

УДК 524.338

О ВЛИЯНИИ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДКАТАКЛИЗМИЧЕСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ НА ИХ КРИВЫЕ БЛЕСКА

В.-В.Ф. Пустынский, И.Б. Пустыльник

Аннотация

В статье рассмотрено влияние параметров предкатаклизмической двойной системы на ее кривую блеска. Эффект отражения рассчитывался на основе модели, разработанной авторами. Показано, что амплитуда эффекта может зависеть от параметров системы двояко: при переходе от более поздних к более ранним спектральным классам холодного спутника амплитуда эффекта отражения сначала растет, а затем уменьшается.

Ключевые слова: предкатаклизмические переменные, эффект отражения, модели атмосферы, кривые блеска.

Введение

Предкатаклизмические переменные (англ. РСВ – *Precataclysmic Binary*) – небольшая группа двойных систем, выделенных в 80-е годы XX в. по следующим признакам: 1) главный компонент – белый карлик или горячий субкарлик; 2) спутник – маломассивная звезда главной последовательности ($M_2 < 1 M_{\odot}$); 3) период не превышает нескольких дней; 4) объект является ядром планетарной туманности. Формирование РСВ связано с прохождением объекта через стадию общей оболочки [1]. В работах [2–4] можно найти список известных РСВ.

Большинство РСВ характеризуется выраженным эффектом отражения – переменностью блеска, связанной с переработкой и переизлучением атмосферой спутника лучистой энергии горячего компонента. У большинства двойных систем эффект отражения является эффектом второго порядка, однако у РСВ из-за близости компонентов именно он часто определяет вид кривой блеска (затменные переменные этого типа редки, поскольку диапазон наклонов, в котором возможны затмения, невелик). Механизм эффекта отражения связан с прогревом атмосферы спутника потоком излучения от главного компонента. В силу высокой температуры белого карлика (субкарлика) параметры атмосферы на облученном полушарии претерпевают значительные изменения: температура верхних слоев значительно возрастает (в результате возможно возникновение температурной инверсии) и исходящий из прогретой атмосферы поток увеличивается. Поскольку при разных фазовых углах к наблюдателю обращены разные доли облученного полушария, то блеск спутника меняется с фазой.

Исторически известен ряд подходов к моделированию эффекта отражения. Многие подходы основаны на введении болометрического параметра («альbedo отражения»), который позволяет эмпирически свести физику всех процессов к единому коэффициенту. Такой подход дает хорошие результаты для обычных систем, где эффект отражения представляет собой лишь небольшую поправку к затменной кривой. Однако для РСВ этот подход неприемлем в силу чрезвычайно значительных изменений в атмосфере спутника, сильно прогретой близким и мощным

источником УФ-излучения: температура прогретой атмосферы может достигать нескольких десятков тысяч кельвинов при невысокой эффективной температуре (соответствующей поздним спектральным классам) атмосферы необлученного полушария. Температура значительно изменяется по поверхности освещенного полушария, спадая от подзвездной точки к терминатору. В результате характеристики переизлученного потока зависят как от длины волны, так и от положения освещенной площадки, что делает невозможным сведение эффекта отражения к единому болометрическому коэффициенту.

1. Модель

Чтобы преодолеть недостатки описанного упрощенного подхода, нами предложена двухслойная модель облученной атмосферы спутника [5, 6]. В верхнем слое мы отказываемся от стандартного предположения о наличии локального термодинамического равновесия (ЛТР) и решаем совместно уравнения гидростатического, ионизационного и теплового равновесия [7]. Это решение мы распространяем до слоев с оптической глубиной в несколько единиц в лаймановском континууме. Ниже, в более глубоком слое, мы полагаем излучение термализованным и используем эддингтоновское приближение. Такой подход, сохраняя достаточную простоту и наглядность, является значительно более точным в сравнении с эмпирическими моделями, основанными на болометрическом коэффициенте отражения. Модель строится независимо для концентрических зон с общим центром в подзвездной точке, затем вычисляются интенсивности излучения, исходящего из каждой площадки под углом, соответствующим направлению на наблюдателя в конкретной фазе. Вклады от отдельных площадок численно интегрируются, давая полный блеск спутника. Монохроматическая кривая блеска (в континууме) строится последовательным вычислением видимого блеска спутника в разных фазах с последующей нормализацией к полному минимальному блеску системы. Излучение белого карлика моделируется излучением абсолютно черного тела. При необходимости учитываются также затмения и прохождение. Вклад полутеневых зон вблизи терминатора учитывается согласно [8].

