

УДК 535.361

## Влияние внутренней структуры на рассеивающие свойства неоднородных частиц

*Д.В. Петров*ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, 298409, Крым  
*dvp@craocrimea.ru*

Поступила в редакцию 4 октября 2022 г.

**Аннотация.** Неоднородные частицы широко распространены в природе. При интерпретации наблюдательных данных дистанционного зондирования небесных тел зачастую определяется относительное содержание различных элементов. В данной статье исследуется вопрос о влиянии взаимного расположения неоднородностей на рассеивающие свойства слоистых частиц. Рассматривались силикатно-углеродные (силикат, покрытый слоем углерода) и углеродно-силикатные (углерод, покрытый слоем силиката) частицы. Компьютерное моделирование рассеивающих свойств слоистых частиц методом матриц формы показало, что взаимное расположение слоев при одинаковом содержании углерода и силиката заметно влияет как на интегральные характеристики рассеяния (фактор рассеяния, фактор поглощения, альbedo однократного рассеяния), так и на степень линейной поляризации. Сравнение результатов моделирования с результатами поляриметрических наблюдений астероида F-типа (3200) Phaethon показало, что для астероидов данного типа характерны скорее силикатно-углеродные частицы, которые обладают как более высокой степенью линейной поляризации на соответствующем фазовом угле, так и более низким альbedo.

**Ключевые слова:** рассеяние света, поляризация, слоистые частицы, метод матриц формы

---

## 1 Введение

Различные рассеивающие объекты, встречающиеся в природе, зачастую имеют гетерогенную внутреннюю структуру, и проблема рассеяния света неоднородными частицами вызывает большой интерес во многих различных науках: астрофизике, оптике атмосферы и океана, биофизике и т. д. Например, растительные и животные клетки, водоросли и бактерии, аэрозоли в атмосфере и реголит на поверхности безатмосферных небесных тел представляют собой объекты гетерогенной (во многих случаях – слоистой) структуры. Помимо этого, образующиеся в природных или технологических процессах частицы также зачастую обладают неоднородным внутренним составом. Изучение рассеивающих свойств неоднородных частиц имеет отношение к широкому кругу приложений во многих областях, таких как процессы фармацевтической промышленности, нанотехнологии, химия, астрофизика, биология и медицинские науки (Gumerov, Duraiswami, 2005). В некоторых случаях неоднородные рассеиватели могут быть представлены многослойными частицами.

Особый интерес изучение частиц со слоистой структурой связан с изучением объектов солнечной системы. При лабораторном изучении частиц, доставленных космическими аппаратами на Землю, такими как образцы частиц астероида (162173) Ryugu, частицы покрывались тонким слоем углерода, чтобы частицы не разлетались под воздействием сканирующего излучения (Kimura et al., 2022). При подготовке миссии Rosetta прибор для изучения космической пыли GIADA (Grain Impact Analyser and Dust Accumulator) калибровался путем изучения слоистых частиц, состоящих из силиката, покрытого слоем аморфного углерода (Ferrari et al., 2014). Такой подход обосновывался тем, что в работе Greenberg, Hage (1990) было доказано, что частицы слоистой структуры могут формироваться за в ходе эволюционных процессов в межзвездной среде. Пыль протопланетной туманности, из которой образуются наблюдаемые в солнечной системе кометы, представляет собой развитую стадию диффузного облака межзвездной пыли. Считается, что диффузное облако межзвездной пыли

