

文章编号: 0253-2239(2004)11-1561-5

均匀球形液滴二阶和五阶彩虹的重建及应用

姜会芬¹ 韩香娥¹ 任宽芳² 潘凤艳¹ MEES Loic²

(¹ 西安电子科技大学理学院, 西安 710071
² UMR 6614/CORIA, CNRS-Université et INSA de Rouen, BP 12, 76801 Saint Etienne du Rouvray, France)

摘要: 从理论和实验两方面研究了不同温度下球形液滴的彩虹强度分布及在粒度测量中的应用。研究结果表明折射率为 1.33 附近液滴在 117°~134° 散射角范围内的散射强度分布不是单一的二阶彩虹强度分布,而是二阶和五阶彩虹的干涉强度分布。基于散射强度频谱特点,提出了一种从干涉强度谱中重建二阶和五阶彩虹强度分布的方法:逆快速傅里叶变换(IFFT)。利用洛伦兹-米理论(LMT)模拟计算了温度为 20 °C 和 80 °C 下水粒子二阶彩虹的高频结构与粒子直径的关系,获得了经验公式。该关系式可用来测量确定温度下均匀水粒子直径。还利用激光彩虹测试系统测量了水柱二阶彩虹角度范围内的散射强度分布。上述理论研究结果与实验结果进行了比较,两者吻合得很好。基于上述研究,可以从单一阵列探测器获取的彩虹信号提取不同阶次彩虹分布,用于液滴多参量的反演测量。

关键词: 物理光学; 粒度测量; 光散射; 彩虹; 洛伦兹-米理论

中图分类号: O436 文献标识码: A

Reconstruction of Intensity of the Second and Fifth Rainbows and Its Applications to Homogeneous Droplet

Jiang Huifen¹ Han Xiang'e¹ Ren Kuanfang² Pan Fengyan¹ MEES Loic²

(¹ School of Science, Xidian University, Xian 710071
² UMR 6614/CORIA, CNRS-Université et INSA de Rouen, BP 12, 76801 Saint
Etienne du Rouvray, France)

(Received 16 October 2003; revised 3 March 2004)

Abstract: This intensity distribution of rainbow at different temperature and its application in grain size measure are investigated theoretically and experimentally. The results show that scattering intensity distribution of droplet is not simply second-order rainbow distribution while refractive index is around 1.33 with scattering angle between 117° and 134°, but the interference distribution between second-order and fifth-order rainbow. According to the spectral characteristics of scattering intensity, the method of reconstructing intensity of the second order and fifth order rainbows from interference intensity spectrum is presented; inverse FFT. The relationship between ripple frequency of second order rainbow and grain diameter is simulated at 20 °C and 80 °C respectively by Lorenz-Mie theory, therefore the experimental formula is obtained to measure the diameter of homogeneous droplet at a certain temperature. The intensity distribution at second rainbow angles of droplets has been measured. The experimental result is in good agreement with the theoretical simulation. Based on this, the information of different orders of rainbow from the signal collected by only one detector is extracted.

Key words: physical optics; particle sizing; light scattering; rainbow; Lorenz-Mie theory

1 引 言

粒度分析的光散射法以其快速、非接触测量等

优点日益受到人们的重视。目前已提出并发展了许多测量粒子尺寸及数密度的方法,如消光法、角谱法、相多普勒法、成像技术及彩虹技术等。近十年来,彩虹技术作为一种重要的工具,已经被用于探测液滴的折射率和温度;该测量技术对于燃烧室或蒸

E-mail: huifen-jiang@163.com

收稿日期:2003-10-16;收到修改稿日期:2004-03-03

气过程中的液滴折射率、尺寸和非球形度的测量具有重要的意义。

利用彩虹技术测量均匀粒子直径和折射率的方法已经被很多学者研究,并且得到了广泛的应用^[1~3]。James Hom 等人也利用彩虹折射率仪分析了粒子的尺寸、温度和折射率的同时测量方法。目前彩虹测量技术主要利用的是一阶彩虹的艾里分布、高频结构(波纹结构)与粒子直径和折射率的关系。二阶彩虹虽然其强度大约只有一阶彩虹强度的10%,随着 CCD 器件性能的不断改善与提高,被用于粒子参量的测量是完全可能的^[4]。本文针对均匀水粒子二阶彩虹强度分布特点以及在粒度测量中的应用进行了理论和实验研究。

