

УДК 523.4

А. П. Видьмаченко, В. Н. Крушевская

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27
vida@mao.kiev.ua, vkrush@mao.kiev.ua

Использование орбитальной фазовой кривой экзопланеты для уточнения ее массы

При дистанционных наблюдениях планеты, обращающейся по эллиптической орбите вокруг центрального светила, ее блеск будет значительно изменяться в зависимости от угла фазы. Пространственная индикатриса отражения видимого слоя планеты-гиганта в непрерывном спектре определяется в основном оптическими свойствами и функцией распределения по размерам частиц на уровнях формирования уходящего излучения. В работе оценены некоторые параметры аэрозолей, рассчитаны спектральные распределения яркости по диску планеты для значений фазового угла в интервале от 0 до 180°. По этим данным определены значения сферического и геометрического альбедо и фазовых функций планеты: вычислено относительное изменение интегрального блеска планеты при вращении вокруг звезды. Для некоторых звездных систем имеется реальная возможность произвести реконструкцию орбитальной фазовой кривой. Это позволит уточнить значения угла наклона плоскости орбиты к картинной плоскости, что в некоторых случаях может привести к увеличению оценки массы экзопланеты почти в шесть раз.

ВИКОРИСТАННЯ ОРБИТАЛЬНОЇ ФАЗОВОЇ КРИВОЇ ЕКЗОПЛАНЕТИ ДЛЯ УТОЧНЕННЯ ЇЇ МАСИ, Видьмаченко А. П., Крушевська В. Н. — При дистанційних спостереженнях планети, яка обертається по еліптичній орбіті навколо центрального світила, її блиск буде значно змінюватися в залежності від фазового кута. Просторова індикатриса відбивання видимого шару планети-гіганта в неперервному спектрі визначається в основному оптичними властивостями і функцією розподілу по розмірах частинок на рівнях формування випромінювання. В роботі оцінено деякі параметри аерозолів, розраховано спектральні розподіли яскравості по диску планети для значень фазового кута в інтервалі від 0° до 180°. За цими даними визначені сферичне та геометричне альбедо і фазові функції планети: обчислені відносні зміни інтегрального блиску планети при обертанні навколо зірки. Для деяких зоряних систем є реальна можливість реконструювати орбітальну фазову криву. Це дозволить уточнити значення кута нахилу площини орбіти до картинної площини, що в деяких випадках може призвести до збільшення оцінки маси екзопланети майже в шість разів.

THE USE OF ORBITAL PHASE CURVE OF AN EXOPLANET FOR IMPROVEMENT OF ITS MASS ESTIMATE, by Vid'machenko A. P., Krushevskaya V. N. — In remote observations of a planet with the elliptic orbit around the central star, the planet brightness varies considerably with phase angle. The spatial indicatrice of the visible layer reflection in continuous spectrum for a giant planet is basically determined by optical properties and the function of particle sizes distribution at the levels of the leaving radiation formation. We estimate some parameters of aerosols and calculate the spectral distributions of the brightness of the disc of a planet for a phase angle from 0° to 180°. With the use of these data the values of spherical albedo, geometrical albedo, and the phase functions for a planet are determined as well as the relative change of the integral brightness for a planet revolving around the central star is calculated. Our results show that, for some star systems, the possibility exists of reconstructing orbital phase curves. This allows one to improve the estimate of the inclination of the orbital plane to the picture plane and, in some cases, this can increase the estimate of the mass of an exoplanet almost by a factor of 6.

