

УДК 523.44

С. В. Зайцев¹, Н. Н. Киселев¹, В. К. Розенбуш¹, С. В. Колесников²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
sergio908@rambler.ru

²Научно-исследовательский институт «Астрономическая обсерватория»
Одесского национального университета имени И. И. Мечникова
ул. Маразлиевская 1в, Одесса, 65014

Поляриметрия спутника Сатурна Реи

Представляются результаты поляриметрических наблюдений спутника Сатурна Реи в диапазоне фазовых углов $0.76\text{--}5.96^\circ$. Наблюдения проводились с 23 марта 2012 г. по 2 мая 2014 г. в спектральной полосе WR (550—750 нм) на 2.6-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории, оснащённом одноканальным фотометром-поляриметром. По результатам наблюдений построена фазовая зависимость линейной поляризации Реи. Параметры этой зависимости сравнены с соответствующими зависимостями для высокоальбедных спутников Юпитера, Янета и среднеальбедных спутников Урана. Полученные результаты обсуждаются в рамках известных моделей рассеяния света реголитными поверхностями.

ПОЛЯРИМЕТРІЯ СУПУТНИКА САТУРНА РЕЇ, Зайцев С. В., Кисельов М. М., Розенбуш В. К., Колесников С. В. — Наводяться результати поляриметричних спостережень супутника Сатурна Реї у діапазоні фазових кутів $0.76\text{--}5.96$. Спостереження проводилися з 23 березня 2012 р. по 2 травня 2014 р. у спектральній смузі WR (550—750 нм) на 2.6-м телескопі Кримської астрофізичної обсерваторії за допомогою одноканального фотометра-поляриметра. За результатами спостережень побудовано фазову залежність лінійної поляризації Реї. Параметри цієї залежності порівнюються з відповідними залежностями для високоальбедних супутників Юпитера і середньоальбедних супутників Урана. Отримані результати аналізуються у рамках відомих моделей розсіяння світла реголітними поверхнями.

POLARIMETRY OF SATURNIAN SATELLITE RHEA, by Zaitsev S. V., Kiselev N. N., Rosenbush V. K., Kolesnikov S. V. — We present results of polarimetric observations of Saturn's moon Rhea carried out from March

23, 2012 — May 2, 2014 in WR spectral band (550—750 nm). We used 2.6-m telescope equipped with a one-channel photoelectric photometer-polarimeter (Crimean Astrophysical Observatory). The phase-angle dependence of linear polarization of Rhea was obtained using the results of our observations. Results obtained are discussed in terms of existing models of light scattering by regolith surfaces.

ВВЕДЕНИЕ

Фазовая зависимость линейной поляризации света, рассеянного поверхностями безатмосферных тел Солнечной системы (астероидов, спутников больших планет), является важным источником информации об альбедо, составе, физических и оптических свойствах их поверхностей. Особенный интерес представляет изучение поляризационных характеристик света высокоальбедных безатмосферных тел, так как при приближении к оппозиции они демонстрируют нелинейное увеличение яркости поверхности, которое называют фотометрическим оппозиционным эффектом (ФОЭ), регулярную ветвь отрицательной поляризации и узкий вторичный минимум отрицательной линейной поляризации, который называют поляриметрическим оппозиционным эффектом (ПОЕ) [12, 15].

В качестве основных механизмов, объясняющих возникновение отмеченных выше эффектов в интенсивности и поляризации, рассматриваются: когерентное усиление обратного рассеяния (эффект слабой локализации фотонов), эффекты ближнего поля и рассеяние на одиночных частицах [15, 17, 18, 24, 28]. Относительный вклад этих механизмов определяется физическими свойствами поверхностей, такими как альбедо, плотность упаковки частиц, размеры мономеров, из которых состоят агрегатные частицы, форма и т. д. Поэтому изучение фазовых зависимостей поляризации света, отраженного поверхностями безатмосферных тел на малых и больших фазовых углах, и определение формы и амплитуды поляриметрического оппозиционного эффекта может содействовать уточнению моделей рассеяния света реголитными поверхностями и определению физических характеристик небесных тел. При этом точные профили поляриметрического оппозиционного эффекта высокоальбедных безатмосферных тел Солнечной системы пока точно не установлены, но уже ясно, что они отличаются для разных механизмов образования поляризации и разных характеристик поверхностей.

