

УДК 524.386/387

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЗАТМЕННОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ CENTAURUS X-3*

© 2014 М. А. Аль-Вардат^{1*}, Х. Аль-Наимий²,
А. Таани³, А. Хасавнех⁴, О. Аль-Банави¹, Х. С. Видиан⁵

¹*Al-Hussein Bin Talal University, Ma'an, 71111 Jordan*

²*University of Sharjah, Sharjah, United Arab Emirates*

³*Aqaba University College, Al-Balqa' Applied University, Aqaba, 77110 Jordan*

⁴*Royal Jordanian Geographic Center, Amman, 11941 Jordan*

⁵*Al al-Bayt University, Ma'raq, 25113 Jordan*

Поступила в редакцию 27 октября 2013 года; принята в печать 22 апреля 2014 года

Представлены модифицированные физические и геометрические параметры затменной рентгеновской двойной системы Cen X-3. Параметры оценены путем сравнения синтетических фотометрических кривых блеска с наблюдаемыми методом итераций до получения наилучшего согласия между ними. Синтетические кривые блеска построены в соответствии с моделью Роша, т.к. источником энергии Cen X-3, скорее всего, является переполнение полости Роша. Основное внимание было уделено феномену рентгеновского прогресса обращенной к компактному объекту стороны оптического компонента. Кратко обсуждаются параметры и текущий статус данной работы.

Ключевые слова: *двойные: тесные — двойные: затменные — звёзды: фундаментальные параметры — звёзды: индивидуальные: Cen X-3*

1. ВВЕДЕНИЕ

Важность изучения двойных систем объясняется тем фактом, что более 50% галактических звездных систем являются двойными. Они играют важную роль в определении нескольких ключевых параметров звезд, что сложнее сделать в случае рентгеновских двойных систем. В этих системах компактный объект (белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра, сформировавшаяся после коллапса обычной звезды) и звездный компонент вращаются друг вокруг друга по взаимной орбите на расстоянии, достаточно малом для обеспечения переноса вещества со звезды-компаньона на компактный объект. Переносимое вещество движется по спирали к компактному объекту и формирует вокруг него аккреционный диск. Аккрецируемое газообразное вещество нагревается до очень высоких температур (от 10^6 до 10^8 К), освобождая гравитационную энергию, полученную им при падении, в виде рентгеновского излучения. В случае нейтронной звезды или белого карлика излучение происходит и с аккреционного диска, и с поверхности компактной звезды, тогда как в двойных с

черной дырой единственным источником рентгена является аккреционный диск.

Рентгеновские двойные звезды обычно делятся на две категории: массивные рентгеновские двойные (High Mass X-Ray Binaries, HMXB), в которых масса компаньона больше нескольких солнечных масс, что позволяет ему выделять вещество в виде звездного ветра, и маломассивные рентгеновские двойные (Low Mass X-Ray Binaries, LMXB), в которых масса компаньона равна приблизительно одной массе Солнца, он поставляет вещество через внутреннюю точку Лагранжа (точку, где гравитационные силы двух звезд и центробежная сила уравниваются).

Первый рентгеновский источник (Sco X-1) был открыт в 1962 г. во время полета ракеты, организованного группой под руководством Риккардо Джаккони [1, 2], который стал лауреатом Нобелевской премии по физике в 2002 г. за свои фундаментальные исследования в области рентгеновской астрономии. С тех пор рентгеновские источники наблюдаются разными космическими аппаратами: UHURU, запущенный в 1970 г. [3, 4], составил карту рентгеновского неба в диапазоне 2–6 кэВ; обсерватория Эйнштейн, запущенная в

*E-mail: mwardat@ahu.edu.jo

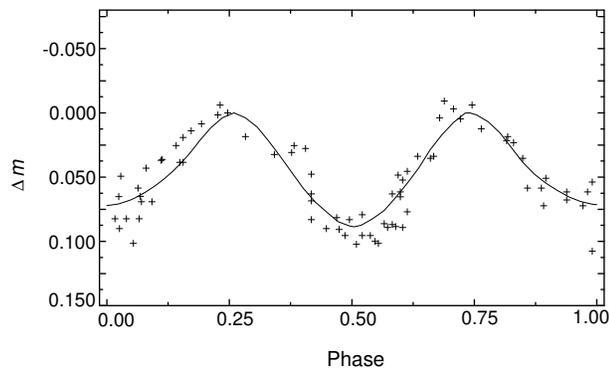


Рис. 1. Лучшее соответствие, полученное в работе [10], между нашей синтетической кривой блеска и наблюдениями Петро [19].

