

辐射传输：从唯象到第一性原理

吴自华¹, 秦其明¹

1. 北京大学 地球与空间科学学院 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871

摘要: 在回顾经典辐射传输理论的发展历程的基础上, 本文对辐射传输理论与经典电磁理论的联系方面的研究工作进行了系统综述: 从十九世纪八十年代提出至今, 辐射传输理论已经过了一百多年的发展, 并在诸多领域, 尤其是定量遥感中得到了广泛的应用。经典辐射传输理论是一种唯象的近似理论, 虽然描述的是电磁辐射的传播过程, 但却长期被视为与经典电磁学相独立的一座“孤岛”。为了建立起辐射传输理论和经典电磁学间的联系, 从二十世纪六十年代开始, 众多研究者从第一性原理 (也即 Maxwell 方程组) 出发, 从理论推导、数值模拟和受控实验三个角度展开了一系列研究, 据此进一步明确了辐射传输理论的适用范围和条件, 并针对相干后向散射和密集介质等情形提出了一些改进的辐射传输方法。展望未来, 这一探索仍将继续, 并将促进辐射传输理论与电磁理论的进一步结合, 从而更好地服务于定量遥感的应用需求。

关键词: 辐射传输 唯象 第一性原理 经典电磁学 Maxwell 方程组

中图分类号: TP701 **文献标志码:** A

引用格式: 吴自华, 秦其明. 2022. 辐射传输: 从唯象到第一性原理.

1 引言

辐射传输理论在天体物理(Chandrasekhar, 1950; Peraiah, 2002)、工程热物理(Howell 等, 2010)、计算机图形学(Glassner, 1989)、生物医学成像(Wang 和 Wu, 2012)、遥感(Verhoef 等, 1998; 秦其明等, 2018)等众多领域都是重要的基础理论之一。在定量遥感中, 辐射传输理论的应用尤为广泛。在植被遥感领域, 辐射传输模型是重要的冠层方向性反射率 (发

射率)模型之一(Kuusk, 2018), 也是诸多计算机模拟模型的理论基础(Gastellu-Etchegorry 等, 2004); 在大气遥感领域, 辐射传输模型是研究大气中气体分子和各种粒子 (包括水滴、冰晶、气溶胶颗粒等) 与电磁辐射相互作用的通行方法(Wendisch 和 Yang, 2012); 此外, 在海洋遥感(Mobley, 2001)、冰雪遥感(Mishchenko 等, 1999; Royer 等, 2017)、土壤遥感(Schmugge, 1983; Bablet 等, 2018; Sadeghi 等, 2018)等领域, 也往往基于辐射传输理论来构建研究对象的反射率或发射率模型, 在此基础上开展正向模拟

收稿日期: 修回日期:

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42071314)

第一作者简介: 吴自华 (1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为定量遥感理论。E-mail: wuzihua@pku.edu.cn

通信作者: 秦其明 (1955—), 男, 教授, 研究方向为定量遥感与地理信息系统。E-mail: qmqin@pku.edu.cn

和参数反演。 61 验的方法来对经典辐射传输理论和精确的电磁计算
 经典辐射传输理论是一种唯象的近似理论 62 或测量结果进行比较(Mishchenko 等, 2007, 2013;
 (Wolf, 1976; Mishchenko, 2014b), 这里的“唯象”指 63 Voit 等, 2009), 以得到定量的结果。
 的是基于对实验现象的概括和提炼, 而非从基本物 64 令人遗憾的是, 长期以来众多遥感领域的专著
 理原理(也即“第一性原理”)出发, 通过严格的理 65 和教科书对于辐射传输理论的物理基础没有给予足
 论推导得到。虽然经典辐射传输理论被广泛用于研 66 够的重视, 往往只是从能量守恒角度给出辐射传输
 究电磁辐射在不同介质中的传输过程和能量收支, 67 方程的唯象推导, 而未能揭示其深层的电磁学基础。
 它与经典电磁学或更加精确的量子电动力学之间并 68 为此, 本文的主要内容安排如下: 在第二节中, 对经
 没有明显的关联。Preisendorfer (1965)曾做出过这样 69 典辐射传输理论的发展历程进行回顾; 在第三节中,
 的比喻: 电磁理论是“大陆”, 而经典辐射传输理论 70 从理论推导、数值模拟和受控实验三个方面系统地
 则是“大陆”之外的一座“孤岛”。由于从一开始就 71 介绍现有的对辐射传输理论与电磁学之间联系的研
 只考虑了电磁辐射的能量而非电磁场的场量, 经典 72 究, 并简要介绍将辐射传输理论向密集介质进行推
 辐射传输理论无法描述电磁波的干涉和衍射等现象 73 广的有关工作; 最后, 在第四节中, 对辐射传输理论
 因此无法用来表征相干后向散射/弱定域性(Wolf 和 74 的未来发展作出展望。

Maret, 1985; Liang, 1997; Mishchenko 等, 1999;
 Kaasalainen 等, 2006)。此外, 对于介质中散射体的
 占空比较高的密集介质(一般认为占空比高于 10%
 可称为密集介质), 经典辐射传输理论也不适用
 (Tsang 和 Ishimaru, 1987; 金亚秋, 1992)。

想要明确辐射传输理论的适用范围和适用条件,
 并进行机理性的修正, 必须从第一性原理出发。从
 上世纪六十年代起, 就有一系列研究者尝试从
 Maxwell 方程组出发推导辐射传输方程或与其具有
 相似形式的方程式。目前得到普遍认可的是
 Mishchenko (2002, 2010)和 Mishchenko 等 (2006)给
 出的离散随机介质(Mishchenko 等, 2016)情形下的推
 导。此外, 也有很多研究者采用数值模拟或受控实

2 经典辐射传输理论

辐射传输理论的起源可以追溯到十八世纪的光
 度学研究。当时, 法国科学家 Bouguer 和瑞士科学
 家 Lambert 对光在半透明介质中的传播进行了系统
 的研究, 并归纳提出了著名的指数衰减定律, 也即
 Lambert-Bouguer 消光定律(Bouguer, 1729, 1760;
 Lambert, 1760):

$$I(s) = I(0) \cdot \exp \left[- \int_0^s \kappa_e(s') ds' \right] \quad (1)$$

式中 I 为辐亮度, κ_e 为消光系数。消光定律描述了在
 不考虑多次散射和发射贡献时, 准直辐射的光束在
 传播过程中的辐亮度衰减。Bouguer 和 Lambert 因此
 被视为让光度学真正成为一门科学的奠基人。在他

86 们之后, 十九世纪时, Beer (1854)在对溶液光学性质
87 的研究中, 进一步将浓度引入了消光定律, 这是对
88 光度学的一个重要补充。

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}})}{d\hat{\mathbf{q}}} = \hat{\mathbf{q}} \cdot \nabla I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}) = -\kappa_e I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}) + \mathcal{E}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}) + \int d\Omega' I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}') p(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{q}}') \quad (2)$$

89 在长期的光度学研究的积累之上, 十九世纪末, J. von Lommel (1887)和 Khvolson (1889)分别提出了积分形式的辐射传输方程, 但他们的工作在较长的一段时间里没有得到足够的重视。反倒是后来 Schuster (1905)对辐射在雾中传播的研究, 被很多人认为是辐射传输方程的首次提出。实际上, 他所提出的是我们现在所熟知的对辐射传输方程的二流近似。Schwarzschild (1906)、Eddington (1916)以及 Milne (1921)等从天体物理的角度, 对恒星辐射平衡进行了一系列研究, 并提出了 Schwarzschild-Milne 积分方程和 Eddington 近似等概念, 这些工作也为辐射传输理论的建立打下了重要的基础。

113 其中 $I(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}})$ 为辐亮度, κ_e 为消光系数, $\mathcal{E}(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}})$ 为热辐射项, $p(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{q}}')$ 则表示了其他方向向 $\hat{\mathbf{q}}$ 方向的散射相函数。式(2)的含义是一目了然的, 也即辐亮度的变化量是消光造成的削减、其他方向带来的散射增强与热辐射增强三者效应的累加。式(2)中, 没有考虑光的偏振, 这一形式的辐射传输方程被称为标量辐射传输方程。如果考虑光的偏振, 则需要将式中的辐亮度和热辐射项分别替换为对应的 Stokes 矢量, 并将消光系数和散射相函数分别替换为消光矩阵和散射相矩阵, 这样得到的辐射传输方程就被称为矢量辐射传输方程。

101 早期的辐射传输方程中, 只考虑了光强, 而没有考虑偏振。Gans (1924)最早考虑了偏振光在平面平行的 Rayleigh 散射大气中的传播问题, 但仅仅考虑了垂直入射的情形; Sobolev (1949)对 Rayleigh 散射情形下的偏振光传播和散射也进行了深入的研究任意入射角度和任意偏振状态的情形, 最终由 Chandrasekhar (1950)解决。我们今天最为熟悉的积分-微分形式的辐射传输方程, 最早由 Rozenberg (1955)系统提出, 这标志着辐射传输理论的基本完成。在此之后, 值得称道的工作主要是 Tsang (1984)以及 Tsang 等(2000)在辐射传输方程中补充了热辐射项(或更一般的, 自身辐射项)。最终得到的方程如下:

125 经典辐射传输理论最主要的优势在于其简洁性 (Efremenko 和 Kokhanovsky, 2021)。一系列对辐射传输方程进行数值和近似求解的方法已相当成熟, 包括但不限于逐次散射法(Zhai 等, 2009)、累加倍加法(Prahl, 1995)、离散纵标法(Chandrasekhar, 1950; Siewert, 2000; Balsara, 2001)、球谐函数法(Benassi 等, 1984; Garcia 和 Siewert, 1986)、Monte Carlo 方法 (Bernes, 1979; Whitney, 2011)等。

虽然在辐射传输方程中并没有直接体现, 但经典辐射传输理论实际上依赖于独立散射假设 (Chandrasekhar, 1950)。在辐射传输方程的唯象推导中, 这一假设往往隐含在“光子”或“光线”的概念下。这里的“光子”概念来自于 Einstein 于 1905 年提出的“光量子”概念(Arons 和 Peppard, 1965), 而

