

文章编号: 1000-2022(2002) 02-0180-06

峨嵋宝光研究之一——宝光机理的综合研究

王鹏飞

(南京气象学院 电子工程系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 通过对宝光形成思路的追索, 否定“冰晶云不可能出现宝光”的看法, 综合考虑了不同条件下出现的宝光应遵循不同的形成机理。指出水云和冰晶云都能出现宝光, 而冰晶云上宝光的伴生光象不是主虹, 而是对日晕。

关键词: 宝光; 摄身光; 对日点; 对日晕

中图分类号: P427.1 **文献标识码:** A

相传仙佛的头身, 围有彩色光环, 称为“佛身光”或“佛光”, 亦叫“宝光”。因佛光现象在峨嵋山顶最为多见, 故常称“峨嵋宝光”。我国唐代画圣吴道子已开始在画佛像时, 就绘有佛身光。北宋沈括又曾有对匠人画佛身光的错误指出看法。公元 1177 年南宋范成大曾在其《吴船录》中记录其在峨嵋山光明岩两度见到宝光的变化动态, 是古代描述宝光的最生动史料, 很有科学探讨价值。在欧洲中世纪时, 名画中对耶和華、玛利亚、耶稣、天使、圣徒或成圣后的主教, 也绘有头光, 称为“圣光”(Glory)。因德国哈茨山(Harz)布罗肯峰(Brocken)常见此光现象, 且内有摄身光影, 疑为幽灵, 所以也有将它称为“布罗肯幽灵”(Brocken Spectra)的。

1 宝光光环形成机制探索史

最初人们看到出现宝光时, 常伴同主虹。它们都呈内紫外红的色彩排列, 认为那必定是与主虹同类的光象, 其形成机理应当相似, 所以称它为“布罗肯虹”(Brocken Bow)。但宝光的彩环数重同心相套, 其角半径在 20° 甚至 10° 以下。主虹的角半径却达 42°; 且较为固定。虽有时也伴同霓, 但霓的角半径比主虹更大, 色彩排列与主虹及宝光均相反, 为内红外紫。说明宝光并不与主虹同类, 其形成机理应与主虹不同。

于是人们就把宝光与包围月亮的华环相比较, 发现有许多相似之处。即都是同心的出现几重, 色带也都内紫外红, 彩环角半径相仿, 都较小, 这就是说, 它们的形成一定有某些相似之处。华环是阳光受云雾微粒衍射所造成的, 那么宝光的形成也应当与衍射有关。但是宝光与华又有不同之处, 即华是围绕日月的光环, 而宝光却位于日月相对的一方。华随日月之升降而升降, 而宝光则当日月上升时下降, 日月下降时却上升。它是围绕着对日点或对月点的。于是人们开始

收稿日期: 2001-05-14; 改回日期: 2002-01-28

作者简介: 王鹏飞(1920-), 男, 上海市人, 教授, 主要从事大气物理学及气象史研究, 曾任气象史志研究会主任、南京气象学院大气物理学系主任等。

把宝光称为“对华”(anti-corona)。这样,人们就研究“对华”(宝光)出现方向与“华”相对的关键原因。最早考虑方向相对的原因是“反射作用的参与”。这种“参与”可以有两种方式。第一种方式是反射日月光,使光源变为来自太阳相对的一方,然后再通过衍射作用形成宝光,这种方式称为“先反射后衍射”的宝光形成方式。第二种方式是已把被观察者前方云雾堤中云雾滴粒衍射到空中,但尚未在位于云雾堤更前方的迎日月光的人目看出是日、月华之前,却被反射到观察者眼睛中形成宝光,在这种情况下,观察者面向前面的云雾堤,日月光从背后射来,假设能见到日、月华的人位于比云雾堤更前的地方,其人目注视着日、月方向,这种方式称为“先衍射后反射”的宝光形成方式。不论这两种方式的那一种,其反射作用或衍射作用的介质都是观察者前面云雾堤中的云雾滴粒。但是应当指出的是:起衍射作用的滴粒其半径较小,而起反射作用的滴粒其半径较大。所以不同尺度的滴粒起不同的光学作用,具有一定的分工。