состоит из неоднородных частиц с силикатным ядром и покрывающим его слоем темного органического вещества (Greenberg, 1985). Фотометрические и поляриметрические исследования поверхности астероидов демонстрируют, за некоторыми исключениями, отсутствие значительных изменений рассеивающих свойств различных участков поверхности астероидов, т.е. высокую степень оптической однородности их поверхности. Одним из возможных механизмов, который может способствовать оптической однородности поверхности, являются отложения слоя углерода на частицах верхнего слоя реголита астероида (Belskaya et al., 2005). Отложения могут образоваться в результате пиролиза углеродсодержащего (органического) вещества, подвергнувшегося процессу космического выветривания (Пронин, Николаева, 1982; Шкуратов и др., 1986; Starukhina, Shkuratov, 1995). С другой стороны, в работе (Shiraiwa et al., 2010) показано, что частицы углерода могут взаимодействовать с окружающими непоглощающими частицами, образующими слой поверх частицы углерода. Таким образом, на поверхности слоистых силикатно-углеродных частиц может находиться как слой углерода, так и слой силиката. Взаимное расположение углеродного и силикатного слоев оказывает определяющее влияние, например, на процессы формирования астероидов (Kudo et al., 2002). Данная работа посвящена изучению влияния взаимного расположения углеродного и слоистого слоя на рассеивающие свойства слоистой частицы.

## 2 Модель слоистой частицы

Для моделирования процессов рассеяния света слоистыми частицами зачастую используется модель слоистых сфер, благодаря достаточной простоте алгоритма вычислений (Wu, Wang, 1991; Johnson, 1996). Однако в природе сферические частицы встречаются достаточно редко. Более того, принято считать, что сферичность формы рассеивающей частицы оказывает определяющее влияние на ее рассеивающие свойства, затмевая тем самым влияние слоистой структуры. По этой причине существует интерес к слоистым несферическим частицам, таким как сфероиды и эллипсоиды (Voshchinnikov et al., 2006; Posselt et al., 2002; Gurwich et al., 2000; Farafonov et al., 2003). Но удаленные от Солнца частицы не обладают даже такими элементами симметрии, как ось вращения или плоскость симметрии, поэтому считается, что многие из пылинок ранней Солнечной системы имели неправильную форму, а не сферическую (Flynn et al., 2013). Позднее был разработан более общий метод вычисления рассеивающих свойств слоистых частиц произвольной формы (Petrov et al., 2007), являющийся разновидностью метода матриц формы (Petrov et al., 2006, 2012). Данный метод позволяет вычислять рассеивающие свойства частиц неправильной формы и слоистой структуры. В данной работе этот метод был использован для компьютерного моделирования процессов рассеяния света.

В качестве модели частицы неправильной формы были использованы сопряженные случайные гауссовские частицы, обладающие как крупномасштабной, так и мелкомасштабной шероховатостью (Петров, Киселев, 2019). Форма такой частицы  $R(\theta, \phi)$  в сферической системе координат описывается соотношением:

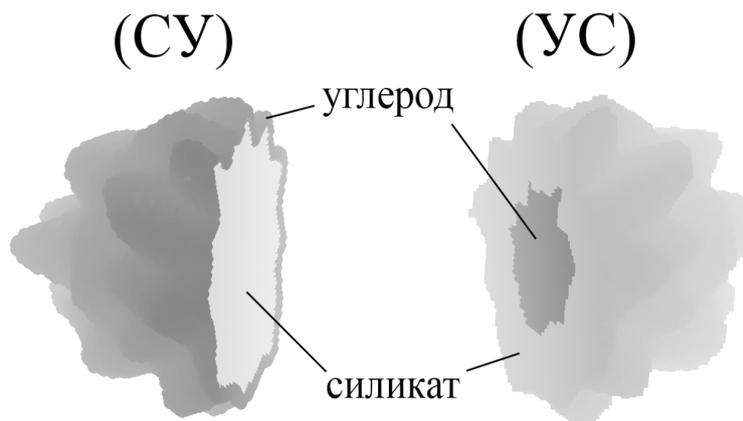
$$R(\theta, \phi) = p \cdot R_{\Gamma_1}(\theta, \phi) + (1 - p) \cdot R_{\Gamma_2}(\theta, \phi), \quad (1)$$

где  $R_{\Gamma_1}(\theta, \phi)$  и  $R_{\Gamma_2}(\theta, \phi)$  – случайные гауссовские частицы с корреляционными углами  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , описанные в работах Муйнонена (Muinonen, 1996, 1998). В данной работе использовались частицы с параметрами  $\Gamma_1 = 7^\circ$ ,  $\Gamma_2 = 50^\circ$ ,  $p = 0.5$ .

