

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
МАТЕМАТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА АСТРОФИЗИКИ

**РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ
СТАЛКИВАЮЩИХСЯ ЗВЁЗДНЫХ ВЕТРОВ В
ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ**

Широков Станислав

Санкт-Петербург 2013

1 Введение

В 1962 году с борта американской ракеты “Аэроби” был открыт первый компактный рентгеновский источник, расположенный за пределами солнечной системы. Им оказалась ныне хорошо известная рентгеновская двойная система Скорпион X-1, содержащая оптическую звезду и аккрецирующую нейтронную звезду. Началась эра рентгеновской астрономии, обеспечившая человечеству новый канал информации о Вселенной.

В 1964 году, задолго до выяснения природы компактных рентгеновских источников как аккрецирующих релятивистских объектов (нейтронных звёзд и чёрных дыр) в тесных двойных системах, Я.Б. Зельдович (СССР) и Е.Е. Салпитер (США) предсказали мощное энерговыделение при несферической аккреции вещества на чёрную дыру и тем самым указали на принципиальную возможность наблюдения чёрных дыр в рентгеновском диапазоне спектра. Теория дисковой аккреции вещества на релятивистские объекты в двойных системах была развита в 1972-1974 годах в работах Н.И. Шакуры и Р.А. Сюняева, Дж. Прингла и М. Риса (Англия), И.Д. Новикова и К. Торна (США). Было показано, что в силу того, что вещество при аккреции разгоняется в гравитационном поле нейтронной звезды или чёрной дыры до скоростей, близких к скорости света, столкновение и взаимное трение высокоскоростных потоков газа вблизи релятивистского объекта приводят к диссипации кинетической энергии газа и его разогреву до температур в десятки и сотни миллионов кельвинов. Это приводит к гигантскому выделению энергии в рентгеновском диапазоне с эффективностью до 0.3 от энергии покоя падающего вещества. Поэтому аккрецирующий релятивистский объект в двойной системе проявляет себя как мощный рентгеновский источник со светимостью $\sim 10^{36} \div 10^{39}$ эрг/с, что в тысячи и миллионы раз больше болометрической светимости Солнца.

Теория дисковой аккреции позволила быстро понять природу большинства рентгеновских источников как аккрецирующих чёрных дыр и нейтронных звёзд в тесных двойных системах. С борта первого специализированного американского рентгеновского спутника “Ухуру” в 1972-1975 годах были открыты сотни рентгеновских двойных систем, содержащих оптические звёзды в паре с релятивистскими объектами, а к настоящему времени число известных рентгеновских двойных систем достигает сотни тысяч [1].

Например, система Геркулес X-1 [2], обнаруженная Ухуру [3] в 1972 году, отождествленная с переменной звездой NZ Геркулеса [4, 5], состоит из оптического компонента A7 [6], который заполняет свою полость Роша, и рентгеновского пульсара с периодом 1.24 с и массой $\sim 1 \div 1.5$

M_{\odot} [9, 10, 11, 12]. Период обращения двойной системы составляет 1.7 дня [7]. Система отображает 35-дневную переменность рентгеновского излучения из-за прецессии искривленного аккреционного диска [3, 8]. Оптическая переменность, происходящая за счет рентгеновского нагрева оптической звезды [4, 5], и искривленность аккреционного диска затрудняют сделать точную оценку массы по кривой лучевых скоростей. Предложенный Антохиной и др. [17, 18] метод расчета кривой лучевых скоростей и исследования Черепашука и др. [13, 14] показали необходимость принятия во внимание формы кривой лучевых скоростей при определении массы компонентов, особенно в присутствии интенсивного рентгеновского нагрева [15, 16, 18].