138 “光线”概念来自于电磁学中的几何光学近似63 度出发，构建起来的另一套理论体系是波的多次散
 139 (Mishchenko 等, 2002)。这些“光子”或“光线”在64 射理论，也称为波的解析理论。波的多次散射理论
 140 介质中的传播被认为是彼此独立、互不影响的，这65 的众多研究成果，为从第一性原理出发的辐射传输
 141 样的传播过程也就被称为独立散射。当散射体在介66 理论推导提供了基础。
 142 质中的分布较为稀疏时，独立散射假设与实际的电67
 143 磁散射过程是比较符合的，因此经典辐射传输理论
 144 在这一情况下可以得到比较理想的结果；但随着散
 145 射体占空比的增加，介质逐渐由稀疏介质过渡到密
 146 集介质，散射体之间的相互作用和影响不再能忽略，
 147 独立散射假设就不再成立，而经典辐射传输理论在
 148 这一情况下也就遇到了问题(Tsang 和 Ishimaru, 1987;
 149 金亚秋, 1992)。

150 3 辐射传输与第一性原理

151 经典辐射传输理论直接描述的对象是电磁辐射177
 152 能量，而非电磁波。在宏观物体的范畴内，要让辐射
 153 传输理论从唯象走向第一性原理，就是要在辐射传
 154 输理论与以 Maxwell 方程组为基础的经典电磁学之
 155 间建立起联系。具体来说，要建立这一联系，有三条
 156 途径：理论推导、数值模拟和受控实验。其中，毋庸
 157 置疑，理论推导是最基础也是最根本的一条途径；
 158 而数值模拟和受控实验则从更接近实际应用的角度，
 159 提供了重要的补充。

160 3.1 理论推导

161 3.1.1 理论基础：波的多次散射理论

162 与辐射传输的能量视角相对的，从波和场的角

度出发，构建起来的另一套理论体系是波的多次散
 射理论，也称为波的解析理论。波的多次散射理论
 的众多研究成果，为从第一性原理出发的辐射传输
 理论推导提供了基础。

Foldy (1945)最早提出基于标量波动方程

$$(\nabla^2 + k_0^2)\psi(\mathbf{r}) = 0 \quad (3)$$

168 来考虑随机分布的散射体集合对波（并不局限于电
 169 磁波）的多次散射作用，其提出的基本假设和研究
 170 思路对之后的研究产生了深远的影响。Foldy (1945)
 171 研究的基本问题是：考虑 N 个位置和散射特性服从
 172 一定概率分布并相互独立的各向同性点状散射体，
 173 在已知这些散射体的散射特性和分布函数的条件下，
 174 由入射波 $\psi_0(\mathbf{r})$ 求出总场 $\psi(\mathbf{r})$ 在配置平均意义下的
 175 一阶矩和二阶矩（相关函数）。在求解这一问题的过
 176 程中，他创造性地提出将总场视为入射波 ψ_0 与 N 个
 散射体的散射波 ψ^i 的叠加：

$$\begin{aligned} \psi(\mathbf{r}) &= \psi_0(\mathbf{r}) + \sum_{i=1}^N \psi^i(\mathbf{r}) \\ &= \psi_0(\mathbf{r}) \\ &\quad + \sum_{i=1}^N g_i \psi^i(\mathbf{r}_i) A(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i) \end{aligned} \quad (4)$$

178 其中 g_i 是第 i 个散射体的散射函数， $A(\mathbf{r}, \mathbf{r}_i)$ 表示以 \mathbf{r}_i
 179 为源点的波在 \mathbf{r} 处的传播系数，在此处具有球面波
 180 $\frac{\exp(-ik_0 r)}{r}$ 的形式（因为所有散射体均被视为各向同
 181 性的点）；而另一方面，每个散射体的散射波又可以
 182 看成是这一散射体对入射波和其他散射体的散射波
 183 （也即总场减去该散射体的散射波）的散射，从而：

$$\psi^i(\mathbf{r}_i) = \psi_0(\mathbf{r}_i) + \sum_{j=1, j \neq i}^N g_j \psi^j(\mathbf{r}_j) A(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) \quad (5)$$

184 将式(5)代入式(4)中，容易看出对总场的这一分解可

185 以进一步迭代展开成一个无穷级数。这一形式的方12
186 程组后来被称为 Foldy-Lax 方程组。

187 上述的分解针对的是某一特定的配置（散射体14
188 的位置、取向和散射特性的某一特定取值组合），更15
189 进一步地，需要在配置平均的意义下进行研究，更16
190 具体地说，就是计算配置平均下总场的一阶矩 $\langle\psi(\mathbf{r})\rangle$ 17
191 和二阶矩 $\langle\psi(\mathbf{r})\psi^*(\mathbf{r}')\rangle$ 。Foldy (1945)推导得到的一阶18
192 矩和二阶矩满足的积分方程形式上分别与量子力学
193 中的 Dyson 方程(Dyson, 1949)和 Bethe-Salpeter 方程
194 (Salpeter 和 Bethe, 1951)类似(Barabanenkov 等, 1971)。

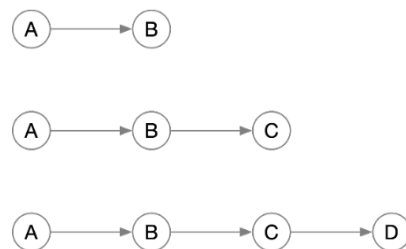
195 在 $N \rightarrow \infty$ 的极限下，使用 Liouville-Neumann 方法对
196 一阶矩和二阶矩满足的积分方程进行迭代展开，可
197 以得到它们各自的级数解，但如果要实际使用，必
198 须对级数进行截断。特别地，在该研究的条件下，可
199 以只保留级数的第一项。这一近似后来被称为 Foldy
200 近似，或有效场近似。

201 Lax (1951, 1952)引入有效场和平均场的比例系
202 数 c 作为修正因子，将 Foldy (1945)的方法进一步推
203 广到了非各向同性散射、非弹性散射和运动散射体
204 等情况下，并明确地将多次散射划分为相干散射和
205 非相干散射两部分，其中相干散射对应于散射场的
206 一阶矩的系综平均或配置平均，而非相干散射对应
207 于散射场的随机涨落。通过对液体和晶体性质的比
208 较，Lax (1952)提出了准晶体近似(Quasi-Crystalline

209 Approximation, QCA)，在 Foldy 近似的基础上多保
210 留一项，也即保留到级数的第二项。值得一提的是，
211 Watson (1953)论证了多体 Schrödinger 方程具有与

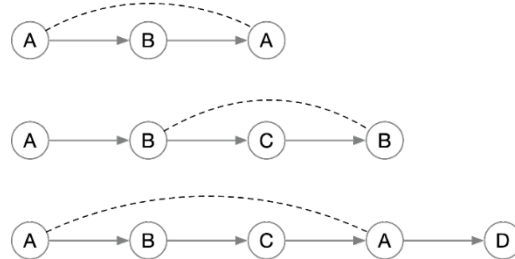
Foldy-Lax 方程组相似形式的严格解，从而揭示了波
213 的多次散射与量子力学中多体问题之间的联系。

Twersky (1964)将 Foldy 和 Lax 等的工作纳入到
一个系统的框架下，并提出在 $N \rightarrow \infty$ 的极限下，可以
忽略迭代式中多次包含同一散射体的项，从而将无
穷阶的展开式截断为至多 N 阶，这一近似后来被称
为 Twersky 近似（如图 1 所示）。



(a) 同一散射体至多出现一次

(a) Each scatterer occurs at most once



(b) 有散射体出现多次（被 Twersky 近似忽略）

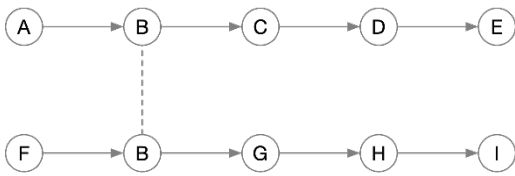
(b) Some scatterers occur more than once (omitted by Twersky approximation)

图 1 Feynman 图表示下的 Twersky 近似示意图。图中
每个不同的字母代表不同的散射体，虚线连接的表示
同一散射体。

Fig. 1 Twersky approximation illustrated conceptually using
Feynman diagrams. Different letters stand for different
scatterers, while dashed curves connect the same scatterer which
occurs more than once.

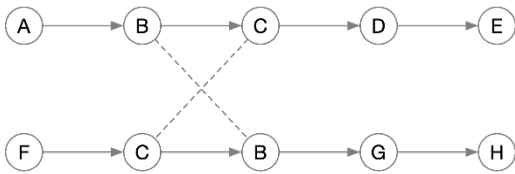
另一方面，对于二阶矩 $\langle\psi(\mathbf{r})\psi^*(\mathbf{r}')\rangle$ ，Borovoi
(1966)提出可以只考虑 $\psi(\mathbf{r})$ 和 $\psi^*(\mathbf{r}')$ 中不含相同散
射体，或所包含的相同散射体顺序相同的那些项，

222 也即所谓“阶梯项”，对应的 Feynman 图表示被称为
 223 “阶梯图”（如图 2a 所示）。与之对应的，含有相同
 224 散射体而顺序不同的项，则称为“交叉项”，对应的
 225 Feynman 图称为“交叉图”（如图 2b 所示）；特别地，
 226 当散射体顺序恰好完全相反时，对应的 Feynman 图
 227 称为“极大交叉图”（如图 2c 所示）。Borovoi 提出
 228 的这一想法，后来被称为阶梯近似。



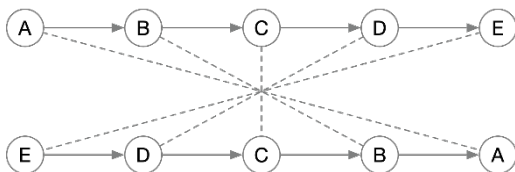
(a) 阶梯图

(a) Ladder diagrams



(b) 交叉图

(b) Crossed diagrams



(c) 极大交叉图

(c) Maximally-crossed diagrams

图 2 Feynman 图表示下的阶梯图和交叉图

Fig. 2 Ladder and cyclical diagrams illustrated using Feynman diagrams

Foldy 等的研究对象是标量场。将其推广到矢量
 场并不容易，因为对一个矢量场来说，散射体产生
 的散射场并不是直接与其所受到的外场作用成比例，
 而是与其旋度的旋度成比例(Foldy, 1945)。特别地，
 对于电磁场，Tsang 和 Kong (1980)和 Prishivalk 等
 (1984)借助并矢 Green 函数等数学工具，推导得到了
 矢量形式的 Foldy-Lax 方程组：

