

文章编号: 0253-2239(2006)04-0630-4

非球形大气粒子对任意波束的电磁散射特性*

韩一平 杜云刚

(西安电子科技大学理学院应用物理系, 西安 710071)

摘要: 研究大气中变形球状的气象粒子对电磁波以及激光的散射特性,采用广义米氏(Mie)理论,精确地求解在任意波束中大气粒子的散射强度,数值计算激光束腰位置对散射强度分布的影响,分析彩虹强度和散射角与变形球状粒子偏心率的关系,研究随着长短轴比例增加,彩虹强度峰值的偏移。计算结果表明雨滴在下降过程中,它在各个方向的光散射强度逐步减弱,即随着雨滴偏心率的增大,散射强度减少,彩虹角变大。对于激光入射,当粒子距离波束中心位置越远,粒子的散射就越弱,并且随尺寸参量增加,后向散射振荡的频率要大于前向散射,当束腰位置矢径的大小增加时,后向散射和前向散射强度均变小。

关键词: 物理光学; 电磁散射; 米氏理论; 波束

中图分类号: O436 文献标识码: A

Electromagnetic Scattering for a Non-Spherical Aerosols with Arbitrary Shaped Beam

Han Yiping Du Yungang

(School of Science, Xidian University, Xian 710071)

Abstract: The electromagnetic scattering properties of spheroidal aerosols are investigated. The numerical values of the scattering intensity under arbitrary shaped beam illumination of aerosols are evaluated by using a generalized Lorenz-Mie theory. The distribution of the scattering intensity is given as the function of the position of the laser beam waist. The dependence of rainbow intensity and scattering angle on ellipticity of the spheroidal aerosols is analyzed and a shift of the main peak with the increase of ratio a/b is observed. The calculation shows that in the falling process of the raindrop, the scattering intensity of all directions decreases gradually, in other words, the scattering intensity decreases and the rainbow angle expands with the rise of ellipticity of the raindrop. In the case of laser incidence, the farther of the aerosol is from the laser beam center, the weaker the scattering intensity is. With the scale parameter increasing, the oscillating frequency of the back scattering is larger than that of the forward scattering, and both of them decrease with the increase of the radius vector magnitude of the laser beam waist.

Key word: physical optics; electromagnetic scattering; Mie theory; shaped beam

1 引 言

在自然界遇到的许多小粒子,如雨滴、冰晶、雪花、气溶胶粒子等大气中的悬浮粒子以及生物医学中的人体细胞等都是非球形粒子。自从利用激光作为通信、雷达遥感、测距和探测目标的手段以来,大气粒子在传输中对光的散射和吸收作用就愈来愈受到重视。例如在环境科学中,光的谱散射和吸收可以用来探测大气中的特定污染物,也可通过对大气

悬浮微粒对光波的散射的测量而监测大气污染。在处理许多实际问题时,为了研究问题方便起见,经常采用一些简化模型,如将粒子简化为球形、柱形、椭球等等。雨滴在下落过程中,由于空气阻力和下落速度增大,常常变形为椭球状,在云中出现的各种冰晶常常是球状、椭球状、柱状或片状的。Gouesbet等^[1]研究了球形粒子对高斯波束的散射。Mishchenko等^[2]用T矩阵方法研究了椭球粒子在

* 国家自然科学基金(60371019)和教育部优秀青年教师资助课题资助课题。

作者简介: 韩一平(1963~),女,浙江萧山市人,教授,博导,主要从事电磁波和光波在介质中传播方面的研究。

E-mail: yphan@xidian.edu.cn

收稿日期: 2004-11-01; 收到修改稿日期: 2005-03-01

平面波中的散射问题,Shoji Asano^[3]利用分离变量法,求解了椭球粒子在平面波中的散射,我们课题组研究了椭球粒子对任意波束的光散射特性,提出了任意波束在椭球坐标系中的展开系数^[4~8]。

