

Рассеяние света на полых гексагональных ледяных столбиках перистых облаков

К.С. Сальников^{1,2*}, А.В. Коношонкин^{1,2}, В.А. Шишко^{1,2}, Н.В. Кустова^{1,2}, Д.Н. Тимофеев^{1,2}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

²Национальный исследовательский Томский государственный университет

Зачем учитывать полость ледяного кристалла

- 01 Лидары и поляриметры измеряют оптические характеристики перистых облаков.
- 02 Интерпретация требует модели рассеяния, учитывающей форму частиц.
- 03 Для гексагональных частиц геометрическая оптика даёт сингулярность назад — именно в направлении, важном для лидарных измерений.

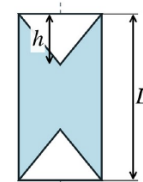
Геометрия частицы и степень вогнутости

01 L — длина, D — диаметр окружности вокруг основания, h — глубина полости.

02 $\mu = \frac{2h}{L}$ — безразмерная степень вогнутости.

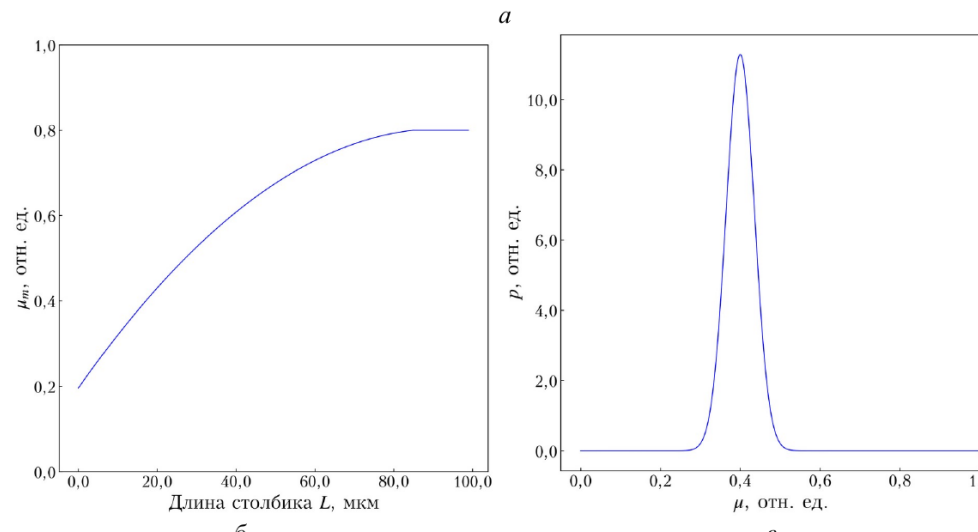
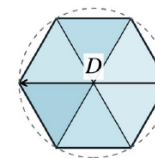
03 Принято $D = 0,7L$; частицы случайно ориентированы в пространстве.

Продольный разрез



$$\mu = 2h/L$$

Вид со стороны основания



Распределение форм частиц

01 Медианная степень вогнутости (L подставляется в мкм):

02

$$\mu_m(L) = \begin{cases} 0,196 + 0,01314L - 0,000071L^2, & L < 85 \\ 0,8, & L \geq 85 \end{cases}$$

03 Нормированное распределение на $0 \leq \mu \leq 1$, параметр $s = 0,05$:

04

$$p(\mu; s, \mu_m) = \frac{\exp[-(\mu - \mu_m)^2/s^2]}{\int_0^1 \exp[-(t - \mu_m)^2/s^2] dt}$$

Диапазон расчётов и оптические константы

01 $0,1 \leq L \leq 100 \mu\text{m}.$

02 $\lambda = 0,355 \mu\text{m} : \quad n = 1,3243.$

03 $\lambda = 0,532 \mu\text{m} : \quad n = 1,3116.$

04 $\lambda = 1,064 \mu\text{m} : \quad n =$
 $1,3004 + i 1,9 \times 10^{-6}.$

05 Поглощение учтено; в исследуемом диапазоне размеров его влияние пренебрежимо мало.

Гибридное решение задачи рассеяния

- 01 ADDA: метод дискретных диполей для малых частиц.
- 02 Физическая оптика: решение для крупных частиц, дополненное краевой поправкой назад.
- 03 В области совместной применимости решения согласуются по всей сфере направлений рассеяния.

