

УДК 524.387-735

О МАССЕ КОМПАКТНОГО ОБЪЕКТА В РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ Her X-1/NZ Her

© 2008 г. М. К. Абубекеров¹, Э. А. Антохина¹, А. М. Черепашук¹, В. В. Шиманский²

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, Казань, Россия

Поступила в редакцию 22.06.2007 г.; принята в печать 26.10.2007 г.

Впервые произведена оценка массы компонент рентгеновской двойной системы Her X-1/NZ Her с учетом неЛТР-эффектов при формировании линии поглощения $H\gamma$. Оценка масс выполнена в модели Роша на основе наблюдаемой кривой лучевых скоростей оптической звезды NZ Her. С учетом неЛТР-эффектов при формировании линий поглощения в спектре оптической звезды массы компонент оцениваются как $m_x = 1.8 M_\odot$ и $m_v = 2.5 M_\odot$. Значения оценок массы рентгеновского пульсара и оптической звезды, полученные в рамках ЛТР-модели, лежат в пределах $m_x = 0.85 \pm 0.15 M_\odot$ и $m_v = 1.87 \pm 0.13 M_\odot$, соответственно. Показано, что оценки масс компонент двойной системы Her X-1/NZ Her, полученные на основе кривой лучевых скоростей, не могут быть приняты за окончательные. Продемонстрирована необходимость оценки масс компонент Her X-1/NZ Her по орбитальной переменности высокоточного наблюдаемого профиля линии поглощения в неЛТР-модели атмосферы оптического спутника.

PACS: 97.80.Jp, 97.80.Fk, 97.10.Nf, 95.85.Kr

1. ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновский источник Her X-1 открыт с борта спутника Uhuru в 1972 г. [1] и отождествлен с переменной NZ Her [2–5]. Двойная система Her X-1/NZ Her состоит из оптического спутника спектрального класса A7 [6], заполняющего свою полость Роша, и рентгеновского пульсара с периодом 1.24 с. Орбитальный период двойной системы $P_{orb} = 1.7^d$ [7]. В системе наблюдается дополнительная рентгеновская 35-дневная переменность, связываемая с прецессией скрученного аккреционного диска [1, 8]. Основной вклад в оптическую переменность в двойной системе вносит эффект рентгеновского прогрева оптической звезды [3, 5].

Двойная Her X-1/NZ Her хорошо изучена: из рентгеновского тайминга получено высокоточное значение полуамплитуды кривой лучевых скоростей рентгеновского пульсара $K_x = 169.049$ км/с [9], из длительности рентгеновских затмений известно наклонение орбиты $i = 81^\circ - 88^\circ$ [6, 10]. Тем не менее однозначной оценки массы рентгеновского пульсара до сих пор нет ввиду огромной величины рентгеновского прогрева $k_x \simeq 150$.

Значение массы нейтронной звезды в двойной Her X-1/NZ Her однозначно не определено. Со-

гласно работе Майдлидича и Нельсона [11] масса рентгеновского пульсара составляет $m_x \simeq 1.30 \pm 0.14 M_\odot$. По результатам работы Ку и Крона [12] масса компактного объекта Her X-1 близка к $m_x \simeq 1.5 M_\odot$. Оценка массы рентгеновского пульсара, предложенная Хатчингсом и др. [13], равна $m_x = 0.93 \pm 0.07 M_\odot$. Рейнольдс и др. в работе [10] приходят к выводу, что масса компактного объекта лежит в интервале $m_x = 1.5 \pm 0.3 M_\odot$. Приведенные оценки масс рентгеновского пульсара выполнены в модели точечных масс, за исключением работы Ку и Крона [12], в которой оценка выполнена в модели Роша в предположении сферической формы оптического спутника и грубым учетом прогрева оптического спутника.

Основным препятствием для точной оценки массы компактного объекта является наличие сильного рентгеновского прогрева оптического спутника. Рентгеновская светимость компактного объекта составляет $L_x = 3.39 \times 10^{37}$ эрг/с [6], вследствие чего спектральный класс оптической звезды за полуорбитальный цикл меняется с A7 ($\phi = 0$) до B3–B6 ($\phi = 0.5$) [6, 14]. Распределение температуры по поверхности оптической звезды также усложнено экранированием рентгеновского излучения скрученным прецессирующим аккреционным диском. Все это не позволяет получить

высокоточную наблюдаемую чисто орбитальную кривую лучевых скоростей и, как следствие, препятствует однозначной оценке массы рентгеновского пульсара.

Заметим, что в модели точечных масс учитывается лишь значение полуамплитуды кривой лучевых скоростей K_v , а ее форма не принимается во внимание. Но известно, что наблюдаемые кривые лучевых скоростей звезд в двойных системах могут отличаться от кривых лучевых скоростей центров масс звезд из-за приливно-вращательного искажения поверхностей звезд и их прогрева излучением спутника (см. работы Вилсона и София [15], Милгрона [16] и содержащиеся в них ссылки). Особенно важен учет этих эффектов при определении масс релятивистских объектов в рентгеновских двойных системах. Так Милгром [17, 16] показал, что даже при относительно небольшом рентгеновском прогреве оптической звезды (как, например, в Cyg X-1 и SMC X-1) измеряемые по абсорбционным линиям лучевые скорости могут претерпевать существенные изменения. На основе численных расчетов профилей различных абсорбционных линий для HZ Her и других звезд [17, 16] он отметил важную роль наличия “мягкого” рентгеновского излучения ($E < 1$ кэВ) в спектре релятивистского объекта, которое ответственно за возникновение эмиссионных компонент линий. Для вычисления профилей спектральных линий использовался разработанный Милгромом и Солпитером [18] алгоритм расчета выходящего излучения для атмосферы звезды, облученной потоком рентгеновского излучения. К сожалению, в 70-е годы такие вычисления требовали больших затрат машинного времени и не могли применяться для массовых расчетов и решения обратной задачи.

Антохиной и др. [19, 20] был предложен алгоритм вычисления профилей линий и кривых лучевых скоростей оптических звезд в рентгеновских двойных системах с учетом падающего рентгеновского потока излучения от релятивистского объекта. С использованием этого алгоритма нами был выполнен цикл работ по анализу спектроскопических наблюдений рентгеновских тесных двойных систем [21–24] и показана необходимость учета формы кривой лучевых скоростей для корректного определения масс компонент, особенно при сильном рентгеновском прогреве.