2 Физика

2.1 Рентгеновские источники неаккреционной природы

Рентгеновская астрономия обеспечила триумф релятивистской астрофизики прежде всего в плане открытия и исследования принципиально новых объектов во Вселенной – нейтронных звезд и черных дыр. В то же время стало ясно, что разгон вещества до больших сверхзвуковых скоростей с последующей диссипацией кинетической энергии вещества при его столкновении с какой-либо преградой не является привилегией только релятивистских объектов. В природе происходят процессы, отличные от аккреции, которые также способны разгонять вещество до скоростей в тысячи и десятки тысяч километров в секунду. Например, при взрыве сверхновой звезды ее оболочка разлетается в космическое пространство со скоростью в десятки тысяч километров в секунду, а звездный ветер массивных горячих звезд спектрального класса O или звезд Вольфа-Райе (WR) ускоряется давлением излучения до скоростей в несколько тысяч километров в секунду. Во всех этих случаях взаимодействие сильно сверхзвукового потока газа с какой-либо преградой (межзвездный газ, поверхность звезды – спутника в двойной системе, звездный ветер от спутника и т.п.) приводит к формированию ударной волны, разогреву плазмы на её фронте до температур в миллионы градусов и соответственно к рентгеновскому излучению. Впервые на такую возможность указал И.С. Шкловский в 1962 году. Он показал, что взаимодействие оболочки сверхновой звезды с межзвездным газом должно приводить к формированию ударных волн и генерации теплового рентгеновского излучения. Поскольку плотность межзвездной среды мала

(менее одного атома в 1 см^3), эффективность переработки кинетической энергии разлета оболочки сверхновой в рентгеновское излучение весьма низка – порядка $10^{-8} \div 10^{-10}$. Однако, ввиду огромной величины потока кинетической энергии разлета оболочки сверхновой ($\sim 10^{43} \div 10^{44}$ эрг/с) ожидаемая величина рентгеновской светимости соответствующего остатка вспышки сверхновой составляет $\sim 10^{34} \div 10^{36}$ эрг/с, что является вполне наблюдаемой величиной. Известны сотни остатков вспышек сверхновых, от которых зарегистрировано рентгеновское излучение в диапазоне $0.1 \div 4$ кэВ. Излучение спектра рентгеновского излучения дает уникальную возможность определения химического состава оболочек сверхновых.

Рентгеновское излучение от областей взаимодействия звёздного ветра массивных горячих звёзд с межзвёздной средой было предсказано в 1968 году С.Б. Пикельнером и П.В. Щегловым и обнаружено Н.Г. Бочкарёвым в 1988 году по архивным данным рентгеновских наблюдений с борта орбитальной обсерватории “Эйнштейн”. Рентгеновская светимость таких областей сравнительно невелика, порядка $10^{32} \div 10^{33}$ эрг/с. Современная модель Роша обсуждается в статье [19].

2.2 Столкновение звёздного ветра звезды WR со спутником в двойной системе

Черепашук в 1967 году [20] указал на то, что взаимодействие мощного сверхзвукового звёздного ветра звезды WR со спутником – звездой спектрального класса WR+O должно приводить к формированию ударной волны и рентгеновского излучения. Причем, поскольку плотность звёздного ветра звезды WR на расстояниях порядка радиуса орбиты тесной двойной системы велика ($n \simeq 10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$), эффективность переработки перехваченного спутником потока кинетической энергии ветра в рентгеновское излучение также велика – порядка единицы. Это связано со следующими обстоятельствами. Рассмотрим рис. 1, где изображена картина обтекания звезды O сверхзвуковым ветром звезды WR. При диссипации на фронте ударной волны первыми до высокой температуры нагреваются протоны. Эффективность излучения в рентгеновском диапазоне определяется скоростью выравнивания температур протонов и электронов, поскольку излучают именно электроны. Время выравнивания температур протонов и электронов