ноябре 1978 г., позволила получить точные положения и изображения высокого разрешения для тысяч рентгеновских источников [5]; европейский рентгеновский спутник EXOSAT (European X-Ray Observatory Satellite), проработавший с мая 1983 по апрель 1986 г., позволил наблюдать рентгеновские источники непрерывно по несколько дней, без перерывов связанных с покрытиями Земли; а также Chandra, XMM-Newton, Rossi XTE, ВероSAX, INTEGRAL и другие.

С другой стороны, наземные наблюдения с помощью оптических телескопов показали, что рентгеновские источники часто состоят в двойных системах. Часть этих источников — затменно-двойные, демонстрирующие периодические изменения блеска; таким образом, рентген периодически становится невидимым для наблюдателя. Для того, чтобы установить физические и геометрические параметры затменно-двойной системы, нужно смоделировать изменение ее блеска (построить синтетическую кривую блеска). Эти методы особенно важны при изучении затменных рентгеновских двойных, поскольку они позволяют определить массу компактного объекта и таким образом установить его природу (нейтронная звезда или черная дыра).

Многие авторы, например [6–11] и др., внесли вклад в исследование и анализ кривых блеска затменных рентгеновских двойных. В настоящей работе мы сосредоточимся на анализе одной такой двойной, Cep X-3, в попытке получить надежные физические и геометрические параметры, основываясь на феноменологической модели рентгеновского отражения и прогрева основной звезды.

2. ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМЫ

Затменная рентгеновская двойная Cep X-3 известна как массивная рентгеновская двойная система, состоящая из оптического гиганта класса

06.5 V–III с массой $18 M_{\odot}$ и нейтронной звезды с массой $1.2 M_{\odot}$ [12], периодом вращения 4.8 с и орбитальным периодом $2^d 1$ (см. обзор [13]).

Рентгеновская звезда Cep X-3 была обнаружена по наблюдениям UHURU [14]; в указанной работе, она была выделена как 4.84-секундный рентгеновский пульсар с периодом затмений $2^d 087$. Кр-земински [15] установил, что рентгеновская звезда Cep X-3 является компонентом затменной двойной системы, состоящей собственно из звезды Cep X-3 и оптического гиганта спектрального класса B0 с оптической величиной $13^m 4$ на расстоянии 10 кпк. Этой звезде приписываются и другие спектральные классы: 06.5 II–Ve [16], 06.5 V–III [17] и 06f [18].

Кривая блеска этой системы характеризуется двумя максимумами в фазах 0.25 и 0.75 и двумя минимумами в фазах 0.0 и 0.5. Один из них — результат затмения компактного объекта оптической звездой, другой (более глубокий) вызван холодным полушарием оптической звезды.

На рис. 1 показано наилучшее соответствие между нашей синтетической кривой блеска, параметры которой представлены в таблице 1 [10], и наблюдениями Петро [19].

3. МЕТОД И ПРОЦЕДУРЫ

Чтобы построить синтетические кривые блеска системы, мы использовали стандартную модель рентгеновских двойных, которая основана на модели Роша и на феномене рентгеновского отражения и прогрева той стороны оптического компонента, которая обращена к компактному объекту. При решении основного уравнения модели Роша мы последовали примеру [11], где авторы использовали метод Ньютона–Рафсона для решения уравнения, предварительно преобразовав его в полиномиальное уравнение восьмой степени, что оказывается точнее и эффективнее, чем решения, основанные на разложении в ряд, разработанные в [26].

Важную роль в оптических вариациях блеска рентгеновских двойных играет эффект рентгеновского отражения и прогрева стороны оптического компонента, обращенной к компактному объекту, эта сторона становится в результате горячее и ярче другой. Таким образом, она испускает больше света, ответственного за пики кривой блеска.

