

大气中的光学现象(如虹、宝光、蜃景、日(月)晕、华、极光等),绚丽多姿,引人入胜。大气光学现象(以下简称大气光象)是物理学、大气光学和气象学的重要研究内容。大气光学在国外是一个非常活跃的研究领域,大气光象也受到相当的重视,美国的《J. Opt. Soc. Am. A》、《Appl. Opt》和《J. Atmos. Sci》等刊物,经常发表这方面的研究论文。相比之下,国内对大气光象的研究不十分重视,致使许多有关大气光象的理论未能及时介绍到国内,一些书籍和刊物仍采用比较陈旧、古老的甚至错误的理论解释某些大气光象。本文拟对大气光象的理论作一概括性的介绍,期望引起有关专家和学者对大气光象研究的关注。

一、中西方古代对大气光象的观测与解释

早在我国殷商时代的甲骨文中,已有“虹”、“晕”等字,在殷墟卜辞里还有关于出现虹、晕以及用晕来卜验天气的记录。对天空光象的观测,在西周时就被定为制度,并有专门的官员从事观测记录,以后历代也沿袭如此。据《周礼》记载,西周时已将天空光象分为10种,称为“十辉”。在24史的《随书》、《晋书》和《魏书》等中,都专列《天文志》或《天象志》,对日晕等大气光象的各种形态作了细致的观察和记录,给它们取了很多很形象的名字,在《晋书·天文志》中就列出了17种名称。

在距今1900多年前的东汉初年,《峨嵋山志·诸经发明》中就记述了宝光现象。12世纪的宋代诗人范成大在《峨嵋山游记》中,对峨嵋宝光作了精采、细致和完整的记述,并将宝光分为“小现”、“大现”和“清现”三类。我国古书中关于极光的记载枚不胜数,最早的记载可追溯到公元前687年。

西方第一个试图解释虹的可能是公元前3世纪的古希腊哲学家、科学家Aristoteles,他认为虹是太阳光从云上反射形成的。13世纪英国的R. Racon测量了虹在天空的角度。1304年,德国的Theodoric提出,虹是阳光经水滴两次折射、一次内反射形成的,副虹是阳光经水滴两次折射和两次内反射形成的。1621年W. Snell发现了光的折射定律,1637年法国数学家和物理学家R. Decartes第一个对虹作出了正确的解释。

外国文献中最早描述宝光现象的,是西班牙旅行家兼船长的Ulloa,他在1735年对秘鲁的Pambamarca山的宝光现象作了比较详细的观测和描绘,比我

大气光象的理论概况

胡波



国晚一千六百余年。国外第一篇关于日晕的记述作于1630年,所以连外国人也不得不承认:“在深入地研究日晕现象方面,中国人远远地走在欧洲人的前面。”西方最早的极光记载在公元前4世纪。

二、大气光象的理论概况

本文仅简要介绍一些主要大气光象的理论梗概,并按光象分类介绍。

1. 天空和太阳的颜色

众所周知,1871年,L. Rayleigh发表了他的著名论文《天空光的颜色和偏振》,提出了蓝色天空是由比光波波长小的空气分子的散射形成的,并于1899年推导出了瑞利公式。由瑞利公式可知,大气分子的容积散射系数为

$$a_{m\lambda} \approx \frac{32\pi^3}{3N\lambda^4} (n^2 - 1)^2 \quad (1)$$

式中N为单位容积中的分子数, λ 为光之波长,n是大气折射率。瑞利定律表明,散射光强度与波长的4次方成反比,

即 $I \propto \frac{1}{\lambda^4}$,大气分子对蓝光比对红光的散射强得多(约为5倍),从而对蓝色天空作出了成功的解释。

1985年,美国的C. F. Bohren和B. Fraser提出,对蓝色天空的解释应与入眼的视觉特性相结合。1990年,笔者

应用大气物理学和色度学理论,利用计算机对天空和太阳的颜色作了定量计算,揭示出天空和太阳的颜色是如下4个因素综合作用的结果:太阳辐射的光谱功率分布,瑞利散射,气溶胶散射和入眼的视觉特性(标准观察者光谱三刺激值),对天空的颜色作出了进一步的解释,对不同垂直高度的天空颜色和红色太阳问题也作出了较为深刻的解释。

