$n(y) \cdot \sin \theta = \text{恒量}$$

由于 $n(y)$ 向上是递减的, 折射角大于入射角, 曲率中心 C 位于折射率大的一方。

根据曲线曲率的定义有

$$\frac{1}{r} = \frac{d\theta}{ds}$$

式中 ds 表示光线在 P 点向前通过的一段弧长, $d\theta$ 表示对应于 P 点的切线转过的角度。由于 $ds \cos \theta = dy$, 因此

$$\frac{1}{r} = \frac{\cos \theta d\theta}{dy}$$

将上述折射定律的表达式微分得

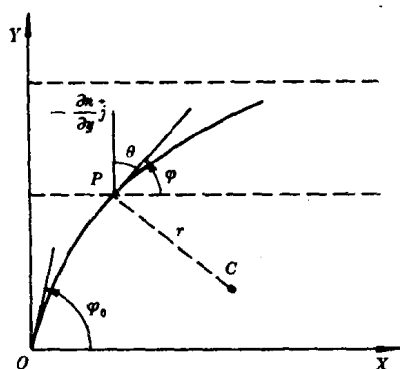


图 1-5 梯度折射率媒质中光线的曲率

$$dn \cdot \sin\theta + n \cdot \cos\theta d\theta = 0$$

由上面两式并考虑到 $\frac{\partial n}{\partial y}$ 是负值, 于是得到光线在任一点 P 的曲率为

$$\frac{1}{r} = \frac{\sin\theta}{n} \left| \frac{\partial n}{\partial y} \right| \quad (1-3)$$

式(1-3)表明, 光线在梯度折射率媒质中传播时, 总是弯向折射率大的一方。式中 $\sin\theta \frac{\partial n}{\partial y}$ 是梯度在光线轨迹上 P 点的法线方向分量, 即光线在轨迹上某点的曲率正比于与光线垂直(即该点的曲率半径方向)的折射率梯度。

当式(1-3)中 $\theta=0$ 时, 即光线沿着与等折射率线垂直的方向入射时, 光线不会偏折; 当 $\theta=\frac{\pi}{2}$ 时, 即光沿等折射率线方向传播时, 光线曲率最大。

若媒质的折射率 n 是三维空间的函数时, 即 $n=n(x, y, z)$, 则光线前进一段元弧长 ΔL 时, 光线相对于原入射方向偏转的角度 $\Delta\theta$ 可表示为^[2]

$$\Delta\theta = \frac{1}{n} \nabla n \cdot \Delta L \quad (1-4)$$

式中 ∇n 为折射率 n 的梯度, $\nabla n = \frac{\partial n}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial n}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial n}{\partial z} \mathbf{k}$ 。

当气温沿竖直方向存在温度梯度时, 即存在折射率梯度时, 光线在大气中传播的路径总是弯向折射率大的一侧(即气温低的一侧, 亦即空气密度大的一侧)。

海市蜃楼就是梯度折射率媒质中的一种光学现象。

1.1.4 梯度折射率媒质中光线路径的曲线方程

在 XOY 坐标系中, 设折射率 n 只沿 Y 方向变化。当媒质

的折射率分布 $n(y)$ 已知时, 便可获得光线在其中传播路径的曲线方程。

如图 1-5 中, φ 表示光线轨迹上某点的切线与 X 轴的夹角, 于是折射定律可写为

$$n(y)\cos\varphi = \text{恒量}$$

光线以 φ_0 角从坐标原点 O 发出, 若 $n(y)$ 越来越小, 则 φ 角越来越小。当 $\varphi=0$ 时, 光线离 X 轴最远, 在此处光线发生“全反射”。令 $y=0$ 处的折射率为 $n(0)$, 光线发生全反射处的折射率为 $n(s)$, 则有

$$n(0)\cos\varphi_0 = n(y)\cos\varphi = n(s) \quad (1-5)$$

用 $\frac{dy}{dx}$ 表示路径曲线在某点切线的斜率, 则

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}\varphi = \left(\frac{1}{\cos^2\varphi} - 1\right) \quad (1-6)$$

由式(1-5)有

$$\begin{aligned} \frac{1}{\cos^2\varphi} - 1 &= \frac{n^2(y)}{n^2(0)\cos^2\varphi_0} - 1 \\ &= \frac{n^2(y) - n^2(0)\cos^2\varphi_0}{n^2(0)\cos^2\varphi_0} \end{aligned}$$

将此式代入式(1-6), 并取其倒数, 得

$$\frac{dx}{dy} = \frac{n(0)\cos\varphi_0}{[n^2(y) - n^2(0)\cos^2\varphi_0]^{1/2}}$$

即

$$dx = \frac{n(0)\cos\varphi_0}{[n^2(y) - n^2(0)\cos^2\varphi_0]^{1/2}} dy$$

此为光线路径曲线的微分方程, 将此式积分, 则得光线路径的曲线方程如下: