

УДК 524.387-735

## МАССА КОМПАКТНОГО ОБЪЕКТА В МАЛОМАССИВНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ 2S 0921–630

© 2006 г. М. К. Абубекеров<sup>1</sup>, Э. А. Антохина<sup>1</sup>, А. М. Черепашук<sup>1</sup>, В. В. Шиманский<sup>2</sup><sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия<sup>2</sup>Казанский государственный университет, Казань, Россия

Поступила в редакцию 15.10.2005 г.; принята в печать 06.02.2006 г.

В модели Роша выполнена интерпретация наблюдаемой кривой лучевых скоростей оптической звезды маломассивной рентгеновской двойной системы 2S 0921–630. Интерпретация кривой лучевых скоростей проведена с учетом рентгеновского прогрева оптической звезды и экранирования рентгеновского излучения релятивистского объекта аккреционным диском. Исследовано влияние возможной анизотропии рентгеновского излучения. Получены зависимости между массой оптического спутника  $m_v$  и массой компактного объекта  $m_x$  для наклонений орбиты  $i = 60^\circ, 75^\circ$  и  $90^\circ$ . Учет рентгеновского прогрева позволил уменьшить массу компактного объекта на  $\sim 0.5\text{--}1 M_\odot$  по сравнению со случаем без прогрева. Исходя из спектрального класса оптического спутника K0III (вероятная масса спутника  $m_v \simeq 2.9 M_\odot$ ) сделан вывод, что масса компактного объекта заключена в пределах  $m_x \simeq 2.45\text{--}2.55 M_\odot$  (при наклонении орбиты  $i = 75^\circ\text{--}90^\circ$ ). Если K0III-звезда в результате обмена потеряла значительную часть массы, подобно системам V404 Cyg и GRS 1905+105, и ее масса составляет  $m_v \simeq 0.65\text{--}0.75 M_\odot$ , то масса компактного объекта близка к стандартному значению массы нейтронной звезды  $m_x \simeq 1.4 M_\odot$  (при наклонении орбиты  $i = 75^\circ\text{--}90^\circ$ ). Это делает вероятной гипотезу о том, что рентгеновский источник в двойной системе 2S 0921–630 — аккрецирующая нейтронная звезда.

PACS numbers : 97.80.J

### 1. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день известны оценки масс  $\sim 30$  нейтронных звезд. Из них прецизионной точностью обладают значения масс радиопульсаров в двойных системах Халса–Тейлора [1] и двойного радиопульсара J0737–3039 [2]. Согласно этим оценкам масса нейтронных звезд лежит в достаточно узком интервале  $1.25\text{--}1.44 M_\odot$ . Тем не менее, накоплен ряд теоретических предположений существования массивных нейтронных звезд с  $m_{NS} \simeq 2\text{--}3 M_\odot$ .

Во-первых, согласно теоретическим расчетам ожидаемые массы нейтронных звезд, образовавшихся при коллапсе ядер массивных звезд, могут лежать в интервале  $1.0\text{--}1.8 M_\odot$  [3–5].

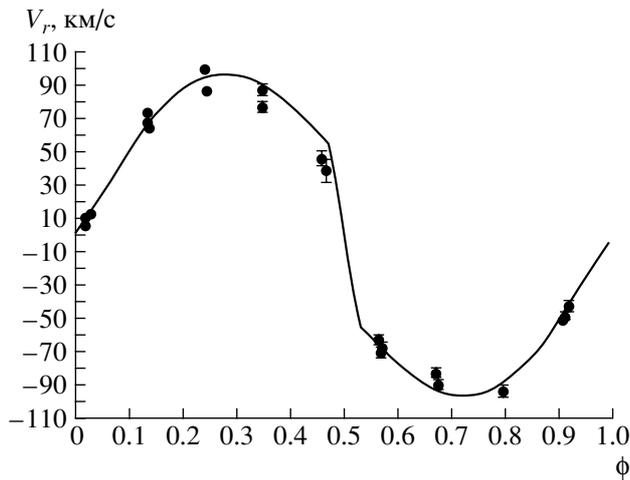
Во-вторых, существует целый ряд жестких уравнений состояния нейтронной материи, в которых масса Опенгеймера–Волкова превышает  $1.8 M_\odot$  [6]. Особое внимание следует обратить на появившийся в последнее время цикл работ по так называемым скайрмионным звездам. В 1999 г. Оуед и Батлер [7] рассмотрели уравнение состояния на основе модели Скайрма [8]. Характерной особенностью моделей нейтронных звезд на основе

уравнения Скайрма является большая предельная масса:  $2.95 M_\odot$  для невращающейся конфигурации и  $3.45 M_\odot$  для вращающейся [9, 10].