Одним из высокоальбедных безатмосферных тел Солнечной системы, демонстрирующих наличие фотометрического оппозиционного эффекта, является Рея — второй по величине спутник Сатурна. Ее диаметр составляет 764 км [27], плотность — 1.23 г/см^3 [11], геометрическое альбедо на длине волны $\lambda = 510 \text{ нм}$ — 0.81 [19]. Первые фотометрические наблюдения Реи были проведены в 1960-х гг. [4, 9].

Они позволили определить, что ведомое полушарие спутника светлее, чем ведущее. Финк [8] и Кларк [6] по результатам спектральных наблюдений обнаружили, что поверхность Реи покрыта водяным льдом. Дальнейшие спектральные наблюдения подтвердили этот вывод и позволили более точно определить состав поверхности. Первые снимки поверхности спутника, полученные с помощью космического аппарата «Вояджер» [25], показали, что поверхность ведомого полушария Реи является геологически более молодой по сравнению с поверхностью ведущего полушария. Космический аппарат «Кассини» предоставил данные, с помощью которых были изучены вариации спектральных свойств Реи по поверхности и построены карты высокого разрешения [20, 26], орбитальная кривая и фазовая зависимость блеска спутника, исследован в широком диапазоне длин волн оппозиционный фотометрический эффект [5, 13, 19].

Несмотря на стойкий интерес к исследованию Реи, поляриметрических наблюдений спутника проведено крайне мало. Это обусловлено сложностью условий наблюдений из-за близости Реи к диску Сатурна. Впервые о поляриметрических наблюдениях Реи сообщила И. Кулик [13]. В ее работе показано, что минимумы фазовой зависимости линейной поляризации обоих полушарий Реи приходятся на угол фазы 2° , и в спектральной полосе RX (эффективная длина волны $\lambda = 694$ нм) имеют средние значения около -1.2% . В работе также отмечено, что форма фазовой зависимости поляризации обоих полушарий близка к форме фазовой зависимости поляризации некоторых транснептуновых объектов. К сожалению, измерения степени поляризации в диапазоне фазовых углов 1.86 — 5.28° , где должен находиться минимум поляризации, не проводились, поэтому данных в работе [13] недостаточно для точного определения положения и величины минимума поляризации и полной формы фазовой зависимости поляризации Реи. Кроме того, разброс результатов измерений довольно значительный, что, по-видимому, связано с нестабильной величиной инструментальной поляризации. В настоящей работе мы представляем новые поляриметрические наблюдения спутника Сатурна Реи, которые более равномерно и плотнее покрывают диапазон фазовых углов 0.76 — 5.96° и существенно дополняют ранее полученные данные.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения Реи проводились с 23 марта 2012 г. по 2 мая 2014 г. в спектральной полосе WR ($\lambda = 550$ — 750 нм) на одноканальном фотометре-поляриметре, установленном в кассегреневском фокусе 2.6-м телескопа Крымской астрофизической обсерватории. Диапазон фазовых углов составил 0.76 — 5.96° . Поляриметрический блок фотометра-поляриметра состоит из непрерывно вращающейся со скоростью 33.3 об/с ахроматической четвертьволновой фазовой пластинки и на-

ходящейся за ней неподвижной призмы Глана. Более подробно устройство и принцип работы фотометра-поляриметра описаны в работе [2].

Для наблюдений использовалась диафрагма, вырезающая на небе площадку диаметром 15'. Фон неба измерялся до и после каждой серии измерений Реи. Значения интенсивности фона интерполировались и учитывались для каждого измерения объекта. Для того чтобы учесть неравномерность интенсивности и поляризации фона неба из-за близости яркого диска Сатурна и его колец, измерения фона проводились по обе стороны от спутника на одинаковом от него расстоянии.

