

虹晕等几种大气光学现象的偏振

张后发 阮士文

周军元

(陕西省商南县气象局, 726300)

(陕西省商洛地区气象局)

提 要

观测到虹的偏振。分析了虹、晕等现象的特点。运用菲涅耳公式给出其偏振度。结果表明:各种现象的偏振度相差较大,主虹、二次虹分别为0.93和0.81,多次虹的偏振度也较大,在0.75以上;46°晕的偏振度为0.16,22°圆晕的偏振度很小,仅为0.04。假日环、日柱的偏振度随入射角有一定的变化范围。虹、假日环、日柱是反射式偏振,以垂直于入射面的振动为主;而46°晕、22°圆晕则是折射式偏振,以平行于入射面的振动为主。着重讨论了水虹和冰虹的偏振。

关键词: 虹晕 大气光学 偏振

引 言

观测事实:用检偏器观测虹,当转动检偏器时,发现虹的各色光的亮度从亮到暗发生连续变化,而虹两边的光亮度变化不明显。对肉眼难以分辨的弱虹,用偏振器很容易观测到。这说明虹具有较强的偏振性。

偏振是光波的特性。气象上对光偏振的研究主要包括天空偏振和云雨滴偏振两个分支。前者已由阿喇果发现(1809年),后来,巴比涅、布儒斯特等人做了系统的研究,几个天空中性点就分别以他们各自的名字命名^[1]。而云、雨滴,特别是对重要的虹晕等现象偏振的研究,至今仍很少见到。曾有人用不同偏振度光线的干涉解释过峨眉宝光的形成^[2],本文从观测事实出发,分析计算了一些现象的偏振性。偏振对大气中光的传输、折射率、反射率有显著影响,在大气探测中有重要应用。

1 相关运算

1.1 入射角

虹、晕等现象的偏振是由折、反射引起,其偏振度是入射角的函数。我们首先从入射角着手。虹类较多,按内反射次数,可分为一次虹(主虹)、二次虹(霓)、多次虹。光线在正圆球形透明介质中经过 K 次内反射

的偏向角:

$$V_k = k \cdot 180^\circ + 2i - 2(k+1)r \quad (1)$$

对式(1)求微分,得偏向角随入射角变化率:

$$\frac{dV_k}{di} = 2 - \frac{2(k+1)\cos i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}} \quad (2)$$

因 $\frac{d^2V_k}{di^2} > 0$ (推导过程略),二次微分得

正值,即证明偏向角 V_k 有一个最小值。令 $\frac{dV_k}{di} = 0$, 得形成虹的入射角:

$$i = \arcsin \sqrt{\frac{(k+1)^2 - n^2}{(k+1)^2 - 1}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,虹的入射角与内反射次数 K 和折射率 n 有关。表1列出波长5847Å°光通过水滴形成虹的相应入射角。从表中可以看出,入射角随 K 增大而增大;当 K 一定时,入射角随折射率 n 增大而减小,与入射光频率有一定的关系。各类虹的入射角均大于布儒斯特角 i_b ; k 越大,入射角越偏离 i_b 。表1同时列出几种现象的最小偏向角。

晕也是比较常见的现象,其中22°圆晕是日月光通过面夹角为60°冰晶时,受到两次折射而形成。46°晕则是光线经过六角形柱状或板状冰晶时发生折射分光而形成。形成这两种晕的入射角、最小偏向角也列于表1。

表1 几种现象的人射角和最小偏向角 (1°)

折射率 $n_{\text{水}} = 1.333; n_{\text{冰}} = 1.307$

名称	一次虹	二次虹	三次虹	四次虹	五次虹	六次虹	22°圆晕	46°晕
人射角	59.41 (60.93)	71.84 (72.69)	76.85 (77.45)	79.46 (80.11)	81.43 (81.82)	82.69 (83.02)	40.81	68
最小偏向角	137.92 (133.98)	230.89 (223.83)	318.26 (308.4)	403.7 (391.07)	488.23 (472.88)	572.25 (554.23)	21.62	45.62