Принимая во внимание важность надежной оценки массы компактного объекта в двойной системе Her X-1/HZ Her, мы проанализировали наблюдательные данные работы [10] в модели Роша с точным учетом эффекта рентгеновского прогрева оптической звезды [20, 25, 26]. Забегая вперед, отметим, что в спектре оптической звезды HZ Her отсутствуют эмиссионные компоненты

у линий поглощения, несмотря на огромную величину рентгеновского прогрева в этой системе. Поскольку это может быть связано с эффектами отклонения от ЛТР, мы провели анализ кривой лучевых скоростей в рамках двух моделей: ЛТР и неЛТР.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В качестве наблюдательных данных использовались спектральные данные из работы [10]. Кратко опишем их. Спектральные данные получены с 10 по 16 июня 1995 г. на 2.5-м телескопе имени Исаака Ньютона (INT) Королевской гринвичской обсерватории на острове Ла Пальма (Канарские острова). Всего получено 59 спектров в диапазоне 4080–4940 Å с экспозицией от 1200 до 1800 с. Спектры получены на спектрографе IDS (Intermediate Dispersion Spectrograph) с 235-мм камерой, дифракционной решеткой с дисперсией 1200 штр./мм и ПЗС-матрицей Tektronix размером 1024 × 1024 пикс. Обратная линейная дисперсия спектрограмм составила 0.84 Å/пикс. Отношение сигнала к шуму в полученных спектрах лежит в пределах $S/N = 50–100$. Калибровка шкалы длин волн выполнена по CuAg-стандарту. Ошибка калибровки шкалы длин волн составила < 0.05 Å.

Лучевая скорость HZ Her определена методом кросс-корреляции относительно IAU-звезд-стандартов лучевых скоростей спектрального класса F, полученных в те же ночи, что и спектрограммы HZ Her. В качестве нулевой фазы авторы работы [10] использовали момент максимальной положительной лучевой скорости оптического спутника Her X-1/HZ Her (JD = 2448800.537). Орбитальный период полагался равным $P_{orb} = 1.700167412^d$ [7].

В нашей работе за нулевую орбитальную фазу принят момент середины затмения рентгеновского источника оптическим спутником. Соответствующий анализ наблюдательных данных работы [10] показал, что в этом случае момент максимальной положительной лучевой скорости оптической звезды приходится на фазу $\phi = 0.22$, а систематическая лучевая скорость центра масс составляет $\gamma = -69$ км/с. Наблюдаемая кривая лучевых скоростей представлена на рис. 1.

Спектрограммы работы [10] получены в промежуток орбитальных фаз 35-дневного прецессионного цикла аккреционного диска $\phi_{35} = 0.14 – 0.33$ (за нулевую фазу принят момент “включения” рентгеновского источника для земного наблюдателя). Таким образом, аккреционный диск в момент проведения спектроскопических наблюдений [10] не экранировал рентгеновский поток

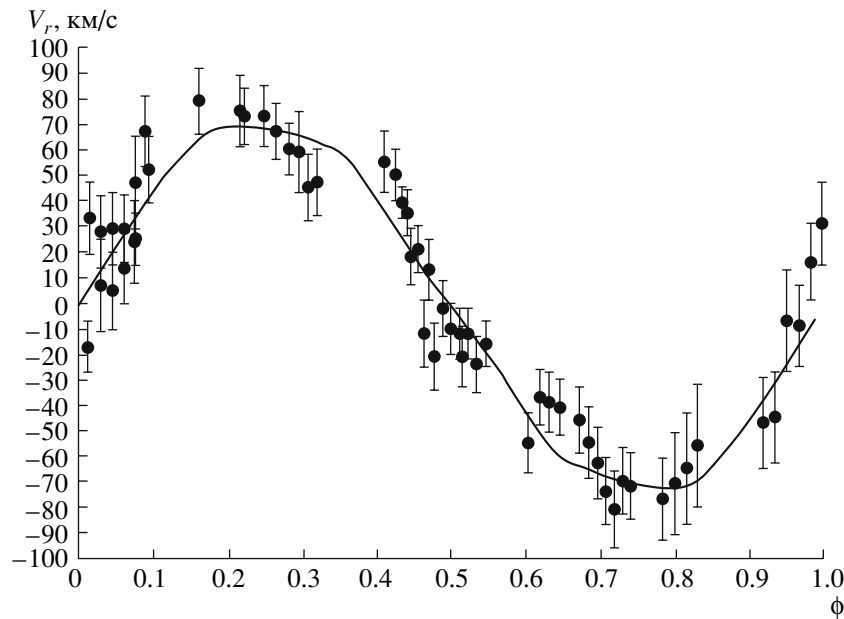


Рис. 1. Наблюдаемая и теоретическая кривая лучевых скоростей оптической компоненты двойной рентгеновской системы Her X-1/HZ Her. Точки — значения лучевой скорости HZ Her из работы [10]. Сплошная линия — теоретическая кривая лучевых скоростей в модели Роша, вычисленная с помощью алгоритма II при массе компактного объекта $m_x = 0.81 M_\odot$, массе оптической звезды $m_v = 1.80 M_\odot$ и наклонеении орбиты $i = 88^\circ$ (остальные параметры двойной системы приведены в табл. 1).

в направлении оптической звезды. Поэтому нами при интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей эффект экранирования рентгеновского излучения аккреционным диском не учитывался.

3. МОДЕЛЬ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ И АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ КРИВОЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Синтез теоретических профилей абсорбционных линий и кривых лучевых скоростей оптической звезды в рентгеновской двойной системе выполнен нами с использованием двух алгоритмов, подробно описанных в работах [20, 25, 26]. Назовем их алгоритмом I [25, 26] и алгоритмом II [19, 20]. Эти алгоритмы аналогичны, различие состоит в способе вычисления потока излучения от локальных площадок звезды. Алгоритм I (экспрессный алгоритм) использует затабулированные профили бальмеровских линий Куруца [27], в алгоритме II (точном алгоритме) поток выходящего излучения вычисляется методом моделей атмосфер при наличии падающего внешнего потока. Кратко опишем методику вычислений.

В тесной двойной системе оптический спутник имеет приливо-деформированную форму и неоднородное распределение температуры по поверхности вследствие эффекта гравитационного потемнения и эффекта прогрева поверхности звезды

рентгеновским излучением релятивистского объекта. Поэтому при моделировании кривой лучевых скоростей рентгеновская двойная система была представлена оптической звездой в модели Роша и точечным рентгеновским источником с конечной массой. Приливо-деформированная поверхность звезды разбивалась на ~ 2600 элементарных площадок, для каждой из которых вычислялось выходящее излучение. При вычислении потока излучения от элементарной площадки учитывались эффект гравитационного потемнения, эффект прогрева поверхности звезды падающим излучением спутника (эффект “отражения”) и эффект потемнения к краю. Эффект прогрева атмосферы звезды рентгеновским излучением спутника в алгоритме I [25, 26] учитывался путем сложения выходящего и падающего потоков без учета переноса излучения в атмосфере звезды.

Профиль абсорбционной линии и его эквивалентная ширина для каждой видимой площадки с температурой T_{loc} и локальным ускорением силы тяжести g_{loc} вычислялись по таблицам Куруца для бальмеровских линий [27] с применением процедуры интерполяции. Суммируя локальные профили по видимой поверхности звезды с учетом эффекта Доплера, предварительно пронормировав их на континуум для каждой площадки, мы вычисляли интегральный профиль от звезды в данной фазе орбитального периода (подробнее см. [25, 26]).