Сперва были созданы силикатно-углеродные (СУ) частицы, в которых частица, состоящая из силиката  $R_{\text{sil}}$ , покрывалась достаточно тонким слоем аморфного углерода  $R_{\text{carb}}$ . Относительная толщина слоя  $\zeta$  определялась по формуле:

$$\zeta = \frac{R_{\text{carb}} - R_{\text{sil}}}{R_{\text{sil}}} \times 100\%. \quad (2)$$

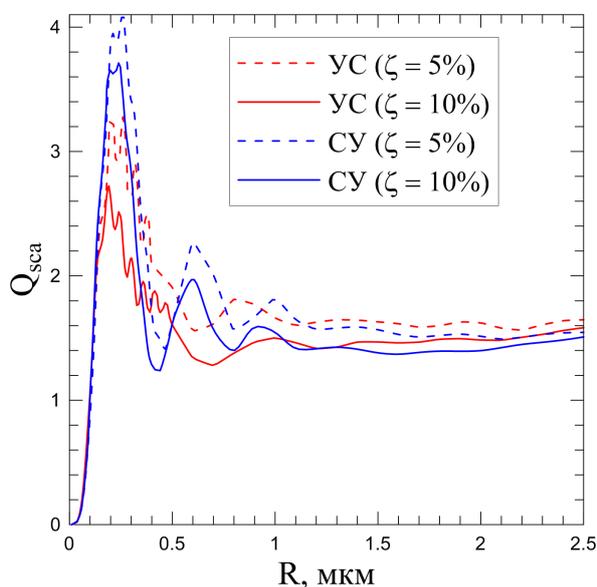
В данной работе использовались две относительные толщины  $\zeta = 5\%$  и  $\zeta = 10\%$ . Затем были созданы углеродно-силикатные (УС) частицы, в которых частица, состоящая из углерода, была покрыта слоем силиката. Толщины слоев частиц УС выбирались таким образом, чтобы объемы силикатной составляющей СУ- и УС-частиц были одинаковы и объемы углеродной составляющей также были одинаковы. Примеры таких частиц приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Пример силикатно-углеродной (СУ) и углеродно-силикатной (УС) частиц

Основными параметрами, определяющими рассеивающие свойства частицы, являются ее размер  $R$  и комплексный показатель преломления  $m = n + i \cdot k$ . Под размером в данном случае понимается радиус сферы того же объема, что и объем силикатного вещества. Показатель преломления силиката для длины волны  $\lambda = 0.5317 \mu\text{m}$ , соответствующей фильтру V, был взят из работы [Scott, Duley \(1996\)](#) и составил  $m = 1.6820 + i \cdot 0.0031$ . Показатель преломления углерода для той же длины волны, взятый из работы [Li, Greenberg \(1997\)](#), составил  $m = 1.9470 + i \cdot 0.2940$ .

### 3 Результаты и обсуждение



**Рис. 2.** Зависимость фактора рассеяния  $Q_{\text{sca}}$  от размера рассеивающей частицы. Синие линии соответствуют СУ-частицам, красные линии – УС-частицам. Пунктирные линии соответствуют толщине углеродного слоя  $\zeta = 5\%$ , сплошные линии –  $\zeta = 10\%$

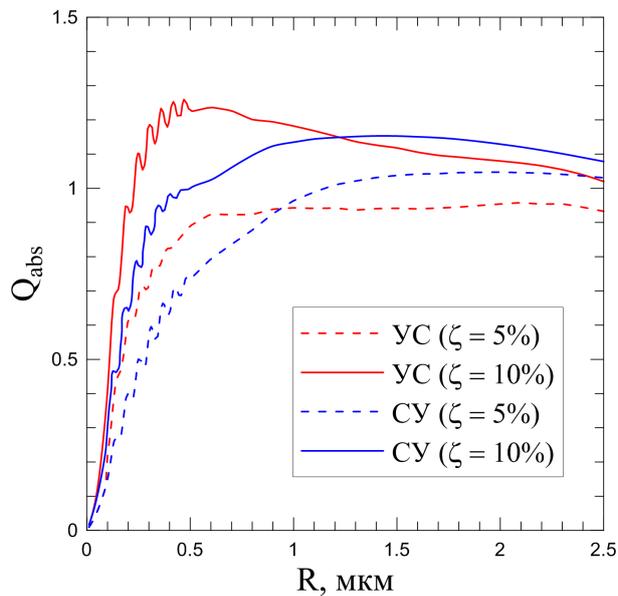
Синие линии – силикатно-углеродные частицы. Из рисунка видно, что при больших размерах рассеивающих частиц (в несколько раз превышающих длину волны) УС-частицы ожидаемо рассеивают