2 不同温度下球形液滴二阶彩虹角范围的强度和频谱分布特点

水粒子一阶彩虹的强度分布和频谱特点已经被广泛地研究和应用。本文主要研究不同温度下均匀水粒子二阶彩虹角度范围内的强度分布特点及应用。

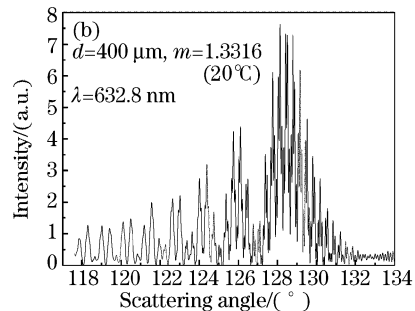
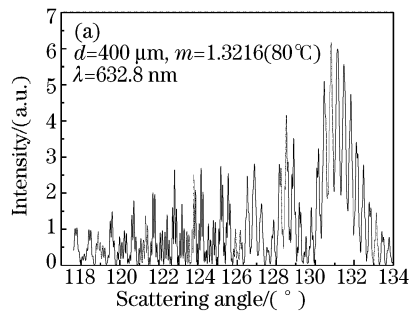
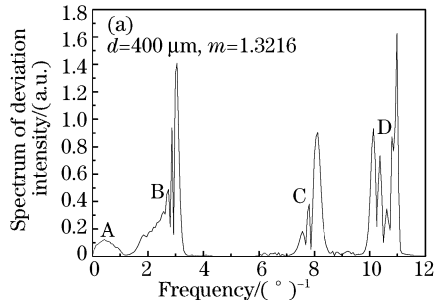


Fig. 1 Intensity distribution simulated by Lorenz-Mie theory for droplet $d=400 \mu\text{m}$ between 117° and 134° .

(a) $m=1.3216$, (b) $m=1.3316$

利用快速傅里叶变换方法,可得到对应于图 1 的强度微分频谱,结果见图 2。从图 2 可看出,强度微分的频谱分布不同于以往人们对二阶彩虹的频谱分布的认识^[6,7],二阶彩虹频谱可以分为 A、B、C、D 四部分。根据 van de Hulst 对其的解释,A 为对应于二阶彩虹艾里分布的频谱,B 为二阶彩虹高频结



构的频谱,C 和 D 两部分解释为表面波对二阶彩虹的影响。但是如果仅仅考虑表面波的影响,C 和 D 两部分频谱的幅值没有这么强,而且也不会与粒子的折射率有如此明显的关系。我们对该现象进行深入研究,C 和 D 两部分频谱随折射率明显变化且不同于传统二阶彩虹的原因是在该散射角范围内存在

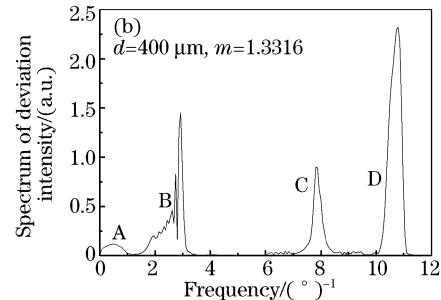


Fig. 2 Spectrum structure of deviation intensity corresponding to Fig. 1. (a) $m=1.3216$, (b) $m=1.3316$