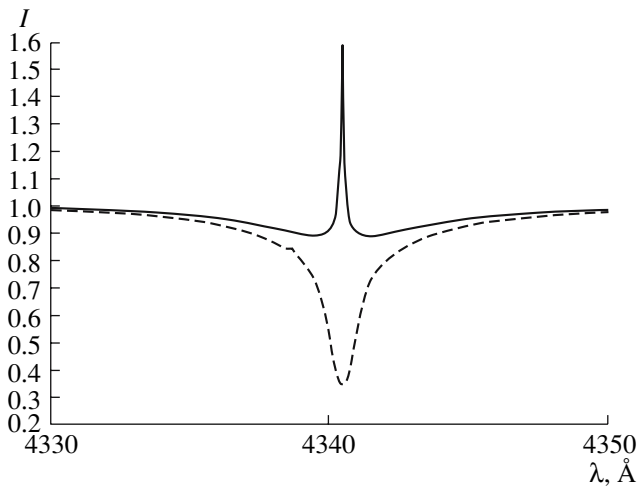


Рис. 2. Модельные локальные профили линии поглощения водорода $H\gamma$. Сплошная линия соответствует расчету в ЛТР-приближении (с помощью алгоритма II) при $m_x = 0.9 M_\odot$, $m_v = 2.0 M_\odot$, $i = 80^\circ$, $k_x = 150$, штриховая расчету в неЛТР-приближении при тех же параметрах двойной системы. Значения температуры и ускорения силы тяжести локальной площадки составляют $T_{loc} = 7825$ К и $\lg g_{loc} = 3.336$, соответственно.

Вычисленный интегральный профиль линии поглощения использовался для определения лучевой скорости звезды. Лучевая скорость в данной орбитальной фазе вычислялась по средней длине волны на уровне остаточных интенсивностей $1/3$, $1/2$ и $2/3$ интегрального профиля линии поглощения.

В более современном алгоритме II для каждой элементарной площадки, помимо локальной температуры T_{loc} и локального ускорения силы тяжести g_{loc} , вычисляется параметр k_x^{loc} , равный отношению падающего рентгеновского потока к выходящему потоку излучения без учета внешнего облучения атмосферы. При этих значениях параметров в данной точке поверхности в предположении об ЛТР вычисляется модель атмосферы путем решения уравнений переноса излучения в линии при наличии падающего внешнего рентгеновского излучения (подробнее см. [19, 20]). Таким образом для каждой локальной площадки вычисляется интенсивность выходящего излучения в линии и континууме. Далее по идентичной алгоритму I процедуре вычисляется интегральный профиль линии поглощения в данной фазе орбитального периода, а по нему определяется лучевая скорость оптической звезды.

Еще раз отметим, что главное отличие алгоритма II [19, 20] от алгоритма I [25, 26] состоит в том, что локальный профиль элементарной площадки находится путем построения ЛТР-модели атмосферы и вычисления для нее интенсивностей

выходящего излучения в линии и в континууме (с учетом переработки внешнего рентгеновского облучения). В алгоритме I используются вычисленные и затабулированные Куруцем профили линий поглощения водорода бальмеровской серии для различных значений эффективных температур T_{eff} и ускорений сил тяжести g . Отметим, что помимо упрощенного учета “эффекта отражения” такой способ вычисления профилей линий поглощения водорода не совсем корректен, поскольку в таблицах Куруца [27] приведены теоретические профили линий в относительных потоках, а не в интенсивностях. Однако поскольку мы используем полученные теоретические профили линий звезды не для сравнения с наблюдаемыми спектральными профилями линий, а для определения лучевых скоростей, мы полагаем такое приближение разумным [23].

В атмосферах горячих звезд, особенно с наличием внешнего облучения, возможны значительные отклонения от ЛТР. Поэтому моделирование профилей бальмеровских линий в рамках алгоритма II выполнялось как в приближении ЛТР, так и с учетом неЛТР-эффектов в атоме водорода. Расчеты равновесных неЛТР-населенностей уровней $H\text{I}$ проведены на основе методики, аналогичной разработанной Ивановой и др. [28]. В вычислениях применялась 23-уровневая модель атома $H\text{I}$, учитывающая все разрешенные ударные и радиативные механизмы перераспределения атомов по состояниям, в том числе генерируемые внешним излучением. Всего модель $H\text{I}$ включает 153 разрешенных связанно-связанных и 22 связанно-свободных радиативных переходов, 55 из которых принимались линеаризуемыми. НеЛТР-населенности уровней получены для моделей атмосфер локальных площадок на поверхности HZ Her с использованием программного комплекса NONLTE3 [29], реализующего метод полной линеаризации в версии Ауэра и Хисли [30] и модернизированного Ивановой и др. [28] для учета внешнего излучения. В процессе вычислений принимались во внимание все непрерывные источники непрозрачности в оптическом и рентгеновском диапазонах и около 570 000 линий из списков Куруца [31]. Последующее моделирование профилей линий $H\text{I}$ осуществлялось по стандартной методике, описанной выше, но с применением полученных неЛТР-населенностей.

Сравнение локальных профилей на рис. 2, полученных в рамках ЛТР и неЛТР-моделей, показывает, что в последнем случае линия $H\gamma$ не формирует эмиссионной компоненты. Данный эффект связан с сильной (в 4–6 раз) формирующейся в хромосферной области перенаселенностью второго уровня ($n = 2$) атома водорода относительно

вышележащих уровней. Функция источников $S_\nu \simeq \simeq \frac{b_i}{b_e} B_\nu(T_e)$ пропорциональна отношению населенностей нижнего и верхнего уровней переходов. В результате, несмотря на большой рост функции $B_\nu(T_e)$ в горячей хромосфере, значение S_ν в ней превышает значение функции источников в области формирования континуума, т.е. профиль линии оказывается абсорбционным.

Как показывает анализ физических процессов, в атоме H I перенаселенность его низковозбужденных состояний должна быть характерной для горячих объектов с рентгеновским облучением. Согласно данным [32], водород обеспечивает менее 20% общего поглощения в рентгеновском диапазоне спектра при $T_e = 7000$ К и в 10^3 раз меньше при $T_e = 20\,000$ К.

Одновременно превышение температуры в хромосферной области над температурой в зоне формирования континуума приводит к доминированию в ней функции источников над средней интенсивностью излучения $J_\nu \ll S_\nu$ (где J_ν — средняя интенсивность излучения в данной частоте на данной глубине, S_ν — полная функция источников в данной частоте на данной глубине) для всех частот оптического спектра. Таким образом, процессы радиативной рекомбинации на все уровни H I и последующих спонтанных переходов, пропорциональные S_ν , преобладают по сравнению с процессами ионизации, вызываемыми как внешним излучением, так и собственным излучением атмосферы. В результате все уровни H I оказываются перенаселенными относительно приближения ЛТР с усилением перенаселенности для более низких состояний.

Данные неЛТР-эффекты должны приводить к усилению абсорбционных и ослаблению эмиссионных компонент водородных линий в спектрах атмосфер со значительным рентгеновским облучением. Подчеркнем, что в спектре оптической звезды HZ Her, несмотря на огромную величину рентгеновского прогрева ($k_x \simeq 150$), не наблюдаются эмиссионные компоненты в профилях линий поглощения, что может быть связано с влиянием эффектов отклонения от ЛТР.