В первую очередь были исследованы интегральные характеристики рассеянного излучения, не зависящие от геометрии освещения и наблюдения – фактор рассеяния  $Q_{\text{sca}}$ , фактор поглощения  $Q_{\text{abs}}$  и альбеда однократного рассеяния  $\omega$ . Фактор рассеяния определяет, насколько эффективно перерассеивает свет единица площади рассеивающего объекта ([Петров и др., 2020](#)), фактор поглощения – насколько эффективно поглощает свет единица площади рассеивающего объекта. Зная фактор рассеяния и фактор поглощения, можно вычислить альбеда однократного рассеяния  $\omega$ , которая определяет вероятность того, что отдельный фотон будет скорее рассеян, чем поглощен частицей ([Mishchenko et al., 2002](#)):

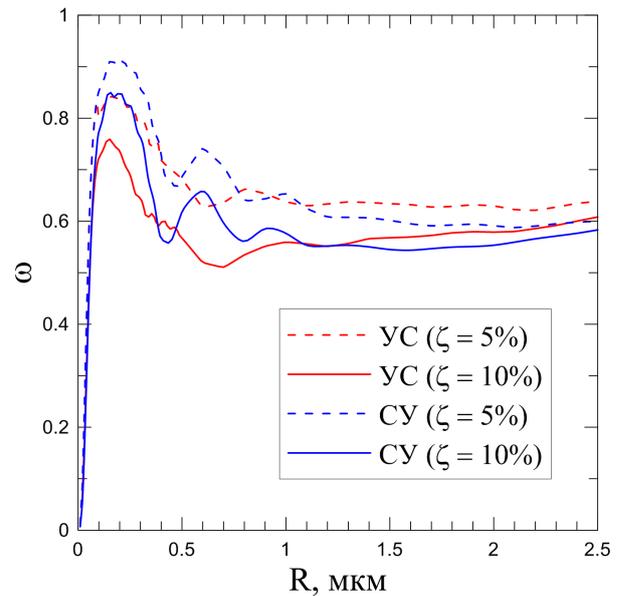
$$\omega = \frac{Q_{\text{sca}}}{Q_{\text{sca}} + Q_{\text{abs}}}. \quad (3)$$

Рисунок 2 демонстрирует зависимость фактора рассеяния  $Q_{\text{sca}}$  от размера рассеивающей слоистой частицы различных типов. Пунктирные линии соответствуют небольшой толщине углеродного слоя  $\zeta = 5\%$ , сплошные линии – толщине углеродного слоя  $\zeta = 10\%$ . Красные линии – это углеродно-силикатные частицы, синие линии – силикатно-углеродные частицы.

свет несколько эффективнее, ибо у них на поверхности находится светлый силикат, в отличие от СУ-частиц с поверхностным слоем из темного углерода. Однако при достаточно малых размерах частиц, от 0.2 до 0.4 мкм, темные СУ-частицы рассеивают свет намного эффективнее. Объяснение этому может быть дано следующее – в случае УС-частиц показатель преломления верхнего слоя заметно меньше, чем показатель преломления нижнего слоя (это справедливо как для действительной, так и мнимой части показателя преломления). При малых размерах рассеивающей частицы происходит эффект, аналогичный так называемому просветлению оптики. Просветление оптики заключается в напылении на преломляющую поверхность, граничащую с воздухом, тонкой пленки с показателем преломления, меньшим чем у преломляющей поверхности, что приводит к заметному уменьшению отражения от преломляющей поверхности, а следовательно, к повышению светочувствительности оптической системы (Бреховских, 1973).