$$t_r \approx \frac{10T_e^{3/2}}{n}$$

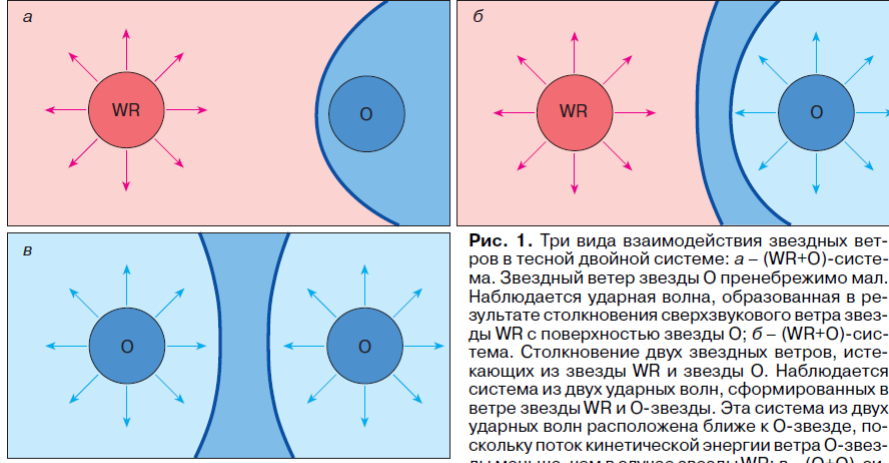


Рис. 1. Три вида взаимодействия звездных ветров в тесной двойной системе: *a* – (WR+O)-система. Звездный ветер звезды O пренебрежимо мал. Наблюдается ударная волна, образованная в результате столкновения сверхзвукового ветра звезды WR с поверхностью звезды O; *б* – (WR+O)-система. Столкновение двух звездных ветров, истекающих из звезды WR и звезды O. Наблюдается система из двух ударных волн, сформированных в ветре звезды WR и O-звезды. Эта система из двух ударных волн расположена ближе к O-звезде, поскольку поток кинетической энергии ветра O-звезды меньше, чем в случае звезды WR; *в* – (O+O)-система. Столкновение двух звездных ветров равной мощности. Формируется система из двух ударных волн, расположенная посередине между компонентами

<http://www.astronet.ru/db/msg/1168021>

при плотности ветра $n \simeq 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и электронной температуре $T_e \leq T \simeq 2 \cdot 10^7 \text{ К}$ не превышает 10^2 с , то есть весьма мало по сравнению с характерными временами движения газа. Таким образом, плазма за фронтом ударной волны изотермична и эффективно высвечивается в рентгеновском диапазоне. В то же время при плотности ветра $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ плазма ветра и ударной волны прозрачна для достаточно жестких рентгеновских фотонов с энергией $h\nu > 1 \text{ кэВ}$, что и позволяет наблюдать рентгеновское излучение от области столкновения ветра звезды WR с O-звездой.

При темпе потери массы звездой WR $\dot{M} \simeq 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$ (M_{\odot} – масса Солнца) и скорости ветра $V \simeq 2 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ поток кинетической энергии ветра $\dot{M}V^2/2 \simeq 10^{37} \text{ эрг/с}$. Соответствующая температура за фронтом сильной ударной волны для идеального одноатомного газа

$$T = \frac{3}{16} \frac{m_p V^2}{k} \simeq 8 \cdot 10^7 \text{ К},$$

где m_p – масса протона, k – постоянная Больцмана. Поскольку температуры протонов и электронов быстро выравниваются, плазма за фронтом ударной волны эффективно излучает тормозное рентгеновское излучение с энергией в несколько килоэлектронвольт. Рентгеновская светимость L_x определяется долей Ω потока кинетической энергии ветра звезды WR, перехваченной спутником – O-звездной

$$L_x = \Omega \frac{\dot{M}V^2}{2} \simeq 10^{35} \text{ эрг/с},$$

где

$$\Omega \approx \frac{\pi r^2}{4\pi a^2} = \frac{1}{4} \left(\frac{r}{a}\right)^2 \simeq 10^{-2}.$$

Здесь r и a – радиусы О-звезды и относительной орбиты системы соответственно.

Из этих простых оценок следует, что от тесных двойных систем WR + О можно ожидать значительного рентгеновского излучения в диапазоне нескольких килоэлектронвольт. В 1967 году, когда эта оценка была опубликована, рентгеновская астрономия находилась еще на заре своего развития и чувствительность рентгеновских телескопов была низка. Поэтому обнаружить рентгеновское излучение от двойных звёзд WR+О (расстояние до которых более 1 кпк) казалось безнадежной задачей. Однако в последующие годы чувствительность рентгеновских телескопов возросла на много порядков величины, и в 1982–1987 годах группами Эндрю Поллока (США) и Антони Моффата (Канада) это предсказание было подтверждено с использованием результатов рентгеновских наблюдений с борта американской орбитальной обсерватории “Эйнштейн”. От ряда двойных WR+О-систем было найдено усиленное рентгеновское излучение со светимостью $L_x \simeq 10^{33} \div 10^{34}$, что качественно согласуется с теоретической оценкой (причины количественного различия будут обсуждаться ниже). Численное моделирование показывает, что форма кривой блеска сильно зависит от параметров ветра.

Обнаружение рентгеновских источников излучения от ударных волн, сформированных при столкновении звёздных ветров в двойных WR+О-системах, открывает широкие перспективы для поиска новых двойных среди звёзд WR, изучения химического состава звёздных ветров, исследования структуры ветров и выяснения причин их ускорения.

2.3 Столкновение звездных ветров в массивных двойных системах

В 1976 году О.Ф. Прилуцкий и В.В. Усов [21] рассчитали рентгеновское излучение, образующееся при столкновении звездных ветров, истекающих из обоих компонентов двойной системы. К тому времени благодаря интенсивным ультрафиолетовым наблюдениям горячих массивных звезд, выполненным с борта европейского спутника IUE (International Ultraviolet Explorer), было доказано существование достаточно интенсивных звездных ветров не только от звезд WR ($\dot{M} \simeq 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$, $V \simeq 2 \cdot 10^3$ км/с), но и от звезд спектральных классов О или В ($\dot{M} \simeq 10^{-6} - 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$, $V \simeq 4 \cdot 10^3$ км/с). Стало ясно, что в двойной WR+О-системе

должно реализоваться столкновение двух звездных ветров, истекающих из звезды WR и звезды O. Кроме того, можно ожидать рентгеновского излучения от столкновения звездных ветров в обычных O+O двойных системах.

Изотермичная высокотемпературная плазма за фронтом ударной волны эффективно высвечивается в рентгеновском диапазоне лишь в том случае, если время ее высвечивания $t_f = 1.5 \cdot 10^{11} T^{1/2} / n_e$ меньше времени пребывания элемента объема плазмы в окрестности ударной волны, то есть в объеме размером порядка радиуса r обтекаемой звезды. В противном случае из-за расширения и адиабатического охлаждения плазма будет остывать, не успевая излучить рентгеновские кванты. Учет этого эффекта, выполненный О.Ф. Прилуцким и В.В. Усовым, приводит к следующей оценке рентгеновской светимости ударной волны в двойной системе с достаточно большим орбитальным периодом $p > 2$ суток:

$$L_X = 6 \cdot 10^{34} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-5} M_{\odot} / \text{ГОД}} \right)^2 \left(\frac{r}{10^{11} \text{СМ}} \right)^3 \left(\frac{\bar{r}}{10^{12} \text{СМ}} \right)^{-4} \left(\frac{V}{10^8 \text{СМ/С}} \right)^{-1} \text{ эрг/с},$$

где \dot{M} - темп потери массы звездой WR, $\bar{r} = a - 1, 25r$. Для двойных систем с короткими орбитальными периодами $p < 2$ суток выражение для рентгеновской светимости более простое:

$$L_X = \frac{1}{4} \left(\frac{1,25r}{a-1,25r} \right)^2 \frac{\dot{M} V^2}{2} \text{ эрг/с},$$

поскольку в этом случае эффектом адиабатического охлаждения газа за фронтом ударной волны можно пренебречь.

Как было отмечено Е.В. Левичем и Р.А. Сюняевым в 1971 году [22], комптоновское рассеяние квантов оптических звезд на свободных электронах приводит к охлаждению горячей плазмы с характерным временем

$$t_c = \frac{3}{4} \frac{m_e c}{\sigma_T (\epsilon_1 + \epsilon_2)},$$

где ϵ_1 и ϵ_2 - плотности излучения звезды WR и спутника O, m_e - масса электрона, σ_T - сечение томсоновского рассеяния.

Черепашук в 1976 году [23] рассчитал ожидаемые рентгеновские светимости и потоки от 13 двойных (WR+O)-систем с известными характеристиками, с учетом охлаждения горячей плазмы за фронтом ударной волны комптоновским механизмом. Теоретические значения рентгеновских светимостей от ударных волн в этих двойных (WR+O)-системах лежат в пределах $L_{TX} = 10^{31} \div 10^{34}$ эрг/с. Следует подчеркнуть, что величина L_{TX} много меньше болометрической светимости звезд WR ($\sim 10^{39}$