2. 蜃景

蜃景(又称海市蜃楼)可分为上现蜃景、下现蜃景和侧现蜃景,以及复杂蜃景。我国山东蓬莱和日本富士湾的上现蜃景,瑞士日内瓦湖的侧现蜃景,以及意大利墨西拿海峡的复杂蜃景举世闻名。

人们已经知道,气温的反常分布是天然蜃景形成的主要因素。上现蜃景是光线在强烈的逆温层中的反常折射和全反射形成的;下现蜃景是在气温直减率很大的气象条件下形成,由于空气的密度是下层大于上层很多,光线在其中传播时向上弯曲。

A. B. Fraser认为,二重上现蜃景形成的必要条件是,气温和气温梯度必须同时增加,气温分布曲线必

胡波,西安西北纺织工学院家属区14*507,邮编:710048

须有一处曲率最大。要获得三重晕景,气温分布除应满足二重晕景的条件外,气温分布曲线上部应存在一个拐点。

如果知道了气温随高度的变化规律,根据光线光学理论,可以计算出光线的轨迹。本世纪40年代,E. Khular 等把光线光学和梯度折射率光学应用于晕景的研究。

本世纪70年代,弗雷泽提出了晕景的像空间理论,80年代中期,弗雷泽将反演理论用于晕景的研究,我国学者在这方面也进行了一些有价值的工作。1985年W. Tape 将拓扑学理论用于晕景的解释。俄国科学家用晕景作数据,运用数学方法演绎出低层大气的温度分布。日本人在富士湾耗资10亿日元,建造了人造海市蜃楼馆供游人观赏。

3. 虹

1637年,笛卡尔经过多年的理论研究和实验研究,提出了虹的几何光学理论:主虹是太阳光射入水滴经一次内反射之后以最小偏向角(138°)出射之后形成的,主虹的虹弧对反日点的角半径为 42° ;副虹(霓)是入射光在水滴内经两次内反射后以最小偏向角(130°)出射形成的,角半径为 51° 。笛卡尔的几何光学理论解释了主虹、副虹和两者之间的亚历山大(Alexander)暗带。牛顿的色散理论进一步解释了虹的色彩的形成原因。

1801年扬氏将光的干涉理论应用于虹的解释。1811年,物理学家J. B. Biot 最先发现了虹霓的偏振,利用菲涅尔(A. J. Fresnel)公式可以计算出主虹的偏振度为92.16% ($\lambda = 656.3\text{nm}$),副虹的偏振度为80.52% ($\lambda = 656.3\text{nm}$)。

1838年,经典的衍射理论被英国物理学家G. B. Airy 应用于虹。他应用惠更斯-菲涅尔原理到虹角附近和几何光学相联系的散射光的虚波前,采用了类似于基尔霍夫近似的假定:波前的光振幅恒定。结果是他的有名的“虹积分”,它在虹现象中所起的作用类似于菲涅尔衍射中的菲涅尔积分。艾里得到的虹的光强度公式为

$$I = I_0 [3a^2 \lambda / 4h(\theta - \theta_R)]^{2/3} f^2(x) \quad (2)$$

式中 a 为水滴半径, λ 为光波波长, θ 为观察角, θ_R 为虹角, I_0 为单位长度出射波前的光强度, $f(x)$ 称为虹积分,又称艾里函数。对于主虹,

$$h = \frac{9}{4(n^2 - 1)} \sqrt{\frac{4 - n^2}{(n^2 - 1)}}$$

其中 n 为水滴的折射率。艾里的虹理论对主虹和副虹的强度及角位置,对亚历山大暗带可以给出正确的解释。艾里理论给出了虹的亮的一边光强的振荡现象,这对应于附属虹。

1946年,H. Bucerius 将米氏(Mie)散射理论应用于虹霓的理论研究。本世纪70年代,巴西圣保罗

大学的H. M. Hussenzweig 将复角动量理论应用于虹的理论研究,他的数学处理深奥而复杂,提出了关于虹的详细而精确的描述,揭示了虹的许多重要特征,特别是关于虹的平行偏振分量重要性的发现。

