第10卷 第 3 邦	月 月 Journal of Nanjing Institute	Vol.10, No.3
1987 年 9 月	of Meteorology	Sep., 1987

水滴和冰球后向散射截面的

实验研究

王庆安 钱 珉 王景岚

(南京大学大气科学系)

(南京大学信息物理系)

本文介绍了3.2cm 微波后向散射测量系统、水滴和冰球对微波后向散射截 面的实验测定及观测值与理论计算值的初步比较。结果表明:水滴和冰球对微 波后向散射特性基本符合理论计算结果。

随着雷达气象学由定性向定量的发展和大气遥感学科的发展,准确地了解单个粒子 散射特性是非常必要的。描述球形介质粒子散射特性的Rayleigh和Mie理论是常用的基 础理论。它是在理想情况下由纯理论导出的,与实际情况符合的程度,应该用实验手段 来验证。国外曾先后有Tolbert,J.R、在8、6—4.3mm波长、Aden,A.L.在16.23cm波 长、Labrum,N.R.在10cm波长和Gerhardt,J.R.等在3.2cm波长作了实验测定^[1]。 国内尚无报道。我们建立了3.2cm微波后向散射测量装置,作了对水球和冰球的初步测 试工作,并将实验结果和理论计算值作了比较。

一、Mie 后向散射截面实用计算公式

由于制作水球和冰球的模子作得较大,只进行了 Mie 区的实验。我们对普球形介质 粒子 Mie后向散射截面(σ_{Mie})^[2]使用下列实、虚部分开的计算公式[•],进行理论计算。

$$\sigma_{\text{Mie}} = \frac{\pi}{k^2} \left\{ \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \left(a_n^{(r)} - b_n^{(r)} \right) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \left(a_n^{(i)} - b_n^{(i)} \right) \right]^2 \right\}$$
(1)

¹⁹⁸⁶年5月23日收到,7月27日收到修改稿

[•] 中国科学院大气物理研究所需达组, 球形雨滴和冰雹的微波散射函数表(第一册), 38-45, 内部材料,1978

式中

5

3 期

$$\begin{cases} a_{a}^{(r)} = \frac{\alpha_{a}\gamma_{a} + \beta_{a}\delta_{a}}{\alpha_{a}^{2} + \beta_{a}^{2}} \\ a_{a}^{(i)} = \frac{\alpha_{a}\delta_{a} - \beta_{a}\gamma_{a}}{\alpha_{a}^{2} + \beta_{a}^{2}} \end{cases}$$
(2)

$$\mathcal{X} = \left(x A_{a}^{(r)} + n u \right) \left(R W_{a}^{(r)} - I W_{a}^{(i)} \right) - \left(x A_{a}^{(i)} - n v \right) \left(I W_{a}^{(r)} + R W_{a}^{(i)} \right) - W_{a-1}^{(r)} \\
\beta_{a} = \left(x A_{a}^{(r)} + n u \right) \left(I W_{a}^{(r)} + R W_{a}^{(i)} \right) + \left(x A_{a}^{(i)} - n v \right) \left(R W_{a}^{(r)} - I W_{a}^{(r)} \right) - W_{a-1}^{(i)} \\
\gamma_{a} = W_{a}^{(r)} \left[\left(x A_{a}^{(r)} + n u \right) R - \left(x A_{a}^{(i)} - n v \right) I \right] - W_{a-1}^{(r)} \qquad (3) \\
\delta_{a} = W_{a}^{(r)} \left[\left(x A_{a}^{(i)} - n v \right) R + \left(x A_{a}^{(r)} + n u \right) I \right]$$

$$\begin{cases} b_{a}^{(r)} = \frac{\alpha_{1n}\gamma_{1n} + \beta_{1n}\delta_{1n}}{\alpha_{1n}^{2} + \beta_{1n}^{2}} \\ b_{a}^{(i)} = \frac{\alpha_{1n}\delta_{1n} - \beta_{1n}\gamma_{1n}}{\alpha_{1n}^{2} + \beta_{1n}^{2}} \end{cases}$$
(4)

4

$$\overline{m} \begin{bmatrix} \alpha_{1u} = \left(x A_{a}^{(r)} + n u_{1} \right) \left(R_{1} W_{a}^{(r)} - I_{1} W_{a}^{(i)} \right) - \left(x A_{a}^{(i)} - n v_{1} \right) \left(I_{1} W_{a}^{(r)} + R_{1} W_{a}^{(i)} \right) - W_{a-1}^{(r)} \\ \beta_{1a} = \left(x A_{a}^{(r)} + n u_{1} \right) \left(I_{1} W_{a}^{(r)} + R_{1} W_{a}^{(i)} \right) + \left(x A_{a}^{(i)} - n v_{1} \right) \left(R_{1} W_{a}^{(r)} - I_{1} W_{a}^{(i)} \right) - W_{a-1}^{(i)} \\ \gamma_{1a} = W_{a}^{(r)} \left[\left(x A_{a}^{(r)} + n u_{1} \right) R_{1} - \left(x A_{a}^{(i)} - n v_{1} \right) I_{1} \right] - W_{a-1}^{(r)} \end{bmatrix}$$
(5)
$$\delta_{1a} = W_{a}^{(r)} \left[\left(x A_{a}^{(i)} - n v_{1} \right) R_{1} + \left(x A_{a}^{(r)} + n u_{1} \right) I_{1} \right]$$