Значения линейной поляризации рассчитывались с помощью параметров Стокса u и q , полученных по наблюдениям Реи для каждой ночи наблюдений:

$$P = \sqrt{u^2 + q^2},$$

Позиционный угол плоскости поляризации в инструментальной системе координат рассчитывался по формуле

$$\text{tg} 2\psi = \frac{u}{q}.$$

Степень поляризации и позиционный угол плоскости поляризации по отношению к плоскости, ортогональной к плоскости рассеяния, выражаются через P_r и ψ_r [30]:

$$P_r = P \cos 2\psi_r, \\ \psi_r = (\psi - 90^\circ).$$

Оценивание ошибки определения степени линейной поляризации производилось двумя способами — из статистики накопленных импульсов и по дисперсии параметров Стокса, вычисленных для каждой серии в течение ночи. Наибольшая из этих двух ошибок выбиралась в качестве окончательной [3]. Ошибка определения угла плоскости поляризации в обоих случаях определялась по формуле

$$\frac{28.65}{P} \psi_r.$$

Инструментальная поляризация учитывалась с помощью результатов наблюдений звезд-стандартов с нулевой поляризацией [23]. Точность определения инструментальной поляризации составляла 0.01—0.02%. Из наблюдений звезд-стандартов с большой поляризацией определялась коррекция за нуль-пункт положения инструментального позиционного угла плоскости линейной поляризации в экваториальной системе [10, 23].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты наших наблюдений Реи в спектральной полосе WR (550—750 нм) представлены в виде фазовой зависимости поляризации на рис. 1 (точки — светлое ведущее полушарие, $L < 180^\circ$, темные ромбики — темное ведомое полушарие, $L > 180^\circ$). Для сравнения показаны результаты наблюдений И. Кулик [13] в спектральной полосе RX (кружки — ведущее полушарие, светлые ромбики — ведомое полушарие). Сплошной кривой показана аппроксимация наших наблюдений поляризации Реи стандартным тригонометрическим выражением [14].

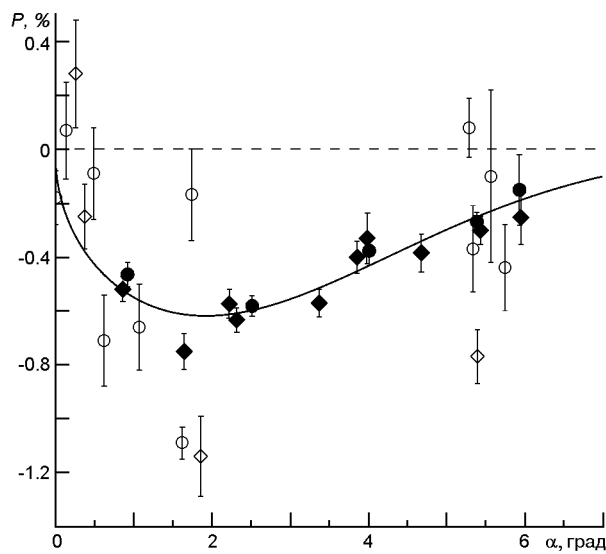


Рис. 1. Фазовая зависимость линейной поляризации Реи. Наши наблюдения: точки — светлое ведущее полушарие, $L < 180^\circ$, темные ромбики — темное ведомое полушарие, $L > 180^\circ$; наблюдения [13]: кружки — ведущее полушарие, светлые ромбики — ведомое полушарие

Полученные данные позволяют утверждать, что фазовая зависимость поляризации Реи имеет ассиметричную форму с минимумом поляризации $P_{\min} = 0.6\%$ на фазовом угле $\alpha_{\min} = 2.2^\circ$. Разброс результатов наблюдений может быть вызван как ошибками наблюдений, так и долготной зависимостью поляризации. На рис. 2 изображена долготная зависимость поляризации Реи, построенная по отклонениям P наблюдаемой поляризации от аппроксимационной кривой в диапазоне фазовых углов $4-6^\circ$. Видно, что данные для ведущего полушария ($L = 90^\circ$) лежат систематически выше, чем для ведомого ($L = 270^\circ$), что согласуется с результатом [13] и соответствует фотометрическому различию двух полушарий [4, 9]. Однако для уверенного разделения долготной и фазовой зависимостей поляризации Реи необходимы дополнительные наблюдения.