一般说来,云雾堤表面的滴粒,由于与外界空气接触,往往处于蒸发状态,而内部的滴粒,温度较高,易于增大,不易蒸发。因此处于云雾堤表层的滴粒,易起衍射作用,而处于稍内的滴粒则起反射作用。这样,在观察者前方的云雾堤,在日光的作用下,上述两种方式,即“先反射后衍射”的宝光形成机制以及“先衍射后反射”的宝光形成机制,是都在起作用的。这类宝光都是以对日点或对月点为中心,数重地同心地存在,带有衍射造成的色彩,即内紫外红,并围绕观察者的身影。

上述说明中,把云雾堤滴粒分为表层与稍内层,很容易使人认为衍射作用的滴粒严格处于云表一层,而起反作用的滴粒严格处于稍内一层,因此出现了解释宝光形成的“两层说”。1965年王鹏飞¹⁾打破了“两层说”的局限,因为云雾中的滴粒都在运动,起作用的滴粒不可能被禁锢于某一层内,在大滴粒周围,也常常有许多小滴粒。起衍射作用的微小滴粒,常分布于一些层次。另外,衍射不仅在小滴粒上出现,按“巴比涅原理”(Babinet's Principle),由许多云雾细滴所引起的衍射花样,与有同样细微的小孔所起的衍射花样相同,可以相互替代。而这些细微小孔,在宝光形成机制中,往往可以由云雾滴中数层运动着的细小甚至较大的云雾滴粒间的空隙组成。而这些空隙大小也是因云雾滴粒的组合和运动而变化着的。可见“两层说”存在缺陷。打破“两层说”使宝光形成的机制更符合实际。

但是不论是“先反射后衍射”还是“先衍射后反射”这两种宝光形成理论,都利用了云雾滴粒的反射作用。而反射作用在转变华的出现方向方面,并不是只能选择的唯一机制。自从瑞利及米氏研究光的散射规律,发展出瑞利分子散射及米氏微粒散射^[1],并指出“后向散射”的存在后,人们认为后向散射可以更自然地代替反射作用来说明宝光的形成。因为通过后向散射的衍射,可以比生硬的假助于反射作用来说明宝光的形成,似乎更简捷些。

宝光现象出现于云雾堤上,云雾滴粒虽也是分子组成,但不是分子,所以不能应用瑞利分子散射的后向理论,人们热衷于利用米氏微粒散射的后向散射光的衍射作用来解释宝光的形成。所以在20世纪70年代后,人们很少再谈到反射机制在宝光形成中的作用。

但对米氏散射作研究,发现其后向散射,因微粒尺度的增大而减小,对于大云雾滴而言,用米氏后向散射解释宝光形成,仍存在困难。1966年布伦特(Bryant H C)和科克司(Cox A J)在美国光学学会会刊(Journal of The Optical Society of America)中发表了《米氏理论与宝光》一文,他们认为其前向散射可产生华,后向散射可形成宝光。这是以折射率为1.333的水滴,其水

1) 王鹏飞. 气象学下篇. 南京气象学院气象系讲义. 1965年1月(第八章大气气象 §4 云雨等悬浮物上的光象内有关华及峨嵋宝光等).

滴尺度参量 β 为 200 与 500 的情况下计算的(因 $\beta=2\pi r/\lambda$, r 为水滴半径, λ 为波长, 故 $\beta=200$, 相当于 $r=32\lambda$; $\beta=500$, 相当于 $r=81\lambda$ 。如 λ 取 $0.6\ \mu\text{m}$, 则水滴半径分别相当于 $20\ \mu\text{m}$ 和 $48\ \mu\text{m}$)。