**Рис. 3.** То же, что на рис. 2, только для фактора поглощения  $Q_{abs}$

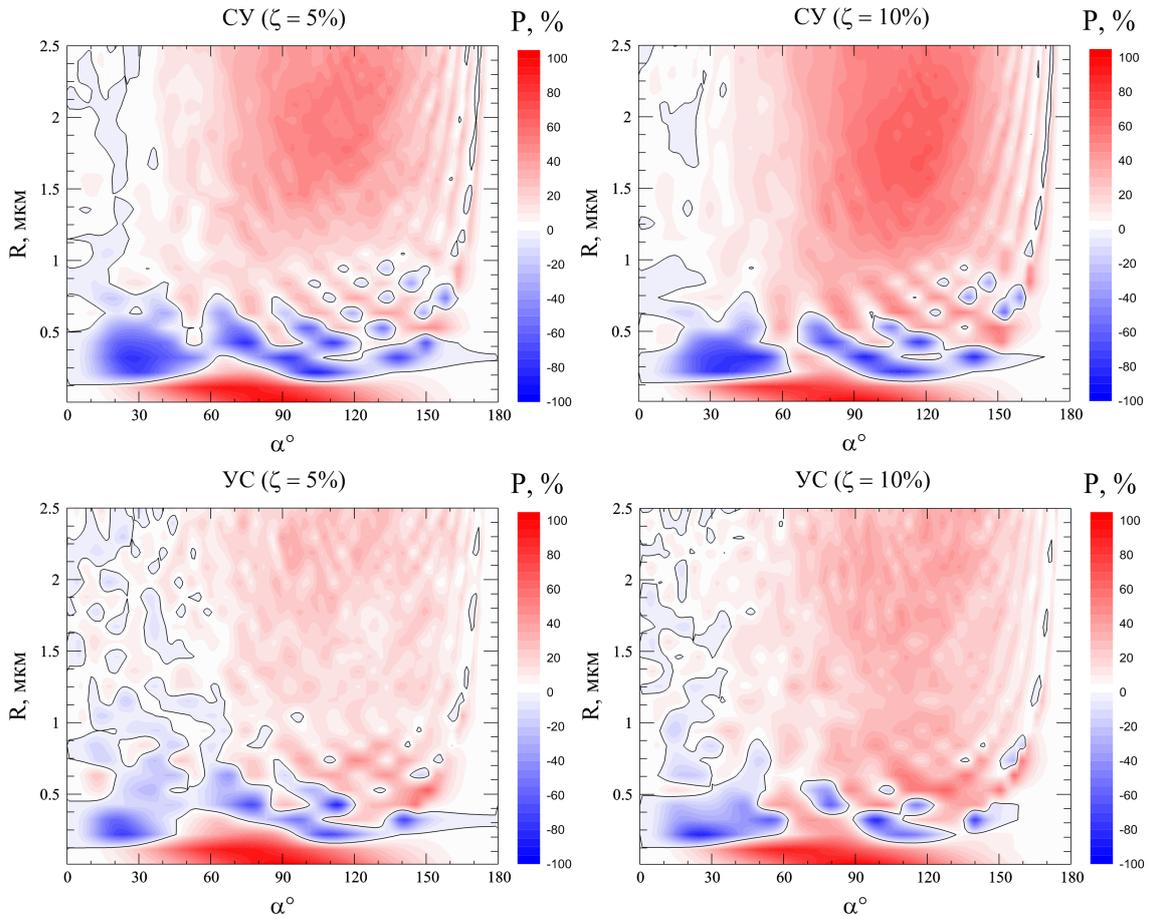


**Рис. 4.** То же, что на рис. 2, только для альбедо однократного рассеяния  $\omega$

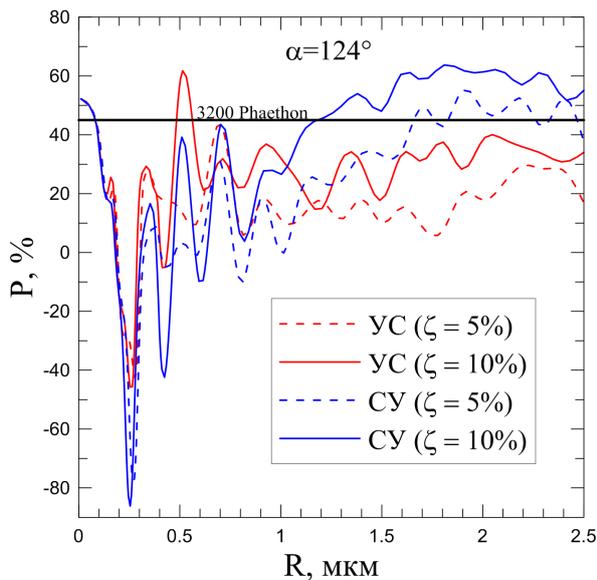
Рисунок 3 демонстрирует зависимость фактора поглощения  $Q_{abs}$  от размера рассеивающей слоистой частицы. Частицы с  $\zeta = 10\%$  обладают заметно большей способностью к поглощению, благодаря большему содержанию углерода. При размерах частицы до  $\approx 1$  мкм сильнее поглощают свет УС-частицы, а при больших размерах – СУ-частицы, что, по-видимому, связано с упомянутым выше эффектом, аналогичным эффекту просветления оптики.

На рисунке 4 показана зависимость альбедо однократного рассеяния от размера частицы. Как видно из рисунка, альбедо у частиц с  $\zeta = 10\%$  заметно ниже, чем у частиц с  $\zeta = 5\%$ , из-за большего количества поглощающего углерода. Поглощением определяется и разница между СУ- и УС-частицами: при размерах  $< 1$  мкм альбедо выше у СУ-частиц, а при больших размерах – у УС-частиц.

Но наибольший интерес вызывает влияние взаимного расположения слоев на фазовую зависимость степени линейной поляризации, изучение которой широко применяется при дистанционном зондировании небесных тел. Ввиду этого были построены карты степени линейной поляризации для частиц четырех вышеописанных типов (рис. 5). Красный цвет соответствует положительной степени линейной поляризации, синий – отрицательной, белый – околонулевой. Из рисунка видно основное отличие между разными типами частиц – СУ-частицы проявляют намного больший максимум степени линейной поляризации, чем УС-частицы. Это крайне важно для интерпретации наблюдений объектов Солнечной системы, например, астероидов F-типа, обладающих достаточно высокой величиной максимума положительной поляризации.