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) &= \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) \\ &+ \sum_{i=1}^N \int_{V_i} d^3\mathbf{r}' \vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \int_{V_i} d^3\mathbf{r}'' \vec{\mathbf{T}}_i(\mathbf{r}', \mathbf{r}'') \cdot \mathbf{E}_i(\mathbf{r}'') \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \sum_{j(\neq i)=1}^N \mathbf{E}_{ij}^{\text{exc}}(\mathbf{r}) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{ij}^{\text{exc}}(\mathbf{r}) &= \int_{V_i} d^3\mathbf{r}' \vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \\ &\cdot \int_{V_j} d^3\mathbf{r}'' \vec{\mathbf{T}}_j(\mathbf{r}', \mathbf{r}'') \cdot \mathbf{E}_j(\mathbf{r}'') \end{aligned} \quad (8)$$

并论证了其是电磁场的体积分方程的严格的解。其
 中， $\mathbf{E}_0(\mathbf{r})$ 表示入射场， $\mathbf{E}_i(\mathbf{r}'')$ 表示第*i*个散射体受到
 的激发场， $\mathbf{E}_{ij}^{\text{exc}}(\mathbf{r})$ 表示第*j*个散射体对第*i*个散射体产
 生的激发场， $\vec{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 表示并矢 Green 函数， $\vec{\mathbf{T}}_i(\mathbf{r}', \mathbf{r}'')$
 和 $\vec{\mathbf{T}}_j(\mathbf{r}', \mathbf{r}'')$ 是并矢散射算符。需要注意的是，虽然这
 里将电场（磁场）划分为了若干成分，这一划分并不
 具有实际的物理意义，而只是一种数学手段，实际
 存在的只有总场 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ ，不应把这里所说的电磁波的
 多次散射理解为“光子”或“光线”在散射体之间来

回碰撞的过程(Mishchenko, 2014b)。 272 下, 可以自然地假设散射体之间不存在相互影响,

246 由于波的多次散射理论与辐射传输理论的研究 273 也即散射体的位置和散射特性的分布都是随机并相

247 对象上有许多重合, 不少研究者对二者的关系进行 274 互独立的, 则在任意时刻, 空间中所有散射体的位

248 了探讨(Bremmer, 1964; Barabanenkov, 1969; Furutsu 275 置和状态分布的概率就等于单个散射体位置和状态

249 1975; Ishimaru, 1978), 并论证了多次散射理论中的 276 分布的概率的乘积。另一方面, 散射体分布的稀疏

250 相关函数可以近似视为对辐亮度的积分, 而相干强 277 性也保证了远场近似(也即散射体之间的距离远大

251 度的衰减形式则与辐射传输理论中的削弱入射辐射 278 于散射体的尺寸, 同时也远大于波长; 在远场处, 每

252 部分的衰减形式(也即消光定律的形式)相仿。这些 279 个散射体的散射场可以视为球面波, 而与散射体本

253 研究为基于第一性原理的辐射传输方程推导奠定了 280 身的大小和形状无关)的成立(Doicu 和 Mishchenko,

254 基础。 281 2018)。Doicu 和 Mishchenko (2018)提出, 在这一情

255 **3.1.2 从 Maxwell 方程组推导辐射传输方程** 282 形下, 从 Maxwell 方程组推导辐射传输方程的方法,

256 早在上世纪六十年代, 研究者就已经认识到: 283 可以分为三类: 第一类是基于远场近似下的远场

257 辐射传输方程的严格推导, 不能依赖于能量守恒, 284 Foldy-Lax 方程组的; 第二类是基于精确 Foldy-Lax

258 而必须考虑辐射传输方程之下的经典电磁学问题, 285 方程组推导得到的 Dyson 和 Bethe-Salpeter 方程组

259 也即电磁波在分布有离散散射体的介质中的多次散 286 的(Doicu 和 Mishchenko, 2019); 第三类是基于 Bethe-

260 射(Kuzmina 等, 2018)。在经典电磁学的框架下, 第 287 Salpeter 方程组的 Wigner 变换的(Doicu 和

261 一性原理指的就是 Maxwell 方程组。从 Maxwell 方 288 Mishchenko, 2019b)。其中得到最广泛接受的是第一

262 程组出发进行辐射传输方程推导, 具体来说, 指的 289 类方法, 这一方法由 Mishchenko (2002)提出, 并经

263 就是在一定的假设和近似下, 从 Maxwell 方程组推 290 过 Mishchenko 等 (2006)、Mishchenko (2010)以及

264 导得到具有辐射传输方程形式的关系式, 并阐明这 291 Doicu 和 Mishchenko (2018)等进一步归纳完善。其

265 一关系式中各物理量与辐射传输方程中各项的对应 292 推导过程可概括为下述主要步骤:

266 关系(Kravtsov 和 Apresyan, 1996)。与此同时, 如果 293 首先, 在远场近似下, 可以得到关于总场和散

267 在特定的假设下能够由 Maxwell 方程组推导得到这 294 射场的远场 Foldy 方程组:

268 样的关系式, 也就说明辐射传输理论在这一假设成

269 立的条件下是适用的。

270 目前得到比较妥善解决的是入射场为平面电磁

271 波, 而散射体在介质中稀疏分布的情形。这一条件

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \sum_i \frac{e^{jk_1 r_i}}{r_i} \mathbf{A}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{s}}) \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{R}_i) + \sum_i \sum_{j \neq i} \frac{e^{jk_1 r_i}}{r_i} \mathbf{A}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{R}}_{ij}) \cdot \mathbf{E}_{ij} \quad (9)$$

其中 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 表示 \mathbf{r} 处的电场强度, $\mathbf{E}_0(\mathbf{r})$ 表示入射场在 \mathbf{r}

296 处的电场强度, $\vec{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{s}})$ 和 $\vec{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{R}}_{ij})$ 是第*i*个散射体的³¹² 在 $N \rightarrow \infty$ 的情况下, 可对积分中的二重求和进行近
 297 远场散射并矢, \mathbf{E}_{ij} 代表第*j*个散射体的激发场在第³¹³ 似得到:
 298 个散射体位置处的电场强度, 从而 $\frac{e^{jk_1 r_i}}{r_i} \vec{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{s}}) \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{R}_i)$
 299 $\mathbf{E}_0(\mathbf{R}_i)$ 就表示了第*i*个散射体对入射场的散射在 \mathbf{r} 处³¹⁴ 另一方面, 可以将相干并矢分为相干部分和非
 300 的电场强度, 而 $\sum_{j \neq i} \frac{e^{jk_1 r_i}}{r_i} \vec{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{R}}_{ij}) \cdot \mathbf{E}_{ij}$ 则表示了第³¹⁵ 相干部分:
 301 个散射体对其余散射体的激发场的散射在 \mathbf{r} 处的电
 302 场强度。³¹⁶ 在此基础上, 对相干并矢应用阶梯近似, 排除
 303 将表征散射体间相互作用的 \mathbf{E}_{ij} 迭代展开成无穷³¹⁷ $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{E}^*(\mathbf{r})$ 中含有相同散射体但作用顺序不同的情
 304 级数, 在散射体数目 $N \rightarrow \infty$ 的情况下, 对展开式应用³¹⁸ 况, 可以推导得到关于比相干并矢 $\vec{\Sigma}_L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}})$ 的积分方
 305 Twersky 近似, 对每一散射体的贡献最多考虑一次,³¹⁹ 程, 并最终得到关于比强度列矢量的矢量辐射传输
 306 得到: ³²⁰ 方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = & \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + \sum_i \vec{\mathbf{U}}(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{s}}) \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{R}_i) \\ & + \sum_i \sum_{j \neq i} \vec{\mathbf{U}}(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{R}}_{ij}) \cdot \vec{\mathbf{U}}(\mathbf{R}_{ij}, \hat{\mathbf{s}}) \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{R}_j) \\ & + \sum_i \sum_{j \neq i} \sum_{k \neq i, j} \vec{\mathbf{U}}(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{R}}_{ij}) \cdot \vec{\mathbf{U}}(\mathbf{R}_{ij}, \hat{\mathbf{R}}_{jk}) \\ & \cdot \vec{\mathbf{U}}(\mathbf{R}_{jk}, \hat{\mathbf{s}}) \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{R}_k) + \dots \end{aligned} \quad (10)$$

307 其中 $\vec{\mathbf{U}}(\mathbf{r}_i, \hat{\mathbf{s}}) = \frac{e^{jk_1 r_i}}{r_i} \vec{\mathbf{A}}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{s}})$ 。

308 在各态历经假设之下, 对展开后的总场进行平³²³
 309 均, 得到相干场 $\mathbf{E}_c(\mathbf{r})$:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_c(\mathbf{r}) = & \langle \mathbf{E}(\mathbf{r}) \rangle \\ = & \mathbf{E}_0(\mathbf{r}) + n_0 \int_D \vec{\mathbf{U}}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{s}}) \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{R}_i) d^3 \mathbf{R}_i \\ & + n_0^2 \int_D \vec{\mathbf{U}}(\hat{\mathbf{r}}_i, \hat{\mathbf{R}}_{ij}) \cdot \vec{\mathbf{U}}(\hat{\mathbf{R}}_{ij}, \hat{\mathbf{s}}) \cdot \mathbf{E}_0(\mathbf{R}_j) d^3 \\ & + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

310 以及相干并矢 $\vec{\mathbf{C}}(\mathbf{r})$:

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{C}}(\mathbf{r}) = & \sum_{A_0} \sum_{B_0} \{\mathbf{E}(\mathbf{r})\}_{A_0} \otimes \{\mathbf{E}^*(\mathbf{r})\}_{B_0} \\ & + n_0 \int_D \sum_{A_i} \sum_{B_i} \{\mathbf{E}(\mathbf{r})\}_{A_i} \otimes \{\mathbf{E}^*(\mathbf{r})\}_{B_i} d^3 \mathbf{R}_i \\ & + n_0^2 \int_D \sum_{A_{ij}} \sum_{B_{ij}} \{\mathbf{E}(\mathbf{r})\}_{A_{ij}} \otimes \{\mathbf{E}^*(\mathbf{r})\}_{B_{ij}} d^3 \mathbf{R}_j d^3 \mathbf{R}_i \\ & + \dots, \end{aligned} \quad (12)$$

311 其中*A*和*B*为散射体集合, 下标代表二者的交集部分。³²⁹

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{C}}(\mathbf{r}) = & \{\mathbf{E}(\mathbf{r})\}_S \otimes \{\mathbf{E}^*(\mathbf{r})\}_S + n_0 \int_D \{\mathbf{E}(\mathbf{r})\}_{S_i} \otimes \{\mathbf{E}^*(\mathbf{r})\}_{S_i} d^3 \mathbf{R}_i \\ & + n_0^2 \int_D \{\mathbf{E}(\mathbf{r})\}_{S_{ij}} \otimes \{\mathbf{E}^*(\mathbf{r})\}_{S_{ij}} d^3 \mathbf{R}_j d^3 \mathbf{R}_i + \dots \end{aligned} \quad (13)$$

