

ВОЗМОЖНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ДВОЙНЫХ СРЕДИ ЗВЕЗД ТИПА ВОЛЬФА — РАЙЕ ПО ИХ РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

А. М. ЧЕРЕПАЩУК

Присутствие спутника у звезды WR можно обнаружить по наличию и периодической переменности рентгеновского излучения ($L_X \lesssim 10^{34}$ эрг/сек в диапазоне 1—10 кэв), возникающего в ударной волне при столкновении вещества оболочки WR со спутником или звездным ветром спутника.

POSSIBILITY OF DISCOVERY OF BINARY SYSTEMS AMONG THE WOLF — RAYET STARS USING THEIR X-RAY RADIATION, by A. M. Cherepashchuk. A companion in a binary Wolf—Rayet star may be detected from the presence and periodic variability of X-ray radiation formed in a shock wave produced by collision of matter of Wolf — Rayet envelope with the satellite or the stellar wind outflowing from the satellite. The X-ray luminosity is $\lesssim 10^{34}$ erg/sec in 1—10 keV range.

Результаты расчетов эволюции массивных тесных двойных систем (Пачинский, 1967; Киппенхан, 1969; Тутуков и Юнгельсон, 1973) теоретически показали возможность образования звезд типа Вольфа — Райе (WR) в двойных системах в результате обмена веществом между компонентами. Предложен механизм образования одиночных звезд WR из массивных звезд на стадии горения гелия в ядре (Бисноватый-Коган и Надежин, 1972). Поэтому важно выяснить из наблюдений, все ли звезды WR двойные.

Среди звезд WR ярче 10^m 55% являются двойными (Смит, 1968; Черепашук, 1974), что несколько превышает долю двойных среди звезд главной последовательности (Яшек и Яшек, 1957). Это, однако, еще не доказывает двойственность всех звезд WR. Некоторые «одиночные» звезды WR (в смысле классических «оптических» критериев) могут быть двойными системами, у которых спутник не замечен в оптическом диапазоне, поскольку большая оптическая светимость и мощный эмиссионный линейчатый спектр звезд WR могут сильно маскировать линии спутника в суммарном спектре двойной системы. Ранее мы показали (Черепашук, 1974), что по оптическим спектрам звезд WR невозможно обнаружить спутники спектрального

класса В5 V и более позднего, поскольку оптическая светимость последних относительно мала.

Прогресс в рентгеновской астрономии открывает принципиально новую возможность обнаружения двойных среди звезд WR. Нами отмечалось (Черепашук, 1967), что в тесных двойных системах с компонентами — звездами WR может возникать рентгеновское излучение в ударной волне, образующейся при обтекании спутника веществом оболочки звезды WR (Валлерстейн, 1968). Прилуцким и Усовым (1975) было указано, что ударная волна может возникать также при столкновении оболочки звезды WR со звездным ветром спутника. При скорости расширения оболочки звезды WR $v \sim 10^8$ см/сек температура за фронтом сильной ударной волны для идеального одноатомного газа $T = (3/16) m_p v^2 / k \approx 2 \cdot 10^7$ К (Каплан, 1958). Мы пренебрегаем различием в степени ионизации вещества перед и за фронтом, которое слабо влияет на результаты. Время выравнивания температур протонов и электронов $t_r \approx 10 \cdot (T_e^{3/2} / n) \leq 10^2$ сек при $n \sim 10^{10}$ см⁻³, $T_e \leq T \approx 2 \cdot 10^7$ К (Пикельнер и Щеглов, 1968), следовательно, плазма за фронтом волны изотермична. При температуре $\sim 2 \cdot 10^7$ К она излучает в основном тормозное рентгеновское излучение с энергией ~ 2 кэв. Плазма эффективно высвечивается в рентгеновском диапазоне лишь если время ее высвечивания $t_f \sim n^{-1} T^{1/2}$ меньше времени пребывания элемента объема плазмы в окрестности ударной волны, т. е. в объеме размером порядка радиуса R обтекаемой звезды. Учет этого эффекта выполнен Прилуцким и Усовым (1976), результаты которых позволяют найти для двойных звезд WR с периодами $> 2^d$ рентгеновскую светимость ударной волны в диапазоне 1–10 кэв (см. таблицу):