В-третьих, расчеты эволюции массы нейтронных звезд в двойных системах на “Машине сценариев” [11] показали, что реализуются каналы эволюции двойной системы, в ходе которых нейтронная звезда за счет аккреции способна увеличить свою массу более чем на  $\sim 1 M_\odot$  [12, 13].

В связи с вышесказанным особый интерес представляет компактный объект в маломассивной рентгеновской двойной системе 2S 0921–630 [14]. Двойная рентгеновская система состоит из компактного объекта и маломассивной оптической звезды (V395 Car) [15] спектрального класса K0III [16]. Орбитальный период двойной составляет  $P_{orb} = 9.006^d \pm 0.007^d$  [17]. Природа компактного объекта не известна — в двойной не наблюдается феномен рентгеновского пульсара и рентгеновского барстера 1 типа. В системе наблюдаются частные оптические и рентгеновские затмения, что говорит о высоком значении наклонения орбиты:  $i \simeq 70^\circ\text{--}90^\circ$  [16, 18].

Согласно результатам работы Шабаза и др. [16], масса компактного объекта, в предположении на-



**Рис. 1.** Наблюдаемая кривая лучевых скоростей оптического спутника двойной рентгеновской системы 2S 0921–630 из работы [17] и теоретическая кривая лучевых скоростей в модели Роша при массе компактного объекта  $m_x = 2.35 M_\odot$ , массе оптической звезды  $m_v = 2.4 M_\odot$ , коэффициенте рентгеновского прогрева оптической звезды  $k_x = 10$  и наклонении орбиты  $i = 75^\circ$  (остальные параметры двойной системы приведены в табл. 1). Теоретическая кривая лучевых скоростей соответствует минимуму невязки ( $\chi_{min}^2 = 149.8$ ).

клонения орбиты  $i = 70^\circ - 90^\circ$ , заключена в пределах  $2.0 - 4.3 M_\odot$ . Отношение масс компонентов, полученное по вращательному уширению линий, составляет  $q = m_x/m_v = 1.12 \pm 0.18$  [16].

В работе [17] выполнена интерпретация высокоточной кривой лучевых скоростей. В предположении наклонения орбиты  $i = 60^\circ - 90^\circ$  масса компактного объекта составила  $1.90 \pm 0.25 M_\odot < m_x < 2.9 \pm 0.4 M_\odot$  [17]. Из-за сильного рентгеновского прогрева для оценки отношения масс компонентов  $q = m_x/m_v$  авторы работы [17] прибегли к так называемой К-корректировке [19] полуамплитуды кривой лучевых скоростей. С учетом К-корректировки значение отношения масс компонентов получилось равным  $q = m_x/m_v = 0.75 \pm 0.37$  [17].

В связи с наличием сильного прогрева атмосферы оптической звезды рентгеновским излучением ( $k_x = L_x/L_v \simeq 10$ ) интерпретация наблюдаемой кривой лучевых скоростей в системе 2S 0921–630 усложняется. Используемая для анализа наблюдаемой кривой лучевых скоростей модель двойной системы должна учитывать круг физических явлений, связанных с высокой рентгеновской светимостью компактного объекта.

Принимая во внимание важность надежной оценки массы компактного объекта в двойной системе 2S 0921–630, мы проанализировали высокоточные наблюдательные данные работы [17] в

модели Роша [20, 21] с учетом эффекта рентгеновского прогрева оптической звезды и экранирования рентгеновского излучения аккреционным диском, а также возможной анизотропии рентгеновского излучения от аккреционного диска вокруг черной дыры.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В качестве наблюдательных данных нами использовались спектральные данные из работы [17]. Кратко опишем их. Спектральные данные работы [17] были получены с декабря 2003 г. по март 2004 г. на телескопе VLT (Very Large Telescope). Всего получено 44 спектра с экспозицией 1300 с. Размер щели спектрографа составлял  $0.4''$ , что позволило получить спектрограммы с высоким разрешением —  $0.75 \text{ \AA}/\text{пикс}$ . Точность калибровки шкалы длин волн составила  $0.03 \text{ \AA}$ .