При дистанционных наблюдениях планеты, обращающейся по эллиптической орбите вокруг центрального светила, ее блеск будет изменяться в довольно значительных пределах. Зависимость такого изменения от угла фазы в звездных величинах $m_{\text{п}}$ определяется из выражения [8]

$$2.512^{m^* - m_{\text{п}}(\alpha)} = \frac{2}{\pi} \left(\frac{R \cdot a}{r^* \cdot \Delta} \right)^2 G(\alpha), \quad (1)$$

где m^* — звездная величина центрального светила, α — фаза видимости планеты для земного наблюдателя, r^* и R — расстояния от звезды до планеты и до наблюдателя соответственно, a — радиус планеты, Δ — расстояние от точки наблюдения до планеты, величина $G(\alpha)$ характеризует отражательные свойства видимого слоя планеты и геометрию падающего от звезды и отраженного облаками излучения:

$$G(\alpha) = \int_{\alpha - \pi/2}^{\pi/2} \cos(\alpha - \omega) \cos \omega d\omega \int_0^{\pi/2} \rho(\eta, \xi, \varphi) \cos^3 \psi d\psi. \quad (2)$$

Здесь ρ — коэффициент отражения видимой поверхности облачного слоя, φ — азимут падающего на поверхность планеты света от звезды, ξ — косинус угла падения света в центре наблюдаемого диска планеты, η — косинус угла отражения света. Планетоцентрические координаты ω и ψ точки на диске связаны с величинами η и ξ с помощью следующих формул:

$$\begin{aligned} \eta &= \cos \psi \cos \omega, \\ \xi &= \cos \psi \cos(\alpha - \omega). \end{aligned} \quad (3)$$

Учитывая выражение для вычисления геометрического альbedo планеты

$$A_{\text{г}} = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \rho(\eta, \eta, \pi) \cdot \eta d\eta, \quad (4)$$

формулу (2) можно представить в следующем виде [1]:

$$G(\alpha) = \frac{\pi}{2} A_{\text{г}} \Phi(\alpha), \quad (5)$$

где $\Phi(\alpha)$ — так называемая фазовая функция планеты. Задавая значение геометрического альbedo планеты, с помощью формул (2) и (5) можно вычислить фазовые функции $\Phi(\alpha)$ для разных длин волн.

Как известно [1, 12], пространственная индикатриса отражения видимого облачного слоя планеты-гиганта в непрерывном спектре определяется

в основном оптическими свойствами и функцией распределения по размерам частиц на уровнях формирования уходящего излучения. При этом для длин волн $\lambda > 500$ нм очень хорошо себя оправдывает простейшая однородная модель атмосферы [1]. При $\lambda < 400$ нм существенный вклад в диффузно отраженное атмосферой излучение может давать надоблачная чисто газовая атмосфера. Поэтому для интерпретации наблюдательных данных в широком диапазоне длин волн необходимо задавать различные модели атмосферы. В связи с этим для оценки параметров аэрозольных частиц обычно принимается ряд упрощающих предположений. По аналогии с работами [1, 12] для области спектра при $\lambda > 500$ нм примем их следующими: 1) аэрозольная составляющая атмосферы играет доминирующую роль при формировании поля рассеянного излучения; 2) аэрозольный слой представляет собой однородный плоскопараллельный слой бесконечной оптической толщины, состоящий из непоглощающих однородных частиц сферической формы; 3) наблюдаемое истинное поглощение вызвано газовой составляющей атмосферы; 4) частицы распределены по размерам согласно нормально-логарифмическому закону