эрг/с) и оптической светимости этих звезд ($\sim 10^{37}$ эрг/с). Поэтому влияние рентгеновского излучения от ударной волны на оптические характеристики звезды WR незначительно. В то же время прямые измерения последних лет показывают, что рентгеновские светимости горячих корон O-звезд и одиночных звезд WR в диапазоне нескольких килоэлектронвольт составляют в среднем $10^{32} \div 10^{33}$ эрг/с для O-звезд и $5 \cdot 10^{31}$ эрг/с для WR-звезд. Следовательно, ударная волна, образованная столкновением звездных ветров, выглядит в рентгеновском диапазоне достаточно контрастно и может служить надежным признаком двойственности звезды WR. При угле наклона орбиты i , близком к 90° (плоскость орбиты близка к лучу зрения), могут иметь место периодические изменения рентгеновского потока и периодические завалы низкоэнергетичных участков рентгеновского спектра, связанные с затмениями ударной волны телами звезд и поглощением в звездных ветрах WR- и O-компонентов.

Последующие строгие численные двумерные газодинамические расчеты параметров ударных волн, образованных при столкновении звездных ветров компонент в WR+O и O+O двойных системах, подтвердили описанные выше простые оценки. На рис. 2 приведены соответствующие результаты газодинамических расчетов для двойной (WR+O)-системы V444 Лебеда с орбитальным периодом 4,2 суток. Эти расчеты выполнены в 1992 году американскими учеными И.Р. Стивенсом, Дж.М. Блондином и Э.М.Т. Поллоком [24].

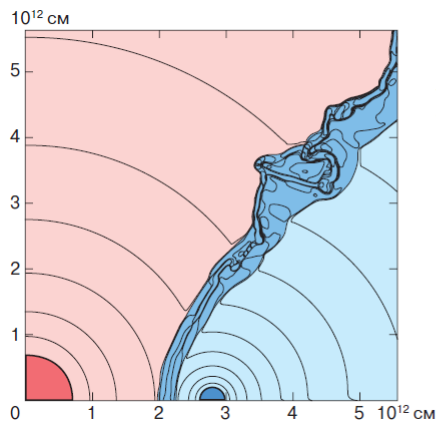


Рис. 2. Результаты численных газодинамических расчетов взаимодействия сверхзвуковых звездных ветров WR- и O-компонентов в двойной системе V444 Лебеда (из ст.: *Stevens I.R., Blondin J.M., Pollock A.M.T. // Astrophys. J. 1992. Vol. 386. P. 265–287*). Звезда WR расположена слева. Показано распределение плотности в ударных волнах, сформированных в ветре звезды WR и ветре звезды O

<http://www.astronet.ru/db/msg/1168021>

На рис. 3 показаны результаты газодинамических численных расчетов для системы V444 Cyg с учетом влияния торможения радиацией O-звезды ветра WR-звезды. Учет тормозящего влияния поля излучения O-звезды на движение ветра WR-звезды, выполненный С.П. Овоки и К.Г. Гэли (США) [25], приводит к уменьшению величины рентгеновской светимости ударной волны и увеличению ее угла раскрытия.

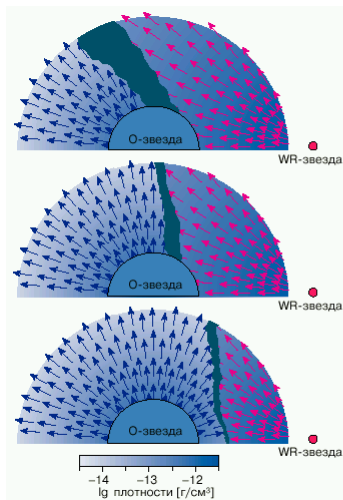


Рис. 3. Результаты численных газодинамических расчетов взаимодействия сверхзвуковых звездных ветров WR- и O-компонентов в двойной системе V444 Лебеда с учетом торможения ветра звезды WR давлением радиации O-звезды. Показаны векторы скорости движения вещества в ветрах и распределение плотности (наиболее темные области соответствуют наибольшим значениям плотности плазмы). В зависимости от величины непрозрачности ветра звезды WR меняется угол раскрытия ударной волны вблизи звезды O (из ст.: *Owocki S.P., Gayley K.G. // Astrophys. J. 1995. Vol. 454. P. L145-L148*)

