



Численное решение задачи рассеяния света на агрегатах частиц космической пыли с использованием метода физической оптики

Тимофеев Дмитрий Николаевич

к.ф.-м.н., н.с. ЛРЭВ · ИОА СО РАН

Введение

Оптические свойства космической пыли определяют интерпретацию наблюдений комет, протопланетных дисков и межпланетной среды. Основные подходы к её исследованию — численное моделирование рассеяния света и лабораторные эксперименты.

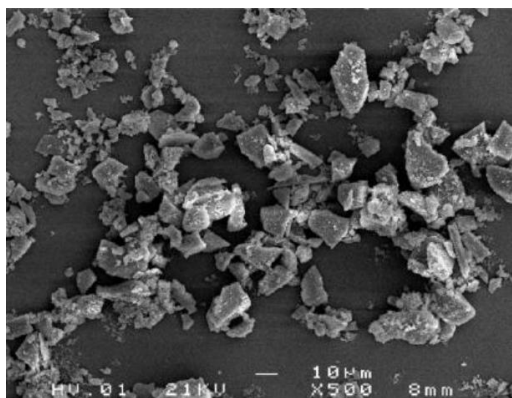


Рис. 1. Фотография оливина.
Белая полоска обозначает 10 мкм.

Силикаты, аморфный углерод и органические соединения образуют агрегаты сложной морфологии. Их частицы несферичны и невыпуклы, поэтому приближения сфер и эллипсоидов непригодны для моделирования их оптических свойств.

Рассеяние фрактальными агрегатами рассчитывают методами Т-матриц или DDA. Лазерное дистанционное зондирование пыли требует базы матриц рассеяния с соответствующими характеристиками частиц.

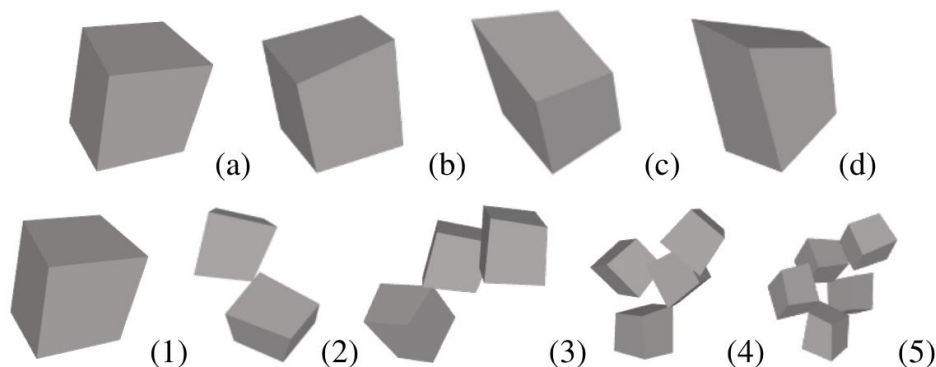
Для этой задачи наиболее применим метод физической оптики* (PO), успешно используемый для атмосферных ледяных частиц. Он позволяет рассчитывать частицы с $x > 10$ и даёт точные результаты в направлении обратного рассеяния.

Расчёт дифракции для каждого рассеянного пучка требует больших затрат; время расчёта методом PO сильнее всего растёт с числом граней. Но существуют угловые интервалы, где матрицы геометрической оптики (GO) и PO близки. Поэтому оптимальным подходом будет сначала рассчитывать матрицы для агрегатных частиц со множеством граней в приближении GO.

В работе сравниваются матрицы рассеяния агрегатов космической пыли различной формы, размера и вещества в приближениях GO и PO.

* Borovoi, A., Konoshonkin, A., Kustova, N. The physical-optics approximation and its application to light backscattering by hexagonal ice crystals. J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 146, 181–189 (2014).

Модель частиц и параметры расчёта



Параметры расчёта

- $\lambda = 1,064$ мкм
- 10 размеров: 5–100 мкм
- $N = 1-5$ частиц

Агрегатах сгенерированы путём соединения одинаковых частиц* в случайных точках и в случайной пространственной ориентации, без взаимных пересечений.

Рис. 2. Формы частиц* а-d и агрегаты из 1–5 частиц (форма а).

Минерал	$m = n + ik$ при $\lambda = 1,064$ мкм
Энстатит	$1,5563 + i \cdot 3,8 \times 10^{-5}$
Пироксен	$1,6636 + i \cdot 9,8 \times 10^{-3}$
Оливин	$1,7305 + i \cdot 7,3 \times 10^{-2}$

Максимальный размер фиксирован: увеличение N усложняет форму агрегата, но не увеличивает его максимальный размер.