本世纪70年代,美国克利夫兰大学的J. D. Walker 教授设计了一种实验装置,可以观察到12级高级虹和附属虹。

近年来,色度学被用于对虹的研究,从而对虹的色彩给出了更深刻的解释。

4. 宝光

宝光(俗称佛光)是一种瑰丽神秘的大气光学现象,我国四川省峨眉山、安徽省黄山、山东省泰山和陕西省华山等地,均有宝光出现,以峨眉山为最多,所以国内常称为峨眉宝光,国外则有“布罗肯幽灵”之称。

虽然关于宝光现象的观察与记载可以追溯到东汉初年,然而关于宝光的形成机理却令人困惑不解。由于宝光发生在反日点周围,光环的色序与主虹相同,又与雾虹常常同时发生,国内至今仍有人试图象解释虹一样用几何光学解释宝光,也有人试图象解释日(月)华一样,用一般的衍射理论解释宝光。

就人们现在所知,宝光是太阳光沿切向入射到云雾前面的水滴上产生的后向散射光的干涉形成的,它的基本特征(如光环的角半径和光强度分布,以及第一暗环通常是模糊的等)不同于虹和华,因此宝光的形成机理既不能用简单的几何光学予以解释,也不能用通常的衍射理论来解释。

1946年,H. Bucerius 将米氏理论应用于宝光的研究,他的结果建立在米氏级数解的渐近展开形式的基础之上,1966年H. C. Bryat 等人利用计算机进行了米氏理论应用于宝光的计算,他们的数值计算揭示了宝光问题的复杂性,也得到了宝光的主要散射特征。人们普遍认为,米氏理论是宝光问题的理论基础。

1957年, Van de Hulst 提出一个假设:宝光是由擦着水滴表面入射到水滴,并且经一次内反射之后紧贴在自身表面上迅速衰减的表面波(Surface Wave)产生的。这样路径的光线对宝光作出了有效贡献,常被称为范德赫尔斯特贡献。范德赫尔斯特的表面波理论是关于宝光的第一个有价值的定量化的标量散射理论。

本世纪70年代,努森兹维格将复角动量理论应用于宝光现象,揭示了宝光现象的物理本质。宝光的复角动量理论揭示出,宝光是下列物理因素的结合而产生的:①从水滴的边缘区域入射的光;②几乎完全内反射的结果和最主要的一些德拜项的贡献,以及轴向聚焦的增强效应;③正交偏振效应;④来自 Regge-Debye 极点的表面波的贡献;⑤在 $\theta = \pi$ 附近形成的高级虹暗区复光线的贡献;⑥与封闭或接近封闭的准周期轨道相联系的几何共振;⑦各种衰变(表面波的辐射

衰变;在虹的焦散曲线暗区的复光线的衰变和内反射的衰变等)之间的相互竞争等。

5. 日晕和华

晕是天空中毛卷层云中的冰晶对阳光的反射和折射引起的光学效应。日晕的形状有圆圈状、弓弧状、光斑和光柱等。较为多见的日(月)晕有 22° 晕、 46° 晕、近假日, 22° 晕或 46° 晕的上(下)切弧,环天顶弧,日(月)柱等。据报道,我国在本世纪出现的著名的日晕奇观有:1933年8月24日的峨嵋山日晕,1934年1月22日和23日的西安日晕,1965年4月6日湖北襄阳的日晕和1984年10月22日上午的峨嵋山日晕。这几次日晕奇观景象复杂,包括了多种多样的日晕现象。

今天,人们对大多数日晕的形成机理已经相当清楚了。形成晕的光学机制有反射,折射,反射和折射兼而有之三种。反射晕有日(月)柱和假日环两种,反射和折射兼而有之的晕有反日弧和反假日等,其余晕象几乎全部属于折射晕。至今,晕的理论仍局限于几何光学的范畴之内,晕的衍射理论尚未建立起来。