4. АНАЛИЗ НАБЛЮДАЕМОЙ КРИВОЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Интерпретация наблюдаемой кривой лучевых скоростей оптической звезды выполнена в модели Роша. Численные значения параметров модели рентгеновской двойной Her X-1/HZ Her представлены в табл. 1.

Как отмечалось выше, в двойной системе Her X-1/HZ Her наблюдается сильный рентгеновский

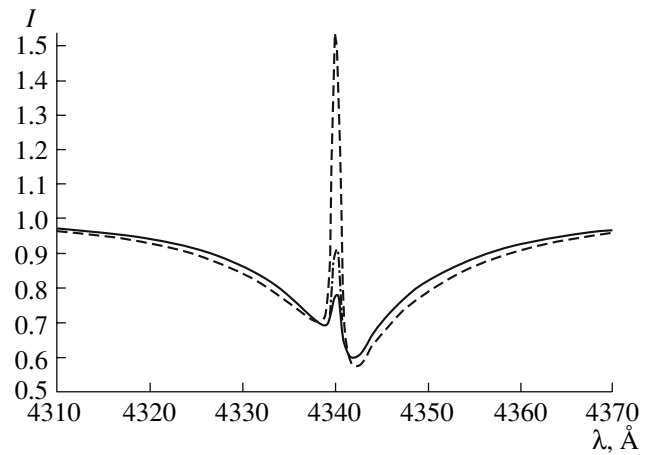


Рис. 3. Влияние учета мягкой компоненты падающего рентгеновского потока на форму линии Hγ. Приведены интегральные профили, вычисленные с помощью алгоритма II при $m_x = 1.0 M_\odot$, $m_v = 2.0 M_\odot$, $i = 80^\circ$, $k_x = 150$. Рентгеновское облучение моделировалось в диапазонах 0.1–1 кэВ (штриховая линия), 0.1–17 кэВ (штрихпунктирная линия), 1–17 кэВ (сплошная линия).

прогрев атмосферы оптической звезды. Рентгеновская светимость компактного объекта составляет $L_x \simeq 3.39 \times 10^{37}$ эрг/с [6], тогда как величина светимости оптической звезды равна $L_v \simeq 2.28 \times 10^{35}$ эрг/с (значение оптической светимости получено в модели Роша в предположении средней эффективной температуры $T_{eff} = 8100$ К [6]).

При моделировании прогрева атмосферы оптического спутника использовались данные о рентгеновском спектре Her X-1, полученные на спутнике ВерроSAX в 1998 г. [33]. Отметим, что, несмотря на сильное межзвездное поглощение, уверенно регистрируется мягкое рентгеновское излучение от Her X-1 в диапазоне 0.1–1 кэВ, что важно для изучения условий формирования оптического спектра HZ Her [17]. Так например, на рис. 3 приведены два модельных ЛТР-спектра линии поглощения водорода Hγ оптического спутника, вычисленные с учетом и без учета мягкой компоненты (0.1–1 кэВ) облучающего рентгеновского спектра. Видно, что в случае учета мягкой компоненты спектра падающего рентгеновского потока эмиссионная компонента в абсорбционной линии Hγ заметно сильнее.

Рентгеновский спектр источника в диапазоне 0.1–10 кэВ, исправленный за межзвездное поглощение, был восстановлен с помощью программы XSPEC по данным [33]. Использовалась двухкомпонентная модель спектра из [33]: чернотельное излучение с температурой 0.093 кэВ (эта компонента преобладает до энергии ~ 1 кэВ), и степенное излучение со спектральным индексом 0.74 (эта

Таблица 1. Численные значения параметров, используемых при моделировании кривых лучевых скоростей оптической компоненты в модели Роша

P , сут	1.700167412	Орбитальный период
e	0.0	Эксцентриситет
i ,	$80^\circ; 88^\circ$	Наклонение орбиты
μ	1.0	Коэффициент заполнения полости Роша оптической компонентой
f	1.0	Коэффициент асинхронности вращения оптической компоненты
T_{eff} , К	8100	Эффективная температура невозмущенной оптической компоненты
β	0.08	Коэффициент гравитационного потемнения
k_x	150	Отношение рентгеновской светимости релятивистской компоненты к болометрической светимости оптической компоненты L_x/L_v
A	1.0	Коэффициент переработки рентгеновского излучения (для алгоритма I)
u	0.3	Коэффициент потемнения к краю

компонента преобладает на энергиях более 1 кэВ). Мы не включили компоненты из [33], описывающие рентгеновские эмиссионные линии железа из-за их малого вклада в общий рентгеновский поток. При моделировании оптического спектра HZ Her мы делали предположение, что рентгеновское излучение релятивистского объекта изотропно.

Поскольку точное значение массы оптической звезды в системе Her X-1/HZ Her неизвестно, то за искомые параметры приняты массы обеих компонент m_x, m_v . Для решения обратной задачи нами

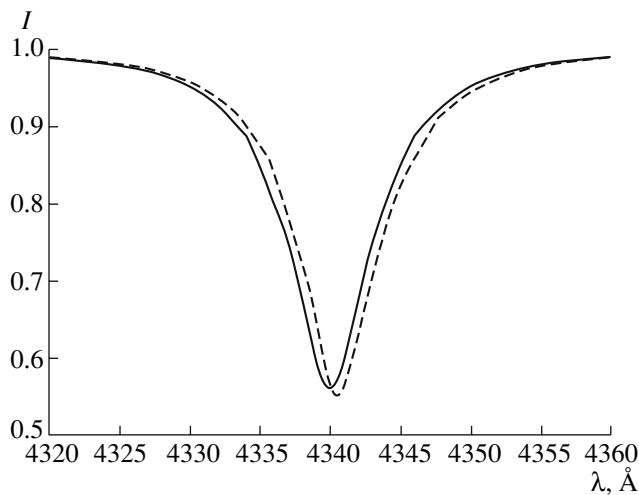


Рис. 4. Интегральные профили линии поглощения водорода H γ , вычисленные в модели Роша с помощью алгоритма I для ширины аппаратной функции FWHM = 1.7 Å и при $m_x = 1.78 M_\odot$, $m_v = 2.5 M_\odot$ и $i = 88^\circ$. Сплошная линия соответствует орбитальной фазе $\phi = 0$, штриховая — $\phi = 0.3$.

использовался метод перебора по параметрам и многократного решения прямой задачи, который позволяет детально исследовать поверхность невязок.

Из рентгеновского тайминга известно значение полуамплитуды кривой лучевых скоростей рентгеновского пульсара $K_x = 169.049$ км/с [9], а следовательно, и функции масс пульсара $f_x(m) = 0.85 M_\odot$. Поэтому при переборе по массам компонент при решении задачи мы специально следили за сохранением величины функции масс рентгеновского пульсара $f_x(m) = 0.85 M_\odot$. Это было выполнено следующим образом.

Функция масс

$$f_x(m) = \frac{m_v^3 \sin^3 i}{(m_x + m_v)^2} \quad (1)$$

при данном значении наклонения орбиты i задает однозначную связь между массой оптической звезды m_v и массой рентгеновского пульсара m_x .