五阶彩虹的影响。下面本文将从粒子散射的几何光学理论、洛伦兹-米理论、德拜理论几个方面说明 C 和 D 两部分产生的原因。

根据彩虹的几何光学理论,几何光学彩虹角与折射率密切相关^[6],我们数值模拟了一阶、二阶和五阶彩虹的几何光学彩虹角随折射率的变化关系,结果见图 3。从图 3 中可以看出,折射率为 1.30~1.40 范围内,一阶、五阶彩虹的几何光学彩虹角随折射率的增大而增大,二阶彩虹的几何光学彩虹角随折射率的增大而减小,不同阶次的几何光学彩虹角在某些折射率处可能相等,例如二阶和五阶彩虹的几何光学彩虹角在折射率 $m=1.334$ 时,它们的几何光学彩虹角相等,大小为 128.9° 。根据物理光学,几何光学角附近的出射光线由于相互干涉形成彩虹的强度角分布,因此二阶和五阶彩虹的散射强度分布将会有一定的重叠区域,产生不同阶次彩虹分布之间的干涉。由此可以初步得出结论:温度分别为 20°C 和 80°C 时,直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的水粒子在 $117^\circ\sim 134^\circ$ 散射范围内的散射强度分布是二阶和五

阶彩虹的相干分布。

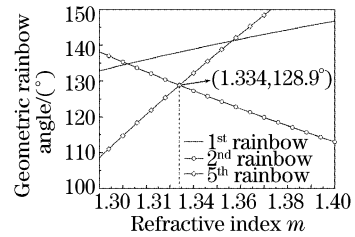


Fig. 3 Refractive index

对图 2 所示的散射强度频谱利用低通和带通滤波的方法分别对 A、B、C 三部分进行逆快速傅里叶变换强度重建。图 4(a)分别给出了对图 2(a)中频谱 A [频率小于 $1.2\ (\text{°})^{-1}$] 和 (A+B) [频率小于 $4\ (\text{°})^{-1}$] 重建的结果。频谱 A 重建分布为二阶彩虹的低频艾里分布,频谱 (A+B) 重建分布为二阶彩虹的强度分布。图 4(b)给出了 C [频率大于 $7.3\ (\text{°})^{-1}$ 而小于 $8.6\ (\text{°})^{-1}$] 部分频谱进行强度重建的结果。类似的,我们还可以对图 2(b)的频谱进行逆快速傅里叶变换重建,得到对应的二阶和五阶彩虹的强度分布。

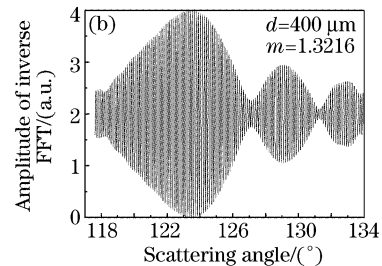
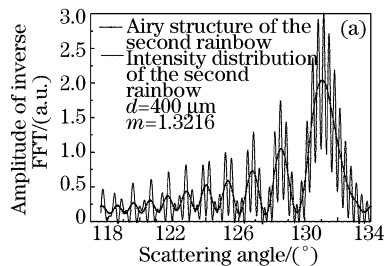


Fig. 4 Amplitudes of second and fifth rainbow from scattering intensity simulated

利用球粒子光散射的德拜理论^[8]模拟计算了 $d=400\ \mu\text{m}$ 的水粒子二阶和五阶彩虹的强度分布,散射角范围为 $117^\circ\sim 134^\circ$,模拟结果见图 5(a)和图 5(b)。比较图 4 和图 5,可以看出德拜理论模拟的

二阶彩虹和五阶彩虹的强度分布与利用强度谱重建 $m=1.3216$ 的水粒子在 $117^\circ\sim 134^\circ$ 范围内的强度分布吻合得很好,尤其是彩虹的各个艾里峰角位置吻合得很好。

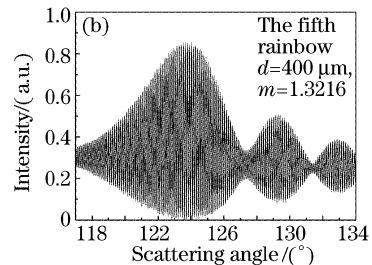
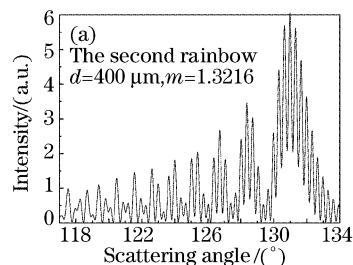