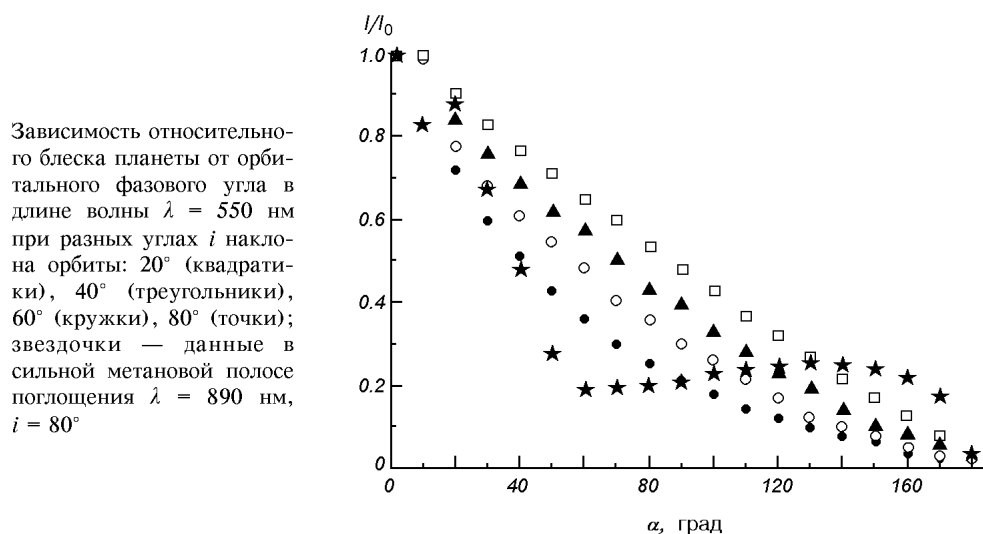
$$f(r)dr = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\ln^2 \frac{r}{r_0}}{2\sigma^2}\right] d(\ln r), \quad (6)$$

где $f(r)dr$ — доля частиц, радиусы которых заключены в пределах от r до $r + dr$, r_0 — среднее геометрическое радиусов частиц, σ^2 — дисперсия логарифма радиусов, 5) коэффициент преломления n частиц в рассматриваемом диапазоне не зависит от длины волны. Далее производились расчеты по программе, любезно предоставленной в наше распоряжение Ж. М. Длугач. Детальное описание программы приведено в работе [5].

Мы оценили некоторые параметры аэрозольных частиц, рассчитали спектральные распределения яркости по диску планеты для значений фазового угла в интервале от 0 до 180° и по этим данным определили значения сферического A_c , геометрического A_g альбедо и фазовых функций $\Phi(\alpha)$ планеты. Предполагалось, что основные наблюдательные параметры планетной атмосферы сходные с параметрами атмосферы Сатурна.

На основании произведенных расчетов следует вывод, что поведение фазовой функции (ее изменение с фазой) вызвано соответствующим поведением индикатрисы рассеяния [12]. При этом с уменьшением значения альбедо однократного рассеяния ω_0 , т. е. при увеличении поглощения, очень сильно увеличивается сходство между фазовой функцией и индикатрисой рассеяния. Это является следствием того, что при большом истинном поглощении роль многократно рассеянного света резко уменьшается [1]. А следовательно, для планетных атмосфер со следами мощных полос поглощения метана, аммиака, воды и пр., а также при наличии протяженного облачного покрова следует ожидать нестандартное поведение фазовых кривых в сильных полосах поглощения. Нестандартность проявляется в том, что после довольно резкого уменьшения блеска при росте фазового угла от $\alpha = 0^\circ$ до 60° после $\alpha = 60^\circ$ снова начинается его увеличение.

Используя формулы (1)–(5), результаты наших расчетов и данные работ [1, 5, 12], мы произвели вычисления относительного изменения интегрального блеска планеты, которая вращается вокруг центральной звезды. На рисунке приведено относительное изменение ее видимого (в $\lambda = 550$ нм) блеска в зависимости от орбитального фазового угла в предположении, что наклон i плоскости планетной орбиты к картинной плоскости варьирует в пределах от 20 до 80° . Для сравнения там же нанесена