Объём и эквивалентный размер

01

$$V_h = \frac{3\sqrt{3}}{8} D^2 L \left(1 - \frac{\mu_m(L)}{3} \right), \quad D = 0,7L$$

02

$$r_{eq} = \left(\frac{3V_h}{4\pi} \right)^{1/3}, \quad x_{eq} = \frac{2\pi r_{eq}}{\lambda}$$

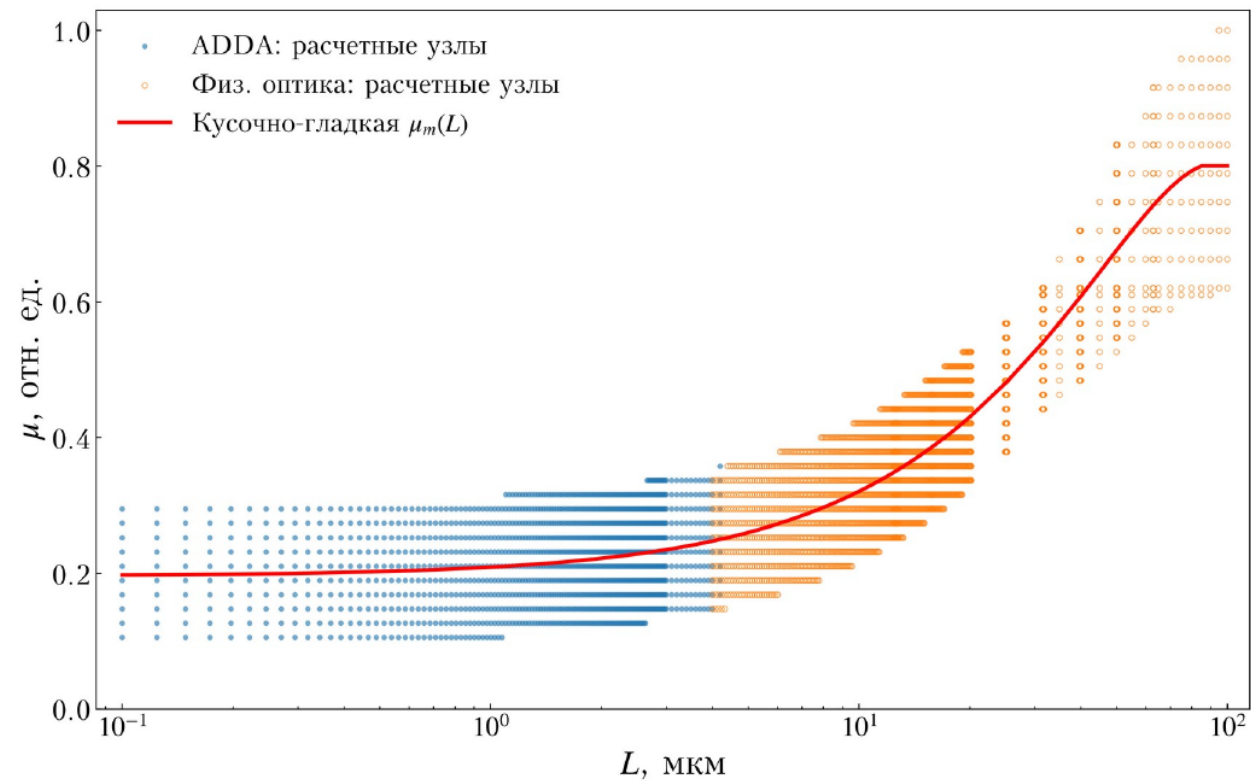
03 Для сопоставления усреднённых кривых объём вычисляется при медианной форме $\mu_m(L)$.

Расчётная сетка и усреднение по формам

01 Для каждой длины L используются 10 узлов ADDA и 10 узлов физической оптики.

02 Оптические характеристики усредняются по распределению $p(\mu; s, \mu_m)$.

03 Сетка следует зависимости $\mu_m(L)$, связывая размер и форму частицы.