**Рис. 5.** Карта степени линейной поляризации рассеянного света в зависимости от фазового угла (горизонтальная ось) и размера рассеивающей частицы льда (вертикальная ось) для четырех типов частиц



**Рис. 6.** Зависимость степени линейной поляризации от размера при фазовом угле  $\alpha = 124^\circ$  для четырех типов частиц. Сплошная горизонтальная линия соответствует максимуму степени линейной поляризации астероида (3200) Phaethon

Как было установлено в работе [Kiselev et al. \(2022\)](#), астероид (3200) Phaethon обладает максимумом поляризации  $P_{\max} = 45\% \pm 1\%$  при фазовом угле  $\alpha = 124^\circ \pm 0.4^\circ$ . Это единственный астероид F-типа, для которого удалось достаточно точно определить положение и величину максимума степени линейной поляризации. Насколько же хорошо СУ и УС-частицы могут воспроизвести максимум поляризации данного астероида? Для этого была построена зависимость степени линейной поляризации от размера при фазовом угле  $\alpha = 124^\circ$  (рис. 6). Горизонтальная линия соответствует максимуму степени линейной поляризации астероида (3200) Phaethon. Как видно из рисунка, УС-частицы не могут воспроизвести этот максимум, поскольку практически во всем диапазоне размеров рассеивающих частиц они проявляют заметно меньшую степень линейной поляризации. В то же самое время, СУ-частицы при размерах свыше 1 мкм проявляют такую же или даже большую степень линейной поляризации,

обладая при этом меньшим альбедо однократного рассеяния (рис. 4). Следовательно, астероиды темных спектральных классов, в частности астероид (3200) Phaethon, вероятнее всего обладает частицами СУ-типа, то есть неоднородными частицами, в которых слой силиката покрыт слоем углерода.