Некоторые параметры звезд и планет возле них

Звезда	α	δ	Sp	$m_{\text{виз}^*}$	$m_{\text{абс}^*}$	Период, сут	$\frac{M_{\text{пл}}}{M_{\text{Ю}}}$	Δ , а. е.	L, пк	$m_{\text{пл}}$	N
HD168746	18 ^h 21 ^m 49.78 ^s	-11°55'21"	G5	7.95	4.78	6.4	0.24	0.07	43.12	19.08	35.2
HD195019	20 28 17.28	18 46 12	G3 IV-V	6.91	5.4	18.3	3.43	0.14	20.03	17.73	46.6
55 Cnc	08 52 37.60	28 20 02	G8 V	5.95	5.3	14.648	1.9	0.11	13.49	16.68	50.8
HD130322	14 47 32.73	-00 16 53	K0 V	8.04	5.67	10.724	1.08	0.09	29.76	18.69	54.6
Gliese 86	02 10 14.42	-50 50 00	K1 V	6.17	5.77	15.83	3.6	0.11	12.02	16.44	77.9
HD46375	06 33 12.62	05 27 47	K1 IV	7.94	5.32	3.024	0.25	0.04	33.44	18.00	94.3
51 Peg	22 57 27.98	20 46 08	G2.5V	5.49	4.94	4.2293	0.47	0.05	12.88	15.52	96.9
HD75289	08 47 40.38	-41 44 12	G0 V	6.35	4.04	3.5096	0.42	0.05	28.94	16.28	107
HD83443	09 37 11.82	-43 16 20	K0 V	8.2	5.01	2.986	0.35	0.04	43.54	17.85	137
HD209458	22 03 10.70	18 53 04	G0 V	7.65	4.29	3.524	0.69	0.05	47.08	17.27	141
HD187123	19 46 57.45	34 25 16	G5	7.9	4.4	3.097	0.52	0.04	50.06	17.47	147
HD217107	22 58 15.45	-02 23 42	G8 IV	6.16	3.32	7.11	1.28	0.04	37.02	14.98	295
HD121504	13 57 17.23	-56 02 24	G2 V	7.54	1.87	64.6	0.89	0.32	13.61	16.14	363
τ Boo	13 47 17.34	17 27 22	F7 V	4.5	3.25	3.3128	3.87	0.05	17.79	12.82	467

аналогичная зависимость в $\lambda = 890$ нм. Как показано в работе [3], спектральные [7, 10, 11, 13—15, 17, 18] и астрометрические [6] методы позволяют по характеристикам центральной звезды и по значению периода обращения внесолнечной планеты-гиганта (ВПГ) определять только нижний предел массы планеты с точностью до синуса угла i наклона плоскости орбиты ВПГ к картинной плоскости:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{п0}} \sin i. \quad (7)$$

Там же [3] мы приводим обоснование возможности реализации метода исследования экзопланет с применением методики фотометрических наблюдений со счетом фотонов [2] на умеренных и даже на малых телескопах с одно- или двухканальным фотометром. Для 14 звезд с планетами (см. таблицу) выполнены оценки относительного вклада интегрального блеска от ближайшей к звезде ВПГ. В последней графе таблицы приведено количество N фотонов от планеты при условии, что от центральной звезды наблюдатель регистрирует 10^6 фотонов. Строки таблицы расположены по возрастанию этой величины, так что в последних строках оказались наиболее перспективные объекты для поиска и обнаружения орбитального изменения блеска ВПГ, т. е. для получения фазовых кривых блеска планетных атмосфер [1,

12]. Поскольку предполагается, что спектр ВПГ [9, 16, 18], как и спектр Юпитера [4], должен также иметь ряд поглощательных особенностей, то с помощью широкополосных фильтров, центрированных на разные избранные длины волн, можно будет получить общую характеристику изменения альbedo планет по спектру. Поэтому для исследования экзопланет можно использовать широко применявшуюся ранее для изучения планет Солнечной системы фотометрическую методику. Работая с двухканальным фотометром, один из каналов которого исследует свет от системы «звезда + планета» в непрерывном участке спектра, а другой центрирован на очень мощную полосу поглощения атмосферы планеты, мы во втором случае получим практически «чистое» излучение от звезды. В первом случае может быть зафиксирована фотометрическая фазовая кривая от ВПГ.