$$L_X \approx 6 \cdot 10^{34} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-5} M_{\odot} / \text{год}} \right)^2 \left(\frac{R}{10^{11} \text{ см}} \right)^3 \left(\frac{\bar{r}}{10^{12} \text{ см}} \right)^{-4} \times \\ \times \left(\frac{v}{10^8 \text{ см/сек}} \right)^{-1} \text{ эрг/сек}, \quad (1)$$

где \dot{M} — скорость потери массы звездой WR, $\bar{r} = a - 1.25 R$, a — расстояние между компонентами системы. Для двойных звезд WR с периодами $\lesssim 2^d$ из таблицы

$$L_X \approx \frac{1}{4} \left(\frac{1.25 R}{a - 1.25 R} \right)^2 \frac{\dot{M} v^2}{2} \text{ эрг/сек}. \quad (2)$$

Комптовское рассеяние квантов на свободных электронах приводит к охлаждению горячей плазмы (Левич и Сюняев, 1971) с характерным временем $t_c = (3/4) m_e c / \sigma T^2 (\epsilon_1 + \epsilon_2)$, где ϵ_1 и ϵ_2 — плотность энергии излучения звезды WR и спутника. Для оценки влияния этого механизма сравним величины t_c и t_r — время выравнивания температур протонов и электронов на фронте ударной волны. Оценки показывают, что для двойных систем WR, у которых период $p < 100^d$, $t_r < t_c$. Поэтому

Звезда	Спектр	Период	δL_X (эрг/сек)	F_X (эрг/см ² сек)
✓ HD 186943	WN 4 + B	9 ^d .55	10 ³⁴ —10 ³²	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹³
HD 193928	WN 6 + OB	21.64	10 ³³ —10 ³¹	10 ⁻¹² —10 ⁻¹⁴
✓ HD 211853	WN 6 + B0I	6.69	10 ³¹ —10 ³²	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹³
HD 190918	WN 4.5 + O9.5I	85	10 ³² —10 ³⁰	10 ⁻¹³ —10 ⁻¹⁵
✓ HD 197406	WN 7	4.32	10 ³⁴ —10 ³²	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹³
✓ HD 152270	WC 7 + O5—8	8.82	10 ³⁴ —10 ³²	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹³
✓ HD 228766	WN 7 + OB	10.60	10 ³⁴ —10 ³²	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹³
✓ CX Ser	WN 5 + OB	2.13	10 ³⁴ —10 ³¹	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹⁴
✓ HD 214419	WN 7 + O7	1.64	10 ³⁴ —10 ³¹	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹⁴
HD 193576	WN 5.5 + O6	4.21	10 ³⁴ —10 ³²	10 ⁻¹¹ —10 ⁻¹³
HD 168206	WC 8 + B0	29.71	10 ³² —10 ³¹	10 ⁻¹³ —10 ⁻¹⁵
HD 193793	WC 7 + O5	326	0	0
HD 68273	WC 8 + O7	78.5	10 ³¹ —10 ²⁹	10 ⁻¹³ —10 ⁻¹⁵