Fig. 5 Intensity distribution simulated by Debye theory. (a) The second rainbow, (b) the fifth rainbow

综上所述,一定温度下均匀水粒子在 $117^\circ\sim 134^\circ$ 范围内的散射强度分布是二阶彩虹和五阶彩虹的相干强度分布。利用低通和带通滤波重建的方法可以将二阶和五阶彩虹分离出来,可同时获得独立

的二阶和五阶彩虹的强度分布信息。与一阶彩虹一样,二阶和五阶彩虹的艾里分布、高频结构等信息均可用于粒子粒度分析,这为粒子直径和折射率的测量提供了多种途径。

3 二阶彩虹在粒度分析中的应用

如前言所述,目前均匀球粒子折射率和尺寸参数的彩虹测量方法主要依据一阶彩虹的信息,如一阶彩虹低频艾里分布、高频结构及频谱等。各阶彩虹强度分布不仅与粒子直径有关,还与粒子的折射率有关,因此可以用来测量粒子的直径和折射率。本文作者之一韩香娥在文献[2]中着重研究了均匀粒子直径和折射率的同时测量方法,其测量原理基于一阶彩虹的高频频率 f_{ripple} 与直径 d 和折射率 m 的关系,测量精度很高。

利用洛伦兹-米理论,我们模拟计算了不同温度下的水粒子二阶彩虹的高频频率 $f_{\text{ripple}2}$ 与直径的关系, $f_{\text{ripple}2}$ 为图 2 中 B 部分的最大值。模拟结果见图 6。模拟条件:粒子折射率分别为 1.3216 和 1.3316 (对应的温度分别为 80 °C 和 20 °C),直径从 100 μm 到 2000 μm ,直径间隔为 5 μm ,入射光为波长 $\lambda = 632.8 \mu\text{m}$ 的平面波。从图 6 中我们可以看出,对于折射率一定的水粒子, $f_{\text{ripple}2}$ 与直径呈线性关系, $f_{\text{ripple}2}$ 随着直径的增大而增大,并且增加的快慢与粒子的折射率有关。利用线性拟合,得到不同折射率(温度) $f_{\text{ripple}2}$ 与直径 d 的线性关系:

$$f_{\text{ripple}2} = Kd, \quad (1)$$

其斜率 K 与折射率(温度)有关, K 随折射率增大而增大。其中 $m = 1.3216$ 时, $K = 0.00768$; $m = 1.3316$ 时, $K = 0.00734$ 。由于均匀粒子的直径和折射率均影响二阶彩虹 $f_{\text{ripple}2}$,我们可以利用二阶彩虹 $f_{\text{ripple}2}$ 、艾里峰角位置等信息综合进行粒子直径、折射率的测量,这是粒子参量测量的又一条途径。

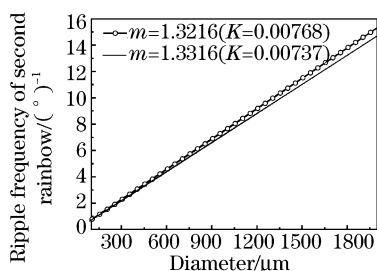


Fig. 6 Relationship between the ripple frequency of the second rainbow and the droplet diameter ($m = 1.3216$ and $m = 1.3316$)

对于给定折射率的均匀粒子,利用 $f_{\text{ripple}2}$ 测量粒子直径还有一个突出的优点,由于是借助 $f_{\text{ripple}2}$ 测量直径,而通过强度分布确定 $f_{\text{ripple}2}$ 时,只须测量散射强度角分布的散射角度范围 $\Delta\theta$ 大小,而不需要确切的散射角分布的绝对角位置,即不需要对散射强