## 4 Выводы

Основной вывод данной работы: учет взаимного расположения слоев в неоднородных частицах, состоящих из углерода и силиката, достаточно сильно влияет на рассеивающие свойства этих частиц даже при одинаковом процентном содержании углерода и силиката. На основании расчетов методом матриц формы для слоистых частиц неправильной формы показано, что взаимное расположение слоев влияет как на интегральные характеристики, такие как фактор рассеяния, фактор поглощения и альбедо однократного рассеяния, так и на фазовую зависимость степени линейной поляризации. Установлено, что углеродные частицы, покрытые слоем силиката, как правило рассеивают свет более эффективно, чем силикатные частицы, покрытые слоем углерода. Исключением является диапазон размеров от 0.2 до 0.4 мкм, в котором рассеяние силикатно-углеродными частицами доминирует. В работе дано объяснение этому эффекту, аналогичному эффекту просветления оптики, который достигается нанесения на преломляющую поверхность тонкой пленки относительно низкого показателя преломления. Продемонстрировано, что взаимное расположения слоев сильно влияет на фазовую зависимость степени линейной поляризации. В случае силикатно-углеродных частиц величина максимума поляризации заметно выше, чем в случае углеродно-силикатных частиц. Сравнение результатов моделирования с данными наблюдений для астероида (3200) Phaethon показало, что углеродно-силикатные частицы в большей части диапазона размеров не могут воспроизвести столь высокое значение степени линейной поляризации, в то время как силикатно-углеродные частицы при размерах более 1 мкм могут достигать столь высоких значений степени поляризации. Следовательно, для темных астероидов F-типа более характерны частицы реголита, представляющие собой силикат, покрытый слоем углерода.

## Литература

- Бреховских Л.М., 1973. Волны в слоистых средах. Изд. 2, доп. и испр. М.: Наука. [Brehovsky L.M., 1973. Waves in layered media, 2nd ed. M.: Nauka. (In Russ.)]
- Петров Д.В., Киселев Н.Н., 2019. Астрон. вестник. Т. 53. № 4. С. 309. [Petrov D.V., Kiselev N.N., 2019. Solar System Research, vol. 53, no. 4. pp. 294–305. (In Russ.)]
- Петров Д.В., Жужулина Е.А., Савушкин А.А., 2020. Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. Т. 116. № 2. С. 41. [Petrov D.V., Zhuzhulina E.A., Savushkin A.A., 2020. Izv. Krymsk. Astrofiz. Observ., vol. 116, no. 2, pp. 41–48. (In Russ.)]
- Пронин А.А., Николаева О.В., 1982. Доклады Академии наук СССР. Т. 265. № 2. С. 429–432. [Pronin A.A., Nikolaeva O.V., 1982. Doklady Akademii Nauk SSSR, vol. 265, pp. 429–432. (In Russ.)]
- Шкуратов Ю.Г., Стадникова Н.П., Ярмоленко С.Н., 1986. Астрон. журн. Т. 63. № 6. С. 1183. [Shkuratov Y.G., Stadnikova N.P., Yarmolenko S.N., 1986. Astronomicheskii Zhurnal, vol. 63, pp. 1183–1188. (In Russ.)]
- Belskaya I.N., Shkuratov Y.G., Efimov Y.S., et al., 2005. Icarus, vol. 178, no 1, pp. 213–221.
- Farafonov V., P'in V., Prokopjeva M., 2003. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, vol. 79–80, pp. 599–626.
- Ferrari M., Della Corte V., Rotundi A., Rietmeijer F.J.M., 2014. Planetary and Space Science, vol. 101, pp. 53–64.
- Flynn G.J., Wirick S., Keller L.P., 2013. Earth Planets Space, vol. 65, no. 10, p. 13.
- Greenberg J.M., 1985. Physica Scripta, vol. T11, pp. 14–26.
- Greenberg J.M., Hage J.I., 1990. Astrophys. J., vol. 361, pp. 260–274.
- Gumerov N.A., Duraiswami R., 2005. Acoustical Society of America Journal, vol. 117, no. 4, pp. 1744–1761.
- Gurwich I., Kleiman M., Shiloah N., Cohen F., 2000. Applied Optics, vol. 39, no. 3, pp. 470–477.
- Johnson B.R., 1996. Applied Optics, vol. 35, pp. 3286–3296.