* Saito, M., Yang, P., Ding, J., Liu, X. A comprehensive database of the optical properties of irregular aerosol particles for radiative transfer simulations. J. Atmos. Sci., 78(7), 2089–2111 (2021).

Методы и критерий сравнения

Метод физической оптики рассчитывает рассеянное поле в ближней зоне в приближении геометрической оптики, а в дальней зоне учитывает волновые свойства света — дифракцию и интерференцию.

Метод основан на алгоритме трассировки пучков, сходном с трассировкой лучей, но работающем с плоскопараллельными оптическими пучками.

Используется абсолютная ошибка, нормированная на полное сечение σ :

$$\xi(M_{ij}) = \frac{|M_{ij}^{GO} - M_{ij}^{PO}|}{\sigma} \times 100\%$$

Для рассчитанных элементов M_{11} и M_{12} матрицы рассеяния света каждое сравнение содержит хотя бы один непрерывный угловой интервал, удовлетворяющий критерию 2%.

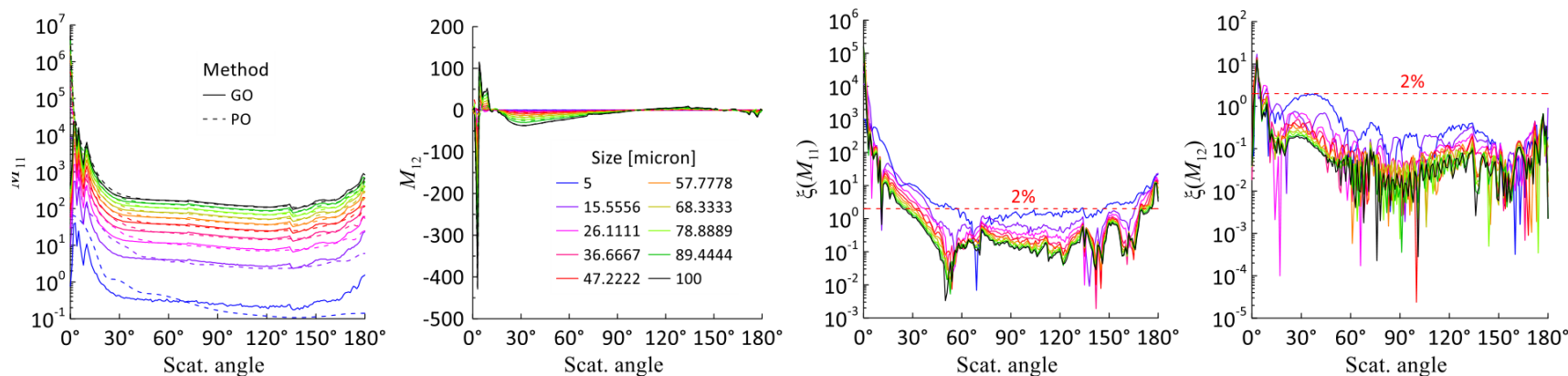


Рис. 3. M_{11} и M_{12} , рассчитанные методами физической и геометрической оптики для агрегата из пяти частиц (энстатит, форма а).

Результаты и выводы

Ниже в таблицах представлены зависимости среднего покрытия полного углового диапазона интервалами согласия $\langle C \rangle$ в процентах для элементов M_{11} и M_{12} от вещества, размера, формы и кол-ва частиц,

Размер агрегата

мкм	$M_{11}, \%$	$M_{12}, \%$
5,00	52,04	92,97
15,5556	71,32	96,80
26,1111	76,55	97,25
36,6667	79,37	98,03
47,2222	81,10	98,16
57,7778	82,59	98,45
68,3333	83,71	98,69
78,8889	85,21	98,91
89,4444	85,80	99,07
100,00	86,31	99,36

Вещество

Вещество	$M_{11}, \%$	$M_{12}, \%$
Энстатит	68,75	96,41
Оливин	84,54	98,21
Пироксен	81,91	98,69

Число частиц

N	$M_{11}, \%$	$M_{12}, \%$
1	82,16	98,28
2	78,10	98,03
3	76,45	97,67
4	78,34	97,39
5	76,95	97,47

Форма частиц

Форма	$M_{11}, \%$	$M_{12}, \%$
a	80,85	97,06
b	78,40	97,77
c	79,30	97,37
d	75,06	98,88

Интервалы согласия M_{11} и M_{12} меньше всего зависят от числа частиц и их формы, но монотонно увеличиваются с размером агрегата. Согласие физической и геометрической оптики охватывает широкий угловой диапазон для большинства исследованных случаев. Полученные данные могут использоваться для оптимизации расчётов частиц с другими значениями исследованных характеристик.

Спасибо за внимание!