Наши результаты подтверждают выводы работы [13] о том, что минимум фазовой зависимости поляризации Реи соответствует фазо-

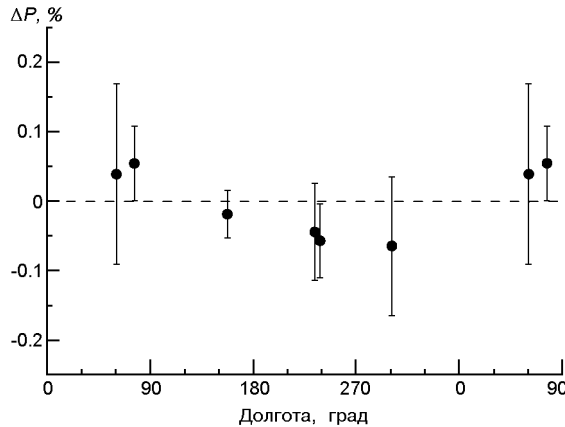


Рис. 2. Долготная зависимость поляризации Реи в диапазоне фазовых углов 4° — 6°

вому углу примерно 2° , но показывают, что его глубина составляет $P_{\min} = 0.57\%$, т. е. в два раза меньше по абсолютной величине, чем было найдено ранее [13]. Как было отмечено выше, расхождения могут быть объяснены тем, что минимум поляризации фазовой зависимости Реи в работе [13] был найден путем интерполяции данных и неполным учетом инструментальной поляризации, которая, как отмечено в работе И. Кулик, сильно изменяется по полю. Наши результаты имеют большую точность, покрывают более плотно и равномерно почти весь доступный для наземных наблюдений диапазон фазовых углов и лучше согласуются между собой.

Полученные данные позволяют провести сравнение параметров фазовой зависимости линейной поляризации Реи с аналогичными параметрами, полученными для высокоальбедных спутников Юпитера, остальных спутников Сатурна и среднеальбедных спутников Урана и обсудить их различия.

Фазовые зависимости поляризации высокоальбедных спутников Юпитера Ио, Европы и Ганимеда ($p_v = 0.44 \dots 0.68$) представляют собой почти плоские по форме кривые с близкими значениями величины $P_{\min} = 0.2 \dots -0.3\%$ [21]. То есть, минимум их регулярной ветви отрицательной поляризации менее глубок по сравнению с минимумом поляризации Реи и смещен в сторону больших углов. Также для этих спутников наблюдаются вторичные минимумы поляризации около оппозиции ($P_{\min, \text{ПОЕ}} = -0.3 \dots -0.6\%$ на фазовых углах $0.2 \dots 0.6^\circ$ [21, 22, 29]. По сравнению с ведомым полушарием спутника Сатурна Япета, обладающим высоким альбедо ($p_v = 0.55$) [7], Рея имеет менее асимметричную и чуть менее глубокую фазовую зависимость поляризации. Тем не менее, для обоих этих спутников не наблюдается отдельный вторичный минимум поляризации около оппозиции. В то же время среднеальбедные спутники Урана ($p_v = 0.19 \dots 0.35$) демонстрируют более узкие и глубокие кривые поляризации с минимумами, достигающими от -1.2 до -1.4% в диапазоне фазовых углов $\min 1^\circ \dots 1.4^\circ$ [1]. Таким образом, глубина минимума отрицательной ветви поляризации

Реи и его положение на фазовой зависимости имеют значения, которые лежат между соответствующими значениями для спутников Юпитера и спутников Урана.