另一方面, 可以将相干并矢分为相干部分和非相干部分:

$$\vec{\mathbf{C}} = \mathbf{E}_c \otimes \mathbf{E}_c^* + \langle \mathcal{E}_{\text{sct}} \otimes \mathcal{E}_{\text{sct}}^* \rangle = \vec{\mathbf{C}}_c + \vec{\mathbf{C}}_d \quad (14)$$

在此基础上, 对相干并矢应用阶梯近似, 排除

$\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{E}^*(\mathbf{r})$ 中含有相同散射体但作用顺序不同的情况, 可以推导得到关于比相干并矢 $\vec{\Sigma}_L(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}})$ 的积分方程, 并最终得到关于比强度列矢量的矢量辐射传输方程:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{I}_d(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}})}{ds} = & -n_0 \mathbf{K}(\hat{\mathbf{q}}) \mathbf{I}_d(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}) + n_0 \mathbf{Z}(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{s}}) \mathbf{I}_c(\mathbf{r}) \\ & + n_0 \int \mathbf{Z}(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{q}}') \mathbf{I}_d(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}') d^2 \hat{\mathbf{q}}' \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\mathbf{I}_d = \mathbf{D} \mathbf{J}_d = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_0}} \begin{bmatrix} \Sigma_{\theta\theta} + \Sigma_{\varphi\varphi} \\ \Sigma_{\theta\theta} - \Sigma_{\varphi\varphi} \\ -\Sigma_{\theta\varphi} - \Sigma_{\varphi\theta} \\ j(\Sigma_{\varphi\theta} - \Sigma_{\theta\varphi}) \end{bmatrix}$ 为相干场的非相

322 干部分的比强度列矢量; $\mathbf{I}_c(\mathbf{r}) = \mathbf{D} \mathbf{J}_c(\mathbf{r}) =$

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\mu_0}} \begin{bmatrix} |E_{c\theta}(\mathbf{r})|^2 + |E_{c\varphi}(\mathbf{r})|^2 \\ |E_{c\theta}(\mathbf{r})|^2 - |E_{c\varphi}(\mathbf{r})|^2 \\ -E_{c\theta}(\mathbf{r}) E_{c\varphi}^*(\mathbf{r}) - E_{c\varphi}(\mathbf{r}) E_{c\theta}^*(\mathbf{r}) \\ j[E_{c\varphi}(\mathbf{r}) E_{c\theta}^*(\mathbf{r}) - E_{c\theta}(\mathbf{r}) E_{c\varphi}^*(\mathbf{r})] \end{bmatrix}$$
为相干场的相

324 干部分的比强度列矢量。这里的比强度列矢量具有

325 与 Stokes 矢量相同的物理意义。 $\mathbf{K}(\hat{\mathbf{q}})$ 为消光矩阵,

326 $\mathbf{Z}(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{s}})$ 和 $\mathbf{Z}(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{q}}')$ 为相矩阵。

327 在得到上述矢量辐射传输方程后, 忽略偏振,

328 就可以得到标量辐射传输方程:

$$\begin{aligned} \frac{dI_d(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}})}{ds} = & -n_0 C_{\text{ext}} I_d(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}) + \frac{C_{\text{sct}}}{4\pi} p(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{s}}) I_c(\mathbf{r}) \\ & + \frac{C_{\text{sct}}}{4\pi} \int p(\hat{\mathbf{q}}, \hat{\mathbf{q}}') I_d(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{q}}') d^2 \hat{\mathbf{q}}' \end{aligned} \quad (16)$$

此时比强度列矢量替换为标量, 消光矩阵和相矩阵

330 也各自替换为标量或标量函数。

356 经验性质的定律。

331 与经典唯象辐射传输理论的推导相比，这里基

357 在定量遥感中，视具体的波段和研究对象，前

332 于第一性原理的推导：1)明确了比强度列矢量并不

358 面的推导中使用的远场近似和散射体之间独立无关

333 直接与能量流动的方向相关，而是来自于对总场二

359 的假设并不总能成立；另外，定量遥感中往往还涉

334 阶矩的角度谱分解，从而避免了多向能流的问题

360 及到地一气、水一气等界面，此时就不能只考虑体

335 (Mishchenko, 2014a); 2) 不再依赖“光子”或“光线”

361 散射，还必须考虑粗糙面散射的影响。针对这些情

336 的概念(Mishchenko, 2014a); 3) 首先得到矢量辐射

362 形，如何从 Maxwell 方程组推导得到辐射传输方程，

337 传输方程再得到标量辐射传输方程，更加符合逻辑

363 还有待更进一步的研究。

338 (Doicu 和 Mishchenko, 2018; Mishchenko, 2014b); 4)

364 3.2 数值模拟

339 直接考虑每一个散射体，不再依赖“体元”的概念

365 Mishchenko 等的推导，说明了辐射传输理论在

340 (Mishchenko 等, 2004)。

366 稀疏介质中的适用性，但并没有给出明确的数值范

341 上面仅对推导的主要环节进行了介绍，更具体

367 围。为了获得更加准确的数值结果，探究散射体的

342 的推导过程，可以参考 Doicu 和 Mishchenko (2018,

368 散射特性和分布情况对辐射传输理论适用性的影响，

343 2019)，以及相关专著，如 Mishchenko 等(2006)和

369 主要有两种方法：一是基于精确的计算电磁学方法

344 Mishchenko (2014a)等。在这一推导的基础上，Doicu

370 (直接求解 Maxwell 方程组)的数值模拟，二是对

345 等(2020a, 2020b)借助平面波谱分解的方法，进一步

371 散射体及其分布进行精确控制的受控实验。

346 处理了入射场为高斯波束的情形。

372 Mishchenko 等(2007)以及 Mishchenko 和 Liu

347 近年来，也有研究者尝试探索新的证明方法。

373 (2007)使用叠加 T-矩阵方法精确求解球形区域内随

348 如 Yang 等(2021)从单散射体的散射转移算符入手，

374 机分布若干完全相同的球形粒子(如图 3 所示)时

349 结合势能函数来推导多散射体的总散射转移算符，

375 的整体电磁散射特性，其实验设置被之后的许多研

350 在不使用有效场近似的情况下，推导得到了相干场

376 究沿用和借鉴。实验采用的粒子个数取值在 1 到 240

351 的相干部分的比强度列矢量，也即 $\mathbf{I}_c(\mathbf{r})$ 所满足的矢

377 之间，对应的占空比为 0.1%到 24%；单个粒子的尺

352 量传输方程：

378 寸参数 $kr = 4$ ，折射率为 1.32 或 1.5)。结果显示，

$$\frac{d\mathbf{I}_c}{ds} = -\mathbf{K}_{\text{ext}} \cdot \mathbf{I}_c \quad (19)$$

379 当粒子的分布和取向均固定时，粒子群散射强度的

353 其中 \mathbf{K}_{ext} 为消光矩阵。可以看到，式(19)有着类似于

380 角度谱呈现出明显的斑点图样，且随着粒子数增加，

354 唯象辐射传输理论中消光定律的形式，但与后者不

381 图样愈发复杂。当粒子群的取向随机，也即对众多

355 同，式(19)是从 Maxwell 方程组出发推导得来，而非

382 取向进行平均时，斑点图样消失。角度谱的这一斑

383 点图样及其在取向平均下的消失，有力地说明了干401
 384 涉效应的存在，从而表明只考虑电磁波能量，将电402
 385 磁波当成相互独立的“光子”或“光线”的辐射传输403
 386 理论，是对实际情况的一种近似，反映的不是电磁404
 387 辐射的瞬时状态，而是一种时间平均或粒子群的配405
 388 置平均。另一方面，对相函数的计算显示，散射角超406
 389 过 170° 时，存在明显的相干后向散射现象，这也是407
 390 单独使用辐射传输理论所无法解释的。

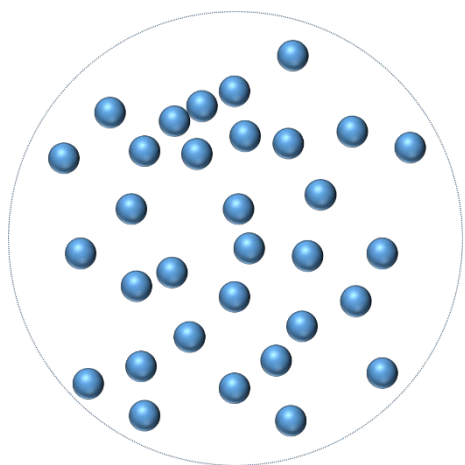


图 3 球形粒子在球形区域内随机分布示意图

Fig. 3 Conceptual illustration of a random distribution of spherical particles within a spherical region

391 Tseng 和 Huang (2007)在类似的设置(粒子个数
 392 取值在 25 到 192 之间，占空比约为 0.3%到 20%，
 393 折射率 1.2)下，在 30—300 THz 的频率范围(对应
 394 的粒子尺寸参数约为 2—20)内，对比了伪谱时域方
 395 法(精确数值解)与 Monte Carlo 方法(辐射传输理
 396 论)同计算得到的粒子群的总散射截面。结果显示，
 397 在粒子分布相对稀疏时，两种方法的结果吻合较好；
 398 但随着粒子数增加，辐射传输理论所依赖的独立散
 399 射假设不再成立，此时二者的计算结果之间出现较
 400 为明显的偏离。Voit 等(2009)也进行了类似(粒子个

数取值在 50 到 800 之间，占空比约为 2.6%到 41.9%，
 尺寸参数约为 10，相对折射率约 1.2)的数值模拟，
 对比了广义多球 Mie 理论与 Monte Carlo 方法的结
 果，发现在不考虑前向(散射角小于 20°)和后向
 (散射角大于 170°)时，二者的误差较小，粒子数
 为 400，对应的占空比超过 20%时，微分散射截面的
 平均误差不超过 5%。此后，Voit 等(2012)进一步考
 虑了电磁波的偏振，并得到了相似的结论：也即在
 粒子占空比不超过 20%时，辐射传输理论与计算电
 磁学的结果吻合较好。Schäfer 和 Kienle (2008)在平
 行放置的无限长圆柱这一情形下，比较了直接求解
 Maxwell 方程组和 Monte Carlo 方法的结果，发现在
 散射体占空比小于 10%时，两种方法的结果都基本
 一致，主要的差异在于基于辐射传输理论的 Monte
 Carlo 方法不能反映出相干前向散射(Mishchenko 等，
 2006)以及有限体积衍射。