Итак, расчеты показали, что для некоторых звездных систем имеется реальная возможность произвести реконструкцию орбитальной фазовой кривой. Особенности ее наклона могут позволить произвести сравнение наблюдательных данных при $\alpha_{\text{орб}} = 0^\circ$ и $50\text{--}70^\circ$ и оценить значение угла i наклона орбиты ВПГ. Как видно из формулы (7), уточнение значения i при нецентральной прохождении планеты по диску звезды может в некоторых случаях ($\sin 10^\circ \approx 0.17$) почти в шесть раз увеличить оценку массы экзопланеты.

1. Бугаенко О. И., Длугач Ж. М., Мороженко А. В., Яновицкий Э. Г. Об оптических свойствах облачного слоя Сатурна в видимом участке спектра // *Астрон. вестник*.—1975.—9, № 1.—С. 13—21.
2. Видьмаченко А. П. Изменение блеска небесных объектов при астрономических наблюдениях на горе Майданак // *Кинематика и физика небес. тел.*—1994.—10, № 5.—С. 62—68.
3. Видьмаченко А. П., Крушевская В. М., Кузнецова Ю. Г. Изменение отражательной способности внесолнечной планеты-гиганта при ее обращении вокруг центральной звезды // *Кинематика и физика небес. тел.*—2002.—18, № 5.—С. 419—432.
4. Видьмаченко А. П., Неволовский П. В. Опытные наблюдения с охлаждаемой фотометрической головкой на базе фотоумножителя с InGaAs-фотокатодом // *Кинематика и физика небес. тел.*—2000.—16, № 1.—С. 72—79.
5. Длугач Ж. М. Отражение света многослойной планетной атмосферой. // *Астрон. вестник*.—1982.—17, № 2.—С. 234—239.
6. Ксанфомалити Л. В. Поиск систем внесолнечных планет с помощью спектрального метода лучевых скоростей и астрометрии // *Астрон. вестник*.—1999.—33, № 6.—С. 547—552.
7. Ксанфомалити Л. В. Внесолнечные планетные системы // *Астрон. вестник*.—2000.—34, № 6.—С. 529—544.
8. Шаронов В. В. *Природа планет*. — М.: Физматлит, 1958.—552 с.
9. Burrows A., Guillot T., Hubbard W.B., et al. On the radii of close-in giant planets // *Astrophys. J. Lett.*—2000.—534, N 1.—P. L97—L100.
10. Butler R. P., Marcy G. W., Williams E., et al. Three new “51 Pegasi-type” planets // *Astrophys. J. Lett.*—1997.—474, N 1.—P. L115—L117.
11. Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W., et al. Detection of planetary transits across a sun-like star // *Astrophys. J. Lett.*—2000.—529, N 1.—P. L45—L48.
12. Dlugach J. M., Morozhenko A. V., Yanovitskij E. G., Vid'machenko A. P. Investigations of the optical properties of Saturn's atmosphere carried out at the Main Astronomical Observatory of the Ukrainian Academy of Sciences // *Icarus*.—1983.—54, N 2.—P. 319—336.
13. Henry G., Marcy G. W., Butler R. P., et al. A Transiting “51 Peg-like” planet // *Astrophys. J. Lett.*—2000.—529, N 1.—P. L41—L44.
14. Jha S., Charbonneau D., Garnavich P. M., et al. Multicolor observations of a planetary transit of HD 209458 // *Astrophys. J. Lett.*—2000.—540, N 1.—P. L45—L47.
15. Mayor M., Queloz, D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star // *Nature*.—1995.—378, N 6555.—P. 355—357.
16. Seager S., Sasselov D. D. Extrasolar giant planets under strong stellar irradiation // *Astrophys. J. Lett.*—1998.—502, N 1.—P. L157—L159.
17. Stepinski T. F., Black D. C. Statistics of low-mass companions to stars: implications for their origin // *Astron. and Astrophys.*—2000.—356, N 2.—P. 903—912.
18. Sudarsky D., Burrows A., Pinto P. Albedo and reflection spectra of extrasolar giant planets // *Astrophys. J.*—2000.—538, N 2.—P. 885—903.

Поступила в редакцию 04.04.03