Краевая поправка к физической оптике

Направление строго назад: $\theta = 180^\circ$

01
$$M_{ij}^{\text{corr}} = F_{\text{edge}}(x_{\text{eq}}) M_{ij}^{\text{PO}}, \quad ij \in \{11, 22, 33\}$$

02
$$F_{\text{edge}}(x) = \begin{cases} 2, & x \leq 20 \\ 2 - \frac{\ln(x/20)}{\ln(300/20)}, & 20 < x < 300 \\ 1, & x \geq 300 \end{cases}$$

03 $\xi = \frac{\lambda}{L} \frac{180^\circ}{\pi}$ задаёт угловую область плавного перехода.

04 $\delta = \frac{M_{11} - M_{22}}{M_{11} + M_{22}}$ сохраняется: оба элемента умножаются на один коэффициент.

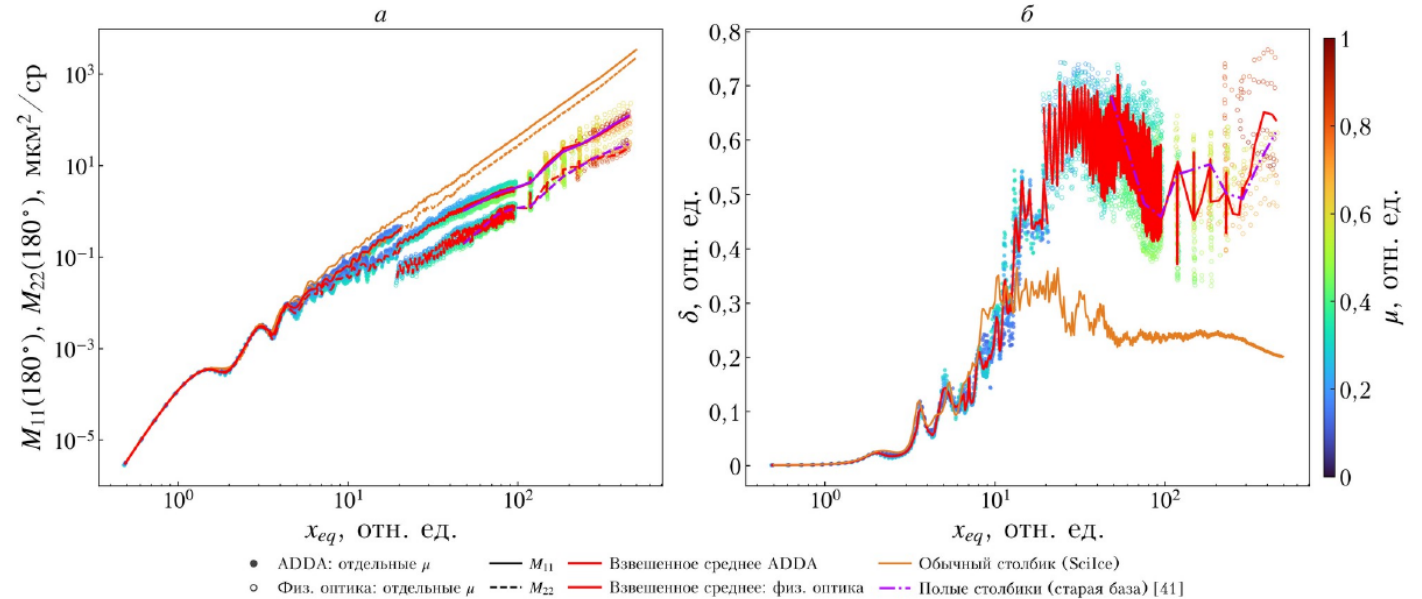
Когда форма частицы становится существенной

Обратное рассеяние: $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$

01 При $x_{\text{eq}} < 1,5$ форма почти не влияет на рассеяние; при $1,5 \leq x_{\text{eq}} \leq 5$ различия малы.

02 При $x_{\text{eq}} > 5$ увеличивается разброс решений по степени вогнутости.

03 Усреднённые кривые полого и обычного столбиков расходятся при $x_{\text{eq}} > 6$ для M_{11} и при $x_{\text{eq}} > 10$ для δ .



Осцилляции: что важно для усреднения

$$4 \leq L \leq 20 \mu\text{m}, \lambda = 0,532 \mu\text{m}$$

01 Выделено 47 полных циклов; причина — интерференция в направлении строго назад.

02 Средний период по размеру: $\Delta L = 0,332 \mu\text{m}$.

03 Средняя относительная полуамплитуда — 14,2%; для отдельных циклов — 8,0–19,7%.