Спектральные данные получены на двух решетках 1200R+93 и 1028z+29, охватывавших спектральные диапазоны  $5920 - 6520 \text{ \AA}$  и  $8360 - 8900 \text{ \AA}$  соответственно. Выполненный авторами работы [17] анализ спектрограмм оптической звезды системы 2S 0921–630 подтвердил ее спектральный класс K0III. Лучевая скорость определена методом кросс-корреляции спектров, полученных на дифракционной решетке 1200R+93, относительно спектров звезды-стандарта. В качестве звезд-стандартов использовались звезды спектрального класса от G5 до K7, спектры которых получены на телескопе Keck с тем же разрешением.

При построении кривой лучевых скоростей за нулевую фазу принят момент середины затмения рентгеновского компонента оптическим. На основе высокоточной кривой лучевых скоростей авторами работы [17] уточнен орбитальный период двойной системы. Значение орбитального периода относительно нулевой эфемериды  $JD_0 = 2453000.49$  составило  $P_{orb} = 9.006^d \pm 0.007^d$ . Пространственная скорость системы составляет  $\gamma = 44.4 \pm 2.4 \text{ км/с}$ . Полуамплитуда наблюдаемой кривой лучевых скоростей, полученная на основе звезды-стандарта лучевых скоростей (HD 124106) спектрального класса K1V, составляет  $K_v = 99.1 \pm 3.1 \text{ км/с}$ . Наблюдаемая кривая лучевых скоростей относительно  $\gamma$ -скорости представлена на рис. 1.

## 3. АНАЛИЗ КРИВЫХ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

В тесной двойной системе 2S 0921–630 оптическая звезда заполняет полость Роша, поверхность звезды приливно-вращательно деформирована, обращенная к релятивистскому компоненту

**Таблица 1.** Численные значения параметров, используемых при моделировании кривых лучевых скоростей оптического компонента в модели Роша

$P$ , сут	9.006	Орбитальный период
$m_v$ , $M_\odot$	<i>var</i> *	Масса оптической звезды
$e$	0.0	Эксцентриситет
$i$ , град	60, 75, 90	Наклонение орбиты
$\mu$	1.0	Коэффициент заполнения полости Роша оптическим компонентом
$f$	1.0	Коэффициент асинхронности вращения оптического компонента
$T_{\text{eff}}$ , К	4700	Эффективная температура оптического компонента
$\beta$	0.08	Коэффициент гравитационного потемнения
$k_x$	<i>var</i> *	Отношение рентгеновской светимости релятивистского компонента к болометрической светимости оптического компонента $L_x/L_v$
$A$	1.0	Коэффициент переработки рентгеновского излучения
$u$	0.3	Коэффициент потемнения к краю
$\alpha_p$	1.2	Фотонный индекс рентгеновского спектра

\* Эти параметры рентгеновской двойной системы менялись в ходе модельных расчетов.

сторона прогрета исходящим от него рентгеновским излучением. Эти эффекты взаимодействия компонентов должны быть приняты во внимание при анализе наблюдаемой кривой лучевых скоростей оптического спутника. Интерпретация наблюдаемой кривой лучевых скоростей была выполнена в модели Роша с учетом прогрева оптической звезды рентгеновским излучением релятивистского спутника. Алгоритм подробно описан в работах Антохиной и др. [20–23]. Кратко напомним основы этого метода.