<http://www.astronet.ru/db/msg/1171217>

3 Результаты наблюдений

В 1982 году группа Антони Моффата [26], обработав результаты наблюдений с борта рентгеновской обсерватории “Эйнштейн”, обнаружила рентгеновское излучение от известной затменной двойной системы WR+O V444 Лебеда. Поскольку расстояние до этой системы известно (~ 2 кпк), из наблюдаемого рентгеновского потока в диапазоне 0.2-4 кэВ получается светимость системы V444 Cyg в рентгеновском диапазоне L_X . Среднее за орбитальный период ($p \simeq 4.2$ суток) значение L_X для V444 Лебеда составляет $\sim 10^{33}$ эрг/с. Доказательством того, что эта рентгеновская светимость излучается в ударной волне, образованной при столкновении звездных ветров WR- и O-компонент, является переменность рентгеновского потока, а также “жесткость” спектра рентгеновского излучения, коррелирующая с фазой орбитального периода $p \simeq 4.2$ суток (рис. 4). Под “жесткостью” понимается отношение потоков в жестком рентгене ($\sim 10 - 100$ кэВ) и мягком ($\sim 0.1 - 1$ кэВ).

Рентгеновский поток регулярно уменьшается примерно в два раза в моменты, когда звезда WR находится впереди O-звезды. В эти же моменты в потоке наблюдается ослабление мягкого рентгена, что усиливает его “жесткость” и свидетельствует о поглощении в звездном ветре звезды WR. Хотя генерация рентгеновского излучения в ударной волне не вызывает сомнения, наблюдательное значение рентгеновской светимости ударной волны $X = 10^{33}$ эрг/с в системе V444 Cyg примерно на порядок ниже теоретического ($\sim 10^{34}$ эрг/с) даже после учета охлаждения горячей плазмы на фронте ударной волны комптоновским механизмом. Это расхождение может быть связано с рядом причин.

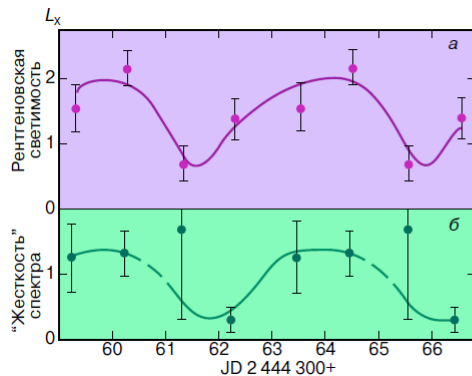


Рис. 4. а – рентгеновская светимость L_x затменной двойной системы WR+O V444 Лебеда (в единицах 10^{33} эрг/с) как функция времени, выраженного в юлианских днях JD. Величина светимости L_x и “жесткость” рентгеновского спектра (б) коррелируют с фазой орбитального периода $p = 4,2$ суток. Это доказывает, что рентгеновское излучение формируется в пространстве звездных ветров WR- и O-компонентов (из ст.: *Moffat A.F.J., Firmani C., McLean I.S., Seggewiss W.* // Proc. IUE Symp. “Wolf-Rayet Stars: Observations, Physics, Evolution”. 1982. P. 577–581)

<http://www.astronet.ru/db/msg/1168021>

Во-первых, система V444 Лебеда весьма тесная ($p \simeq 4,2$ суток) и вполне возможно, что в области столкновения звездных ветров величины их скоростей еще не достигли своих максимальных, предельных значений. Во-вторых, тормозящее действие потока излучения спутника O-звезды на ветер звезды WR может понижать его скорость в направлении вдоль линии центров компонент, что также приводит к уменьшению рентгеновской светимости ударной волны и понижению температуры плазмы за ее фронтом. В-третьих, известно, что звездный ветер звезд WR имеет сильно неоднородную, клочковатую структуру. Учет этой клочковатости также позволяет уменьшить величину рентгеновской светимости ударной волны в системе V444 Лебеда. В-четвертых, часть рентгеновского излучения ударной волны, особенно в мягком диапазоне спектра, поглощается в ветре звезды WR и звезды O и не доходит до наблюдателя.