度角位置进行定标,这就使得测量过程更易于实现。

4 实验结果

为了验证上述理论研究,我们利用法国 UMR 6614/CORIA 光学实验室的激彩虹测试系统,测量了均匀液柱二阶彩虹角度范围内的强度分布,实验装置结构示意图见图 7。纯净水经一个内径 600 μm 、长度为 50 cm 的金属管流出,形成约 50~60 mm 长的液柱,其中距离管口 30 mm 内的液柱为非常稳定且截面近于理想圆形的液柱。氦氖激光经一维准直扩束后垂直照射液柱,利用线阵 CCD 系统进行散射光强角分布的测量。

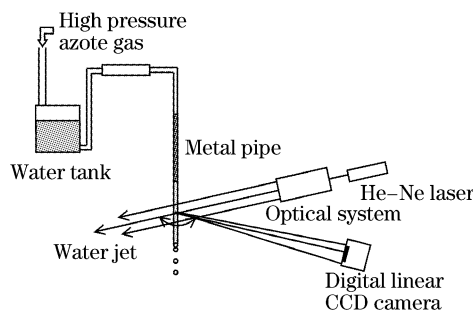


Fig. 7 Scheme of the experiment system

图 8(a) 给出了液柱二阶彩虹角范围的散射强度角分布测量结果。具体测试条件为:测量液体温度为 20 °C,出水管内径 600 μm ,照射光束位置距离金属管口 6 mm,照射光波波长 632.8 nm,测试条件下水折射率为 1.3316;CCD 共 2048 探测单元,每个单元宽 13 μm 、高 50 μm ,CCD 中心至液柱距离 10.7 cm,CCD 对液柱张角大小为 14.18°,测量范围 118°~132.2°。测量的散射强度角分布对应的频谱分布见图 8(b)。与理论模拟结果一样,图 8(a) 所示的二阶彩虹范围内的强度分布除了二阶彩虹的低频艾里分布和高频结构之外,还存在有其他更高频率成分。该结果在图 8(b) 的频谱分布显示得更清楚,更高频率成分对应于该均匀液柱五阶彩虹及二阶和五阶彩虹的相干频谱。我们同样可以利用强度频谱低通和带通滤波后逆快速傅里叶变换的方法分别重建二阶和五阶彩虹分布。对图 8(b) 频率小于 6 ($^\circ$)⁻¹ 部分进行逆快速傅里叶变换重建,可获得重建的二阶彩虹强度分布,结果见图 9。图 8(b) 中二阶彩虹的高频频率 $f_{\text{ripple}2}$ 大小为 4.18 ($^\circ$)⁻¹,利用(1)式,其中斜率 $K = 0.00734$,反演得到该位置液柱直径为 570 μm ,这与借助一阶彩虹测得的直径 571 μm 吻合很好。

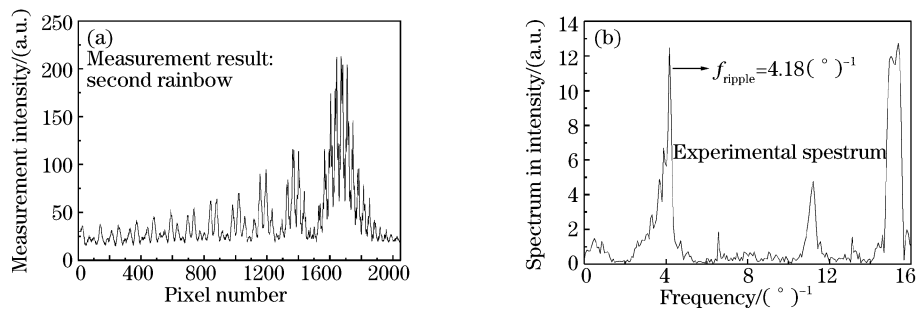


Fig. 8 Scattering intensity measured between $118^{\circ}\sim 132.2^{\circ}$ for a water jet of $d=571\ \mu\text{m}$.