Различия в фазовых зависимостях поляризации рассмотренных нами объектов можно качественно интерпретировать в рамках отмеченных выше механизмов рассеяния. Поверхность небесных тел представляет собой реголит, состоящий из агрегатных частиц (кластеров). Яркие кластеры, упакованные в среде неплотно, дают узкий пик яркости в обратном рассеянии и асимметричную отрицательную ветвь с глубоким минимумом около нулевой фазы [15, 17, 18]. Чем мельче составляющие частицы и чем рыхлее кластеры, тем уже пики вторичных минимумов поляризации. Вероятно, именно это наблюдается у спутников Юпитера Ио, Европы и Ганимеда. Согласно [28] для более плотно упакованных кластеров становятся заметными эффекты ближнего поля, особенно при повышении показателя преломления и поглощения. Они начинают размывать узкие пики около нулевой фазы, отрицательная ветвь поляризации становится более широкой. У темных плотных поверхностей когерентное обратное рассеяние малоэффективно, и отрицательная ветвь получается практически симметричной, или даже с минимумом, сдвинутым к углу инверсии, в основном от эффектов ближнего поля. Вместе с тем в работе [16] было показано, что механизм когерентного усиления обратного рассеяния действует даже в плотных кластерах, размеры которых сравнимы с длиной волны. Таким образом, различия формы и параметров отрицательной ветви линейной поляризации, которые наблюдаются у разных поверхностей, может быть вызвано наложением разных механизмов рассеяния света, эффективность которых определяется свойствами реголитовых поверхностей.

ВЫВОДЫ

1. Получены новые поляриметрические наблюдения Реи в широком диапазоне фазовых углов. Показано, что фазовая зависимость поляризации спутника имеет ассиметричную форму с минимум поляризации $P_{\min} = 0.57\%$ на фазовом угле 2.2° .

2. Проведен сравнительный анализ формы и параметров фазовой зависимости поляризации Реи с аналогичными параметрами высокоальбедных спутников Юпитера, Япета и среднеальбедных спутников Урана. Качественно показано, что обнаруженные различия могут быть вызваны разным относительным вкладом нескольких механизмов рассеяния, что в свою очередь связано с разными альбедо и плотностью упаковки частиц на поверхности этих объектов.

1. Афанасьев В. Л., Розенбуш В. К., Киселёв Н. Н. Поляриметрия главных спутников Урана на 6-м телескопе // Астрофиз. бюл. — 2014. — 69, № 2. — С. 121—133.

2. Зайцев С. В., Киселев Н. Н., Розенбуш В. К. и др. Поляриметрия астероида Е-типа 64 Ангелина // Кинематика и физика небес. тел. —2014.—**30**, № 3.— С. 155—160.
3. Шаховской Н. М., Ефимов Ю. С. Поляризационные наблюдения нестационарных звезд и внегалактических объектов. I. Аппаратура и методика наблюдений и их обработки // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1972.—**45**.—С. 90—110.
4. Blair G. N., Owen F. N. The UVB orbital phase curve of Rhea, Dione, and Tethys // Icarus.—1974.—**22**.—P. 224—229.
5. Ciarniello M., Capaccioni F., Filacchione G., et al. Hapke modeling of Rhea surface properties through Cassini-VIM Spectra // Icarus.—2011.—**214**, N 2.—P. 541—555.
6. Clark R. N., Steele A., Brown R. H., et al. Saturn's satellites: near-infrared spectrophotometry (0.65—2.5 μm) of the leading and trailing sides and compositional implications // Icarus.—1984.—**58**.—P. 265—281.
7. Ejeta C., Boehnhardt H., Bagnulo S., et al. Spectro-polarimetry of the bright side of Saturn's moon Iapetus // Astron. and Astrophys.—2012.—**537**.—A23.
8. Fink U., Larson H. P., Gautier III T. N., Treffers R. R. Infrared spectra of the satellites of Saturn: identification of water ice on Iapetus, Rhea, Dione, and Tethys // Astrophys. J.—1976.—**207**, N 2.—P. L63—L67.
9. Harris D. L. Photometry and colorimetry of planets and satellites // Planets and satellites / Eds G. P. Kuiper, B. M. Middlehurst. — Chicago: Univ. Chicago Press, 1961.—P. 272—342.
10. Hsu J.-C., Breger M. On standard polarized stars // Astrophys. J.—1982.—**262**, N 1.— P. 732—738.
11. Iess L., Rappaport N. J., Tortora P., et al. Gravity field and interior of Rhea from Cassini data analysis // Icarus.—2007.—**190**, N 2.—P. 585—593.
12. Johnson P. E., Kemp J. C., King R., et al. New results from optical polarimetry of Saturn rings // Nature.—1980.—**283**.—P. 146—149.
13. Kulyk I. Brightness and polarization opposition effects at low phase angles of the Saturnian satellites Tethys, Dione, and Rhea, Planet // Planet. Space Sci.— 2012.— **73**.—P. 407—424.
14. Lumme K., Muinonen K. A two-parameters system for linear polarization of some Solar System objects // Asteroids, Comets, Meteors 1993 / Eds A. W. Harris, E. Bowell. — Houston: Lunar and Planetary Inst., 1993.—P. 194—197.
15. Mishchenko M. I. On the nature of the polarization opposition effect exhibited by Saturn's rings // Astrophys. J.—1993.—**411**, N 1.—P. 351—361.
16. Mishchenko M., Dlugach J., Liu L., et al. Direct solutions of the Maxwell equations explain opposition phenomena observed for high-albedo solar system objects // Astrophys. J. Lett.—2009. —**705**. —P. L118—L122.
17. Muinonen K., Videen G. A phenomenological single scatterer for studies of complex particulate media // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.—2012.—**113**.—P. 2385—2390.
18. Petrova E. V., Tishkovets V. P. Light scattering by morphologically complex objects and opposition effects (a review) // Solar System. Res.—2011.—**45**.—P. 304—322.
19. Pitman K. M., Buratti B. J., Mosher J. A. Disk-integrated bolometric bond albedos and rotational light curves of Saturnian satellites from Cassini visual and infrared mapping spectrometer // Icarus.—2010.—**206**, N 2.—P. 537—560.
20. Roatsch T., Kersten E., Wahlisch M., et al. High-resolution atlas of Rhea derived from Cassini-ISS images // Planet. Space Sci.—2011.—**61**.—P. 135—141.

