КОНФЕРЕНЦИЯ С

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

АЗИМУТАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ В МАТРИЦЕ РАССЕЯНИЯ ДЛЯ ХАОТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ЧАСТИЦ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Боровой А.Г.[1], Кустова Н.В.[1], Коношонкин А.В.[1,2], Zhenzhu Wang[3]

[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

[2]Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

[3]Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, China

e-mail: borovoi@iao.ru, kustova@iao.ru, sasha_tvo@iao.ru, zzwang@aiofm.ac.cn

Проведен численный расчет матрицы рассеяния света для нерегулярного многогранника с размерами, превышающими длину волны падающего света в 150 раз. Показано, что при хаотической ориентации частицы часть элементов матрицы проявляют симметрию по азимутальному углу рассеяния. Такая симметрия различна для разных элементов матрицы, но одинакова для различных форм частиц. В данном сообщении мы доказываем, что эта симметрия является результатом усреднения матриц рассеяния, в основном, из-за вращения частицы вокруг направления падения света.

Решение задачи рассеяния волн на частицах сложной формы в настоящее время является еще плохо изученной проблемой, численное решение которой требует привлечения значительных вычислительных ресурсов, напр. [1-3]. При численном решении форма частиц обычно задается в виде совокупности элементарных граней, например в виде набора большого числа маленьких треугольников. В таком случае, разрабатываемый нами метод физической оптики [4-6] хорошо подходит для решения этих задач, так как в методе физической оптики основным допущением является представление формы частиц в виде совокупности произвольного числа плоских граней, при этом размер граней должен существенно превосходить длину волны света.

В данной работе мы численно решаем задачу рассеяния света на хаотически ориентированной частице с формой, представленной на рис. 1, когда размер частицы превышал длину волны света в 150 раз. Хаотическая пространственная ориентация частицы означает, что решение задачи рассеяния при заданной фиксированной ориентации должно затем усредняться по ориентациям. Усреднение по ориентациям частицы сводится к усреднению по трем углам Эйлера α, β и γ. Для этого: а) выбирается произвольная ось, проходящая через центр частицы; б) частица вращается вокруг этой оси по углу γ; в) затем выбранная ось наклоняется относительно направления падения света на угол β; г) и, в завершении, частица вращается вокруг направления падения света на угол α. Рассчитываемая численно 4×4 матрица рассеяния состоит из 16 функций $M_{ij}(\theta,\varphi)$ зенитного θ и азимутального φ углов рассеяния.

Рисунок 1 – Форма частицы - выпуклый многогранник

Как пример, на рис. 2 приведены все 16 элементов матрицы рассеяния при фиксированной ориентации частицы. Здесь элементы матрицы рассеяния являются нерегулярными функциями азимутального угла рассеяния.

Как показали наши расчеты, усредненные по хаотической ориентации элементы матрицы рассеяния $M_{ij}(\theta,\varphi)$ проявляют одинаковую закономерность. А именно, они оказываются симметричными функциями от азимутального угла φ. Причем эта симметрия различна для разных элементов матрицы, но одинакова для различных форм частиц. Другими словами, форма частиц только влияет на коэффициенты функций $M_{ij}(\theta,\varphi)$, но сама аналитическая форма зависимости $M_{ij}(\theta,\varphi)$, от азимутального угла φ универсальна. В данном сообщении мы показываем, что эта симметрия является результатом усреднения матриц рассеяния, в основном, из-за вращения частицы относительно угла α. Чтобы доказать эту закономерность, мы провели расчеты матриц рассеяния, где углы β и γ были фиксированными, а усреднение проводилось по углу α.

На рис. 3 мы видим, что элементы 11, 14, 21, 24, 31, 34, 42 и 44 не зависят от угла φ, т.е. не имеют азимутальной симметрии. Остальные элементы 12, 13, 22, 23, 32, 33, 42, 43 повторяются через 90°, т.е. они имеют 4-кратную азимутальную симметрию. Очевидно, что усреднение ориентации частицы по другим углам β и γ не приведет к симметрии матрицы рассеяния относительно азимутального угла рассеяния φ.