(a) Intensity distribution, (b) spectrum of deviation intensity

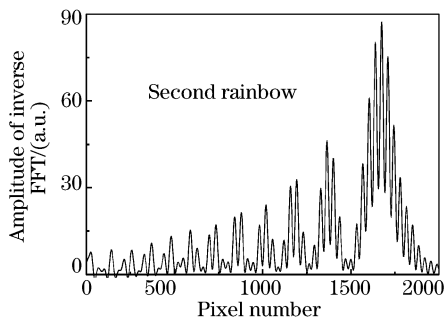


Fig. 9 Amplitudes of inverse FFT of second rainbow from measured intensity

从上述实验测量强度角分布及频谱特点、对二阶彩虹强度分布的重建以及利用 $f_{\text{ripple}2}$ 测量液柱直径的结果来看,证实了折射率为 $m=1.3316$ 均匀液柱在散射角范围为 $117^{\circ}\sim 134^{\circ}$ 内的散射强度角分布为二阶和五阶彩虹的干涉强度;利用二阶彩虹 $f_{\text{ripple}2}$ 测量粒子直径是可行的。

结论 通过对不同温度下水粒子在 $117^{\circ}\sim 134^{\circ}$ 散射角范围内散射强度的研究表明:对于均匀水粒子,上述散射角范围内散射强度分布不是单纯的二阶彩虹,而是二阶和五阶彩虹的干涉强度分布。利用对强度频谱进行低通和带通滤波后逆快速傅里叶变换强度重建的方法,可从干涉强度分布中分离出二阶和五阶彩虹,这些彩虹分布对于水粒子多参量同时测量提供了非常丰富的信息。对于均匀水粒子二阶彩虹快速傅里叶变换频率与粒子直径关系研究表明,二阶彩虹的高频频率与直径也是线性关系,其斜率与粒子的折射率有关。确定温度下,可利用实验测量的二阶彩虹快速傅里叶变换频率获得粒子的直径。本文的理论研究和实验测量是针对水粒子进行的,但其研究结果对于其他液滴如酒精、航空煤油和柴油等液滴的彩虹测量具有指导意义。由于不同液体具有不同的折射率,它们的二阶彩虹范围内的散射强度可能是单纯的二阶彩虹,也可能是二阶彩虹

与其他高阶彩虹的干涉强度分布,如酒精的折射率约为 1.36,其二阶彩虹角范围内强度分布不受其他彩虹分布的影响;而航空煤油折射率约为 1.46,其二阶彩虹角范围内强度分布将受四阶彩虹的影响。无论液滴二阶彩虹角范围内是否存在其他高阶彩虹的影响,其范围内的强度谱中的二阶彩虹谱都将非常清晰,二阶彩虹的快速傅里叶变换频率容易准确获取,利用二阶彩虹的快速傅里叶变换频率测量液滴直径是一种精度高且易于测量的实验方法。

参 考 文 献

- 1 James Hom, Norman Chigier. Rainbow refractometry: Simultaneous measurement of temperature, refractive index, and size of droplets. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10): 1899~1907
- 2 Han X. *Study of Refractometry of Rainbow and Applications to the Measurement of Instability and Temperature Gradient of a Liquid jet*. [Ph. D. thesis], France: Rouen University, 2000
- 3 van Beeck J. *Rainbow phenomena: development of a laser-based, non-intrusive technique for measuring droplet size, temperature and velocity*. [Ph. D. thesis] Technische University Eindhoven: The Netherlands, 1997. ISBN, 90-386-0557-9. NuGI 812
- 4 Han Xiang'e, Wu Zhensen. Measurement of first and second rainbow of liquid jet and fiber, proceedings of the 3rd international conference on fluid dynamic measurement and its applications, Beijing, China, 1997. 45~50
- 5 Thormahlen I, Straub J, Grigull U. Refractive index of water and its dependence on wavelength, temperature, and density. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1985, **14**(4): 933~945
- 6 van de Hulst H C. *Light Scattering by Small Particles*. New York: Dover Publications, 1983. 353,368
- 7 Han Xiang'e, Ren Kuanfang, Mees Loic. Surface waves/geometrical rays interferences: Numerical and experimental behaviour at rainbow angles. *Opt. Commun.*, 2001, **195**(4): 49~54
- 8 Hovenac E A, Lock J A. Accessing the contributions of surface waves and complex rays to far-field Mie scattering by use of the Debye series. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1992, **9**(5): 781~795