2. Зависимость кривых блеска от параметров системы

Мы использовали нашу модель для построения теоретических кривых блеска ряда РСВ (V477 Lyr, UU Sge, V664 Cas) в разных спектральных диапазонах, получив наборы возможных параметров этих систем и ограничив тем самым диапазон их возможных значений [6]. Однако помимо непосредственного моделирования важным является нахождение общих закономерностей, которым подчиняются кривые блеска предкатаклизмических двойных.

Рис. 1–3, на которых приведены избранные кривые блеска, иллюстрируют ряд важнейших зависимостей. По оси абсцисс отложен фазовый угол, по оси ординат – звездная величина. Все кривые нормированы к блеску в фазе, когда горячий компонент располагается позади своего спутника; если при этом горячий компонент находится в затмении, его блеск добавляется к нормирующему делителю. Такое нормирование позволяет наглядно сопоставлять как глубины минимумов, так и величину эффекта отражения у систем с различными параметрами. Незначительная негладкость графиков – артефакт, связанный с ограниченным числом кольцевых зон (6), на которые разбивается освещенная полусфера спутника. Число зон определяется экономией времени расчетов, поскольку расчет одной модели требует значительных вычислительных ресурсов.

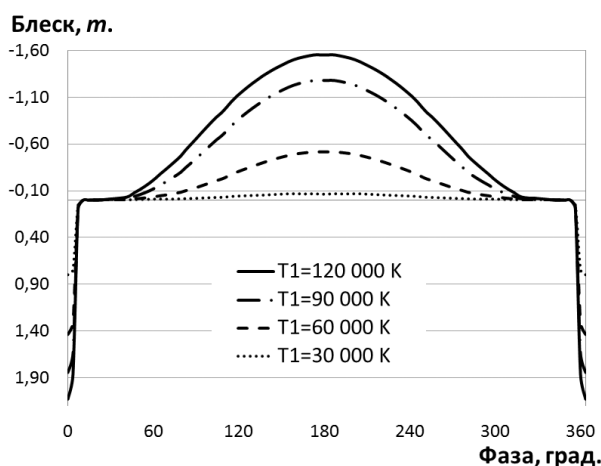


Рис. 1. Зависимость кривой блеска РСВ от температуры горячего компонента

На рис. 1 представлена зависимость кривых блеска предкатаклизмической системы от температуры T_1 горячего компонента. Параметры системы: большая полуось $a = 2.9 R_\odot$, радиусы компонентов $R_1 = 0.057 R_\odot$ и $R_2 = 0.57 R_\odot$ (индекс «1» относится к горячему компоненту), массы компонентов $M_1 = 0.5 M_\odot$ и $M_2 = 0.15 M_\odot$, эффективная температура спутника $T_2 = 4500$ К, наклон плоскости орбиты $i = 80^\circ$. Относительное содержание гелия в атмосфере принято равным 0.027, а металлов – 0.001. Кривые блеска построены для длины волны 550 нм (V-диапазон). Период системы при данных параметрах соответствует $P = 16.8^h$.

Из рисунка очевидна возрастающая с ростом T_1 роль эффекта отражения в формировании кривой блеска. Для очень горячих субкарликов амплитуда эффекта превышает 1.5^m , эффект доминирует в кривой блеска, вторичный минимум практически исчезает. С уменьшением температуры субкарлика амплитуда эффекта заметно падает, и ему возвращается роль вторичного фактора, вносящего сравнительно небольшой вклад в кривую блеска. Можно заметить, что основной рост амплитуды эффекта (почти на одну звездную величину) соответствует промежутку температур субкарлика $T_1 = (60000 \div 90000)$ К. В дальнейшем рост амплитуды эффекта отражения замедляется.