Интенсивность переизлучения $J^*(x, y)$ как функция падающего потока имеет вид:

$$J^*(x, y) = \sigma E A F_{in}, \quad (1)$$

где E представляет собой в некотором роде перераспределение длин волн падающего потока, который переизлучается на наблюдаемых эффективных длинах волн. Многие авторы, начиная с [26, 27], описывали и упрощали этот эффект для случая

Таблица 1. Физические и геометрические параметры системы из литературы

Параметр	Значение	Ссылка
M_{opt}	$17 \pm 2 M_{\odot}$	[18]
	$18.25 \pm 1.75 M_{\odot}$	[12]
M_{n}	$1.2 \pm 0.6 M_{\odot}$	[12]
	$1 \pm 0.3 M_{\odot}$	[18]
	$0.85 \pm 0.25 M_{\odot}$	[20]
e	< 0.002	[20]
i	90°	[15]
P_{orb}	$2^{\text{d}}087$	[2]
	$2^{\text{d}}08712$	[21]
$\dot{P}_{\text{orb}}/P_{\text{orb}}$	-1.6×10^{-6} с/год	[22]
L_x	7.7×10^{37} эрг/с	[22]
L_{opt}/L_x	100	[23]
Период пульсаций P_p	4.84 с	[24]
Расстояние, кпк	от 5 до 10	[24]
m_V	$13^{\text{m}}4$	[12]
Δm_V	$0^{\text{m}}7$	[22]
	$0^{\text{m}}8$	[12]
Длительность рентгеновского затмения ϑ_e	$39 \pm 2^{\circ}$	[2, 15, 25]
Отношение масс q	0.06 ± 0.002	[10]
R (оптический компонент)	$0.625 \pm 0.003 R_{\odot}$	[10]
Коэффициент потемнения к краю u	0.8 ± 0.02	[10]
Коэффициент гравитационного потемнения τ_o	0.4 ± 0.02	[10]
Эффективность переизлучения η	0.1 ± 0.05	[10]
T_{eff} (оптический компонент)	$38\,000 \pm 1000$ К	[10]

двух оптических компонентов. Но случай рентгеновских двойных несколько сложнее, т.к. вторичный компонент (рентгеновский источник) является компактным объектом, что делает его вклад в оптический блеск пренебрежимо малым, хотя он эффективно излучает в рентгене. Поэтому отраженный поток F_{ref} можно описать следующим уравнением:

$$F_{\text{ref}} = \tau_o \eta (L_x/L_{\text{opt}}) (R/r')^2 \cos \Gamma, \quad (2)$$

где τ_o — коэффициент гравитационного потемнения, η — эффективность поглощения, L_x —

рентгеновская светимость, L_{opt} — оптическая светимость, R — радиус оптической звезды в R_{\odot} , r' — расстояние между центром компактного объекта и точкой на поверхности оптической звезды, где мы вычисляем F , Γ — угол падения рентгеновского излучения на главную звезду.

Кроме эффективности поглощения и переизлучения η , мы рассматривали еще шесть входных параметров, которые после получения наилучшего соответствия между наблюдаемыми и синтетическими кривыми можно считать физическими и

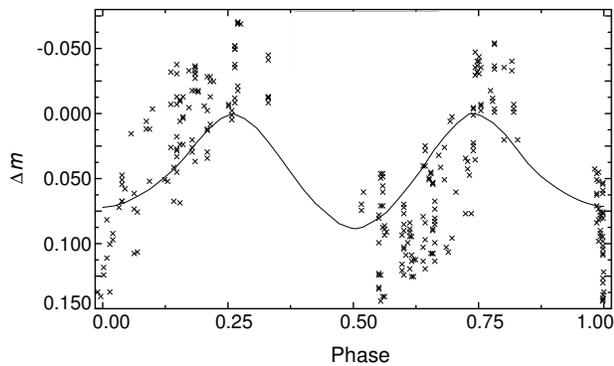


Рис. 2. Синтетическая кривая блеска (данная работа) и наблюдения Петро [19].

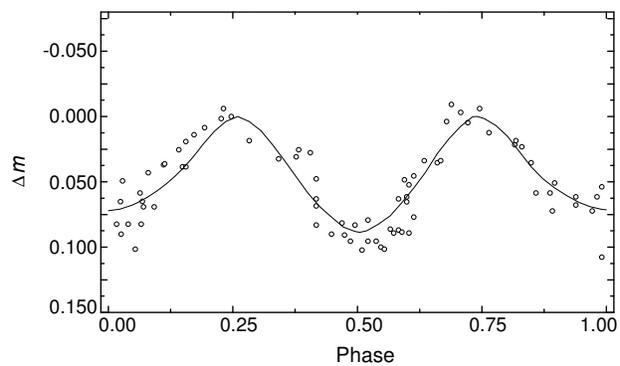


Рис. 3. Синтетическая кривая блеска (данная работа) и наблюдения Ван Парадийса и др. [28].