в большинстве случаев роль комптоновского охлаждения на передней границе фронта несущественна, и плазма здесь имеет $T \sim 10^7$ К. По мере дальнейшего движения горячей плазмы, она охлаждается под действием трех причин: тормозного излучения в рентгеновском диапазоне, расширения и комптоновского взаимодействия с полем излучения звезд двойной системы. Совместное рассмотрение этих трех факторов приводит к следующим выводам. Для известных систем с $p < 2-3^d$, $t_r \ll t_c \ll t_f \ll t_g = 1.25 R/v$, и в рентгене успевает высветиться лишь доля $\delta \approx t_c/t_f \approx 0.05-0.5$ от L_X , определяемой формулой (2), для $\dot{M} = 10^{-6}-10^{-5} M_{\odot}/год$ соответственно. Для систем с $100^d > p > 3^d$, $t_r < t_c \approx t_g < t_f$, и в рентгене высвечивается $\sim 0.3 L_X$ (см. формулу (1)) при любых \dot{M} . Для систем с $p \geq 100^d$, $t_c < t_r$, и плазма охлаждается уже на передней границе фронта, которая растянута на толщину порядка радиуса обтекаемой звезды R . Рентгеновское излучение в таких разделенных системах пренебрежимо мало. Возможно лишь слабое излучение в мягком рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Как показывают гидродинамические расчеты (Коровяковский и Сухарев, 1975), замедление движения вещества оболочки WR в пространстве между компонентами под действием давления излучения спутника несущественно при $v \sim 10^8$ см/сек. Звезды WR принадлежат к плоской составляющей Галактики и погружены в межзвездный газ. Некоторые из «одиночных» звезд WR окружены кольцевыми туманностями (Джонсон и Хогг, 1965), которые могли образоваться в результате сгребания межзвездного газа веществом оболочки звезды WR (Аведисова, 1971). При столкновении оболочки WR с межзвездным газом также может возникать рентгеновское излучение. Пикельнер и Щеглов (1968) показали, что из-за малой плотности межзвездного газа соответствующая рентгеновская светимость порядка $10^{-4}-10^{-5}$ от полного потока кинетической энергии движения оболочки звезды WR, что меньше

ожидаемой рентгеновской светимости большинства двойных звезд WR. Кроме того, ударная волна в межзвездном газе должна проявлять себя как протяженный рентгеновский источник, поскольку ее радиус порядка нескольких парсек (Аведисова, 1971).

При $\dot{M} = 10^{-5} \div 10^{-6} M_{\odot}/год$ и $v \sim 10^8$ см/сек поток кинетической энергии $\dot{M}v^2/2$ оболочки звезды WR равен $3.3 \cdot 10^{36} \div 3.3 \cdot 10^{35}$ эрг/сек. Это значительно меньше болометрической светимости звезд WR, которая составляет $\sim 2 \cdot 10^{39}$ эрг/сек (Черепашук и Халиуллин, 1975). Рентгеновская светимость L_X ударной волны у большинства изученных двойных звезд WR составляет $10^{30} \div 10^{34}$ эрг/сек (см. таблицу), что много меньше их оптической светимости ($\sim 10^{37}$ эрг/сек). Поэтому рентгеновское излучение не должно заметно влиять на оптические характеристики двойных звезд WR. В то же время можно предполагать, что значение $L_X = 10^{30} \div 10^{34}$ эрг/сек значительно превосходит собственную рентгеновскую светимость спутника и звезды WR в диапазоне нескольких кэв. Действительно, согласно последним результатам внеатмосферных наблюдений (Мев и др., 1975), светимость 26 звезд различных спектральных классов в диапазоне 0.2—0.28 кэв меньше 10^{30} эрг/сек, а рентгеновская светимость Сириуса (A1 V) в этом диапазоне $\sim 10^{28}$ эрг/сек. Соответствующие температуры звездных корон $\sim 10^6$ К, поэтому рентгеновская светимость в диапазоне нескольких кэв должна быть $\ll 10^{30}$ эрг/сек. В случае звезд WR электронная температура в оболочке $< 10^5$ К (Черепашук и Халиуллин, 1975; Рублев, 1972), поэтому можно предполагать, что их светимость в диапазоне нескольких кэв пренебрежимо мала. Следовательно, ударная волна в рентгене выглядит весьма контрастно и может служить надежным признаком двойственности звезды WR. При угле наклона орбиты i , не сильно отличающемся от 90° , могут иметь место периодические вариации рентгеновского потока и периодические завалы низкоэнергичных участков спектра, связанные с затмениями ударной волны телом спутника и протяженной атмосферой звезды WR. Заметим, что для большинства звезд WR низкоэнергичная часть рентгеновского спектра должна быть значительно ослаблена из-за поглощения в межзвездном газе, поскольку звезды WR — далекие объекты.