417 之后的研究除了对比辐射传输理论与精确的计
 418 算电磁学结果之间的差异，更关注如何对辐射传输
 419 理论进行修正，以拓展其适用范围。Muinonen (2004)
 420 和 Muinonen 等(2012)发展和完善了辐射传输-相干
 421 后向散射方法(RT-CB)，在对辐射传输进行 Monte
 422 Carlo 模拟的过程中记录散射路径，定量计算出沿这
 423 一散射路径与沿其反向散射路径传播的电磁波的相
 424 干效应(对应于图 2c 中所示的相干场二阶矩的极大
 425 交叉图部分)，从而表征了相干后向散射效应。RT-
 426 CB 的计算结果与叠加 T-矩阵方法的对比表明，在粒
 427 子占空比为 5%左右时，将相干后向散射引入辐射传

428 输后,可以有效减少后向散射计算结果的误差;但
 429 前向部分仍有明显的偏离,因为前向的散射峰来自
 430 于衍射效应。Ma 等(2017)延续了球形粒子在球形
 431 域内随机分布这一基本设置,比较叠加 T-矩阵和
 432 Monte Carlo 方法的结果,发现在粒子尺寸参数不超
 433 过 7,且粒子占空比不超过 10%的情况下,引入
 434 Percus-Yevick 近似来考虑非独立散射的影响,对
 435 Monte Carlo 方法进行修正,可以有效减少计算得到
 436 的 Mueller 矩阵的误差。

437 计算电磁学方法通过对 Maxwell 方程组的直接

438 数值求解,理论上可以求得任意介质中任意散射体

439 分布情形下的电磁散射特性。但实际情况下,受到

440 计算机计算能力和内存空间的限制,这些方法往往

441 只适用于尺寸参数不超过 100 的情形(Mishchenko 等,

442 2002)。近年来,高性能计算发展迅猛,陆续有研究

443 者报道了使用离散偶极近似(Yurkin 和 Hoekstra,

444 2011)、多层快速多极子算法(Ergul 和 Gurel, 2014)、

445 伪谱时域算法(Panetta 等, 2013)、不变嵌入 T-矩阵

446 方法(Sun 等, 2019)等计算尺寸参数达到数百的单个

447 散射体电磁散射特性的结果,但都需要消耗大量的

448 计算资源和计算时间,与大规模应用还有一定的差

449 距。一方面,要从这些方法的结果进一步精确计算

450 得到多个散射体和散射体团簇的散射特性,还比较

451 困难——随着散射体尺寸的增大和数目的增加,或

452 是散射体形状非对称、不规则时,计算成本会变得

453 十分高昂(Mackowski 和 Mishchenko, 2011; Egel 等,

454 2017);另一方面,对于遥感观测的一些典型场景,

455 比如对植被冠层的光学遥感观测,如果把每片叶子

456 看成一个独立的散射体,简单估算可知此时散射体

457 的尺寸参数将达到数千甚至数万,这已经远远超出

458 了上述精确方法的可计算范围。最近, Yu 等(2022)

459 提出了使用不变嵌入 T-矩阵方法得到的散射特性数

460 据集训练神经网络的方法,可以在几乎不损失精度

461 的情况下大大压缩数据量并缩短运行时间,这是一

462 个很有潜力的发展方向,但还需要进一步的探索和

463 挖掘。

464

465

466

467

468

469

470

471

472

473

474

475

476

477

478

479

480

481

比如对植被冠层的光学遥感观测,如果把每片叶子
 看成一个独立的散射体,简单估算可知此时散射体
 的尺寸参数将达到数千甚至数万,这已经远远超出
 了上述精确方法的可计算范围。最近, Yu 等(2022)
 提出了使用不变嵌入 T-矩阵方法得到的散射特性数
 据集训练神经网络的方法,可以在几乎不损失精度
 的情况下大大压缩数据量并缩短运行时间,这是一
 个很有潜力的发展方向,但还需要进一步的探索和
 挖掘。

3.3 受控实验

在上述基于数值模拟的研究工作之外,

Mishchenko 等(2013)精心设计的受控实验,为探究

辐射传输理论的适用性开辟了新途径。他们的研究

对象是宽口圆柱形容容器中的悬浮单分散乳胶颗粒,

容器的侧面和底部均为吸收性材料,乳胶颗粒相对

水的折射率约为 1.196,平均直径 350 nm,而使用的

入射波的中心波长为 595 nm 和 695 nm,从而散射

体的尺寸参数约为 2。实验中乳胶颗粒的占空比为 2%

到 10%。在入射角度固定为 20° 的情况下,测量得

到了 -60° 到 60° 之间多个角度下的反射矩阵。另一

方面,在这一实验条件下,容器中的水和悬浮乳胶

颗粒可近似看做无限大水平分层介质,从而适用累

加一倍加法;而水-气界面的反射和透射可以根据

Kirchhoff 近似来计算。在假定单个乳胶颗粒的散射

特性未知的情况下,可以根据实验测量结果和辐射

传输理论来优化求解单个乳胶颗粒的散射特性。结

果显示,对于占空比为 2%和 5%的情况,能够求得

482 结果,但 5%情况下优化得到的光学厚度远远超过了509 次散射时,就指出了密集介质的特殊性,并针对密
 483 2%情况下的 2.5 倍;对于占空比 10%的情况,则概510 集介质提出了准晶体近似。在此之后,研究者们针
 484 本无法求得结果。而在对辐射传输方程中使用的概511 对密集介质中波的传播过程陆续开展了一系列研究
 485 函数引入基于 Percus-Yevick 近似的静态结构因子的512 (Tsang 和 Kong, 1980; Ishimaru 和 Kuga, 1982; Tsang
 486 修正后,结果得到显著改善。 513 等, 1982; Twersky, 1983; Tsang 和 Ishimaru, 1987;

487 以上这些数值模拟和受控实验方法,一定程度514 Wen 等, 1990)。这些研究的成果集中体现为 Tsang 和
 488 上揭示了辐射传输理论的适用条件,同时也帮助515 Kong (2001)所系统介绍的密集介质辐射传输理论
 489 证了不同修正方法的效果。但与遥感中面临的实际516 (Dense Matter Radiative Transfer, DMRT)。DMRT
 490 情况相比,目前所采用的模拟或实验设置还过于简517 从 Maxwell 方程组出发,利用准晶体近似和含相干
 491 单,既无法反映像植被冠层这样的复杂结构,也没518 势的准晶体近似(QCA-CP)等,借助成对分布函数
 492 有反映出散射体多尺度的聚集特征(Titov, 1990);另519 和 Percus-Yevick 近似等方法引入了有效传播常数 K ,
 493 一方面,受到计算性能或实验条件的限制,目前能520 从而考虑了相干性的影响。这些近似条件有着各自
 494 够得到的不同参数组合下的结果还非常有限,散射521 的适用范围:如 QCA 适用于尺寸与电磁波波长相当
 495 体数目也相对较少,尚难以据此提出更进一步的统522 的散射体;QCA-CP 则适用于尺寸小于波长的散射
 496 计模型或经验公式来给出一般性的结果,也就无法523 体,同时要求平均自由程远大于波长和散射体的尺
 497 回答:在何种参数组合之下,辐射传输计算结果的524 寸(Tsang 和 Kong, 2001)。DMRT 首先在雪盖的微波
 498 误差在可接受范围之内。 525 辐射建模和基于被动微波亮温数据的雪盖厚度反演

499 3.4 辐射传输理论向密集介质的推广 526

500 上述理论推导、数值模拟和受控实验共同说明 527
 501 了辐射传输理论对于稀疏介质有着较好的适用性, 528
 502 而在加入对极大交叉项的考虑后,也能够较好地描 529
 503 述相干后向散射现象。但对于密集介质,理论推导 530

504 中所依赖的远场近似和散射体状态独立无关的假设 531
 505 都不再成立,因此必须考虑粒子散射场的相干作用 532
 506 (Ishimaru 和 Kuga, 1982; 金亚秋, 1992; Väisänen, 533
 507 2020)。 534
 508 除了 DMRT 外,近年来,在 RT-CB 方法的基础 535

508 早在上世纪五十年代, Lax (1952)在研究波的多

536 格求解。数值模拟和实验测量结果都显示, 与此前562 目前这些研究还局限在较为理想的情形下, 但它们
537 的方法相比, R^2T^2 对于高占空比 (~25%) 的密集介563 已经能够给辐射传输理论的机理性修正提供一定的
538 质情形更加适用(Väisänen 等, 2019, 2020a, 2020b)564 指导, 从而对辐射传输理论的应用范围进行拓展。
539 Väisänen, 2020)。基于类似的思想, Ito 等(2017, 2018)565 另一方面, 在这一联系得到揭示之后, 伴随着
540 也提出了一种叠加 T-矩阵和辐射传输相结合的行基566 计算机性能的发展和有关算法的改进, 辐射传输方
541 风化层反射率和发射率模型, 并发现使用静态结构567 法与计算电磁方法的结合正在成为一个值得关注的
542 因子对叠加 T-矩阵得到的广义球函数展开系数进行568 研究方向。目前, 定量遥感中针对不同波段和不同
543 修正后, 可以减少对前向散射峰的高估, 从而与实569 研究对象, 往往采用不同的方法: 比如对植被的光
544 验室测量结果吻合得更好。570 学遥感和微波遥感, 或是植被遥感和大气遥感, 虽

545 4 结 论

546 从积分形式的辐射传输方程最早提出, 到现在573
547 已经过了一百多年。如今, 辐射传输理论的应用已574
548 经触及从宏观(天体物理、卫星遥感)到微观(生物575
549 医学、纳米材料), 从现实到虚拟(图形渲染)的众576
550 多领域; 而我们对辐射传输机理的认识也越发深入。577
551 对概念的推敲、基于第一性原理的推导、有关的数578
552 值模拟和受控实验, 共同说明了辐射传输理论的唯一579
553 象属性, 但这并没有削减辐射传输理论的应用价值。580

554 对于定量遥感的典型应用场景, 与计算电磁学方法
555 相比, 基于辐射传输理论的方法的计算和求解都更581
556 加简单, 使用起来也更为方便。因此, 在可预见的未582
557 来, 辐射传输理论仍将继续在定量遥感中扮演举足583
558 轻重的角色。584
558 轻重的角色。585
559 从第一性原理出发的研究, 建立起了辐射传输586
560 理论与经典电磁理论之间的联系, 从而帮助我们更587
561 好地认识了辐射传输理论的适用范围和条件。虽然588