21. *Rosenbush V., Kiselev N., Afanasiev V.* Icy moons of the outer planets // Polarimetry of stars and Planetary systems / Eds L. Kolokolova, J. Hought, A.-Ch. Levasseur-Regourd. — Cambridge, 2015.—P. 340—359.
22. *Rosenbush V., Kiselev N., Avramchuk V., et al.* Photometric and polarimetric opposition phenomena exhibited by Solar System bodies // Optics of Cosmic Dust / Eds G. Videen, M. Kocifaj. — Dordrecht: Kluwer Academic, 2002.—P. 191—226.
23. *Serkowski K.* Polarimeters for optical astronomy // Planets, stars and nebulae. Studied with photopolarimetry / Ed. by T. Gehrels. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1974.—P. 135—174.
24. *Shkuratov Yu., Bondarenko S., Ovcharenko A., et al.* Comparative studies of the reflectance and degree of linear polarization of particulate surfaces and independently scattering particles // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.—2006.—**100**.—P. 340—358.
25. *Smith B. A., Soderblom L., Beebe R., et al.* Encounter with Saturn: Voyager 1 imaging science results // Science.—1981.—**212**.—P. 163—191.
26. *Stephan K., Jaumann R., Wagner R., et al.* The Saturnian satellite Rhea as seen by Cassini VIMS // Planet. Space Sci.—2012.—**61**.—P 142—161.
27. *Thomas P. C., Burns J. A., Helfenstein P.* Shapes of the Saturnian icy satellites and their significance // Icarus.—2007.—**190**, N 2.—P. 573—584.
28. *Tishkovets V. P., Petrova E. V.* Coherent backscattering by discrete random media composed of clusters of spherical particles // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.—2013.—**127**.—P. 192—206.
29. *Zaitsev S. V., Kiselev N. N., Rosenbush V. K., et al.* Polarimetric observations of the Galilean satellites near opposition in 2011 // Adv. Astron. and Space Phys.—2012.—**2**.—P. 177—179.
30. *Zellner B., Gehrels T., Gradie J.* Minor planets and related objects. XVI. Polarimetric diameters // Astron. J.—1974.—**79**.—P. 1100—1110.

Статья поступила в редакцию 14.10.14