1993年3月10日上午7时许,山东烟台芝罘老爷爷顶东部出现了“三日同晖”奇观,有人认为可用正弦光栅衍射来解释。尽管正弦光栅只有三个衍射光斑与之相符,但在大气中形成如此精细结构的大气光栅是十分困难的,而且衍射光斑的色序为靠近真太阳一边为紫色,另一边为红色,这与事实不符。事实上,“三日同晖”奇观中,中间一个是真太阳,南北两边各一个近假日,近假日是阳光经过六角冰晶以最小偏向角出射形成的,近假日对太阳的角距离为 22° (或稍大),色序为内(靠近太阳一侧)红外紫。

美国的 R. Greenler 在过去十余年间,对种种天空晕象的形成机理,进行了计算机模拟,唯妙唯肖,并与实际的观测资料认真对比,作出了中肯的分析和论述,成绩斐然。

华是日(月)光经过透光云层后产生的衍射现象,可以近似地看作夫琅和费圆盘衍射,将 Mie 散射理论应用于华,能够得到更为精确的结果。就目前所知,在一般情况下,用衍射理论解释华是可以的。

6. 极光

极光是最为壮观和美丽绝伦的大气光学现象。1896年,挪威的物理学家伯克伦特奠定了现代极光理论的基础。

对于极光的研究,是人类对大气气象进行的规模最大的研究。在第二国际极年(1932—1933)和国际地球物理年(1957—1958)期间,国际上进行了合作研究。本世纪50年代以来,利用了火箭、人造卫星等航天工具,应用光谱分析和照相等技术,对极光进行了综合研究。

现在,极光的发生机理、发生区域和高度等已经清

楚了。极光是地球磁场对来自太阳的高能电子和质子产生偏转效应,将带电粒子投射到极地上空撞击大气分子和离子产生的。极区是极光出现率最大的区域,它位于地磁北(南)极 22.5° 的一个环形线附近,即极光区是磁纬 $60\sim 75^\circ$ 的环形带。极光有弧型、带型、平面型、帷幕型、光线型和放电型等,不同类的极光出现的高度一般不同,最多一类极光(如帷幕型、面型和带型极光)的高度在105km左右。

三、大气气象有待深入研究

大气气象的成因,有的较为简单,有的相当复杂。迄今为止,主要的大气气象规律和形成机理,多数已基本清楚了。但是,还有许多问题尚待探索和研究。

景观的形成机理尚待完善,真实景观的观测和定量研究工作有待于人们去进行。宝光形成的物理机制仍不十分清楚;宝光的“大现”、“小现”和“清现”的形成条件和机制也不清楚;宝光尚无任何物理模型;日晕的波动光学理论也未真正建立起来,目前需要进行大量的科学观测,在此基础上再进行新的理论研究。芬兰为此建立了日晕观测网,寻找罕见的日晕。还有一些大气气象也有待人们进行深入的研究。

在目前的情况下,大气气象的应用研究应该受到重视,使其为经济建设服务,使大气气象为天气形势分析和预报服务,古已有之,现在应在现代科学技术的条件下进一步研究。世界各地的旅游者常以观赏罕见的自然奇景和大气气象为乐事,因此,观赏大气气象是一项十分重要的值得大力开发的旅游资源。为此可对宝光、海市蜃楼等大气气象的出现规律进行研究,进而对之进行预报,必将产生很大的社会效益和经济效益。在旅游胜地建立大气气象馆,人造大气气象,播映大气气象录相片,无疑是有价值的。

爱因斯坦谈人生

爱因斯坦不仅是一位物理学巨匠,同时他对于人生的意义有着自己深刻的理解。他在回答一位年轻人“人活在世界上到底为什么?”的信中这样写道:

我们都认为,一个人活着就应该扪心自问,我们到底应该怎样度过一生,这是一个合情合理的问题,也是一个非常重要的问题。在我看来,问题的答案应该是:在力所能及的范围内尽量满足所有人的欲望和需要,建立人与人之间和谐美好的关系。这就需要大量的自觉思考和自我教育。不容否认,在这个非常重要的领域里,开明的古代希腊人和古代东方贤哲们所取得的成就远远超过我们现在的学校和大学。

(欣悦 编)