公式(3)、(5)中,x=ka, k为波数, a为球形散射体半径, W^(r)、W⁽ⁱ⁾、A^(r)、A⁽ⁱ⁾可 由下列递推公式求得

$$\begin{cases} W_{n}^{(r)} = \frac{2n-1}{x} W_{n-1}^{(r)} - W_{n-2}^{(r)} \\ W_{n}^{(i)} = \frac{2n-1}{x} W_{n-1}^{(i)} - W_{n-2}^{(i)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_{0}^{(r)} = \sin x & W_{0}^{(i)} = \cos x \\ W_{-1}^{(r)} = \cos x & W_{-1}^{(i)} = -\sin x \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_{a}^{(r)} = \frac{nR - A_{a-1}^{(r)}}{\left[nR - A_{a-1}^{(r)}\right]^{2} + \left[nI - A_{a-1}^{(i)}\right]^{2}} - nR \\ A_{a}^{(i)} = \frac{nI - A_{a-1}^{(i)}}{\left[nR - A_{a-1}^{(r)}\right]^{2} + \left[nI - A_{a-1}^{(i)}\right]^{2}} + nI \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_{0}^{(r)} = \frac{\sin p \cos p}{\sin^{2} p + \sin^{2} q} \end{cases}$$

$$\left(A_{0}^{(i)} = \frac{\operatorname{shq} \operatorname{chq}}{\sin^{2} p + \operatorname{sh}^{2} q} \right)$$

以上式中, p、q、R、I、u、v、R₁、I₁、u₁、v₁ 系按如下定义。

取m为复折射指数,则m=u-iv, mx=p-iq, R=u/x(u²+v²), I=v/x(u²+v²), R₁=u/x, I₁=-v/x, u₁=u/(u²+v²), v₁=-v/(u²+v²)

按上列各式,即可由给定的参数m和 a,编制程序,计算出 o_{Mie}。

二、后向散射测量系统和测量技术

我们用实验室微波元器件作出微波后向散射测量装置(见图1、2)。采用3.2cm 微波 源,由速调管配上通用速调管电源而成,也可以用现成的整机式源。隔离器可减少反射 对源工作状态的影响。波长计用于测量频率和监测其漂移。衰减器用于调试时控制能量 输出的多少。因使用同一喇叭天线发射和接收讯号,故采用魔T隔离入射讯号与回波讯 号。对于理想魔T,E臂和H臂的隔离度应无限大。从3端入射的能量经1端被匹配负 载吸收,经2端输出,入射到目标物上。

由于实际魔T的隔离度非无限大,3端的输入能量会部分地泄漏到4端,4螺钉调 **配器**T₂可用来使1端产生部分反射能量来抵消泄漏能量。

为了使回波能量全部由2端进入,不在2端口产生部分向外反射,使用了4螺钉调 配器T₁。调配时,接可移动短路活塞产生全反射。

尽管有吸收材料(图 2 中喇叭的正前方),测量放大器也会收到一定的背景反射能量,调配4螺钉调配器T₃,产生附加反射以抵消背景噪声。

测量前,要对微波源及整个通道进行严格调试,才能检测出单个粒子产生的微弱后 向散射讯号。调试中,微波源的谐振腔电压和反射极电压要加得很恰当;波长检测可用 波长计法,也可用导波长法;调配T₁、T₃可采用跟踪最小值逐步逼近法;调配T₂需接可 移动吸收负载[•]。



图2 装置实物图

水球是用精心吹制的薄壁圆玻璃球盛水制成(见图3)。从5mm—22mm成一个系列。 玻璃的相对复介电常数 ε 的实部约为 5,比ε_水 小得多。空薄壁玻璃球的反射能量很小, 且该系列中不同尺寸玻璃球的反射能力差不多,其影响可作为背景反射,通过T₃的调配 予以消除。

冰球是采用液氮制冷冻结而成,尺寸也成一个系列。 水球和冰球的直径(D)可用下式定出

$$D = D_{\overline{x}\overline{n}\overline{x}} - 2d$$

d 为玻璃球的薄壁厚度。

为了验证此装置的可靠性,利用了2-20mm的金属圆球系列,其实验测量值与理论 计算值比较符合。金属球后向散射截面按下式计算^[3]