Двойная система состоит из оптической звезды в модели Роша и точечного рентгеновского источника. Поверхность оптической звезды разбивается на несколько тысяч элементарных площадок (в нашем случае  $\sim 2600$ ), для каждой из которых вычисляется выходящее локальное излучение в ЛТР-приближении с учетом падающего рентгеновского потока. Элементарной площадке соответствуют локальная температура  $T_{loc}$ , локальное ускорение силы тяжести  $g_{loc}$  и 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 путем решения уравнений переноса излучения в линии при наличии падающего внешнего рентгеновского излучения вычислялась модель атмосферы, интенсивность выходящего излучения в линии и континууме. Синтез кривой лучевых скоростей выполнен по линии поглощения CaI 6439.075 Å (именуемой далее в работе как CaI 6439 Å). Для данной фазы

орбитального периода вклады площадок в полное излучение суммируются с учетом эффекта Доплера и условий видимости площадок для наблюдателя. Таким образом, вычисляется интегральный поток излучения от звезды в направлении наблюдателя в континууме и уширенный вращением профиль спектральной линии, по которому определяется лучевая скорость звезды. Лучевая скорость звезды в данной орбитальной фазе определяется по средней длине волны на уровне остаточных интенсивностей 1/3, 1/2 и 2/3 интегрального профиля линии поглощения.

В работе выполнен анализ наблюдательных данных как без учета, так и с учетом влияния аппаратной функции на модельный интегральный профиль линии поглощения CaI 6439 Å. Полная ширина аппаратной функции на половине интенсивности принята равной  $FWHM = 0.5$  Å. Поскольку результаты оказались почти тождественны, то мы в работе приводим лишь результаты, полученные с учетом влияния аппаратной функции на интегральный профиль линии поглощения CaI 6439 Å.

Как отмечено выше, в двойной системе наблюдается значительный рентгеновский прогрев атмосферы оптической звезды. В связи с этим спектр рентгеновского излучения должен быть учтен наиболее корректным образом. Форма рентгеновского спектра двойной системы 2S 0921–63 известна [24]. Опираясь на наблюдательные данные обсерваторий XMM и Chandra [24], мы задали

**Таблица 2.** Зависимость массы релятивистского компонента от массы оптического, полученная в модели Роша с учетом изотропного прогрева оптического спутника рентгеновским излучением при  $k_x = 10$  для углов наклона орбиты  $i = 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$  (без учета экранирования рентгеновского излучения аккреционным диском)

$m_v, M_\odot$	$m_x, M_\odot$		
	$i = 60^\circ$	$i = 75^\circ$	$i = 90^\circ$
1.0	2.00	1.70	1.55
1.9	2.55	2.15	2.00
2.4	2.80	2.35	2.25
2.9	3.00	2.55	2.45

величину фотонного индекса степенного спектра  $\alpha_p = 1.2$  в интервале 0.1–12 кэВ.

По данным наблюдений ХММ и Chandra собственная рентгеновская светимость компактного объекта  $L_x \sim 10^{36}$  эрг/с [24]. Светимость оптической звезды, заполняющей свою полость Роша, в предположении средней эффективной температуры  $T_{eff} = 4700$  К составляет  $L_v \simeq 2 \times 10^{35}$  эрг/с. Принимая во внимание некоторую неопределенность оценки расстояния до системы и рентгеновской светимости компактного объекта  $L_x$ , можно положить  $k_x = L_x/L_v \simeq 10$ . Мы провели интерпретацию наблюдаемой кривой лучевых скоростей при значениях коэффициента прогрева атмосферы оптического спутника  $k_x = 0$  и  $k_x = 10$ .

Интерпретация наблюдаемой кривой лучевых скоростей проведена в трех разных моделях: без учета и с учетом экранирования рентгеновского излучения аккреционным диском, а также с учетом анизотропии рентгеновского излучения от аккреционного диска вращающейся черной дыры. Численные значения параметров модели Роша рентгеновской двойной 2S 0921–630 представлены в табл. 1.