Для каждого значения массы оптической компоненты m_v при фиксированном значении параметра i из уравнения (1) вычислялось значение m_x . Далее для полученных значений масс компонент m_x и m_v при численных параметрах модели Роша из табл. 1 вычислялась теоретическая кривая лучевых скоростей оптического спутника. Проверка адекватности модели наблюдательным данным выполнена по статистическому критерию χ^2 . Для работы был выбран уровень значимости 5% (подробности см. в работе [34]).

4.1. Результаты, полученные с алгоритмом I

Поскольку значения лучевых скоростей в работе [10] определены по спектрам, полученным с

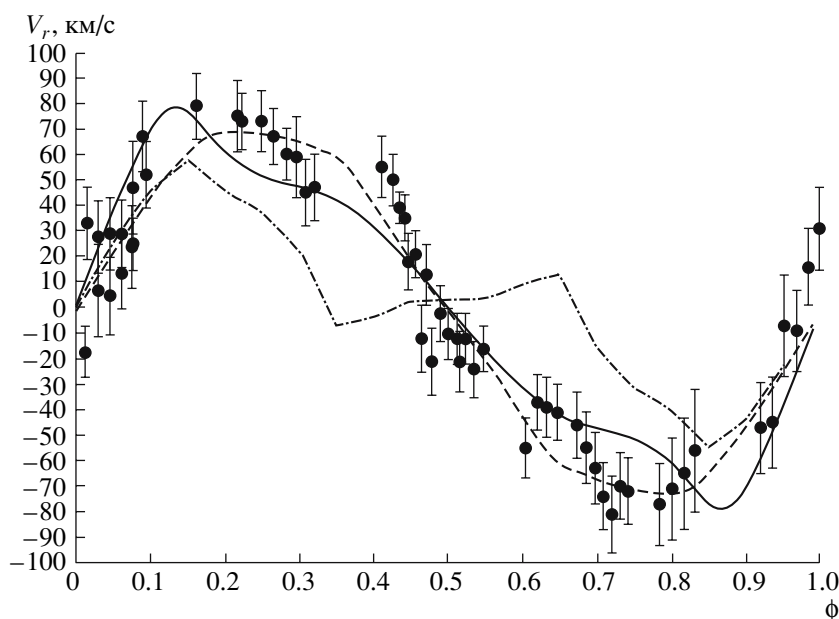


Рис. 5. Наблюдаемая кривая лучевых скоростей оптической компоненты двойной рентгеновской системы Her X-1 из работы [10] (точки) и теоретические кривые лучевых скоростей, вычисленные с помощью алгоритма I при $m_x = 1.78 M_\odot$, $m_v = 2.5 M_\odot$, $i = 88^\circ$ (сплошная кривая), с помощью алгоритма II при $m_x = 0.81 M_\odot$, $m_v = 1.80 M_\odot$, $i = 88^\circ$ по шести сечениям интегрального профиля линии $H\gamma$ (штриховая линия) и с помощью программного комплекса NONLTE3 [29] в рамках нелТР-модели при $m_x = 0.81 M_\odot$, $m_v = 1.80 M_\odot$, $i = 88^\circ$ (штрих-пунктирная кривая).

величиной аппаратной функции $\text{FWHM} = 1.7 \text{ \AA}$, то в нашей работе теоретические кривые лучевых скоростей вычислялись по профилю линии $H\gamma$, свернутому с инструментальным профилем с величиной $\text{FWHM} = 1.7 \text{ \AA}$. Теоретические интегральные профили линии поглощения $H\gamma$ представлены на рис. 4.

В табл. 2 приведены значения масс рентгеновского пульсара m_x и оптической звезды m_v , соответствующие минимуму невязки χ^2 между теоретической и наблюдаемой кривой лучевых скоростей. Значения масс компонент в табл. 2 приведены без указания величины ошибки, поскольку модели двойной системы отвергалась по выбранному уровню значимости $\alpha = 5\%$. При значения квантиля $\Delta(\alpha = 5\%) = 77.93$, минимальное значение невязки при наклонении орбиты $i = 80^\circ, 88^\circ$ составляло $\chi_{\text{min}}^2 \simeq 170$. Теоретическая кривая лучевых скоростей для наклонения орбиты $i = 88^\circ$ представлена на рис. 5. Поведение невязки χ^2 при наклонении орбиты двойной системы $i = 88^\circ$ представлено на рис. 6а.

4.2. Результаты, полученные с алгоритмом II

Как сказано выше, в исследовании мы опирались на наблюдательные данные работы [10]. На представленных в работе [10] спектрах профиль линии поглощения водорода $H\gamma$ на орбитальной

фазе 0.47 имеет возмущение [10, рис. 1]. Теоретический интегральный профиль линии поглощения водорода $H\gamma$ в той же орбитальной фазе при свертке с аппаратной функцией со значением $\text{FWHM} = 1.7 \text{ \AA}$ имеет заметную эмиссионную составляющую, и как следствие, значительно отличается от наблюдаемого (рис. 7). Подобное возмущение в фазе 0.47 на интегральном теоретическом профиле линии водорода $H\gamma$ нам удалось воспроизвести лишь при значении аппаратной функции $\text{FWHM} = 5 \text{ \AA}$ (рис. 7). Поэтому анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей выполнен по линии водорода $H\gamma$ при значении аппаратной функции $\text{FWHM} = 5 \text{ \AA}$.

При эффективной температуре поверхности звезды $\sim 8000 \text{ K}$ линия водорода имеет ширину несколько десятков ангстрем на половине остаточной интенсивности. В нашем случае модельный интегральный профиль линии $H\gamma$ имел ширину на половине остаточной интенсивности $\sim 25 \text{ \AA}$ (рис. 8).

Таблица 2. Массы релятивистской и оптической компонент Her X-1, полученные в модели Роша с помощью алгоритма I