在本文中,主要研究椭球形大气粒子的光散射特性,比较粒子偏心率不同,对散射强度影响,研究

激光光束中心位于不同位置时,粒子的散射特性。

2 理论方法

根据广义米氏理论,我们把入射电场用椭球谐波函数展开^[3,7]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}^i &= E_0 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} i^n [G_{n,TE}^m(c) \mathbf{M}_{enn}^{r(1)}(c, \zeta, \eta, \phi) + iG_{n,TM}^m(c) \mathbf{N}_{enn}^{r(1)}(c, \zeta, \eta, \phi)], \\
 \mathbf{E}_{TE}^w &= E_0 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} i^n \{ \delta_{n,TE}^m \mathbf{M}_{enn}^{r(1)}[c^{(II)}, \zeta, \eta, \phi] + i\gamma_{n,TE}^m \mathbf{N}_{enn}^{r(1)}[c^{(II)}, \zeta, \eta, \phi] \}, \\
 \mathbf{E}_{TE}^s &= E_0 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} i^n \{ \beta_{n,TE}^m \mathbf{M}_{enn}^{r(3)}[c^{(I)}, \zeta, \eta, \phi] + i\alpha_{n,TE}^m \mathbf{N}_{enn}^{r(3)}[c^{(I)}, \zeta, \eta, \phi] \},
 \end{aligned}$$

对平面电磁波或任意形状的波束,均可用波束因子 $G_{n,TE}^m, G_{n,TM}^m$ 描述^[7]:

$$\begin{aligned}
 G_{n,TE}^m &= i^{-m} N_{mm}^{-1} \sum_{r=0,1}^{\infty} \frac{2(r+2m)!}{(2r+2m+1)r!} i^{-r} d_r^{mm} g_{r+m,TE}^m, \\
 G_{n,TM}^m &= i^{-m} N_{mm}^{-1} \sum_{r=0,1}^{\infty} \frac{2(r+2m)!}{(2r+2m+1)r!} i^{-r} d_r^{mm} g_{r+m,TM}^m,
 \end{aligned}$$

根据边界条件,借助上述场的展开式,可以得到粒子的散射场(TE Mode)

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}_{TE}^s &= \frac{i\lambda^{(1)}}{2\pi r} \exp\left[i \frac{2\pi r}{\lambda^{(1)}}\right] \left\{ - \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} \left[\alpha_{n,TE}^m \frac{dS_{nm}(\cos \theta)}{d\theta} + \beta_{n,TE}^m m \frac{S_{nm}(\cos \theta)}{\sin \theta} \right] (\sin m\phi) \mathbf{a}_\eta + \right. \\
 &\quad \left. \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} \left[\alpha_{n,TE}^m m \frac{S_{nm}(\cos \theta)}{\sin \theta} + \beta_{n,TE}^m \frac{dS_{nm}(\cos \theta)}{d\theta} \right] (\cos m\phi) \mathbf{a}_\phi \right\}.
 \end{aligned}$$

3 数值计算

我们采用 Matlab,以及 Fortran 语言对粒子散射进行数值计算,将椭球波函数本征值和本征函数简化为一个对称矩阵方程的求解,根据所得到的本征值,数值计算任意波束用椭球波函数展开的系数以及椭球粒子在波束中的散射强度的分布^[7,8]。

数值计算结果已经过多方面验证。程序可以计算平面电磁波以及任意波束入射时粒子的散射特性。所能够计算的粒子的尺寸参量(粒子的有效半

径与波数之比)已突破 1000。图 1 是我们程序的流程,图 2 是在计算中所需要输入的参量。图 3 是数值结果的输出界面。

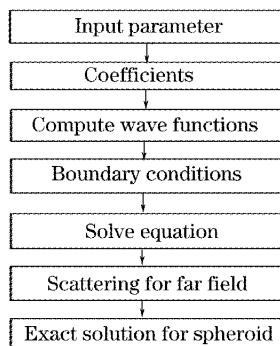


图 1 程序的流程

Fig. 1 Flow chart of the program

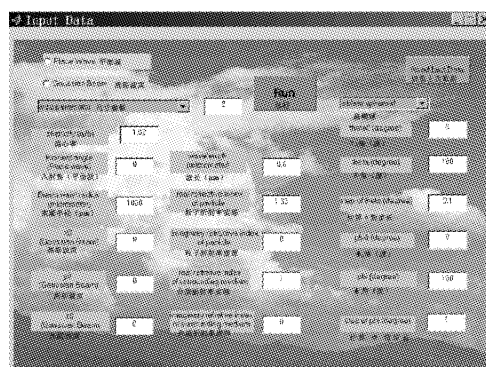


图 2 输入参量的界面

Fig. 2 Interface of the input parameters

大气中水滴粒子在下落过程中,由于受重力作用,引起的水滴粒子形状发生变化,即偏心率的增加。图 4 给出不同偏心率雨滴的散射强度的比较: $[w_0 = 2 \mu\text{m}, a/b = 4, 2, 1.000001, \alpha = 30, \tilde{n} = 1.33, (x'_0, y'_0, z'_0) = (1, 1, 1)]$,可以看出,随着雨滴偏心率的增大,散射强度减少。即粒子在下降过程中,它