1.2 偏振度

一束单色平面电磁波，它的入射面内和垂直于入射面的光振动能量在单位时间入射到介质单位面积上的能量相等，即： $J_P = J_S$ 。光路上各段能量相对变化分别用平行振动和垂直振动能量的反射率 R_P, R_S 或透射率 T_P, T_S 表示。 $T_P = 1 - R_P, T_S = 1 - R_S$ 。对于正圆球形透明介质， K 次内反射的出射光中，平行振动能量为：

$$D_P = R_P^k (1 - R_P)^2 J_P$$

同样，垂直振动能量也可写成：

$$D_S = R_S^k (1 - R_S)^2 J_S$$

(因球形介质的扩散作用，上两式仅限于偏振度计算用)

偏振度：

$$P = \left| \frac{D_P - D_S}{D_P + D_S} \right| = \left| \frac{R_P^k (1 - R_P)^2 - R_S^k (1 - R_S)^2}{R_P^k (1 - R_P)^2 + R_S^k (1 - R_S)^2} \right| \quad (4)$$

对于晕：

$$P = \left| \frac{(1 - R_P)^2 - (1 - R_S)^2}{(1 - R_P)^2 + (1 - R_S)^2} \right| \quad (5)$$

对于假日环、日柱：

$$P = \left| \frac{\cos^2(i - r) - \cos^2(i + r)}{\cos^2(i - r) + \cos^2(i + r)} \right| \quad (6)$$

式(4)、(5)中 R_P, R_S 用菲涅耳公式求得。

2 计算结果

表2列出了一些现象的偏振度。可以看出各类虹的偏振度均较大，在0.75以上，它随着 K 的增大有所减小。主虹的偏振度最大，为0.93，二次虹次之，为0.81，多次虹依次减小。但是，随着 K 的增大， P 变化趋缓，且略有上升。例如： $K = 50$ 时， $P = 0.753$ ； $K = 100$ 时， $P = 0.754$ 。这是因为当 K 增大时，入射角越偏离 i_0 ，反射光的偏振度减小，但反射次数增多最终使偏振度不致持续下沉。对于

冰雹、冰粒，其最小偏向角光线的偏振度较水滴为小(如表2)，变化趋势与水滴相同。从形成虹的过程看，反射是决定因素，因此，虹的偏振总是表现为反射式偏振，其振动以垂直于入射面的振动为主。在实际观测中，其振动垂直于人眼、介质、太阳三点所组成的平面。当我们用检偏器检验时，很容易发现其具有偏振性。而再将检偏器转动 90° ，虹光近于完全透过，而虹以外的光偏振度较小，要滤去较多的光量，使虹与周围的亮度对比增大，变得更加明显。

计算中看出，随着 K 的增大，虹越来越弱。虽然多次虹很弱，但是它在传输过程中扩散衰减慢，远场效应明显。

晕是折射式偏振，平行于入射面的振动稍大。46°晕的偏振度为0.16，22°圆晕接近于自然光， P 为0.04。从计算中也可看出晕的光量较强。为说明激光测云系统中偏振的影响，表2也给出了各类现象中两个振动分量之比。图1给出了几种现象的位置和偏振方式。图中三、四次虹，二、五次虹靠得很近，未分开。

表2 几种现象的偏振度

名称	一次虹	二次虹	三次虹	四次虹	五次虹	六次虹	22°圆晕	46°晕
偏振度	0.93 (0.87)	0.81 (0.76)	0.78 (0.73)	0.77 (0.72)	0.76 (0.718)	0.76 (0.716)	0.04	0.16
$D_P: D_S$	25.31	9.41	8.11	7.71	7.51	7.4	0.93	1.07

色散对偏振的影响不大。例如主虹彩带中，红色光的偏振度为0.92，紫色光为0.94，其它各色光的偏振度在0.92~0.94之间。随着内反射次数的增多，虹的色散加强。在可见光波段，主虹的色散视宽度不到 2° ，而二次虹为 3° 多，十次虹的色散视宽度达十几度。色散减弱了虹的强度，这也是多次虹不易见到的原因之一。另外，在近红外光照射下，十次虹出现在正后向，光量大增，偏振度为0.757。此时 $i = 85.43^\circ$ 的环球带上的光被水滴折、反射，出射光平行于入射光，振动方向在光柱截面内，与以轴为圆心的圆切