Наклонение орбиты i	m_x, M_\odot	m_v, M_\odot
80°	1.84	2.6
88°	1.78	2.5

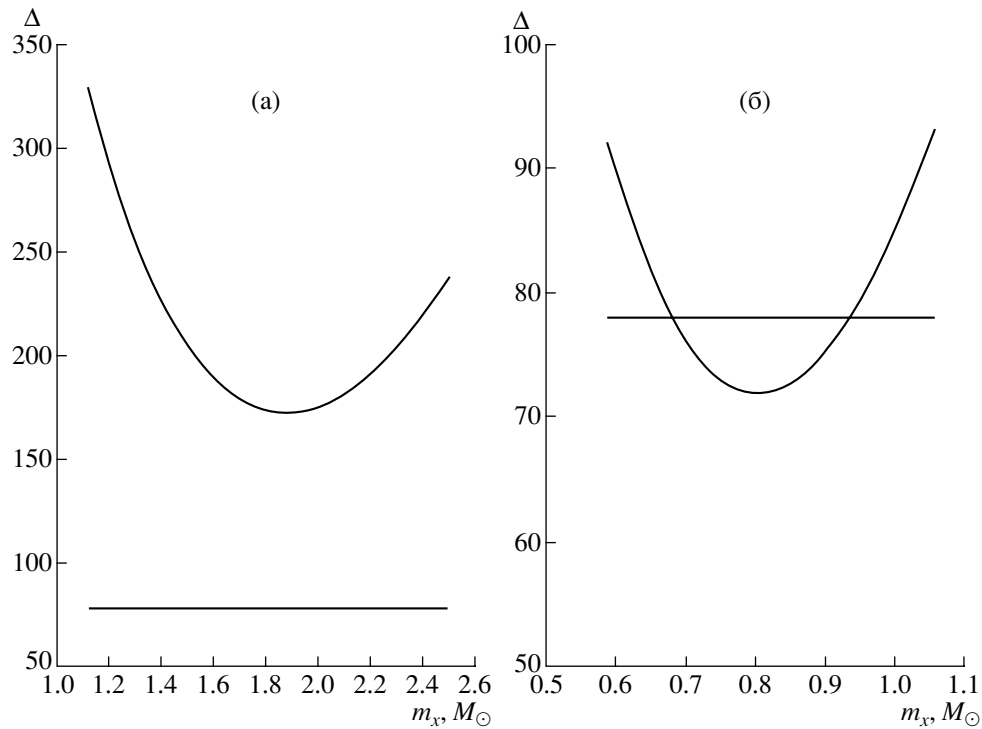


Рис. 6. Значения невязок между наблюдаемой и теоретической кривыми лучевых скоростей HZ Нег. Теоретическая кривая получена с помощью алгоритма I (а) и алгоритма II (б) при наклонении орбиты $i = 80^\circ$. Горизонтальная линия соответствует критическому уровню χ^2 -критерия $\Delta_{59} = 77.93$ по уровню значимости $\alpha = 5\%$.

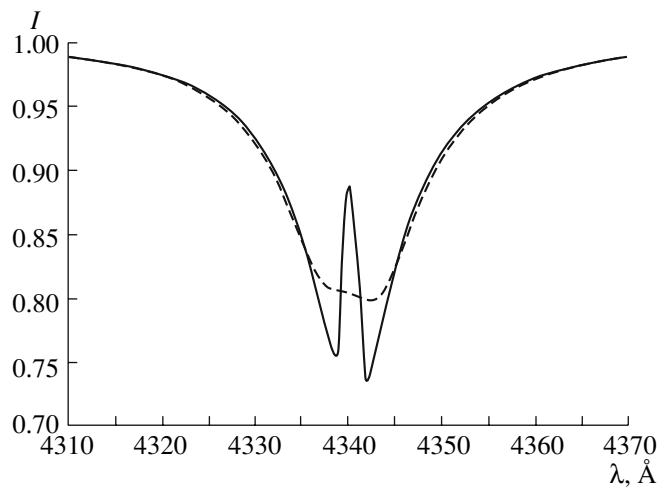


Рис. 7. Модельный интегральный профиль линии поглощения водорода в орбитальной фазе $\phi = 0.47$, вычисленный в рамках ЛТР с помощью алгоритма II при ширине аппаратной функции $\text{FWHM} = 1.7 \text{ \AA}$ (сплошная линия) и $\text{FWHM} = 5 \text{ \AA}$ (штриховая линия) при $m_x = 0.81 M_\odot$, $m_v = 1.80 M_\odot$, $i = 88^\circ$.

Мы столкнулись с проблемой определения лучевой скорости по столь широкому профилю линии поглощения H γ . В случае алгоритма I полуширина модельного профиля была меньшей $\sim 10 \text{ \AA}$ (рис. 8), а сам профиль обладал большей симметрией. Поэтому для определения положения центра

тяжести линии было достаточно трех сечений на высоте 1/2, 2/3 и 1/3 остаточной интенсивности. В случае вычисления интегрального профиля H γ с помощью алгоритма II трех сечений для определения центра тяжести линии было недостаточно. Для определения центра тяжести линии H γ мы выбрали

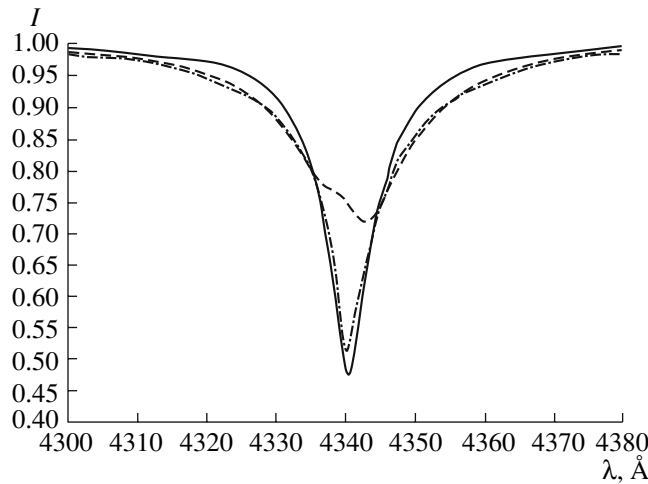


Рис. 8. Модельный интегральный профиль линии поглощения водорода $H\gamma$ в орбитальной фазе $\phi = 0.3$, полученный с помощью алгоритма II при ширине аппаратной функции $\text{FWHM} = 5 \text{ \AA}$, $m_x = 0.81 M_\odot$, $m_v = 1.80 M_\odot$, $i = 88^\circ$ (штриховая линия), с помощью алгоритма I при ширине аппаратной функции $\text{FWHM} = 1.7 \text{ \AA}$, $m_x = 1.78 M_\odot$, $m_v = 2.5 M_\odot$, $i = 88^\circ$ (сплошная линия) и с помощью программного комплекса NONLTE3 в неЛТЭ-модели при ширине аппаратной функции $\text{FWHM} = 1.7 \text{ \AA}$, $m_x = 0.81 M_\odot$, $m_v = 1.80 M_\odot$, $i = 88^\circ$ (штрих-пунктирная линия).

6 и 8 уровней сечений остаточной интенсивности модельного интегрального профиля.

В случае 6 уровней сечений лучевая скорость определялась по средней длине волны по 6 уровням сечений нижней половины профиля линии поглощения. Ошибка определения лучевой скорости в этом случае составила $\sim 1 \text{ км/с}$. В случае 8 уровней сечений дополнительно к предыдущему случаю вводилась пара сечений верхней половины модельного профиля линии поглощения водорода $H\gamma$. Ошибка значения теоретической лучевой скорости в этом случае составила $\sim 2.5 \text{ км/с}$. Здесь в качестве ошибки теоретической лучевой скорости приведены значения лучевой скорости на орбитальной фазе $\phi = 0$ (оптический спутник затмевает рентгеновский источник). Ошибка лучевой скорости при вычислении центра тяжести линии по 6 сечениям заметно меньше вследствие узости нижней части профиля линии $H\gamma$ по сравнению с крыльями (рис. 8).

Массы рентгеновского пульсара m_x и оптической звезды m_v , соответствующие минимуму невязки χ^2 между теоретической и наблюдаемой кривой лучевых скоростей, полученные по 6 и 8 уровням сечения интегрального профиля линии $H\gamma$, приведены соответственно в табл. 3 и 4. Кривая лучевых скоростей, полученная по 6 сечениям интегрального профиля линии $H\gamma$, приведена на рис. 5.