Окончательное доказательство существования ударной волны вблизи O-звезды в системе V444 Лебеда было получено американскими учеными С. Шором и Д. Брауном [27] с использованием ультрафиолетовых спектров высокого разрешения, полученных с борта европейской орбитальной обсерватории IUE. В фазах орбитального периода 0.47 и 0.60, когда O-звезда расположена впереди звезды WR, абсорбционный компонент профиля резонансной эмиссионной линии CIV 1550 резко смещается в коротковолновую часть спектра. Соответствующее значение предельной скорости звездного ветра, измеряемой по абсорбционной линии, увеличивается от 2000 км/с (характерное для звезды WR) до 4000 км/с (типичное для звезды O). Такое резкое и сильное изменение величины наблюдаемой предельной скорости связано с тем, что в эти моменты (фазы 0.47 и 0.60) мы видим, как излучение звезды WR проходит границу раздела ветров WR- и O-звезды, которая связана с ударными волнами, образованными в результате столкновения ветров (рис. 5).

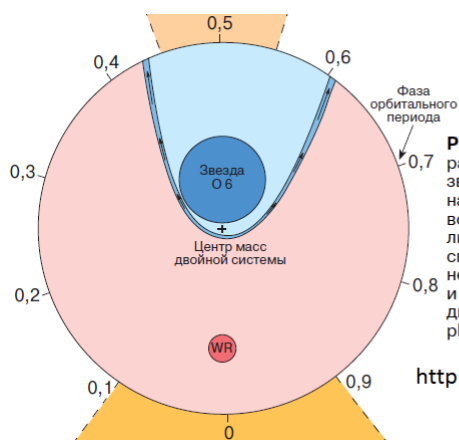


Рис. 5. Ударная волна в системе V444 Лебеда, образованная столкновением ветров звезды WR и звезды O. Структура ударной волны восстановлена из наблюдений переменности коротковолнового абсорбционного компонента резонансной линии излучения CIV 1550 в ультрафиолетовом спектре V444 Cyg. Ударная волна расположена несимметрично относительно линии центров WR- и O-компонентов из-за влияния их орбитального движения (из ст.: Shore S.N., Brown D.N. // Astrophys. J. 1988. Vol. 334. P. 1021)

<http://www.astronet.ru/db/msg/1168021>

Окончательный вывод о наличии у большинства известных двойных (WR+O)-систем избытка рентгеновского излучения, обусловленного столкновением звездных ветров, был сделан Поллоком в 1987 году [28]. Им были обработаны рентгеновские наблюдения 48 звезд WR, выполненные с борта обсерватории “Эйнштейн” в диапазоне 0,2-4 кэВ. Из них 20 суть двойные (WR+O)-системы. Среднее значение рентгеновской светимости LX для одиночных звезд WR составляет $5 \cdot 10^{31}$ эрг/с, в то время как для двойных (WR+O)-систем величина LX лежит в пределах $10^{32} - 10^{34}$ эрг/с. В четырех WR+O двойных системах найдена корреляция рентгеновской светимости LX и спектра рентгеновского излучения с фазой орбитального периода. Это доказывает, что рентгеновское излучение возникает в пространстве между компонентами двойной (WR+O)-системы, то есть в области столкновения звездных ветров WR- и O-компонентов. Некоторые звезды WR являются источниками нетеплового (синхротронного) радиоизлучения, которое формируется в результате излучения релятивистских электронов в магнитном поле. Источником релятивистских электронов, по-видимому, являются ударные волны в двойных (WR+O)-системах, образованные в результате столкновения звездных ветров. Ускорение электронов до релятивистских энергий может происходить под воздействием различных плазменных неустойчивостей на фронте ударной волны.

В тесных двойных (WR+O)-системах нетепловое радиоизлучение ударной волны поглощается в звездном ветре и не доходит до наблюдателя. Однако в разделенных системах WR+O (например, в системе HD 193793, $p = 7.94$ года) нетепловое радиоизлучение наблюдается [29]. Кроме того, у системы HD 193793 в моменты, близкие к прохождению звезды WR через периастр орбиты (орбита системы - эллипс с эксцентриситетом $e \simeq 0.8$), наблюдаются вспышки инфракрасного излучения, обусловленные

формированием пыли в области взаимодействия звездных ветров. Формирование пыли может стимулироваться возрастанием плотности вещества звездного ветра звезды WR вблизи ударной волны.