Таким образом, тесные двойные системы с звездами WR должны проявлять себя как точечные переменные рентгеновские источники в диапазоне нескольких кэв. Значительное рентгеновское излучение от одиночных звезд WR в этой области спектра маловероятно. Решающим аргументом в пользу гипотезы двойственности всех звезд WR было бы обнаружение от большинства из них (в том числе и от звезд WR, известных ныне как «одиночные») периодически меняющегося рентгеновского излучения в диапазоне нескольких кэв.

Мы провели оценки ожидаемых рентгеновских потоков

от изученных тесных двойных систем с компонентами — звездами WR, которые приведены в таблице. Сводка спектроскопических и фотометрических данных, необходимых для расчетов, приведена в работе Рублева и Черепашука (1974). В таблице F_X — ожидаемый поток у поверхности Земли. Левая цифра соответствует $\dot{M} = 10^{-5} M_{\odot}/год$, правая — $\dot{M} = 10^{-6} M_{\odot}/год$. Из-за неопределенности основных параметров приведены лишь порядки величин δL_X и F_X . Полученные значения рентгеновских потоков для большинства двойных звезд WR лежат на пределе чувствительности современных рентгеновских телескопов. Однако учитывая быстрый прогресс в рентгеновской астрономии, вполне вероятно, что такие потоки в скором времени можно будет уверенно измерять, что может дать принципиально новую информацию о природе звезд WR.

Автор благодарит Р. А. Сюняева за ценное замечание о важной роли охлаждения комптоновским механизмом.

Гос. астрономический ин-т
им. П. К. Штернберга, Москва

Поступила в редакцию
4 февраля 1976 г.

ЛИТЕРАТУРА

- Аведисова В. С., 1971. Астрон. ж., 48, 894.
 Бисноватый-Коган Г. С. и Надежин Д. К., 1972. Astrophys. and Space Sci., 15, 353.
 Валлерштейн (Wallerstein G), 1968. Astrophys. J. (Letters), 151, L 121.
 Джонсон и Хогг (Johnson H. M., Hogg D. E.), 1965. Astrophys. J., 142, 1033.
 Каплан С. А., 1958. Межзвездная газодинамика. Физматгиз., М., 70.
 Киппенхан (Kippenhahn R.), 1969. Astron. and Astrophys., 3, 83.
 Коровяковский Ю. П. и Сухарев Ю. В., 1975. Изв. спец. астрофиз. obs., 7, 19.
 Левин Е. В. и Сюняев Р. А., 1971. Астрон. ж., 48, 161.
 Мев и др. (Mewe R., Heise J., Gronenschild E. H. V. M., Brinkman A. C., J. Schrijver, A. J. F. den Boggenge), 1975. Astrophys. J. (Letters), 202, L67.
 Пачинский (Paczynski B.), 1967. Acta astron. (Polska), 17, 355.
 Пикельнер С. Б. и Щеглов П. В., 1968. Астрон. ж., 45, 953.
 Прилуцкий О. Ф. и Усов В. В., 1975. Астрон. циркуляр., № 854.
 Прилуцкий О. Ф. и Усов В. В., 1976. Астрон. ж., 53, 6.
 Рублев С. В., 1972. Изв. спец. астрофиз. obs., 4, 18.
 Рублев С. В. и Черепашук А. М., 1974. В сб. Явления нестационарности и звездная эволюция. «Наука», М., 47—124.
 Смит (Smith L. F.), 1968. Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 138, 109.
 Тутуков А. В. и Юнгельсон Л. Р., 1973. Научн. информ. Астрон. совета АН СССР, 27, 58.
 Черепашук А. М., 1967. Переменные звезды, 16, 226.
 Черепашук А. М., 1974. В сб.: Явления нестационарности и звездная эволюция. «Наука», М., 92, 94.
 Черепашук А. М. и Халиуллин Х. Ф., 1975. Астрон. ж., 52, 1214.
 Яшек и Яшек (Jaschek C., Jaschek M.), 1957. Publs. Astron. Soc. Pacif., 69, 546.