• 同前

,

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{4\pi} \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n+1)}{\widehat{H}_n^{(2)} (ka) \widehat{H}_n^{(2)} (ka)} \right]^2$$
 (6)

式中H_a⁽²⁾(ka)是汉克函数。



三、测量结果

实际测量出水球和冰球的一系列回波功率P,值,考虑到P,与 o 的关系[4]



 $P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 r^4} \cdot \sigma \quad (7)$

式中P₄:发射功率,G;天线 增益,r:散射体距天线的距 离。令P₁G² $\lambda^2/(4\pi)^3$ r⁴=A, 当将目标物置于同一r处测 量,可视A为定值,则 σ/σ_0 =P_r/P_{r0},P_{r0}是参考球的回 波功率, σ_0 是参考球的后向 散射截面。实际上,只要按测 量放大器的表头示值就可以 算出相对散射截面(σ/σ_0)。

我们在距天 线 口 径 面 r=3.8cm和r=5.2cm处, 测量出几批数据,分别算出

水球和冰球的σ/σ₀值,点绘在图 4 - 6 中。

为与理论值比较,使用(1)式,按实验时测定的水球和冰球温度.给出相应的m值, 计算出一系列后向散射截面σ值。同时选一最小的金属球(或水、冰球)作参考球,计算

10卷

出其散射截面值 σ_0 。以 σ_0 作归一化标准,求出水球的相对后向散射截面值 σ/σ_0 ,点绘出 σ/σ_0 一D的理论曲线,见图4、图5。同样,点绘出冰球的理论曲线,见图6。



四、初步结论

从图 4 看,两次实验结果,一次普遍在理论曲线上方,一次基本在下方,但都靠近 理论曲线。偏上或偏下是系统误差的影响,可能是两次测试时,入射能量有变化等所致。 从图 5 看,在距天线较远处(r=5.2cm),大球和小球的测量值基本上都紧 靠 理 论

10卷

*

曲线: 在距天线较近处(r=3.8cm),小水球的测量值与理论值符合程度较好,较大水 球符合程度差。从图6可见,在近距离处测量,冰球的测量值与理论值符合程度也呈现 小球较好,大球次之。对此,初步认为在较近距离处,小球比大球能较好满足远场条件。

不论水球或是冰球,初步结果表明:实验值对理论曲线的离散程度不大,与理论结果比较符合,这与Gerhardt的结果^[1]基本一致。

在测试冰球过程中,多次仔细观察了冰球溶化外包水膜时的后向散射情况,发现回 波能量变化的情况与文献[1]中的结论一致,即薄的水膜对冰球的后向散射性能似乎没有 产生什么明显影响。

五、说 明

实验中,我们注意到用微量注射器制造微小水滴,经喇叭口中心一定距离处下滴时,能观察到较明显的回波讯号。如配备示波器,用示波照相技术,可以更真实地模拟水滴试验和进行Rayleigh区后向散射截面的实验测定。对3.2cm的源,若用一个直径大于20cm的金属球作为定标球,在较远距离测定P,,可以测定出后向散射截面的绝对量。由于一时条件限制,未能进行这些工作。

本实验装置如进一步完善,可以进行较精细的实验研究。用高灵敏度接收机代替测量放大器,配上屏蔽罩,在冬季用金属模制作裸露冰球,可用以验证外包水膜冰球和冰水交错混合球的散射特性。还可用于非球形粒子(如较大的雹块、雪花等)散射偏振特性的实验研究。相应改换元器件,可以推广到5cm、10cm等波长,进行类似的实验研究。

参考文献

- [1] Gerhardt, J.R., etc., Experimental determinations of the back-scattering cross-sections of water drops and of wet and dry ice spheres at 3.2 centimeters, J. Met., Vol.2 (1961), 340-347.
- [2] Stephens, J.J., Radar cross-sections for water and ice spheres, J. Met., Vol. 18(1961), 348-359.
- [3] 哈林登, R.F.著, 孟侃译, 正弦电磁场, 318页, 上海科学技术出版社, 1964.
- [4] Barclay, P.A., etc., An assessment of the overall gain of the melbourne weather radar system, Proceedings, 12 Conference on Radar Meteorology, p. 78, AMS, 1966.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF BACK-SCATTERING CROSS-SECTIONS OF WATER AND ICE SPHERES AT 3.2 CENTIMETERS

Wang Qingan[•] Qian Min^{••} Wang Jinglan^{••}

ABSTRACT

A system for measuring back-scattering of microwaves at 3.2 cm is presented. The back-scattering cross-sections of water and ice spheres are measured by the system and the measurements are found to be in good agreement with the theoretically computed values.

[·] Affiliated with the Dept. of Atmospheric Sciences, Nanjing University

[&]quot;Affiliated with the Dept. of Information Physics, Nanjing University