559 从第一性原理出发的研究, 建立起了辐射传输590
560 理论与经典电磁理论之间的联系, 从而帮助我们更591
561 好地认识了辐射传输理论的适用范围和条件。虽然592
593
594
595

570 学遥感和微波遥感, 或是植被遥感和大气遥感, 虽
571 然使用的方法名称都是“辐射传输”, 但其实是建立
572 在不同的假设和近似基础之上的。而辐射传输与计
573 算电磁的结合, 将有望把对不同波段、不同对象的
574 遥感建模和反演研究统一到 Maxwell 方程组这一共
575 同的理论基础之上(秦其明等, 2020), 从而推动多波
576 段协同定量遥感以及大气—地表/海表—地下/水下
577 一体化定量遥感模型的发展, 进而服务于大气成分
578 反演、地表/海表监测、地下资源勘查(如各种矿物、
579 石油、煤层气等)等应用领域。

580 参考文献(References)

- Arons, A.B., Peppard, M.B., 1965. Einstein's Proposal of the Photon Concept—a Translation of the Annalen der Physik Paper of 1905. American Journal of Physics 33, 367–374.
- Bablet, A., Vu, P.V.H., Jacquemoud, S., Viallefont-Robinet, F., Fabre, S., Briottet, X., Sadeghi, M., Whiting, M.L., Baret, F., Tian, J., 2018. MARMIT: A multilayer radiative transfer model of soil reflectance to estimate surface soil moisture content in the solar domain (400–2500 nm). Remote Sensing of Environment 217, 1–17.
- Balsara, D., 2001. Fast and accurate discrete ordinates methods for multidimensional radiative transfer. Part I, basic methods. Journal of

- 596 Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 69, 671–707. 658
- 597 658
- 598 Barabanenkov, Y.N., 1969. On the spectral theory of radiation transport equations. Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics 29, 679–686. 660
- 599 660
- 600 Barabanenkov, Y.N., Kravtsov, Y.A., Rytov, S.M., Tamarskiĭ, V., 1971. Status of the theory of propagation of waves in a randomly inhomogeneous medium. Soviet Physics Uspekhi 13, 551. 662
- 601 662
- 602 663
- 603 664
- 604 665
- 605 666
- 606 Beer, A., 1854. Grundriss des photometrischen Calculs... Friedrich Vieweg und sohn. 667
- 607 668
- 608 Benassi, M., Garcia, R.D.M., Karp, A.H., Siewert, C.E., 1984. A high-order spherical harmonic solution to the standard problem in radiative transfer. The Astrophysical Journal 280, 853–864. 669
- 609 670
- 610 671
- 611 672
- 612 673
- 613 Bernes, C., 1979. A Monte Carlo approach to non-LTE radiative transfer problems. Astronomy and Astrophysics 73, 67–73. 674
- 614 675
- 615 676
- 616 Borovoi, A.G., 1966. The iteration method in multiple scattering: The transfer equation. Soviet Physics Journal 50–54. 677
- 617 678
- 618 679
- 619 <https://doi.org/10.1007/BF01103181> 680
- 620 Bouguer, P., 1760. Traité d’optique sur la gradation de la lumière. Guerin & Delatour. 681
- 621 682
- 622 Bouguer, P., 1729. Essai d’optique sur la gradation de la lumière. chez Claude Jombert, rue Jacques, au coin de la rue des Mathurins, à Paris. 683
- 623 684
- 624 685
- 625 Bremmer, H., 1964. Random volume scattering. Radiative Sci 68, 967–981. 686
- 626 687
- 627 Chandrasekhar, S., 1950. Radiative transfer. Oxford University Press. 688
- 628 689
- 629 Chang, W., Tan, S., Lemmetyinen, J., Tsang, L., Xu, X., Yueh, S.H., 2014. Dense media radiative transfer applied to SnowScat and SnowSAR. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 6, 3811–3825. 690
- 630 691
- 631 692
- 632 693
- 633 694
- 634 695
- 635 Doicu, A., Mishchenko, M.I., 2019a. An overview of methods for deriving the radiative transfer theory from the Maxwell equations. II: Approach based on the Dyson and Bethe-Salpeter equations. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 224, 25–70. 696
- 636 697
- 637 698
- 638 699
- 639 700
- 640 701
- 641 <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.10.037> 702
- 642 Doicu, A., Mishchenko, M.I., 2019b. An overview of methods for deriving the radiative transfer theory from the Maxwell equations. III: Effect of random rough boundaries and packing density. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 224, 154–170. 703
- 643 704
- 644 705
- 645 706
- 646 707
- 647 708
- 648 <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.11.002> 709
- 649 Doicu, A., Mishchenko, M.I., 2018. Overview of methods for deriving the radiative transfer theory from the Maxwell equations. I: Approach based on the far-field Foldy equations. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 220, 123–139. 710
- 650 711
- 651 712
- 652 713
- 653 714
- 654 715
- 655 716
- 656 <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.09.004> 717
- Doicu, A., Mishchenko, M.I., Trautmann, T., 2020a. Electromagnetic scattering by discrete random media illuminated by a Gaussian beam II: Solution of the radiative transfer equation. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 256, 107297. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107297>
- Doicu, A., Mishchenko, M.I., Trautmann, T., 2020b. Electromagnetic scattering by discrete random media illuminated by a Gaussian beam I: Derivation of the radiative transfer equation. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 256, 107301. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107301>
- Dyson, F.J., 1949. The S matrix in quantum electrodynamics. Physical Review 75, 1736.
- Eddington, A., 1916. On the radiative equilibrium of the stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 77, 16–35.
- Efremenko, D., Kokhanovsky, A., 2021. Light Scattering, Absorption, Extinction, and Propagation in the Terrestrial Atmosphere, in: Foundations of Atmospheric Remote Sensing. Springer, pp. 77–147.
- Egel, A., Pattelli, L., Mazzamuto, G., Wiersma, D.S., Lemmer, U., 2017. CELES: CUDA-accelerated simulation of electromagnetic scattering by large ensembles of spheres. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 199, 103–110.
- Ergul, O., Gurel, L., 2014. The multilevel fast multipole algorithm (MLFMA) for solving large-scale computational electromagnetics problems. John Wiley & Sons.
- Foldy, L.L., 1945. The multiple scattering of waves. I. General theory of isotropic scattering by randomly distributed scatterers. Physical review 67, 107.
- Furutsu, K., 1975. Multiple scattering of waves in a medium of randomly distributed particles and derivation of the transport equation. Radio Science 10, 29–44.
- Gans, R., 1924. Die Farbe des Meeres. Annalen der Physik 380, 1–22.
- Garcia, R.D.M., Siewert, C.E., 1986. A generalized spherical harmonics solution for radiative transfer models that include polarization effects. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 36, 401–423.
- Gastellu-Etchegorry, J.P., Martin, E., Gascon, F., 2004. DART: a 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. International Journal of Remote Sensing 25, 73–96. <https://doi.org/10.1080/0143116031000115166>
- Glassner, A.S., 1989. An introduction to ray tracing. Elsevier.
- Guo, J., Tsang, L., Asher, W., Ding, K.-H., Chen, C.-T., 2001. Applications of dense media radiative transfer theory for passive microwave remote

- 718 sensing of foam covered ocean. *IEEE* 78
719 transactions on geoscience and remote sensing 79
720 39, 1019–1027. 780
- 721 Howell, J.R., Menguc, M.P., Siegel, R., 2010. *Thermal* 781
722 radiation heat transfer. CRC press. 782
- 723 Ishimaru, A., 1978. Wave propagation and scattering in 783
724 random media. Academic press New York. 784
- 725 Ishimaru, A., Kuga, Y., 1982. Attenuation constant of a 785
726 coherent field in a dense distribution of 786
727 particles. *J. Opt. Soc. Am.* 72, 1317–1318
728 <https://doi.org/10.1364/JOSA.72.001317> 788
- 729 Ito, G., Arnold, J.A., Glotch, T.D., 2017. T-matrix and 789
730 radiative transfer hybrid models for densely 790
731 packed particulates at mid-infrared 791
732 wavelengths. *Journal of Geophysical Research* 792
733 *Planets* 122, 822–838. 793
- 734 Ito, G., Mishchenko, M.I., Glotch, T.D., 2018 794
735 Radiative-Transfer Modeling of Spectra of 795
736 Planetary Regoliths Using Cluster-Based 796
737 Dense Packing Modifications. *J. Geophys. Res.* 797
738 *Planets* 123, 1203–1220
739 <https://doi.org/10.1029/2018JE005532> 799
- 740 Jin, Y., 1992. Radiative Transfer of multi-layer random 800
741 media with multi-component dense random 801
742 scattering particles. *Science China A*, 1311–1317
743 1317. [金亚秋, 1992. 多成分密集随机散射 803
744 粒子多层随机介质的辐射传输. *中国科学* 804
745 *A* 辑, 1311–1317.] 805
- 746 Jin, Y., 1997. Radiative transfer of 806
747 snowpack/vegetation canopy at the SSM/I 807
748 channels and satellite data analysis. *Remote* 808
749 sensing of environment 61, 55–63. 809
- 750 Kaasalainen, S., Kaasalainen, M., Mielonen, T. 810
751 Suomalainen, J., Peltoniemi, J.I., Näränen, J. 811
752 2006. Optical properties of snow in backscatter 812
753 *Journal of Glaciology* 52, 574–584. 813
- 754 Khvolson, O.D., 1889. Grundzüge einer 814
755 mathematischen Theorie der inneren Diffusion 815
756 des Lichtes. *Bull. Acad. Imp. Sci. St. Petersburg* 816
757 33, 221–256. 817
- 758 Kravtsov, Y.A., Apresyan, L.A., 1996. IV Radiative 818
759 Transfer: New Aspects of the Old Theory, in 819
760 *Progress in Optics*. Elsevier, pp. 179–244. 820
- 761 Kuusk, A., 2018. Canopy Radiative Transfer Modeling 821
762 in: *Comprehensive Remote Sensing*. Elsevier 822
763 pp. 9–22. [https://doi.org/10.1016/B978-0-12-](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10534-2) 823
764 [409548-9.10534-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10534-2) 824
- 765 Kuzmina, M.G., Bass, L.P., Nikolaeva, O.V., 2018 825
766 Polarized Radiative Transfer in Optically 826
767 Active Light Scattering Media, in 827
768 Kokhanovsky, A. (Ed.), *Springer Series in* 828
769 *Light Scattering*, Springer Series in Light 829
770 Scattering. Springer International Publishing 830
771 Cham, pp. 1–53. [https://doi.org/10.1007/978-](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70808-9_1) 831
772 [3-319-70808-9_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-70808-9_1) 832
- 773 Lambert, J.H., 1760. *Photometria sive de mensura et* 833
774 *gradibus luminis, colorum et umbrarum* 834
775 (Photometry for measuring and grading light 835
776 colour and shades). Augsburg 836
777 Detlefsen. (German translation by E. Anding) 837
778 838
- Lamberts *Fotometrie*. Leipzig: Klett Publ., 1892. English translation by DL DiLaura: *Photometry, or on the measure and gradation of light, colors and shade*. New York: Publ. IES Amer., 2001).
- Lax, M., 1952. Multiple scattering of waves. II. The effective field in dense systems. *Physical Review* 85, 621.
- Lax, M., 1951. Multiple scattering of waves. *Reviews of Modern Physics* 23, 287.
- Liang, S., 1997. Calculations of the Soil Hot-Spot Effect Using the Coherent Backscattering Theory. *Remote Sensing of Environment* 60, 163–173. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00179-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00179-4)
- Lommel, E., 1887. *Die Photometrie der diffusen Zurückwerfung*. Sitzber Acad Wissensch München 17, 95–124.
- Ma, L.X., Tan, J.Y., Zhao, J.M., Wang, F.Q., Wang, C.A., 2017. Multiple and dependent scattering by densely packed discrete spheres: Comparison of radiative transfer and Maxwell theory. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 187, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2016.09.025>
- Mackowski, D.W., Mishchenko, M.I., 2011. A multiple sphere T-matrix Fortran code for use on parallel computer clusters. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 112, 2182–2192. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.02.019>
- Milne, E.A., 1921. Radiative equilibrium in the outer layers of a star. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 81, 361–375.
- Mishchenko, M.I., 2014a. Directional radiometry and radiative transfer: The convoluted path from centuries-old phenomenology to physical optics. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 146, 4–33. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.02.033>
- Mishchenko, M.I., 2014b. *Electromagnetic Scattering by Particles and Particle Groups: An Introduction*. Cambridge University Press.
- Mishchenko, M.I., 2010. Poynting–Stokes tensor and radiative transfer in discrete random media: the microphysical paradigm. *Opt. Express* 18, 19770. <https://doi.org/10.1364/OE.18.019770>
- Mishchenko, M.I., 2002. Vector radiative transfer equation for arbitrarily shaped and arbitrarily oriented particles: a microphysical derivation from statistical electromagnetics. *Appl. Opt.* 41, 7114. <https://doi.org/10.1364/AO.41.007114>
- Mishchenko, M.I., Dlugach, J.M., Yanovitskij, E.G., Zakharova, N.T., 1999. Bidirectional reflectance of flat, optically thick particulate layers: an efficient radiative transfer solution and applications to snow and soil surfaces. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 63, 409–432.
- Mishchenko, M.I., Dlugach, J.M., Yurkin, M.A., Bi, L.,

