

# 粒子的电磁波散射

粒子与电磁波相互作用产生的独特散射模式可以描述粒子的特性。光散射测量涵盖了一系列广泛应用，例如气象学、粒子大小测量、生物医学和超材料等。

作者：SERGEI YUSHANOV、JEFFREY S. CROMPTON 和 KYLE C. KOPPENHOEFER (ALTASIM TECHNOLOGIES)

在电磁波通过物质时，它们会与粒子或杂质相互作用扰动局部电子分布。这种变化会在粒子内产生周期性的电荷分离，导致局部感应偶极矩发生振荡。这种周期性加速度会起到电磁辐射源的作用，从而产生散射。

## 粒子大小会有影响

粒子引起的电磁波散射可以通过两种理论框架描述：适用于无能量吸收的球形介电小粒子的瑞利散射，以及球对与粒子大小无关的一般散射情况提供通解的米氏散射。当粒子很大时，米氏散射理论会过渡到几何光学的极限。因此，米氏散射理论可以用于描述球形粒子引起的大多数散射，包括瑞利散射，但由于其计算的复杂性，通常偏向于使用瑞利散射理论。

当粒子大小大于入射波长的大约 10% 时，瑞利散射模型就会失效，此时必须采用米氏散射理论。米氏散射的解通过解析求解球形粒子电磁波散射的麦克斯韦方程组得到；它以无穷级数的形式而不是简单数学表达式进行建模。

米氏散射与瑞利散射有几个方面的不同：它在大多数情况下与波长无关，并且散射强度在向前方向上大于

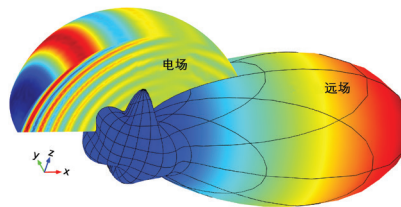


图 1：x 方向入射波的米氏散射产生的电场，可以看到向前方向的散射增强了。

相反的方向（见图 1）。粒子大小越大，向前散射的光就越多。除了光散射的许多大气效应之外，米氏散射的应用还包括环境模型（例如大气中的尘埃粒子和水中的油滴）以及用于测量生物系统中的细胞核或身体组织中的胶原纤维的医疗技术。

## 米氏散射

得到粒子或物体引起的米氏散射的解析解是非常复杂的，需要求解包括入射场、散射场和内部场的麦克斯韦方程组。它们采用矢量球谐函数的无穷级数展开形式，可用于预测散射截面、效率因素和强度分布。此外，还可以研究粒子形状、波的入射角和粒子材料属性的影响。

在电磁波散射问题中，总的电磁

波可分解为入射波和散射波的叠加。从散射场中可以获得重要的物理量之一就是截面，它可以定义为穿过以粒子为中心的虚拟球表面的电磁能量与入射波辐射功率 ( $P_{inc}$ ) 的比值。为了计算被粒子吸收的电磁能量 ( $W_{abs}$ ) 和散射的电磁能量 ( $W_{sca}$ ) 的比例，吸收截面 ( $\sigma_{abs}$ )、散射截面 ( $\sigma_{sca}$ ) 和消光截面 ( $\sigma_{ext}$ ) 定义为：

$$\sigma_{abs} = \frac{W_{abs}}{P_{inc}}, \quad \sigma_{sca} = \frac{W_{sca}}{P_{inc}}, \quad \sigma_{ext} = \sigma_{abs} + \sigma_{sca}$$

吸收的总能量通过在粒子体积上对能量损耗进行积分得到。散射的能量通过在包围粒子的虚拟球体上对坡印廷矢量进行积分得到。

## 计算电磁学

研究人员利用 COMSOL Multiphysics®

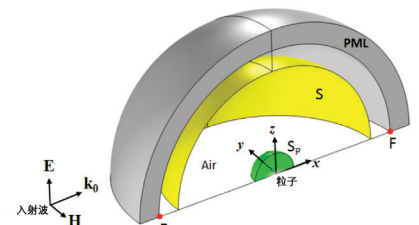


图 2：球形粒子引起的米氏散射的模型几何。

及其 RF 模块设计了米氏散射的计算模型，求解半径为  $a$  的介电、磁性或金属球形粒子的散射。模型几何如图 2 所示。

空气域通过插入的完美匹配层 (PML) 截断，将模型范围限制在感兴趣的有限区域。该域内的解不会受到引入的 PML 影响，得到的求解与无

限大求解域下的结果一致。PML 层会吸收所有出射的波能量，不存在任何可能在边界上导致杂散反射的阻抗不匹配。PML 对于将求解保持在所需精度级别同时节省计算资源非常有用。COMSOL 同时支持远场计算，这通过在 PML 域的内边界处对近场积分得