*Модель 1. Анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей без учета экранирования рентгеновского потока аккреционным диском*

Поскольку масса оптической звезды точно не известна, то за искомые параметры были приняты массы обоих компонентов двойной системы. Обратная задача в такой формулировке достаточно громоздка. Поэтому мы использовали метод перебора по параметрам и многократного решения прямой задачи. Для каждого значения массы оптического компонента  $m_v$  из дискретного набора значений 1.0, 1.9, 2.4, 2.9  $M_\odot$  при фиксированном значении параметра  $i$  производился перебор по

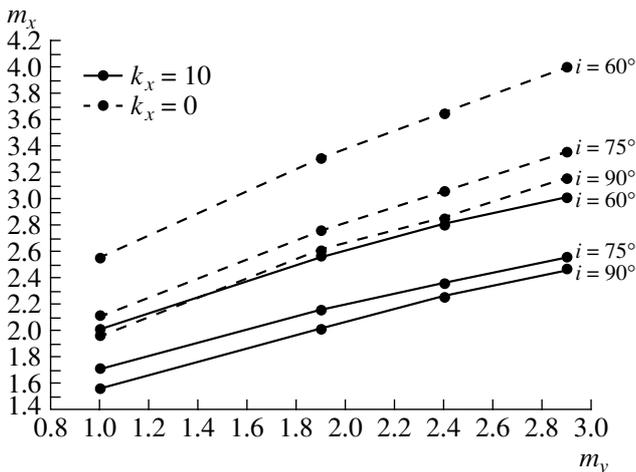
**Таблица 3.** Зависимость массы релятивистского компонента от массы оптического, полученная в модели Роша без учета прогрева оптического спутника ( $k_x = 0$ ) для углов наклона орбиты  $i = 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$

$m_v, M_\odot$	$m_x, M_\odot$		
	$i = 60^\circ$	$i = 75^\circ$	$i = 90^\circ$
1.0	2.55	2.10	1.95
1.9	3.30	2.75	2.60
2.4	3.65	3.05	2.85
2.9	4.00	3.35	3.15

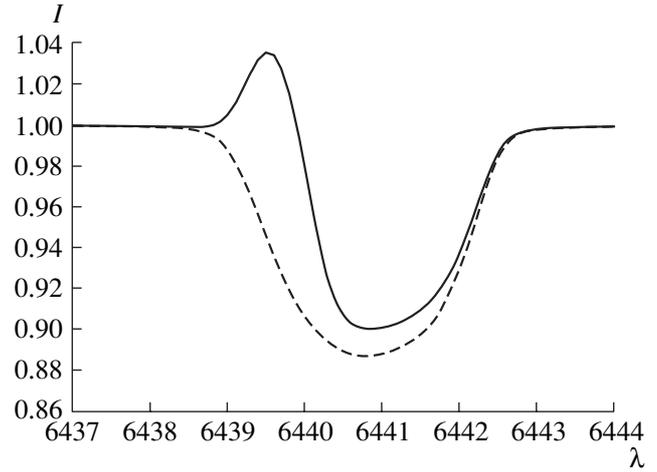
массе компактного объекта  $m_x$ . Проверка адекватности модели наблюдательным данным выполнена по статистическому критерию  $\chi^2$ . Для работы был выбран уровень значимости  $\alpha = 1$  и 5% (подробности см. в работе [25]).

Для количественной оценки влияния эффекта рентгеновского прогрева на оценку массы компактного объекта  $m_x$  интерпретация наблюдаемой кривой лучевых скоростей выполнена как с учетом, так и без учета рентгеновского прогрева, а также с учетом возможной анизотропии рентгеновского излучения от внутренних частей аккреционного диска вокруг черной дыры. В случае учета рентгеновского прогрева величина  $k_x = 10$ . Интерпретация выполнена в предположении наклона орбиты двойной системы  $i = 60^\circ, 75^\circ$  и  $90^\circ$ . Результатом нашего анализа являются зависимости между массой оптической звезды  $m_v$  и массой компактного объекта  $m_x$ . Численно результаты приведены в табл. 2 и 3, а графически представлены на рис. 2.