На рис. 2 приведена зависимость кривых блеска от радиуса горячего компонента. Три представленных на нем варианта соответствуют белому карлику (кривая с $R_1 = 10000$ км) и двум субкарликам разного радиуса. $T_1 = 60000$ К, остальные параметры системы такие же, как для рис. 1. Из рисунка видно, что амплитуда эффекта отражения имеет выраженную зависимость от радиуса горячего компонента: даже при достаточно высоких температурах эффект слабо выражен для белых карликов (менее 0.2^m на графике), но для субкарликов амплитуда становится значительной. Вторичный минимум выражен очень слабо при наклонах плоскости орбиты, заметно отличающейся от 90° . Это связано с тем, что лишь при наклонах плоскости орбиты, близких к 90° , горячий компонент при прохождении затмевает наиболее яркое «горячее пятно» на освещенной атмосфере спутника. При больших наклонах горячий компонент проходит через близкие к терминатору более холодные зоны, что не вызывает заметного падения блеска.

Рис. 3 иллюстрирует влияние спутника на кривую блеска. В отличие от рис. 1, 2, здесь варьировались несколько параметров спутника, чтобы поставить ему в соответствие типичные звезды классов M, K и G. Массы спутника выбирались $M_2 = 0.3 M_\odot$, $M_2 = 0.7 M_\odot$ и $M_2 = 0.9 M_\odot$ соответственно, радиусы $R_2 = 0.43 R_\odot$,

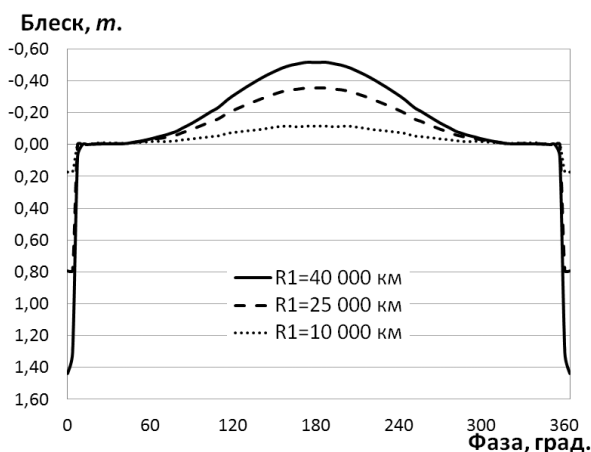


Рис. 2. Зависимость кривой блеска РСВ от радиуса горячего компонента

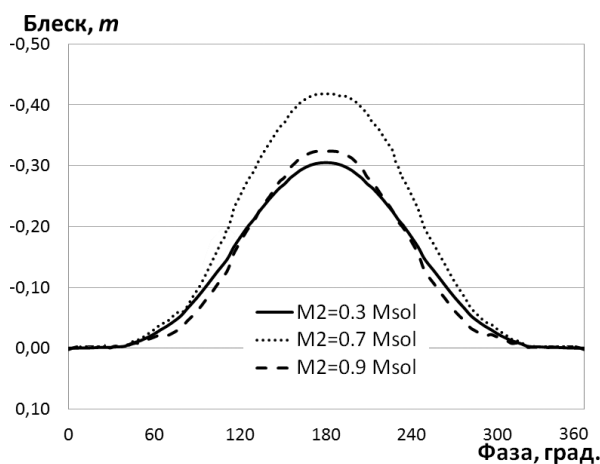


Рис. 3. Зависимость кривой блеска РСВ от параметров спутника. Затмений нет

$R_2 = 0.72 R_{\odot}$ и $R_2 = 0.95 R_{\odot}$ соответственно, температуры $T_2 = 3500$ К, $T_2 = 4500$ К и $T_2 = 5500$ К соответственно; $T_1 = 60000$ К, $a_1 = 25000$ К, $i = 70^\circ$. Из рис. 3 видно, что амплитуда эффекта растет от класса М к классу К, что связано с увеличением «отражающей» поверхности спутника и связанным с этим ростом абсолютной величины эффекта. Однако при переходе к классу G амплитуда эффекта снова падает. Это объясняется тем, что вклад достаточно крупного спутника в полную яркость становится значительным, и относительная доля «отраженного» света в полной яркости системы уменьшается. Из рисунка видно также, что нарастание блеска происходит более плавно для спутников более позднего спектрального класса (класс К на графике), у спутников более ранних классов максимум более «острый».