- 839 Cairns, B., Liu, L., Panetta, R.L., Travis, L.D. 900
 840 Yang, P., Zakharova, N.T., 2016. First 901
 841 principles modeling of electromagneti 002
 842 scattering by discrete and discretel 903
 843 heterogeneous random media. Physics Report 904
 844 632, 1–75905
 845 <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.04.002> 906
 846 Mishchenko, M.I., Goldstein, D.H., Chowdhary, J. 907
 847 Lompado, A., 2013. Radiative transfer theory 908
 848 verified by controlled laboratory experiments. 909
 849 Opt. Lett. 38, 3522–3529
 850 <https://doi.org/10.1364/OL.38.003522> 911
 851 Mishchenko, M.I., Hovenier, J.W., Mackowski, D.W. 912
 852 2004. Single scattering by a small volume 913
 853 element. J. Opt. Soc. Am. A 21, 7191–7194
 854 <https://doi.org/10.1364/JOSAA.21.000071> 915
 855 Mishchenko, M.I., Liu, L., 2007. Weak localization of 916
 856 electromagnetic waves by densely packed 917
 857 many-particle groups: exact 3D results. 918
 858 Journal of Quantitative Spectroscopy and 919
 859 Radiative Transfer 106, 616–621. 920
 860 Mishchenko, M.I., Liu, L., Mackowski, D.W., Cairns 921
 861 B., Videen, G., 2007. Multiple scattering by 922
 862 random particulate media: exact 3D results. 923
 863 Opt. Express 15, 2822–2833
 864 <https://doi.org/10.1364/OE.15.002822> 924
 865 Mishchenko, M.I., Travis, L.D., Lacis, A.A., 2006 925
 866 Multiple scattering of light by particles 926
 867 radiative transfer and coherent backscattering 927
 868 Cambridge University Press. 928
 869 Mishchenko, M.I., Travis, L.D., Lacis, A.A., 2002 929
 870 Scattering, absorption, and emission of light by 930
 871 small particles. Cambridge university press. 931
 872 Mobley, C.D., 2001. Radiative transfer in the ocean. 932
 873 Encyclopedia of ocean sciences 2321–2330. 933
 874 Muinonen, K., 2004. Coherent backscattering of light 934
 875 by complex random media of spherical 935
 876 scatterers: numerical solution. Waves in 936
 877 Random Media 14, 365–388
 878 <https://doi.org/10.1088/0959-7174/14/3/010> 938
 879 Muinonen, K., Markkanen, J., Väisänen, T., Peltoniemi 939
 880 J., Penttilä, A., 2018. Multiple scattering of 940
 881 light in discrete random media using 941
 882 incoherent interactions. Optics letters 43, 683–686. 942
 883 943
 884 Muinonen, K., Mishchenko, M.I., Dlugach, J.M. 944
 885 Zubko, E., Penttilä, A., Videen, G., 2012 945
 886 Coherent backscattering verified numerically 946
 887 for a finite volume of spherical particles. The 947
 888 Astrophysical Journal 760, 118. 948
 889 Panetta, R.L., Liu, C., Yang, P., 2013. A pseudo-spectral 949
 890 time domain method for light scattering 950
 891 computation, in: Light Scattering Reviews 8 951
 892 Springer, pp. 139–188. 952
 893 Peraiah, A., 2002. An Introduction to Radiative 953
 894 Transfer: Methods and applications in 954
 895 astrophysics. Cambridge University Press. 955
 896 Prah, S.A., 1995. The adding-doubling method, in 956
 897 Optical-Thermal Response of Laser-Irradiated 957
 898 Tissue. Springer, pp. 101–129. 958
 899 Preisendorfer, R.W., 1965. Radiative transfer on 959
 discrete spaces. Oxford: Pergamon Press.
 Prishival'ko, A.P., Babenko, V.A., Kuzmin, V.N., 1984.
 Scattering and absorption of light by
 inhomogeneous and anisotropic spherical
 particles. Hauka i Tehnika.
 Qin, Q., Fan W., Ren H, 2018. Theories, Methods and
 Applications of Quantitative Remote Sensing
 for Croplands. Science Press. [秦其明, 范闻
 捷, 任华忠, 2018. 农田定量遥感理论, 方
 法与应用. 科学出版社.]
 Qin, Q., Chen, J., Zhang, Y., Ren, H., Wu, Z., Zhang,
 C., Wu, L., Liu, J., 2020. A discussion on some
 frontier directions of quantitative remote
 sensing. Remote Sensing for Land &
 Resources 32(4), 8–15. [秦其明, 陈晋, 张永
 光等, 2020. 定量遥感若干前沿方向探讨. 国
 土资源遥感, 32(4) : 8–15.]
 Royer, A., Roy, A., Montpetit, B., Saint-Jean-Rondeau,
 O., Picard, G., Brucker, L., Langlois, A., 2017.
 Comparison of commonly-used microwave
 radiative transfer models for snow remote
 sensing. Remote sensing of environment 190,
 247–259.
 Rozenberg, G.V., 1955. Vector-parameter Stokes. UAN
 56, 79–110.
 Sadeghi, M., Babaeian, E., Tuller, M., Jones, S.B., 2018.
 Particle size effects on soil reflectance
 explained by an analytical radiative transfer
 model. Remote Sensing of Environment 210,
 375–386.
 Salpeter, E.E., Bethe, H.A., 1951. A relativistic
 equation for bound-state problems. Physical
 Review 84, 1232.
 Schäfer, J., Kienle, A., 2008. Scattering of light by
 multiple dielectric cylinders: comparison of
 radiative transfer and Maxwell theory. Opt.
 Lett. 33, 2413.
<https://doi.org/10.1364/OL.33.002413>
 Schumge, T., 1983. Remote Sensing of Soil Moisture
 with Microwave Radiometers.
 TRANSACTIONS of the ASAE 6.
 Schuster, A., 1905. Radiation through a foggy
 atmosphere. The astrophysical journal 21, 1.
 Schwarzschild, K., 1906. Über das gleichgewicht der
 sonnenatmosphäre. Nachrichten von der
 Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen,
 Mathematisch-Physikalische Klasse 1906, 41–
 53.
 Siewert, C.E., 2000. A discrete-ordinates solution for
 radiative-transfer models that include
 polarization effects. Journal of Quantitative
 Spectroscopy and Radiative Transfer 64, 227–
 254.
 Sobolev, V., 1949. On polarization of scattered light.
 Trudy Astron. Obs. Leningr. Univ 13, 3–16.
 Sun, B., Bi, L., Yang, P., Kahnert, M., Kattawar, G.,
 2019. Invariant Imbedding T-matrix method
 for light scattering by nonspherical and
 inhomogeneous particles. Elsevier.
 Titov, G.A., 1990. Statistical description of radiation