В табл. 2 и 3 приведены значения  $m_x$ , соответствующие минимуму невязки  $\chi^2$  между теоретической и наблюдаемой кривой лучевых скоростей. Значения массы компактного объекта в табл. 2 и 3 приведены без указания величины ошибки значения параметра  $m_x$ , поскольку модели двойной системы в обоих случаях отвергались по выбранным уровням значимости  $\alpha = 1$  и 5%. Значения квантилей выбранных уровней значимости соответственно равны  $\Delta_{1\%} = 38.93$ ,  $\Delta_{5\%} = 32.67$ . В случае учета рентгеновского прогрева оптической звезды ( $k_x = 10$ ) минимальное значение невязки составляет  $\chi_{min}^2 \simeq 120$ –150. В случае анализа наблюдаемой кривой лучевых скоростей без учета рентгеновского прогрева ( $k_x = 0$ ) минимальное значение невязки больше:  $\chi_{min}^2 \simeq 350$ –380. Неадекватность моделей двойной системы наблюдательным данным связана со значительной дисперсией точек на наблюдаемой кривой лучевых скоростей при относительно небольшой погрешности лучевых скоростей в каждой точке (см. далее рис. 4). Как отме-



**Рис. 2.** Зависимости между массой оптической звезды и массой релятивистского спутника в двойной системе 2S 0921–63, полученная путем интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей в модели Роша при величине рентгеновского прогрева оптической звезды  $k_x = 10$  (сплошные линии) и без учета влияния рентгеновского прогрева на атмосферу оптического спутника  $k_x = 0$  (штриховые линии). Случай изотропного рентгеновского прогрева.



**Рис. 3.** Модельные интегральные профили линии поглощения CaI 6439 Å оптического спутника двойной рентгеновской системы 2S 0921–630 в орбитальной фазе 0.25. Профили получены в модели Роша при  $m_x = 2.35 M_\odot, m_v = 2.4 M_\odot, i = 75^\circ$ . Штриховой линией показан профиль линии поглощения, полученный в модели Роша без учета эффекта “отражения”. Сплошная линия — профиль линии поглощения при величине рентгеновского прогрева оптической звезды  $k_x = 10$ . Оба модельных интегральных профиля свернуты с аппаратной функцией спектрографа с величиной FWHM = 0.5 Å.

чалось в работе [17], значительная дисперсия точек на кривой лучевых скоростей двойной системы 2S 0921–630 связана, по-видимому, с переменным рентгеновским прогревом звезды.

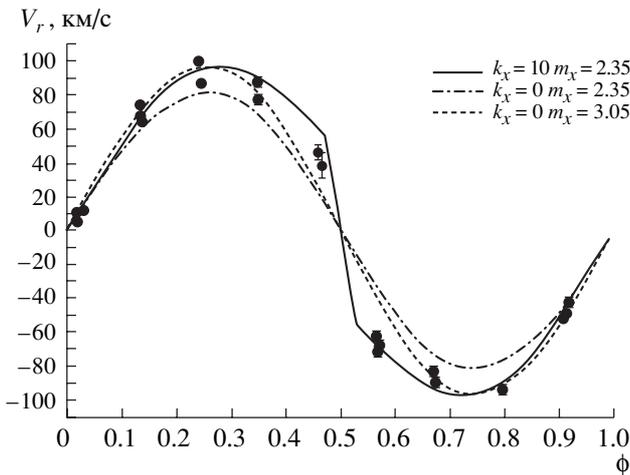
Сравним результаты интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей, полученные в модели Роша с учетом эффекта рентгеновского прогрева (табл. 2) с результатами, полученными без учета рентгеновского прогрева (табл. 3). В случае рентгеновского прогрева с  $k_x = 10$  при наклонении орбиты  $i = 60^\circ - 90^\circ$  и массе оптического спутника  $m_v = 1.0 - 2.9 M_\odot$  масса релятивистского объекта лежит в пределах  $m_x = 1.55 - 3.0 M_\odot$ ; без учета рентгеновского прогрева ( $k_x = 0$ ) масса компактного объекта заключена в диапазоне  $m_x = 1.95 - 4.0 M_\odot$ . Таким образом, интерпретация наблюдательных данных, выполненная без учета рентгеновского прогрева атмосферы оптической звезды, ведет к систематическому завышению массы компактного объекта на  $0.5 - 1.0 M_\odot$ .

Рассмотрим подробно, с чем связано систематическое завышение массы релятивистского объекта  $m_x$  в модели, не учитывающей эффект рентгеновского прогрева. На рис. 3 приведены модельные интегральные профили линии поглощения CaI 6439 Å в орбитальной фазе  $\phi = 0.25$ , полученные при массе оптической звезды  $m_v = 2.4 M_\odot$ , массе компактного объекта  $m_x = 2.35 M_\odot$ , наклонении орбиты  $i = 75^\circ$  с учетом рентгеновского

прогрева (сплошная линия) и без учета прогрева (штриховая линия).