线方向一致。

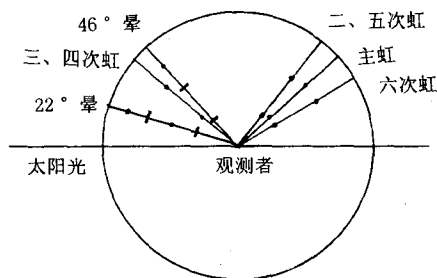


图1 几种现象的位置和偏振方式

假日环、日柱是太阳光在冰晶外表面的反射光，入射角有一定的变化范围，除入射角很大或很小时，反射光均具有一定的偏振度，其中 i 在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 范围内，反射光偏振度均较大。 $i = i_b = 53^\circ, P = 1$ 。

3 结论和讨论

(1) 在虹的方向上，不仅有形成虹的最小偏向角光线，而且还有一些杂散光^①。后向散射方向的杂散光较弱，对虹的偏振的影响较小；前向散射方向上杂散光强，对虹的影

响很大，如三次虹、四次虹根本不可显现。另外，最小偏向角光线强，虹抗干扰能力就强，反之则弱。远场中主虹、二次虹的偏振度不易改变。

(2) 虹的偏振与介质相态、形状等有关。冰虹的偏振度较水虹为小，出现的位置也不同。 K 越大，两类介质虹的偏向角相差越大。 $K = 6$ ，冰虹接近于正后向，其最小偏向角为 194° 。云中冰雹、冰粒多为不透明，其偏振方式与透明介质不同。

(3) 晕的偏振度较小，但它的光较强，杂散光的干扰显得很微弱。

(4) 尽管一些现象的偏振度可用菲涅耳公式确定，但其强度计算必须借助 Mie 理论。本文的计算说明，偏振在激光测云系统中具有重要影响。

致谢：本项目得到陕西省气象局及王万瑞、吕从中同志的大力支持和热情帮助。论文写作过程中，陈君寒老师提出很多宝贵意见并被采纳，在此一并致谢。

参考文献

- 1 范少卿，郭富昌. 物理光学. 北京：北京理工大学出版社，1990：186.
- 2 A·slingo. 气溶胶与辐射的相互作用. 气象科学讲座选编. 南京气象学院编译出版，1982：38.

Polarization of Some Atmospheric Optical Phenomena as Rainbow and Halo

Zhang Houfa Ruan Shiwen

(Shangnan Meteorological Office, Shaanxi Province 726300)

Zhou Junyuan

(Shangluo Meteorological Office, Shaanxi Province)

Abstract

After the first observation on polarization of rainbow, the features of some atmospheric optical phenomena such as rainbow and halo, etc. were analysed. Fresnel formula can be used to calculated poporization angles. The results show as follows, all kinds of angles are far from the same each other. the main rainbow and minor one are respectively 0.93 and 0.81. The difference between repeated rainbows is also sharp by above 0.75. The 46° -halo angle is 0.16, while 22° disc halo's is only 0.04. There is a certain variation limit for angles of the false solar circle and solar column with incident angle. Rainbow, false solar circle and solar column are reflective polarizaton, mainly characterized by vibration verticle to incident plane. Halo 46° and disc halo 22° are refractive ones, mainly characterized by vibration parallel to incident plane. In the end, polarizaton of "water rainbow" and "ice rainbow" were discussed emphatically.

Key Words: rainbow halo atmospheric optics polarization

^①式(2)中，令 $\frac{dV_k}{di} = \alpha$, α 为扩散角。 $\alpha = 0$ 时，为最小偏向角光线，也称迪卡尔光线。在正圆球形透明介质四周，广泛分布着另一些光线，它们的扩散角 $\alpha \neq 0$ ，为区别于最小偏向角光线，故称杂散光。