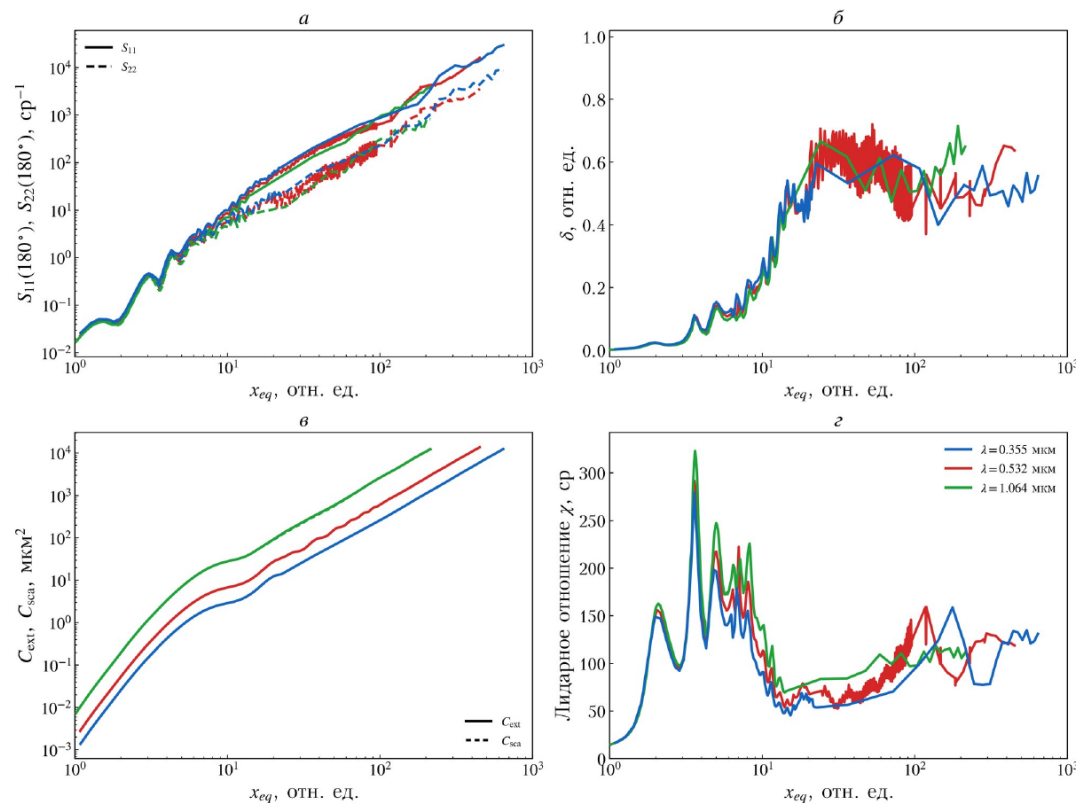
04 За пределами 20 мкм эффект сохраняется в исследованных окрестностях. Для приложений важно усреднение по периоду.

Три длины волны: сравнение характеристик

01 На общей шкале x_{eq} сопоставлены $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064 \mu m$.

02 Показаны S_{11} , S_{22} , δ , сечения C_{ext} и C_{sca} , а также лидарное отношение χ .

03 χ вычисляется после усреднения оптических величин по форме частиц.