Таким образом, если ориентация частиц является хаотической, то азимутальная симметрия матриц рассеяния является следствием вращения частицы вокруг направления падения света. Аналогичная азимутальная симметрия была известна ранее только для многократно рассеивающих сред [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 19-45-703010, 20-35-70041, 21-55-53027). Расчеты для матриц рассеяния в приближении физической оптики выполнены в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

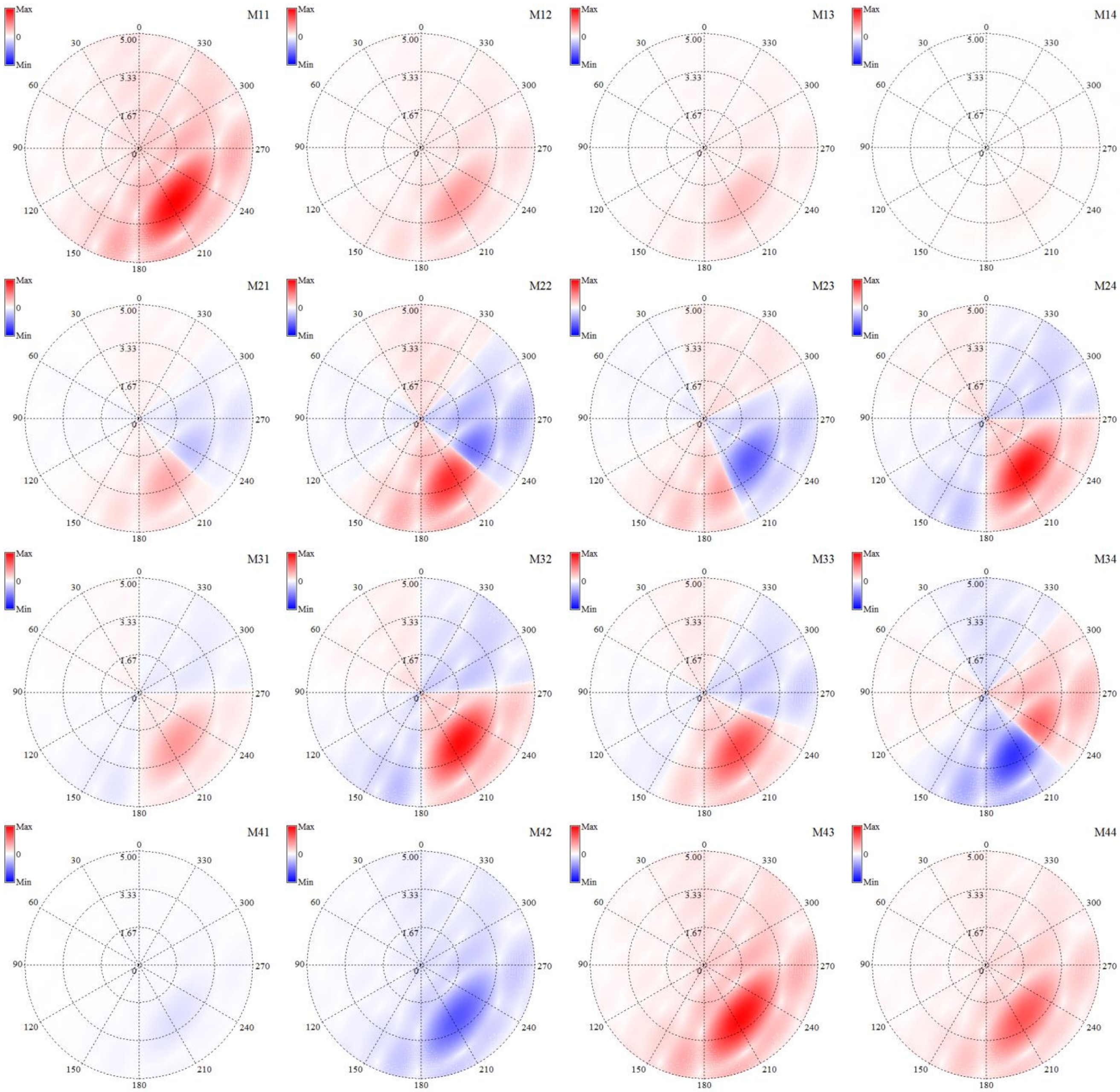

Рисунок 2 – Элементы матрицы рассеяния при фиксированной ориентации частицы как функции азимутального и зенитного углов рассеяния