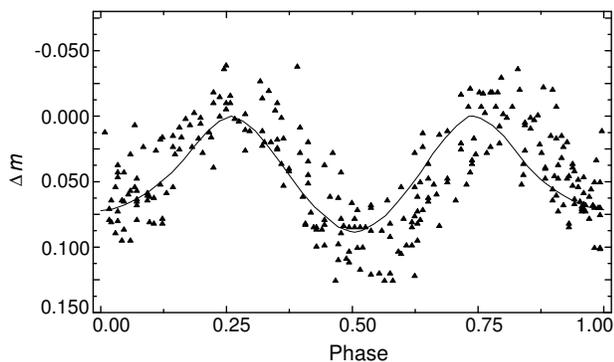


Рис. 4. Синтетическая кривая блеска (данная работа) и наблюдения Маудера [29].

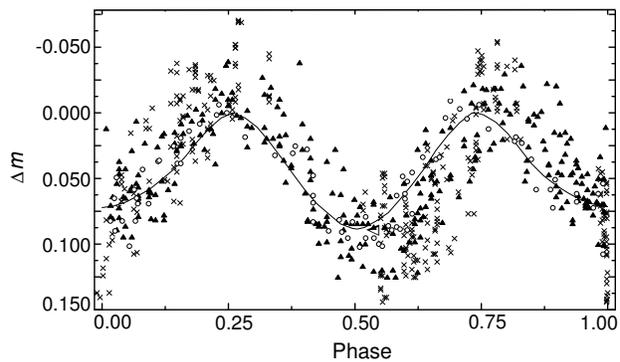


Рис. 5. Синтетическая кривая блеска (данная работа) и наблюдения Петро [19] (кружки), Ван Парадийса и др. [28] (треугольники) и Маудера [29] (крестики).

геометрическими параметрами системы. Эти параметры следующие: отношение масс компонентов q , относительный радиус оптического компонента r , коэффициент потемнения к краю u , коэффициент гравитационного потемнения τ_o , отношение оптической светимости к рентгеновской L_{opt}/L_x и эффективная температура оптической звезды T_{eff} .

Таблица 2. Модифицированные параметры системы

Отношение масс q	0.062 ± 0.002
R (оптический компонент)	$0.636 \pm 0.003 R_{\odot}$
Отношение оптической светимости к рентгеновской L_{opt}/L_x	105 ± 3
Коэффициент потемнения к краю u	0.85 ± 0.02
Коэффициент гравитационного потемнения τ_o	0.37 ± 0.02
Эффективность переизлучения η	0.6 ± 0.05
T_{eff} (оптический компонент)	$38\,000 \pm 1000 \text{ K}$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наш метод определения параметров затменных рентгеновских двойных основан на итеративном подходе с целью получения наилучшего соответствия между наблюдаемыми оптическими кривыми блеска и синтетическими, поэтому было сделано множество таких итераций. В качестве наблюдательной основы и ориентира, мы использовали три наблюдаемые кривые блеска, найденные в литературе [19, 28, 29].

На рис. 2, 3 и 4 показано наилучшее согласие, достигнутое между нашей синтетической кривой блеска (параметры указаны в таблице 2) и наблюдаемыми кривыми блеска из [19], [28] и [29] соответственно, а на рис. 5 показаны все три наблюдаемые кривые блеска вместе с нашей синтетической кривой.