Видно, что результат зависит от метода определения центра тяжести интегрального профиля линии поглощения $H\gamma$, хотя массы рентгеновского

пульсара и оптической звезды в пределах ошибок согласуются между собой.

В случае использования 6 сечений модель двойной системы удовлетворяла наблюдательным данным по уровню доверия $\gamma = 95\%$. Величина невязки составляла $\chi_{\text{min}}^2 \simeq 70$ (рис. 6б). В случае использования 8 сечений модель двойной системы отвергалась по уровню значимости $\alpha = 5\%$, величина невязки составляла $\chi_{\text{min}}^2 \simeq 90$ (по этой причине массы компонент в табл. 4 приведены без ошибок).

Таблица 3. Массы релятивистской и оптической компоненты, полученные при определении лучевой скорости по 6 сечениям интегрального профиля $H\gamma$

Наклонение орбиты i	m_x, M_\odot	m_v, M_\odot
80°	0.85 ± 0.15	1.87 ± 0.13
88°	0.81 ± 0.13	1.80 ± 0.11

Таблица 4. Массы релятивистской и оптической компоненты, полученные при определении лучевой скорости по 8 сечениям интегрального профиля $H\gamma$

Наклонение орбиты i	m_x, M_\odot	m_v, M_\odot
80°	0.70	1.75
88°	0.70	1.70

4.3. Интегральный профиль и кривая лучевых скоростей с учетом неЛТР-эффектов

Как уже отмечалось выше, несмотря на огромную величину рентгеновского прогрева ($k_x = 150$), в оптическом спектре системы HZ Her отсутствуют заметные эмиссионные компоненты у абсорбционных линий. Это, по-видимому, связано с влиянием неЛТР-эффектов (см. выше).

Дополнительно в работе нами выполнен расчет интегральных профилей линии поглощения $H\gamma$ и соответствующей им кривой лучевых скоростей в неЛТР-модели (рис. 5). Расчет выполнен с помощью программы NONLTE3 [29] для параметров модели двойной системы $m_x = 0.81 M_\odot$, $m_v = 1.80 M_\odot$ и $i = 88^\circ$ (остальные параметры содержатся в табл. 1). Ширина аппаратной функции полагалась равной $\text{FWHM} = 1.7 \text{ \AA}$. К сожалению, расчеты на основе алгоритма NONLTE3 слишком многозатратны по времени. Поэтому поиск параметров тесных двойных систем на его основе в настоящий момент трудно выполним. В этой части работы остается довольствоваться лишь качественными выводами.

Локальный и интегральный профили линии поглощения $H\gamma$, рассчитанные в неЛТР-приближении, представлены на рис. 2 и 8, соответственно. Полученная на их основе кривая лучевых скоростей представлена на рис. 5.

Из рис. 8 видно, что качественно интегральный профиль линии поглощения $H\gamma$, полученный в неЛТР-модели, близок к интегральному профилю линии $H\gamma$, рассчитанному с помощью алгоритма I — на обоих модельных интегральных профилях линии $H\gamma$ отсутствует эмиссионная компонента. В то же время интегральный профиль линии поглощения $H\gamma$, полученный в рамках ЛТР, в алгоритме II содержит эмиссионную компоненту (рис. 3 и 8).

Также из рис. 5 видно, что форма кривой лучевых скоростей, полученная в рамках неЛТР-модели, качественно наиболее близка к форме кривой лучевых скоростей, вычисленной с помощью алгоритма I. В связи с этим результаты интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей двойной HZ Her/Her X-1, выполненные на основе алгоритма I, можно полагать более достоверными: $m_x = 1.78 M_\odot$, $m_v = 2.5 M_\odot$ при наклонении орбиты $i = 88^\circ$. Хотя еще раз подчеркнем, что модель двойной системы с данными параметрами отвергается на принятом в работе уровне значимости $\alpha = 5\%$.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим достоинства и недостатки использованных в работе алгоритмов расчета кривой лучевых скоростей.

Как отмечено выше, при расчете интегрального профиля оптического спутника с помощью алгоритма I в качестве локальных профилей используются затабулированные Куруцем [27] интегральные профили линий поглощения одиночных звезд. Эти профили линий поглощения не содержат эмиссионной компоненты, и тем самым локальные профили, используемые в алгоритме I, качественно согласуются с локальными профилями линии поглощения $H\gamma$ в неЛТР-приближении. Однако модельный интегральный профиль линии $H\gamma$, полученный с помощью алгоритма I, не воспроизводит характерного возмущения линии поглощения водорода $H\gamma$ на орбитальной фазе $\phi = 0.47$ [10, рис. 1], а оптимальная теоретическая кривая лучевых скоростей заметно расходится как качественно, так и количественно ($\chi_{\min}^2 \simeq 170$ — модель отвергается по уровню значимости $\alpha = 5\%$) с наблюдаемой кривой лучевых скоростей (рис. 5). Принимая во внимание вышесказанное, полученные с помощью алгоритма I оценки масс компонент Her X-1/HZ Her нельзя полагать окончательными.

Рассмотрим результаты интерпретации наблюдательных данных и особенности расчета модельных профилей линии поглощения с помощью алгоритма II.

Локальные профили в ЛТР-приближении с точным учетом эффекта прогрева содержат эмиссионную компоненту (которая отсутствует в наблюдаемых оптических спектрах системы HZ Her), тогда как на локальных профилях линии поглощения $H\gamma$, вычисленных в неЛТР-приближении, эмиссионная компонента отсутствует (рис. 2). Тем не менее теоретический интегральный профиль линии поглощения $H\gamma$, свернутый с искусственно уширенной аппаратной функцией с $\text{FWHM} = 5 \text{ \AA}$ (превышающей реальную ширину аппаратной функции в 3 раза) качественно воспроизводит “возмущение” формы профиля наблюдаемой линии поглощения (ср. рис. 1 в работе [10] и рис. 8 в настоящей работе). Ширина полученного интегрального профиля линии поглощения $H\gamma$ на половине остаточной интенсивности составила $\sim 25 \text{ \AA}$, что затруднило определение центра тяжести линии поглощения. Для определения центра тяжести модельного интегрального профиля линии поглощения $H\gamma$ использовались 6 и 8 его сечений.

Значения масс компонент с использованием 6 и 8 уровней сечения модельного интегрального профиля $H\gamma$ в пределах ошибок согласуются между собой (табл. 3 и 4). Однако данный эксперимент

показал, что количественные оценки масс компонент двойной, полученные с помощью алгоритма II, и достоверность модели двойной зависят от количества сечений интегрального профиля, используемых для нахождения центра тяжести профиля линии поглощения $H\gamma$. Так, в случае использования 8 сечений модельного интегрального профиля линии $H\gamma$, модель отвергалась по выбранному в работе уровню значимости $\alpha = 5\%$, а массы компонент двойной отличались от случая использования 6 сечений интегрального профиля линии $H\gamma$ на $\sim 0.1 M_{\odot}$.