但较大水滴如何造成后向散射的机制, 还需进一步探讨。1923 年雷(Ray B)第一次把云雾滴中光线通过折射、内反射过程与‘散射’联系起来, 以解释宝光的形成。到了 1957 年, 范达荷斯特(Van de Hulst)认为这种后向散射是日光折射入水滴后, 通过一次内反射, 再次通过水滴表面时, 在水滴表面激发表面波并造成与入射阳光方向相反的后向散射, 这种后向散射光, 在通过云雾滴的衍射, 即可形成宝光。此过程可以图 1 表示。图中日光在 A 处掠射, 折入水滴, 在 B 处内反射, 在 C 处, 一部分折射返大气形成主虹光, 另外又激发出水滴表面波, 这种表面波行进到 D 处, 发生了“次级散射后向电磁波”, 即后向散射, 以与入射日光的相反方向传播, 再通过云雾滴的衍射, 而形成宝光。1981 年比利时科学家吉尔司(Gills P)以氦氖激光为光源, 按图 1 进行实验, 曾证实了这个机制可形成宝光。

事实上, 后向散射存在着共振激励作用促使其加强, 这更有利于宝光的强化(图 2)。图中水滴边缘数字, 代表第几次内反射, 日光在 A 处掠射入水滴后, 在第 48 次内反射时, 又重到 A 处, 而在第 24 次内反射时, 恰好到 A 的直径另一端, 距 A 为 180° ; 在第 2、37、24 次内反射所激起之表面波, 均能在 D 处激发后向散射, 在第 11、46、33、20 次内反射所造成之表面波, 对造成 D 处之后向散射, 已无影响。而在 6、41、28、15 次的内反射, 其表面波一般已难传到 D 点, 也对 D 点后向散射作用不大。可见图 2 中的内切线圆与水滴表面之间形成一个波导环, 在波导环中, 日光在波导中内反射一周, 仅 2、37、24 次内反射对激励后向散射有利。日光的持续使不断有后继内反射出现于 2、37、24 处, 使后向散射持续产生或加强。这种图 2 所表示的共振激励波导机制, 称为宝光的后向散射的范氏激励机制(范氏即指 Van de Hulst)。

对于图 2 而言, 既然在 A 处掠射入水滴的日光, 可在 D 处产生后向散射, 则在 D 处掠射入水滴的日光, 也必能在 A 处出现后向散射, 推而言之, 在水滴周边掠射入水滴的日光, 也必

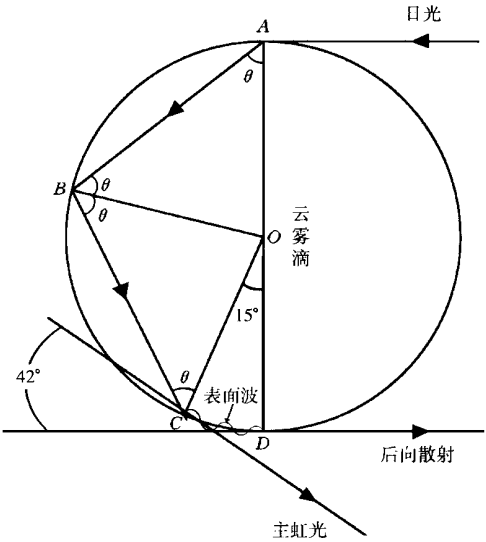


图 1 水滴产生后向散射的机制
Fig.1 The mechanism of back-scattering of water-droplet

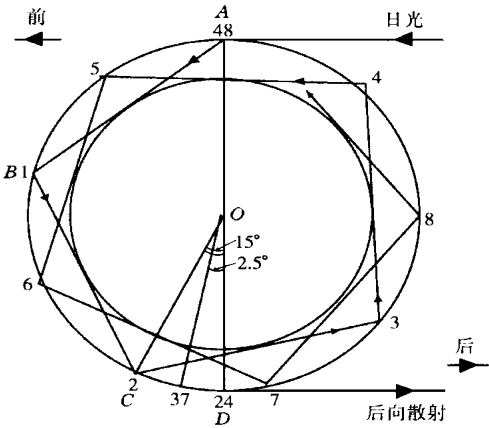


图 2 共振激励波导对水滴后向散射的激励机制
Fig.2 The enchanting mechanism of the water-droplet backscattering by resonance waveguide