- transfer in clouds. *Journal of Atmospheric Sciences* 47, 24–38. 1021
- 1022
- 1023 Tsang, L., 1984. Thermal emission of nonspherical particles. *Radio science* 19, 966–974. 1024
- 1025 Tsang, L., Chen, C.-T., Chang, A.T.C., Guo, J., Ding, K.-H., 2000a. Dense media radiative transfer theory based on quasicrystalline approximation with applications to passive microwave remote sensing of snow. *Radio Science* 35, 731–749. 1026
- 1027 <https://doi.org/10.1029/1999RS002270> 1028
- 1029 Tsang, L., Ishimaru, A., 1987. *Radiative Wave Equations for Vector Electromagnetic Propagation in Dense Nontenuous Media*. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 1, 59–70. 1030
- 1031 <https://doi.org/10.1163/156939387X000901037> 1032
- 1033 Tsang, L., Kong, J.A., 2001. *Scattering of Electromagnetic Waves: Advanced Topics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. 1034
- 1035 <https://doi.org/10.1002/0471224278> 1041
- 1042 Tsang, L., Kong, J.A., 1980. Multiple scattering of electromagnetic waves by random distributions of discrete scatterers with coherent potential and quantum mechanical formalism. *Journal of Applied Physics* 51, 3465–3485. 1043
- 1044
- 1045 Tsang, L., Kong, J.A., Ding, K.-H., 2000b. *Scattering of Electromagnetic Waves: Theories and Applications*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA. 1046
- 1047 <https://doi.org/10.1002/0471224286> 1052
- 1053 Tsang, L., Kong, J.A., Habashy, T., 1982. Multiple scattering of acoustic waves by random distribution of discrete spherical scatterers with the quasicrystalline and Percus–Yevick approximation. *The Journal of the Acoustical Society of America* 71, 552–558. 1054
- 1055
- 1056 Tsang, L., Pan, J., Liang, D., Li, Z., Cline, D.W., Taheri, Y., 2007. Modeling Active Microwave Remote Sensing of Snow Using Dense Medium Radiative Transfer (DMRT) Theory With Multiple-Scattering Effects. *IEEE Transactions on Geosci. Remote Sensing* 45, 990–1004. 1057
- 1058 <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888854> 1065
- 1066 Tseng, S.H., Huang, B., 2007. Comparing Monte Carlo simulation and pseudospectral time-domain numerical solutions of Maxwell’s equations for light scattering by a macroscopic random medium. *Applied Physics Letters* 91, 051114. 1067
- 1068
- 1069 Twersky, V., 1983. Propagation in correlated distributions of large-spaced scatterers. *J. Opt. Soc. Am.* 73, 3180–3187. 1070
- 1071 <https://doi.org/10.1364/JOSA.73.000313> 1074
- 1075 Twersky, V., 1964. On propagation in random media with discrete scatterers, in: Bellman, R. (Ed.) *Proceedings of Symposia in Applied Mathematics*. American Mathematical Society, Providence, Rhode Island, pp. 84–116. 1076
- 1077 <https://doi.org/10.1090/psapm/016/0163605> 1080
- 1081 Väisänen, T., 2020. *Light scattering in dense particulate media* (PhD Thesis). University of Helsinki, Finland.
- 1082 Väisänen, T., Markkanen, J., Hadamcik, E., Renard, J.-B., Lasue, J., Levasseur-Regourd, A.C., Blum, J., Muinonen, K., 2020a. Scattering of light by a large, densely packed agglomerate of small silica spheres. *Opt. Lett.* 45, 1679. 1083
- 1084 <https://doi.org/10.1364/OL.382240>
- 1085 Väisänen, T., Markkanen, J., Penttilä, A., Muinonen, K., 2019. Radiative transfer with reciprocal transactions: Numerical method and its implementation. *PLoS ONE* 14, e0210155. 1086
- 1087 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210155>
- 1088 Väisänen, T., Martikainen, J., Muinonen, K., 2020b. Scattering of light by dense particulate media in the geometric optics regime. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 241, 106719. 1089
- 1090 <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.106719>
- 1091 Verhoef, W., Molenaar, M., Bunnik, N.J.J., 1998. Theory of radiative transfer models applied in optical remote sensing of vegetation canopies. *Landbouwniversiteit Wageningen (LUW), Wageningen*.
- 1092 Voit, F., Hohmann, A., Schäfer, J., Kienle, A., 2012. Multiple scattering of polarized light: comparison of Maxwell theory and radiative transfer theory. *J. Biomed. Opt.* 17, 045003. 1093
- 1094 <https://doi.org/10.1117/1.JBO.17.4.045003>
- 1095 Voit, F., Schäfer, J., Kienle, A., 2009. Light scattering by multiple spheres: comparison between Maxwell theory and radiative-transfer-theory calculations. *Opt. Lett.* 34, 2593. 1096
- 1097 <https://doi.org/10.1364/OL.34.002593>
- 1098 Wang, L.V., Wu, H., 2012. *Biomedical optics: principles and imaging*. John Wiley & Sons.
- 1099 Watson, K.M., 1953. Multiple Scattering and the Many-Body Problem—Applications to Photomeson Production in Complex Nuclei. *Phys. Rev.* 89, 575–587. 1100
- 1101 <https://doi.org/10.1103/PhysRev.89.575>
- 1102 Wen, B., Tsang, L., Winebrenner, D.P., Ishimaru, A., 1990. Dense medium radiative transfer theory: comparison with experiment and application to microwave remote sensing and polarimetry. *IEEE Transactions on Geosci. Remote Sensing* 28, 46–59. <https://doi.org/10.1109/36.45744> 1103
- 1104 Wendisch, M., Yang, P., 2012. *Theory of atmospheric radiative transfer: a comprehensive introduction*. John Wiley & Sons.
- 1105 Whitney, B.A., 2011. Monte Carlo radiative transfer, in: *Fluid Flows To Black Holes: A Tribute to S Chandrasekhar on His Birth Centenary*. World Scientific, pp. 151–176.
- 1106 Wolf, E., 1976. New theory of radiative energy transfer in free electromagnetic fields. *Physical Review D* 18.
- 1107 Wolf, P.-E., Maret, G., 1985. Weak Localization and Coherent Backscattering of Photons in Disordered Media. *Phys. Rev. Lett.* 55, 2696–2699.

- 1082 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.55.2694>
 1083 Yang, W., Jin, X., Gao, X., 2021. Vector radiative
 1084 transfer equation for arbitrary shape particles
 1085 derived from Maxwell's electromagnetic
 1086 theory. *Journal of Quantitative Spectroscopy
 1087 and Radiative Transfer* 265, 107307
 1088 <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107307>
 1089 Yu, J., Bi, L., Han, W., Zhang, X., 2022. Application
 1090 of a Neural Network to Store and Compute the
 1091 Optical Properties of Non-Spherical Particles
 1092 *Adv. Atmos. Sci.*
 1093 <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1375-5>
 1094 Yurkin, M.A., Hoekstra, A.G., 2011. The discrete
 1095 dipole-approximation code ADDA
 1096 Capabilities and known limitations. *Journal of
 Quantitative Spectroscopy and Radiative
 Transfer, Polarimetric Detection,
 Characterization, and Remote Sensing* 112,
 2234–2247.
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2011.01.031>
 Zhai, P.-W., Hu, Y., Trepte, C.R., Lucker, P.L., 2009. A
 vector radiative transfer model for coupled
 atmosphere and ocean systems based on
 successive order of scattering method. *Optics
 Express* 17, 2057–2079.
 Zhou, L., Tsang, L., Chen, D., 2003. Polarimetric
 passive microwave remote sensing of wind
 vectors with foam-covered rough ocean
 surfaces. *Radio Science* 38, 12–1.

1112 Radiative Transfer: From Phenomenology to First Principles

1113 WU Zihua¹, QIN Qiming¹

1114
 1115 *1. Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, School of Space and Earth Sciences, Peking*
 1116 *University, Beijing 100871, China*

1117 **Abstract:** The Radiative Transfer Theory (RTT) is one of the essential foundations in astrophysics,
 1118 engineering thermophysics, computer graphics, biomedical imaging, and remote sensing. In the field of
 1119 quantitative remote sensing, RTT is particularly widely used. However, the classical RTT is a
 1120 phenomenological theory based on heuristic summarizations of experiments instead of directly derived
 1121 from the first principles. Due to the ignorance of the wave property, RTT cannot explain interference and
 1122 diffraction phenomena, e.g., the well-known coherent backscattering.

1123 The root of RTT dates back to the photometry study by Bouguer, Lambert, and Beer. Von Lommel and
 1124 Khvolson are believed to propose the integral form of the Radiative Transfer Equation (RTE) for the first
 1125 time in the 1880s. After that, many other scientists contributed to the establishment of RTT as a strict
 1126 theory, including Schuster, Schwarzschild, Eddington, Milne, Gans, Sobolev, Chandrasekhar, Rozenberg,
 1127 and Tsang. However, the classical RTT implicitly depends on the assumption of independent scattering,
 1128 which fails when applied to dense matter.

1129 It requires the first-principle approach to bridge the gap between classical RTT and classical
 1130 electromagnetics and extend the application of RTT. There are three ways: 1) direct derivation, 2)
 1131 numerical simulations, and 3) controlled experiments.

1132 Direct derivation of the RTE from first principles (i.e., Maxwell equations) is the most fundamental
1133 approach. Currently, Mishchenko and his colleagues' derivation is considered the most rigorous. This
1134 derivation is primarily based on previous research on multiple scattering of electromagnetic waves, to
1135 which Foldy, Lax, Twersky, and many others have made significant contributions. Under the condition
1136 of plane wave and discrete random media, Mishchenko et al. managed to derive the RTE from Maxwell
1137 equations for both coherent and incoherent intensity. The derivation proves that RTT is not a disconnected
1138 "island" from the "mainland" of classical electromagnetics.

1139 Besides derivations, numerical simulations and controlled experiments also help to reveal the connection
1140 between RTT and numerical-exact computational electromagnetics. In these simulations and experiments,
1141 RTT and electromagnetic computation results are compared under different conditions, showing that RTT
1142 can yield satisfactory results when the volume percentage of scatterers is low. When the density of
1143 scatterers further increases, some corrections, e.g., the Percus-Yevick model, can be introduced to
1144 compensate for the errors of RTT. Based on these studies, some efforts have been made to extend RTT to
1145 the case of dense matter. Notable achievements include the DMRT and the R^2T^2 theories and some others.
1146 Although these studies are still limited to some ideal situations, they have provided some guidance for
1147 the mechanistic revision of radiative transfer theory, thus expanding the scope of its application. On the
1148 other hand, the combination of radiative transfer methods with computational electromagnetics is
1149 becoming a research direction of interest, along with the development of computer performance and the
1150 improvement of relevant algorithms. At present, different methods are used in quantitative remote sensing
1151 for different wavebands and different research objects: for example, optical remote sensing and
1152 microwave remote sensing for vegetation, or vegetation remote sensing and atmospheric remote sensing,
1153 although the names of the methods used are "radiative transfer", they are based on different assumptions
1154 and approximations. The combination of RTT and computational electromagnetics is a promising
1155 approach to unifying the remote sensing modeling and inversion studies of different wavelengths and
1156 objects.

1157 **Key words:** radiative transfer, phenomenology, first principles, classical electromagnetics, Maxwell
1158 equations

1159 **Supported by the** National Natural Science Foundation of China (No. 42071314)