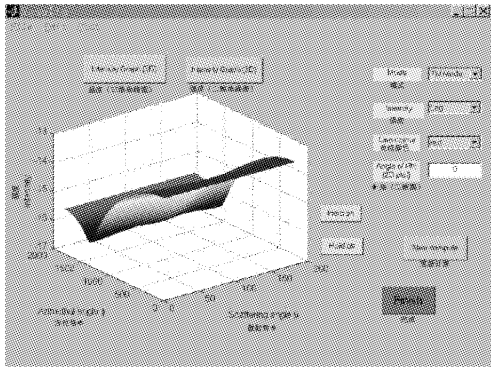


图 3 输出结果界面

Fig. 3 Interface of the output results

在各个方向的光散射强度逐步减弱。

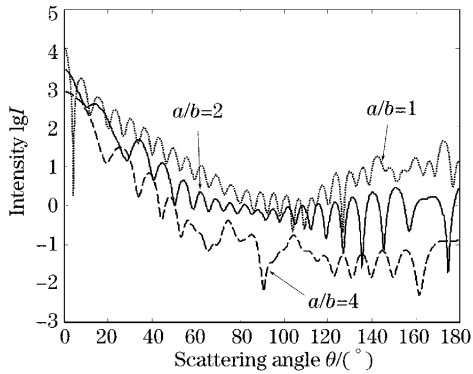


图 4 不同偏心率雨滴的散射强度的比较

Fig. 4 Scatlering intensity versus ellipticity of the raindrop

根据粒子在散射时的彩虹角位置,可以测量一些具有对称性分布的粒子的折射率和直径,精度较高,因此可以作为一种探测粒子的折射率或温度的方法。在图 5 中我们比较水滴由于偏心率不同对彩虹角的影响,从图中看出,随着偏心率的增大,水滴的彩虹角变大。

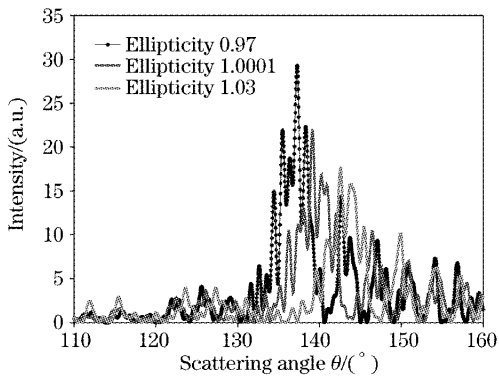


图 5 偏心率不同对彩虹角的影响

Fig. 5 Influence of ellipticity on the rainbow angle

随着激光技术的发展,在许多实验中都采用激光作为光源,如采用激光相多普勒实验,根据粒子的散

射强度分布,研究粒子的形状、尺寸、折射率和运动速度。因此研究粒子对高斯光的散射是近几年的研究热点。图 6 中给出了激光照射粒子,离高斯光束中心不同位置的水滴粒子的散射强度,粒子相应的参量是:折射率 $\tilde{n}=1.33$,高斯光束束腰半径 $w_0=2 \mu\text{m}$,长短轴之比 $a/b=2$,粒子的尺寸参量 $\alpha=30$ 。粒子中心位置 $(x'_0, y'_0, z'_0)=(0,0,0), (1,0,0), (1,1,1)$ 。

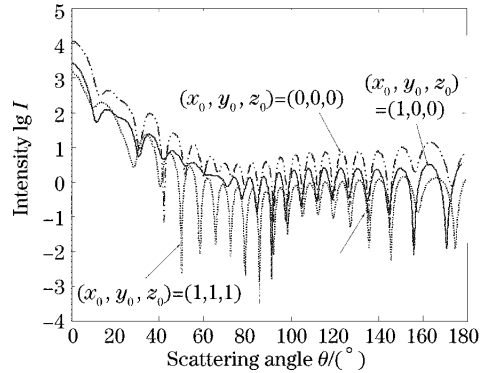


图 6 距离高斯光束中心不同位置的水滴粒子的散射强度

Fig. 6 Scattering intensity of the drip with different positions referring to the Gaussian beam center