在通过掠射点的水滴大圆的另一端出现后向散射。这样,可以得到图 3。

图 3 中以 $\odot$ 表示日光在水滴边缘进入水滴的掠射点(光线指向纸面),而 $\ominus$ 表示水滴中的后向散射(方向是自纸面向上)。大圆表示与纸面平行的水滴截面大圆。 A_1D_1 、 A_2D_2 、 A_3D_3 、 A_4D_4 、 A_5D_5 、 A_6D_6 ……等通过水滴中心 O 并垂直于纸面的诸平面截水滴而成的诸大圆直径。可见水滴周边的掠射日光,必导致水滴周边的交互后向散射。换言之,后向散射是在一个水滴周边出现,水滴中部并不发生后向散射。

2 范氏宝光形成理论

图 3 中指出,范氏后向散射对一个水滴言,仅出现于水滴的边缘部分,而宝光之形成,并非一个水滴的边缘后向散射所致,而是许多云雾滴的边缘后向散射光进一步受到较小云雾滴粒的衍射所致。也可能其衍射是由后向散射云雾滴粒间空隙的衍射所致。因此它属于“先后向散射后衍射”的宝光形成机制。一般,起后向散射的云雾滴粒较大,而起衍射作用的云雾滴较小。但这两种过程也不是仅分别发生在云雾堤的表层与稍内两层内。所以也不要受“两层说”所限。它只指出按范氏理论宝光之形成仅由后向散射与衍射两个物理过程先后进行而已。

必须指出,在范氏宝光形成机制中,所形成的宝光半径与衍射为云雾滴或小空隙的尺度有关。衍射云滴或小空隙的尺度愈大,则宝光的半径愈小;反之,则愈大。而宝光半径与后向散射云雾滴的尺度关系不大。但后向散射的强弱及后向散射水滴的分布密度则与宝光的强度及色彩明显与否有关。后向散射强度或散射云雾滴密度愈大,则出现宝光强度愈大,色彩也愈明显。

3 宝光彩环形成的综合理论

到现在为止,宝光之形成是由于光的衍射作用,已无疑问。对于宝光为什么与华出现的方向正好相对,是宝光研究的关键。在上一世纪研究中,认为可能与宝光形成有关的理论,大体有 4 个。1) 先“反射”后“衍射”理论; 2) 先“衍射”后“反射”理论; 3) 先“米氏后向散射”后“衍射”理论; 4) 先“范氏后向散射”后“衍射”理论。

这 4 种理论,前两种较为直观,后两种有数学的详尽推导及更细微的物理概念为基础。特别是第 4 种理论,其数学基础及物理概念更为精微,头头是道,引人入胜,赢得了近代大气光学工作者极大兴趣,且有实验的证实。使得前 3 种理论,相形有些苍白,减少了人们的注意力,以致人们误认为仅范氏理论为宝光形成的唯一理论。

其实其他 3 种理论亦言之成理,并不能完全否定。首先是先反射后衍射理论,它比“露致头光”(Heiligenschein)的形成^[3]仅多一衍射过程,而露致头光的反射光还是很眩目的。况且露致头光的反射是水滴的表面近中轴对称反射,可以增加衍射前的光的强度与光的分布密度,更有利于宝光显现的明显性。其次是“米氏后向散射理论”;它也由实验证实,仅缺乏共振激励作用而已。再有“先衍射后反射”理论,他是使原应在日光中形成的华象通过反射而反转过来,它对