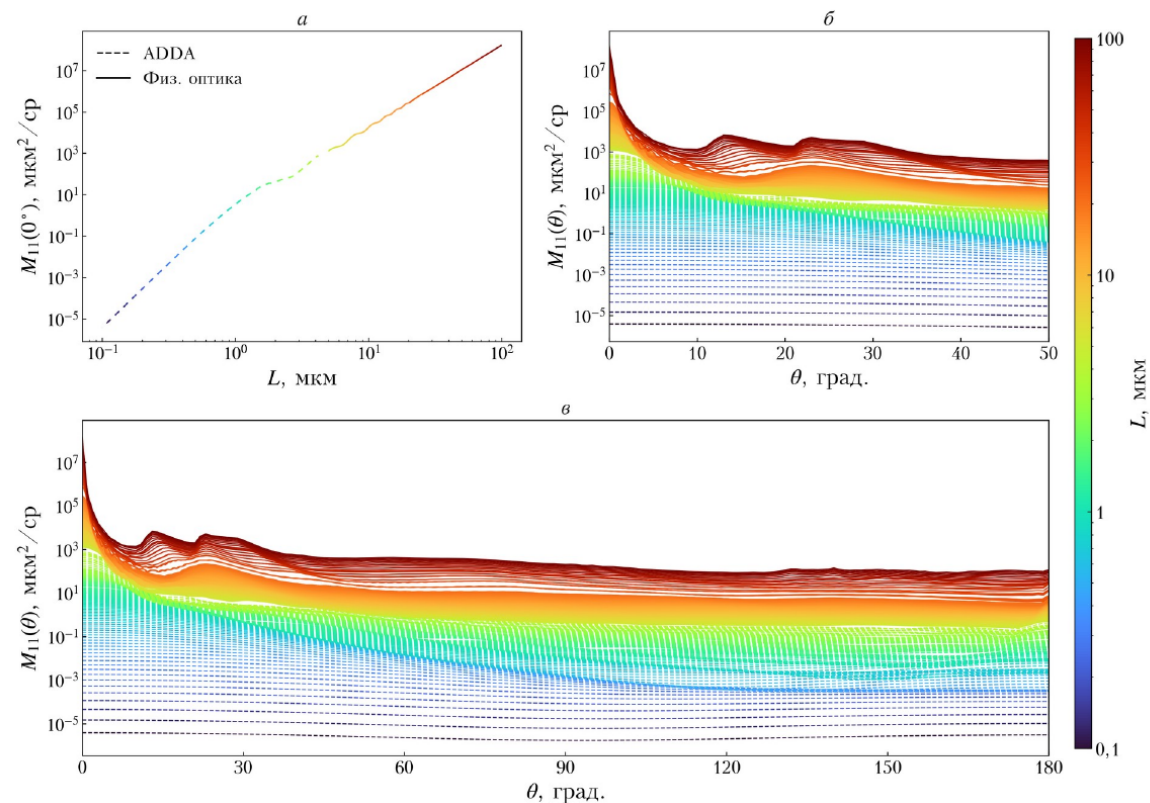


Полная фазовая функция и приложения

01 При $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$ рассмотрены $\theta = 0^\circ$, область $0-50^\circ$ и весь диапазон $0-180^\circ$.

02 Окрестность направления вперёд существенна для лазерных трасс «Земля — космос».

03 Учёт многократного рассеяния требует фазовой функции во всём диапазоне углов.