Значения, полученные при наилучшем соответствии, достаточно хорошо представляют физические и геометрические параметры компонентов системы в пределах ошибок наблюдаемой фотометрии.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе наилучшего соответствия между наблюдаемыми фотометрическими кривыми блеска, измеренными наземными телескопами, и синтетическими кривыми блеска, построенными в соответствии с моделью Роша, были оценены модифицированные физические и геометрические параметры затменной рентгеновской двойной системы Cen X-3. Уточнение параметров системы основывалось, в основном, на увеличении влияния эффекта рентгеновского прогрева стороны оптического компонента, обращенной к компактному объекту. При моделировании кривых блеска мы предполагали, что оптический компонент системы заполняет свою полость Роша и что система обладает синхронным вращением; мы пренебрегли эффектом магнитных полей обоих компонентов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Giacconi, H. Gursky, and J. R. Waters, *Nature* **204**, 981 (1964).
2. J. B. Hutchings, *Astrophys. J.* **188**, 341 (1974).
3. E. M. Kellogg, *Astrophys. J.* **197**, 689 (1975).
4. R. Giacconi, S. Murray, H. Gursky, et al., *Astrophys. J.* **178**, 281 (1972).
5. M. J. Harris, G. H. Share, M. D. Leising, and J. E. Grove, *Astrophys. J.* **416**, 601 (1993).
6. J. B. Hutchings, in *Physics and Astrophysics of Neutron Stars and Black Holes*, Ed. by R. Giacconi and R. Ruffini (North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1978), pp. 202–215.
7. Y. Avni, in *Physics and Astrophysics of Neutron Stars and Black Holes*, Ed. by R. Giacconi and R. Ruffini (North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1978), pp. 43–62.
8. E. A. Antokhina and A. M. Cherepashchuk, *Sov. Astron.* **31**, 295 (1987).
9. E. A. Antokhina and A. M. Cherepashchuk, *Astronomy Reports* **38**, 367 (1994).
10. M. A. S. Al-Wardat, H. M. Al-Naimiy, I. A. Barghouthi, and H. A. Sabat, *Astrophys. and Space Sci.* **260**, 335 (1998).
11. H. A. Sabat, H. M. Al-Naimiy, I. A. Barghouthi, and M. A. S. Al-Wardat, *Astrophys. and Space Sci.* **260**, 347 (1998).
12. J. N. Bahcall, in *Physics and Astrophysics of Neutron Stars and Black Holes*, Ed. by R. Giacconi and R. Ruffini (North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1978), pp. 63–110.
13. F. Nagase, *Publ. Astron. Soc. Japan* **41**, 1 (1989).
14. R. Giacconi, H. Gursky, E. Kellogg, et al., *Astrophys. J.* **167**, L67 (1971).
15. W. Krzeminski, *Astrophys. J.* **192**, L135 (1974).
16. E. P. J. van den Heuvel, *Space Sci. Rev.* **30**, 309 (1981).
17. C. Hoffmeister and P. N. Kholopov, *Sov. Astron.* **29**, 719 (1985).
18. J. B. Hutchings, A. P. Cowley, D. Crampton, et al., *Astrophys. J.* **229**, 1079 (1979).
19. L. D. Petro, *Astrophys. J.* **195**, 709 (1975).
20. Y. Avni, J. N. Bahcall, *Astrophys. J.* **197**, 675 (1975).
21. R. Giacconi, in *Physics and Astrophysics of Neutron Stars and Black Holes*, Ed. by R. Giacconi and R. Ruffini (North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1978), pp. 17–42.
22. E. Schreier, R. Levinson, H. Gursky, et al., *Astrophys. J.* **172**, L79 (1972).
23. P. Bagot, *Astron. and Astrophys.* **314**, 576 (1996).
24. E. P. J. van den Heuvel, in *Proc. Enrico Fermi School on Physics of Neutron Stars and Black Holes* (North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1978), pp. 828–871.
25. Y. Avni, *Astron. and Astrophys.* **63**, L13 (1978).
26. Z. Kopal, *Close Binary Systems* (Chapman & Hall, London, 1959).
27. W. M. Napier, *Astrophys. and Space Sci.* **2**, 61 (1968).
28. J. van Paradijs, J. Lub, J. W. Pel, et al., *Astron. and Astrophys.* **124**, 294 (1983).
29. H. Mauder, *Astrophys. J.* **195**, L27 (1975).

Перевод Е. Г. Чмырёвой

Modified Physical and Geometric Parameters of the Eclipsing X-Ray Binary System Centaurus X-3

M. A. Al-Wardat, H. Al-Naimiy, A. Taani, A. Khasawneh, O. Al-Banawi, and H. S. Widyan

Modified physical and geometric parameters for the eclipsing x-ray binary system Cen X-3 are presented. The parameters were estimated by comparing synthetic photometric light curves with the observed ones in an iterative method until the best fit was achieved. The synthetic light curves were constructed in accordance with the Roche model, since Cen X-3 is likely to be powered by Roche-lobe overflow. We focused on the phenomenon of x-ray heating of the side of the optical component facing the compact object. The parameters and present status of this work are briefly discussed.

Keywords: *binaries: close—binaries: eclipsing—stars: fundamental parameters—stars: individual: Cen X-3*