到。面  $S$  用于计算散射的总能量。入射平面波沿  $x$  轴正方向传播 (见图 2)，而电场沿  $z$  轴极化。 $x$ - $z$  和  $x$ - $y$  对称平面上分别使用完美磁导体 (PMC) 和完美电导体 (PEC) 边界条件。入射到球上的平面波通过其幅值、空气中的波矢和角频率定义。COMSOL 提供了计算散射积分所需的所有方便功能。图 3、4 和 5 显示了三种不同粒子的散射特性。计算得到的结果与实际实验结果良好吻合<sup>1</sup>。

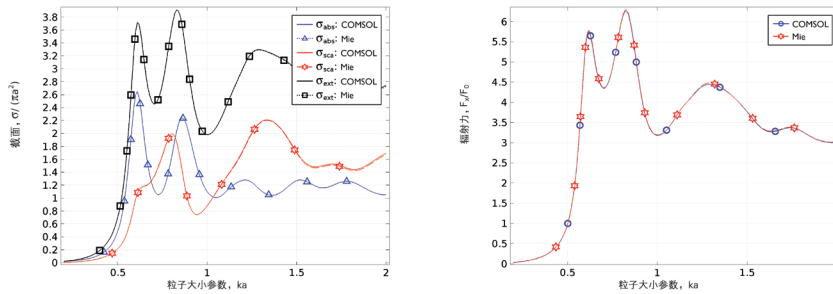


图 3：介电粒子的截面参数和辐射力，折射率  $n=5-0.4j$ ，相对磁导率  $\mu=1$ 。

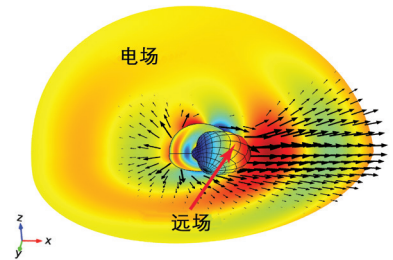


图 6：半径  $0.1 \mu\text{m}$  的粒子对入射电磁波散射产生的电场  $z$  分量的分布。箭头显示了频率为  $950 \text{ THz}$  时，相对电场的时均功率流。

米氏散射问题的仿真可以帮助研究人员可视化微小粒子对于入射电磁波的影响 (见图 6)，以便更好地了解其相互作用。■

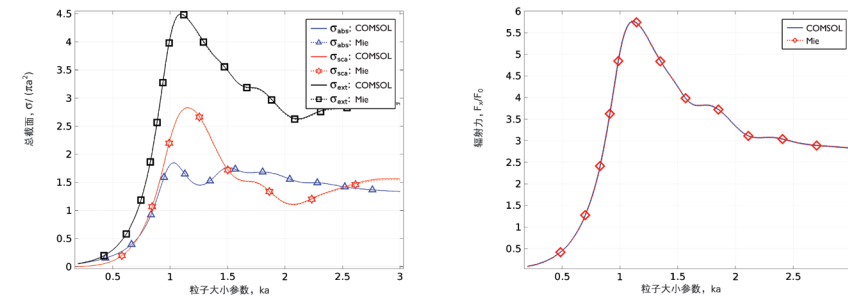


图 4：磁性粒子的截面参数和辐射力，相对介电常数  $\epsilon=1$ ，相对磁导率  $\mu=8-2j$ 。

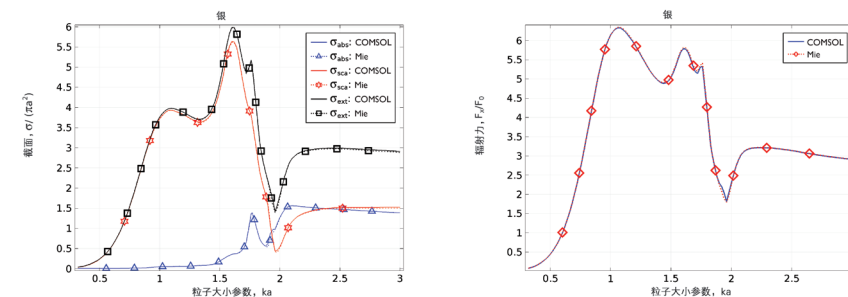


图 5：银粒子的截面参数和辐射力，介电常数恒定。

## 参考文献

<sup>1</sup> Mätzler, C., MATLAB Functions for Mie Scattering and Absorption, Version 2, IAP Research Report, (Bern: Institut für angewandte Physik, Universität, 2001), No. 2002-11.