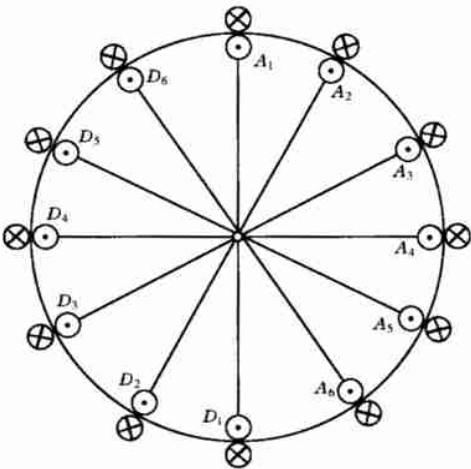


图 3 水滴后向散射全图
Fig.3 Whole backscattering of one water-droplet

宝光的形成起到补充作用。因此,宝光的形成可以综合这四个理论较为完整。没有必要因范氏理论的出现而就废弃其他 3 个理论,此其一。

其次,范氏宝光形成的理论及其实验等,仅适用于液水云雾滴,不能用于由冰晶组成的云雾上出现的宝光。这就往往令人误认为凡是冰晶组成的云雾不可能出现宝光。但这种看法是错误的。因为事实上衍射作用并不回避冰晶,也并非仅适用于水滴。例如,冰晶云上往往可出现华。而反射及米氏后向散射作用,在液水滴及冰晶粒上均可产生。倒是范氏后向散射反而不易在冰晶粒上出现。事实上自然界中,冰晶云雾上出现宝光现象已是常事。因此,我们在认识到范氏理论的局限性后,更应将范氏理论与其他 3 种理论综合起来,以全面解释自然界中不论冰云及水云,都能出现宝光。

根据以上对范氏理论的评述,可以把宝光形成的 4 个理论综合成如图 4 所示的宝光综合理论。这个理论,可包括两个形成方式:其一,可解释液水云雾中出现的宝光环现象;其二,则可解释冰晶云雾中出现宝光环现象。图 4 中过冷却云雾的宝光环应包括在液态云雾宝光环综合理论中。

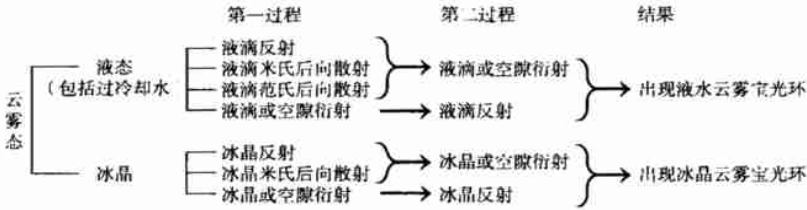


图 4 宝光环形成的综合理论

Fig. 4 The comprehensive theory of the glory formation

1969 年豪厄尔(Howell)计算^[2]得出的宝光环角半径与云滴尺度参量 $\beta(= 2\pi r/\lambda)$ 的关系见图 5。图中 r 为云滴的半径, λ 为光波波长。由图 5 可以看出,在列(a)中,设光波波长 λ 为常数,则由曲线可知云雾滴半径 r 愈大,则宝光环角半径愈小。在列(b)中,设云滴半径 r 为常数,则由曲线可知光波波长 λ 愈大,则宝光环的角半径也愈大。换言之,宝光环必然是内紫外红的。

图 5 中的曲线代表从内向外同心而不同角半径的宝光环带的情况。实线为亮带,虚线为暗带。

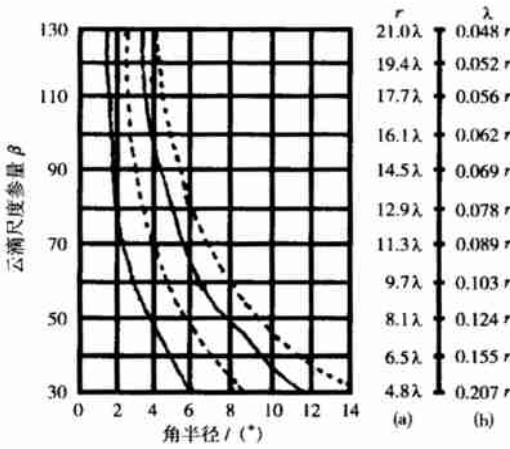


图 5 云滴尺度参量 β 与宝光彩虹角半径关系($\beta= 2\pi r/\lambda$)

Fig. 5 The relation between the angular radius of glory and the parameter of cloud-droplet size

参考文献:

- [1] 胡 波. 大气光象研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1993.
- [2] Houghton H G. Physical Meteorology[M]. London: The MIT Press, 1985.
- [3] Humphreys W J. Physics of the Air[M]. New York, London: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1940.

Study on Emei 's Glory. Part I : Comprehensive Research of Glory Formation Mechanism

Wang Peng-fei

(Department of Electronic Engineering, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: A comprehensive research of glory formation mechanism is given to explain the glories appearing on clouds either containing water droplets or ice particles on the basis of negating Van de Hulst's backscatter glory promotion theory.

Key words: glory; shadow in glory ring; anti-solar point; anti-solar halo