- Kimura Y., Kato T., Anada S., et al., 2022. 53rd Lunar and Planetary Science Conference, vol. 2678.
- Kiselev N.N., Rosenbush V.K., Petrov D., et al., 2022. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, vol. 514, no. 4, pp. 4861–4875.
- Kudo T., Kouchi A., Arakawa M., Nakano H., 2002. *Meteoritic and Planetary Science*, vol. 37, pp. 1975–1983.
- Li A., Greenberg J.M., 1997. *Astron. Astrophys.*, vol. 323, pp. 566–584.
- Mishchenko M.I., Travis L.D., Lacis A.A., 2002. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles*, Cambridge: Cambridge University Press, UK.
- Muinonen K., 1996. *Earth Moon Planets*, vol. 72, pp. 339–342.
- Muinonen K., 1998. *Astron. Astrophys.*, vol. 332, pp. 1087–1098.
- Petrov D., Synelnyk E., Shkuratov Y., Videen G., 2006. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.*, vol. 102, no. 1, pp. 85–110.
- Petrov D., Shkuratov Y., Zubko E., Videen G., 2007. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.*, vol. 106, no. 1–3, pp. 437–454.
- Petrov D., Shkuratov Y., Videen G., 2012. *J. Quant. Spectrosc. Rad. Trans.*, vol. 113, no. 18, pp. 2406–2418.
- Posselt B., Farafonov V.G., Il'in V.B., Prokopjeva M.S., 2002. *Measurement Science and Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 256–262.
- Scott A., Duley W.W., 1996. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, vol. 105, p. 401.
- Shiraiwa M., Kondo Y., Iwamoto T., and Kita K., 2010. *Aerosol Science Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 46–54.
- Starukhina L.V., Shkuratov Yu.G., 1995. *Icarus*, vol. 113, pp. 442–449.
- Voshchinnikov N.V., Farafonov V.G., Videen G., Ivlev L.S., 2006. *Abstracts of ninth international conference on electromagnetic and light scattering by non-spherical Particles*, p. 271–4.
- Wu Z.P., Wang Y.P., 1991. *Radio Science*, vol. 26, no. 6, p. 1393.

## Influence of the internal structure on the scattering properties of inhomogeneous particles

*D. Petrov*

Crimean Astrophysical Observatory, Nauchny 298409  
*dvp@craocrimea.ru*

**Abstract.** Inhomogeneous particles are widespread in nature. When interpreting observational data of remote sensing of celestial bodies, the relative abundances of various elements are often determined. This paper investigates the question of the influence of the mutual arrangement of inhomogeneities on the scattering properties of layered particles. Silicate-carbon (silicate covered with a layer of carbon) and carbon-silicate (carbon covered with a layer of silicate) particles were considered. Computer simulation of the scattering properties of layered particles using the shape matrix method showed that the mutual arrangement of layers at the same carbon and silicate contents noticeably affects both the integral scattering characteristics (scattering factor, absorption factor, single scattering albedo) and the degree of linear polarization. A comparison of the simulation results with the results of polarimetric observations of the F-type asteroid (3200) Phaethon showed that asteroids of this type are highly likely to be characterized by silicate-carbon particles, which have both a higher degree of linear polarization at the corresponding phase angle and a lower albedo.

**Key words:** light scattering, polarization, layered particles, shape matrix method