На рис. 4 показана зависимость кривой блеска от длины волны (кривые построены для средних длин волн каждого из спектральных диапазонов). Параметры системы соответствуют рис. 1, температура главного компонента $T_1 = 60000$ К. Очевидно, что амплитуда эффекта заметно возрастает в диапазоне длинных волн

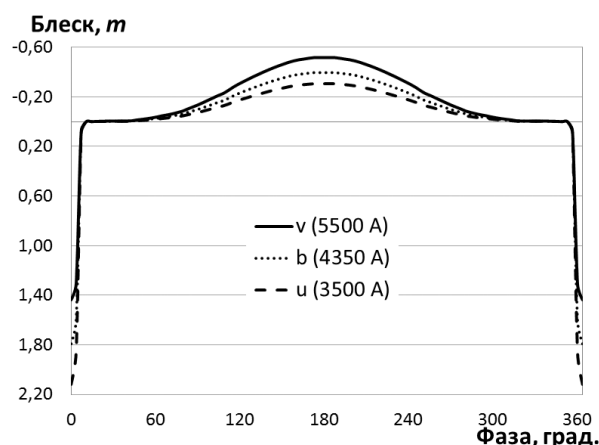


Рис. 4. Кривая блеска РСВ в разных спектральных диапазонах

(глубина затмения, наоборот, сильно уменьшается с переходом от U к V , поскольку эффективная светимость главного компонента в ультрафиолетовом диапазоне значительно выше, чем у холодного спутника). Такое поведение кривой блеска связано с тем, что УФ-кванты перерабатываются в атмосфере спутника в длинноволновое излучение, поэтому амплитуда эффекта растет при переходе к большим длинам волн.

Настоящее исследование является продолжением работы, начатой совместно с Изольдом Бенционовичем Пустыльником. И.Б. Пустыльник скоропостижно скончался 2 мая 2008 года.

Исследование финансировалось грантом ETF7691 Эстонского научного фонда (Eesti Teadusfond).

Summary

V.-V. Pustynski, I.B. Pustyl'nik. Influence of Parameters of Pre-Cataclysmic Binaries on Their Light Curves.

The article deals with the influence of the parameters of a pre-cataclysmic binary system on its light curve. The reflection effect is analyzed based on the model elaborated by the authors. It is demonstrated that the parameters of the system may influence its light curve in two ways. For instance, the amplitude of the effect is larger for K class cold companions and is smaller for M and G class companions.

Key words: pre-cataclysmic binaries, reflection effect, atmosphere models, light curves.

Литература

1. Iben I. Jr., Livio M. Common envelopes in binary star evolution // Publ. Astron. Soc. Pac. – 1993. – V. 105, No 694. – P. 1373–1406.
2. Cherepashchuk A.M., Katysheva N.A., Khruzina T.S., Shugarov S.Yu. Highly Evolved Close Binary Stars: Catalog. – Amsterdam: Gordon and Breach Publ., 1996. – 368 p.
3. Ruciński S.M. The Photometric Proximity Effects in Close Binary Systems. VI. The Exact Solution for the Source Function in Monodirectional Illumination of the Grey Atmosphere // Acta Astronomica. – 1973. – V. 23, No 4. – P. 301–310.

4. *Ritter H., Kolb U.* Cataclysmic Binaries, LMXBs, and related objects, VizieR On-line Data Catalog. Version 7.12. – 2011. – URL: <http://vizier.u-strasbg.fr>.
5. *Pustynski V.-V., Pustynnik I.* Modelling The Irradiated Upper Atmospheres Of Unevolved Companions In Precataclysmic Binaries (Pcb): Evidences On Thermal Instability // *Astrophys. Space Sci.* – 2005. – V. 299, No 2. – P. 177–201.
6. *Pustynski V.-V.* Modeling the Reflection Effect in Precataclysmic Binary Systems. – Tartu: Tartu Univ. Press, 2007. – 116 p.
7. *Basko M.M., Sunyaev R.A.* Interaction of the X-Ray Source Radiation with the Atmosphere of the Normal Star in Close Binary Systems // *Astrophys. Space Sci.* – 1973. – V. 23, No 1. – P. 117–158.
8. *Napier W.Mcd.* The Photometric Reflection Effect in Close Binaries // *Astrophys. Space Sci.* – 1968. – V. 2, No 1. – P. 61–82.

Поступила в редакцию
13.12.10

Пустынский Владислав-Вениамин Фридрихович – PhD, старший научный сотрудник, Таллинский технический университет, Тартуская обсерватория, Эстония.

E-mail: vlad.pustynski@gmail.com

Пустыльник Изольд Бенционович – доктор физико-математических наук, Тартуская обсерватория, Эстония.