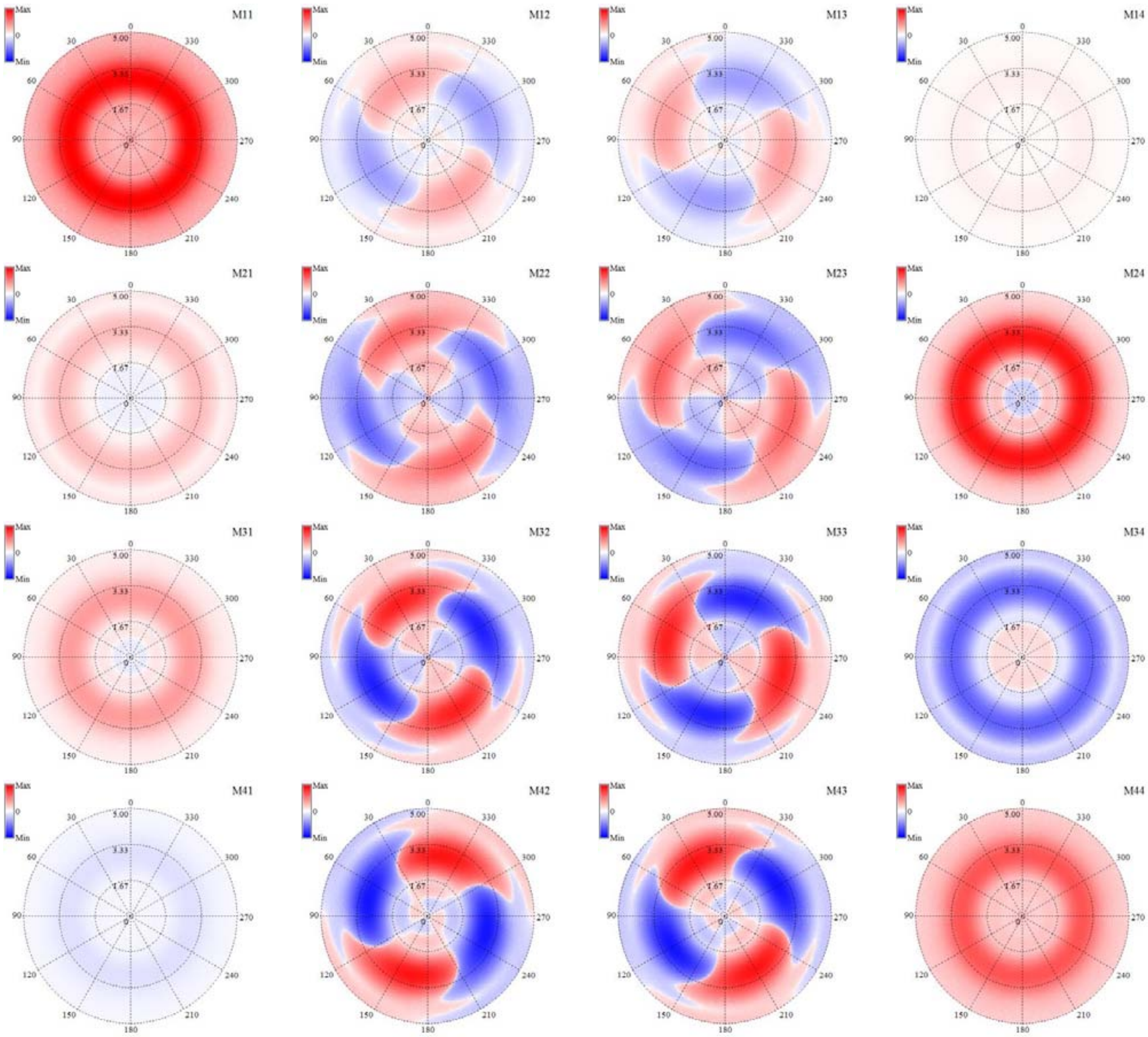

Рисунок 3 – То же, что и на рис. 2, при усреднении ориентации частицы по углу α

1. *Grynko Y., Shkuratov Y., Forstner J.* Intensity surge and negative polarization of light from compact irregular particles // Optics Letters 2018. V.43. №15. P. 3562 - 3565.

2. *Grynko Y., Shkuratov Y., Forstner J.* Light scattering by irregular particles much larger than the wavelength with wavelength-scale surface roughness // Optics Letters 2016. V.41. №15. P. 3491 - 3494.

3. *Rakovic´ M.J., Kattawar G.W., Mehrubeoglu M., Cameron B.D., Wang L.V., Rastegar S., Cote G.L.* Light backscattering polarization patterns from turbid media: theory and experiment // Applied Optics 1999. V. 38. №15. P. 3399-3408.

4. *Konoshonkin A., Borovoi A., Kustova N., Reichardt J.* Power laws for backscattering by ice crystals of cirrus clouds // Opt. Express. 2017. V. 25, N 19. P. 22341–22346.

5. *Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G., Grynko Y., Förstner J.* Light scattering by ice crystals of cirrusclouds: Comparison of the physical optics methods // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2016. V. 182. P. 12–23.

6. *Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Borovoi A.G.* Beam splitting algorithm for the problem of light scattering by atmospheric ice crystals. Part 1. Theoretical foundations of the algorithm // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 5. P. 441–447.