Таким образом, ударные волны, образованные при столкновении звездных ветров в двойных (WR+O)-системах, приводят к многообразным наблюдательным проявлениям в рентгеновском, ультрафиолетовом, инфракрасном и радиодиапазонах спектра. В 1991 году американские ученые Т. Клебовски и К. Гармани [30] обнаружили избытки рентгеновского излучения от двойных (O+O)-систем, содержащих обычные звезды спектрального класса O. Эти избытки также обусловлены наличием ударных волн, сформированных в результате столкновения звездных ветров.

Список литературы

- [1] Черепашук А.М., <http://www.astronet.ru/db/msg/1171217>
- [2] M. K. Abubekеров, E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, V. V. Shimanskii, arXiv:1201.5519v1 (2013)
- [3] Tananbaum H., Gursky H., Kellog E.M. // *Astrophys.J.* V.174, L.143 (1972).
- [4] Cherepashchuk A.M., Efremov Yu.N., Kurochkin N.E. et al // *IBVS* No.720, (1972).
- [5] Bahcall J.N., Bahcall N.A. // *Astrophys.J.* V.178 L.1 (1972).
- [6] Cheng F.H., Vrtilik S.D., Raymond J.C. // *Astrophys.J.* V.452 P.825 (1995).
- [7] Prince T.A., Bildsten L., Chakrabarty D. // in Holt S.S., Day C.S. eds, *The Evolution of X-ray Binaries.* AIP Press, New York, P.235 (1994).
- [8] Schandl S. // *Astron. Astroph.* V.307, P.95 (1996).
- [9] Middleditch J., Nelson J.E. // *Astrophys.J.* V.208 P.567 (1976).
- [10] Koo D.C., Kron R.C. // *PASP* V.89 P.285 (1977).
- [11] Hutchings J.B., Gibson E.M., Crampton D., Fisher W.A. // *Astrophys.J.* V.292 P.670 (1985).
- [12] Anderson S.F., Wachter S., Margon B. et al. // *Astrophys.J.* V.436 P.319 (1994).

- [13] M. K. Abubekеров, E. A. Antokhina, and A. M. Cherepashchuk // Astron. Rep. 48, 89 (2004). 801 (2005).
- [14] M. K. Abubekеров, E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, and V. V. Shimanskii // Astron. Rep. 50, 544 (2006).
- [15] E. A. Antokhina and A. M. Cherepashchuk // Astron. Rep. 38, 367 (1994).
- [16] E. A. Antokhina // Astron. Rep. 40, 483 (1996).
- [17] E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, and V. V. Shimanskii, *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Fiz.* 67 (3), 293 (2003).
- [18] E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, and V. V. Shimanskii // Astron. Rep. 49, 109 (2005).
- [19] J. 1988. Vol. 334. P. 1021 E.A. Antokhina, I.I. Antokhin, A.M. Cherepashchuk, arXiv:1303.6543v1 (2013)
- [20] Черепашук А.М. // Переменные звёзды. Т, 16, с. 226 (1967)
- [21] Прилуцкий О.Ф., Усов В.В. // Астроном. журн., Т. 53, с.6 (1976)
- [22] Levich, E. V.; Syunyaev, R. A. *Soviet Astronomy*, Vol. 15, p.363
- [23] Черепашук А.М. // Письма в "Астроном. журн.", Т.2, №7, с.356 (1976)
- [24] Stevens I.R., Blondin J.M., Pollock A.M.T. // *Astrophys. J.* 1992. Vol. 386. P. 265-287
- [25] Owocki S.P., Gayley K.G. // *Astrophys. J.* 1995. Vol. 454. P. L145-L148
- [26] Moffat A.F.J., Firmani C., McLean I.S., Seggewiss W. // *Proc. IUE Symp. "Wolf-Rayet Stars: Observations, Physics, Evolution"*. 1982. P. 577-581
- [27] Shore S.N., Brown D.N. // *Astrophys. J.* 1988. Vol. 334. P. 1021
- [28] Pollock A.M.T. // *Astrophysical Journal*, vol. 320, 1987, p. 283-295.
- [29] Cherepashchuk A.M., Katysheva N.A., Khruzina T.S., Shugarov S.Yu. *Highly Evolved Close Binary Stars: Catalog. L.: Gordon and Breach Publ.*, P. 49 (1996)
- [30] Chlebowski, Tomasz; Garmany, Catharine D. *Astrophysical Journal*, vol. 368, 1991, p. 241-251