在激光雷达对粒子测量中,粒子对电磁波的前向和后向散射特性是所感兴趣的一个主要方面。图 7 给出了波束在不同位置时的前向散射和后向散射: $[a/b=1.2, \tilde{n}=1.33, w_0=3\lambda$ at $(x'_0, y'_0, z'_0)=(0,0,0), (1,0,0), (1,1,1)]$ 。从图中可以看出,随尺寸参量增加,后向散射振荡的频率要大于前向散射,当束腰位置矢径的大小增加时,后向散射和前向散射强度均变小。

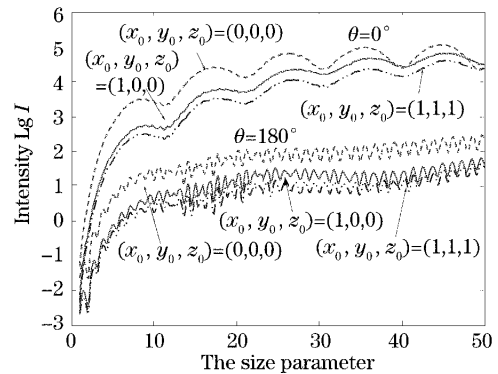


图 7 波束在不同位置时的前向散射和后向散射

Fig. 7 Forward and back scattering with different positions of the shaped beam

从图 6、图 7 可以看出,当粒子距离光束中心位置越远,粒子对激光的散射就越弱。

图 8 是非极化高斯光束散射在 $\phi-\theta$ 平面的三维散射分布,和其相应的等值线图: $[w_0=5\lambda,$

$(x'_0, y'_0, z'_0) = (0, 0, 0)$, $a/b = 1.2$, $\alpha = 50$, $\tilde{n} = 1.33$].

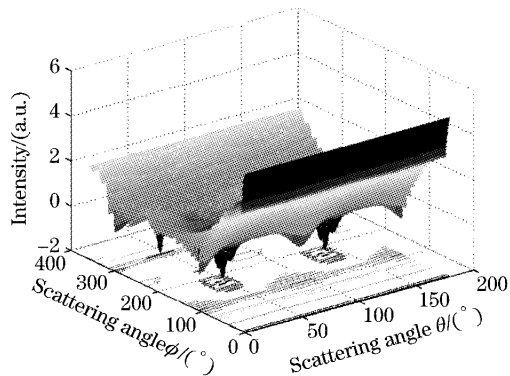


图 8 非极化高斯波束散射在平面的三维散射分布

Fig. 8 Three-dimensional distribution of scattering of the nonpolarized Gaussian shaped beam in the ϕ - θ plane

4 结 论

本文给出了计算非球形粒子的散射分布的数值结果。结果表明雨滴在下降过程中,它在各个方向的光散射强度逐步减弱,即随着偏心率的增大,散射强度减少,而彩虹角变大。对于激光入射,当粒子距离波束中心位置越远,粒子的散射就越弱。随尺寸

参量增加,后向散射振荡的频率要大于前向散射,当束腰位置矢径的大小增加时,后向散射和前向散射强度均变小。理论及其计算程序适用于计算粒子在高斯光中的散射和平面波中的散射。

参 考 文 献

- 1 G. Gouesbet, B. Maheu, G. Gréhan. Light scattering from a sphere arbitrarily located in a Gaussian beam, using a Bromwich formulation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(): 1427~1443
- 2 M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier, L. D. Travis. *Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications* [M]. San Diego: Academic Press
- 3 S. Asano, G. Yamamoto. Light scattering by a spheroidal particle [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(1): 29~49
- 4 C. F. Bohren, D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. John Wiley & Sons, 1983. 83~97
- 5 Y. Han, Z. S. Wu. Scattering of a spheroidal particle illuminated by a Gaussian beam[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**: 2501~2509
- 6 Han Yiping, Wu Zhengsheng. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(1): 57~60 (in Chinese)
韩一平,吴振森. 椭球粒子电磁散射的边界条件的讨论[J]. *物理学报*, 2000, **49**(1): 57~60
- 7 Yiping Han, Gerard Gréhan, Gerard Gouesbet. Generalized Lorenz-Mie theory for a spheroidal particle with off-axis Gaussian beam illumination[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(33):
- 8 Y. Han, Z. S. Wu. The expansion coefficients of a spheroidal particle illuminated by Gaussian beam[C]. *IEEE Transactions on Antennas and Transactions*, 2001, **49**: 615~620