Принимая во внимание вышесказанное, отдать предпочтение какому-либо результату нам не представляется возможным. Поэтому мы считаем результаты, содержащиеся в табл. 2 и 3, равноправными. Как показала настоящая работа, надежная оценка масс компонент двойной системы Her X-1/HZ Her возможна лишь на основе анализа не только кривой лучевых скоростей, но и орбитальной переменности профилей линий поглощения при корректном учете неЛТР-эффектов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной результат работы носит методический характер. Показано, что задача определения лучевой скорости в тесных двойных системах с сильным рентгеновским прогревом оптической звезды требует учета неЛТР-эффектов в формировании линий поглощения в спектре оптической звезды. Для двойных систем типа Her X-1/HZ Her необходимо анализировать не только кривую лучевых скоростей (которая определяется по профилям линий неоднозначно), но и интерпретировать профили линий в разных фазах орбитального периода.

Наши расчеты показали, что в системе Her X-1/HZ Her вследствие очень сильного рентгеновского прогрева линия поглощения $H\gamma$ оптической звезды достаточно асимметрична, в результате чего трудно однозначно определить центр тяжести линии и, как следствие, значение лучевой скорости и значение масс компонент. Так, при определении теоретической лучевой скорости в зависимости от количества сечений профиля линии поглощения значение массы рентгеновского пульсара m_x меняется на $\sim 15\%$ (табл. 3 и 4). Следует подчеркнуть, что методы оценки масс компонент двойной системы Her X-1/HZ Her, представленные в нашей работе, основаны на наиболее современном и физически обоснованном методе анализа, при котором вычисляются локальные профили линий поглощения с учетом внешнего рентгеновского прогрева. Тем не менее, даже такой метод не позволяет однозначно определить массу рентгеновского пульсара в системе Her X-1/HZ Her ввиду огромной величины рентгеновского прогрева в этой уникальной

рентгеновской двойной системе. Анализируя кривую лучевых скоростей двумя способами, мы получили два значения массы рентгеновского пульсара $m_x = 0.85 \pm 0.15 M_{\odot}$ и $m_x = 1.8 M_{\odot}$. Таким образом, на данный момент масса рентгеновского пульсара в системе Her X-1 определяется с точностью до фактора ~ 2 , что вызвано неопределенностью реальной модели формирования профилей линий в спектре прогреваемой оптической звезды.

Наши результаты продемонстрировали необходимость использования спектрограмм высокого разрешения ($\lambda/\Delta\lambda \simeq 50\,000$) и учета неЛТР-эффектов для оценки массы компактного объекта. Корректная и надежная оценка масс компонент может быть получена лишь при анализе орбитальной переменности профилей линий поглощения в спектре оптического спутника в неЛТР-приближении.

Выражаем благодарность И.И. Антохину за полезные обсуждения. Также выражаем благодарность за финансовую поддержку работы грантами Российского фонда фундаментальных исследований 05-02-17489 и 05-02-17744, грантом Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ ИШ-5218.2006.2, грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук МК-2059.2007.2 и грантом аналитической ведомственной целевой программы "Развитие научного потенциала высшей школы" РНП-2.1.1.5940.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Tananbaum, H. Gursky, and E. M. Kellog, *Astrophys. J.* **174**, 143 (1972).
2. Н. Е. Курочкин, *Переменные звезды* **18**, 425 (1972).
3. A. M. Cherepashchuk, Yu. N. Efremov, N. E. Kurochkin, *et al.*, *Intern. Bull. Var. Stars* No. 720 (1972).
4. W. Forman, C. A. Jones, and W. Liller, *Astrophys. J.* **177**, 103 (1972).
5. J. N. Bahcall and N. A. Bahcall, *Astrophys. J.* **178**, 1 (1972).
6. F. H. Cheng, S. D. Vrtilek, and J. C. Raymond, *Astrophys. J.* **452**, 825 (1995).
7. T. A. Prince, L. Bildsten, and D. Chakrabarty, in: *The Evolution of X-ray Binaries*, eds S. S. Holt, C. S. Day (New York: AIP Press, 1994), p. 235.
8. S. Schandl, *Astron. and Astrophys.* **307**, 95 (1996).
9. J. E. Deeter, P. E. Boynton, and S. H. Pravdo, *Astrophys. J.* **247**, 1003 (1981).
10. A. P. Reynolds, H. Quaintrell, M. D. Still, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **288**, 43 (1997).
11. J. Middleditch and J. E. Nelson, *Astrophys. J.* **208**, 567 (1976).
12. D. C. Koo and R. C. Kron, *Publ. Astron. Soc. Pacif.* **89**, 285 (1977).
13. J. B. Hutchings, E. M. Gibson, D. Crampton, and W. A. Fisher, *Astrophys. J.* **292**, 670 (1985).

14. S. F. Anderson, S. Wachter, B. Margon, *et al.*, *Astrophys. J.* **436**, 319 (1994).
15. R. E. Wilson and S. Sofia, *Asrophys. J.* **203**, 182 (1976).
16. M. Milgrom, *Astron. and Astrophys.* **54**, 725 (1977).
17. M. Milgrom, *Astrophys. J.* **206**, 869 (1976).
18. M. Milgrom and E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **196**, 853 (1975).
19. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Изв. РАН. Сер. физ.* **67**, №3, 293 (2003).
20. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **82**, 131 (2005).
21. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **81**, 108 (2004).
22. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **81**, 606 (2004).
23. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **82**, 900 (2005).
24. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **83**, 609 (2006).
25. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **71**, 420 (1994).
26. Э. А. Антохина, *Астрон. журн.* **73**, 532 (1996).
27. R. L. Kurucz, *Kurucz CD-Roms* (Cambridge, MA, USA: Smithsonian Astrophys. Observ., 1993).
28. Д. В. Иванова, Н. А. Сахибуллин, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **79**, 433 (2002).
29. Н. А. Сахибуллин, *Тр. Казанск. городск. астрон. обсерв.* **48**, 9 (1983).
30. L. H. Auer and J. Heasley, *Astrophys. J.* **205**, 165 (1971).
31. R. L. Kurucz, *Kurucz CD-Roms* (Cambridge, MA, USA: Smithsonian Astrophys. Observ., 1994).
32. Н. А. Сахибуллин, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **73**, 73 (1996).
33. T. Oosterbroek, A. N. Parmar, D. D. E. Martin, and U. Lammers, *Astron. and Astrophys.* **327**, 215 (1997).
34. А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **70**, 1157 (1993).

The Mass of the Compact Object in The X-Ray Binary Her X-1/Hz Her

M. K. Abubekеров, E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, and V. V. Shimanskii

We have obtained the first estimates of the masses of the components of the Her X-1/Hz Her X-ray binary system taking into account non-LTE effects in the formation of the $H\gamma$ absorption line: $m_x = 1.8 M_\odot$ and $m_v = 2.5 M_\odot$. These mass estimates were made in a Roche model based on the observed radial-velocity curve of the optical star, Hz Her. The masses for the X-ray pulsar and optical star obtained for an LTE model lie are $m_x = 0.85 \pm 0.15 M_\odot$ and $m_v = 1.87 \pm 0.13 M_\odot$. These mass estimates for the components of Her X-1/Hz Her derived from the radial-velocity curve should be considered tentative. Further mass estimates from high-precision observations of the orbital variability of the absorption profiles in a non-LTE model for the atmosphere of the optical component should be made.