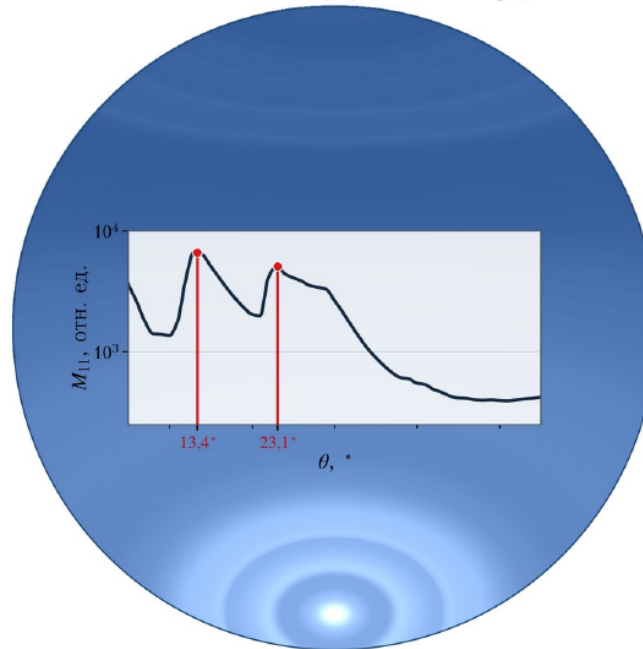


Полая и обычная частицы: различие картин гало

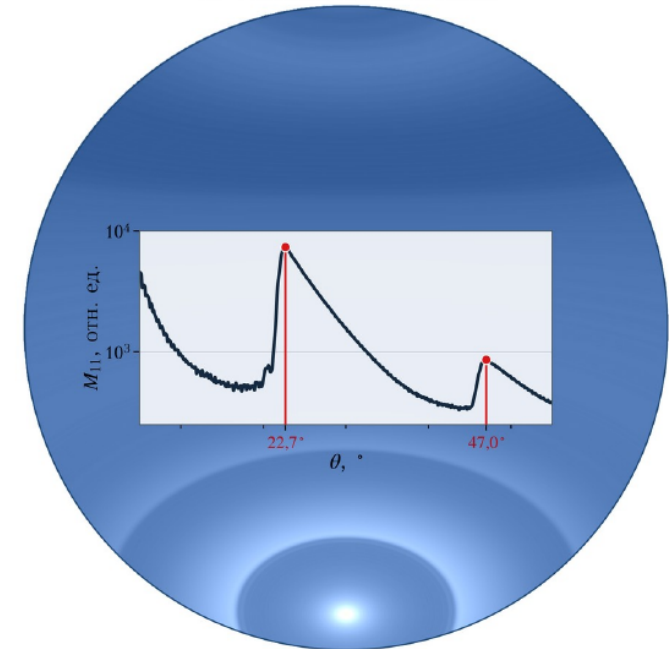
$$L = 100 \mu\text{m}, \lambda = 0,532 \mu\text{m}$$

- 01 Для полой частицы после усреднения по μ модель даёт дополнительное кольцо около $\theta \approx 13,4^\circ$.
- 02 В этой модели 46° -гало отсутствует, а максимум 22° -гало смещён относительно обычного столбика.
- 03 Это расчётные изображения для случайно ориентированных частиц, а не наблюдения облака.

а) Полый столбик, усреднение по форме



б) Обыкновенный столбик



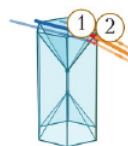
Геометрический механизм 13°-гало

01 Луч входит в полость → преломляется на наклонной стенке → выходит через боковую грань.

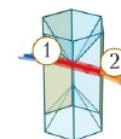
02 Угол стенки 37,2° даёт минимальное отклонение 12,2°; расчётный максимум M_{11} находится при 13,4°.

03 Для полого столбика на схеме: $\mu = 0,8$, $D/L = 0,7$, $n = 1,3116$, $\lambda = 0,532 \mu\text{m}$.

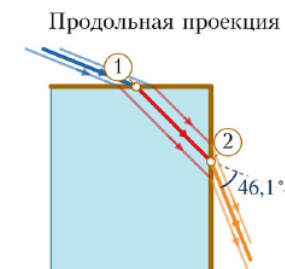
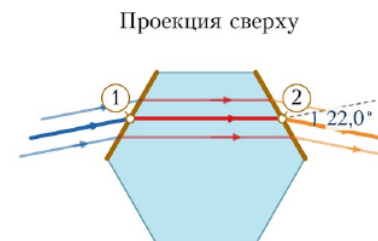
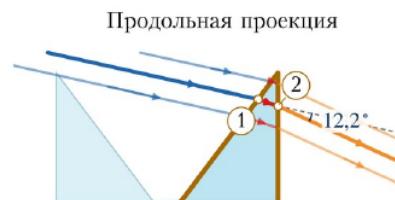
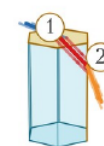
а) Полый столбик: 13°-гало



б) Полый столбик: 22°-гало



в) Обыкновенный столбик: 46°-гало



Общие параметры: $D/L=0,7$, $n=1,3116$, $\lambda=0,532 \mu\text{m}$; в (а, б) $\mu=0,8$, в (в) $\mu=0$.
Показаны три луча одной траекторной семьи; 1 и 2 — вход в лёд и выход из него.

— падающий луч (воздух) — луч внутри льда — выходящий луч (воздух) - - - - - исходное направление — активные грани

Выводы: от формы к оптическому отклику

- 01 Гибридное решение охватывает $L = 0,1-100 \mu\text{m}$ и три лидарные длины волн.
- 02 При увеличении размера полость заметно влияет на обратное рассеяние. Для приложений важны усреднение по форме и по осцилляциям.
- 03 Результаты дополняют банк оптических данных для лидарных и поляризметрических измерений, переноса излучения и лазерных трасс.

Благодарности и финансирование

01 Учёт краевого эффекта выполнен в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

02 Решение задачи рассеяния света выполнено при финансовой поддержке РФФ № 25-17-00087.

<https://rscf.ru/project/25-17-00087/>