В случае учета рентгеновского прогрева в интегральном профиле линии поглощения появляется эмиссионный компонент (рис. 3). За счет появления эмиссионной составляющей “центр тяжести” линии поглощения смещается. Так, на рис. 3 в случае учета рентгеновского прогрева “центр тяжести” линии приходится на длину волны 6441.131 Å, что соответствует лучевой скорости 95.44 км/с. В случае отсутствия рентгеновского прогрева “центр тяжести” линии приходится на длину волны 6440.818 Å, что соответствует лучевой скорости 81.57 км/с. Таким образом, вследствие деформации формы профиля линии поглощения эмиссионным компонентом, наблюдаемую амплитуду кривой лучевых скоростей оптического спутника можно объяснить меньшей массой компактного объекта. Поэтому корректный учет рентгеновского прогрева в двойной системе 2S 0921–63 снижает массу компактного объекта с  $m_x = 1.95 - 4.0 M_\odot$  до  $m_x = 1.55 - 3.0 M_\odot$ .

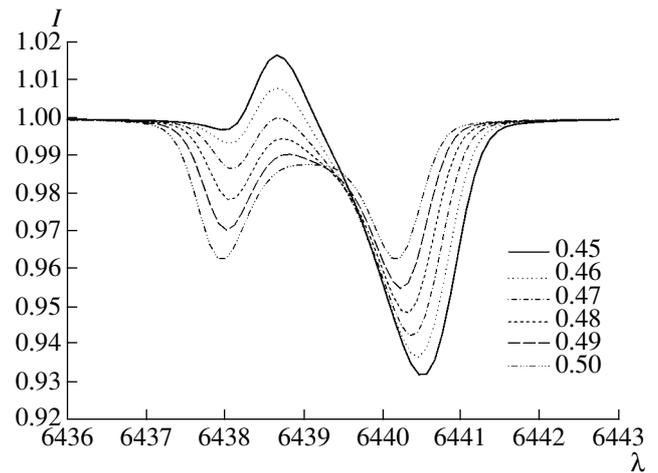
На рис. 4 вышесказанное поясняется модельными кривыми лучевых скоростей. В случае рентгеновского прогрева с  $k_x = 10$  при массе оптической звезды  $m_v = 2.4 M_\odot$  и наклонении орбиты



**Рис. 4.** Наблюдаемая кривая лучевых скоростей из работы [17] и теоретические кривые лучевых скоростей, полученные в модели Роша при наклонении орбиты  $i = 75^\circ$ . Сплошная линия — оптимальная кривая лучевых скоростей при величине рентгеновского прогрева  $k_x = 10$  и при  $m_v = 2.4 M_\odot$  и  $m_x = 2.35 M_\odot$ . Штрихпунктирная линия — кривая лучевых скоростей, полученная в модели Роша без учета рентгеновского прогрева ( $k_x = 0$ ) при  $m_v = 2.4 M_\odot$  и  $m_x = 2.35 M_\odot$ . Штриховая линия — оптимальная кривая лучевых скоростей, полученная в модели Роша без учета рентгеновского прогрева ( $k_x = 0$ ) при  $m_v = 2.4 M_\odot$  и  $m_x = 3.05 M_\odot$ . Остальные параметры двойной системы приведены в табл. 1.

$i = 75^\circ$  минимуму невязки ( $\chi_{min}^2 = 149.8$ ) соответствует масса компактного объекта  $m_x = 2.35 M_\odot$ . На рис. 4 соответствующая кривая лучевых скоростей представлена сплошной линией. Значение полуамплитуды кривой лучевых скоростей оптического спутника составляет  $K_v = 96.81$  км/с. Кривая лучевых скоростей оптической звезды при этих же параметрах двойной системы без учета рентгеновского прогрева имеет полуамплитуду  $K_v = 81.27$  км/с (штрихпунктирная линия на рис. 4). При анализе наблюдаемой кривой лучевых скоростей без учета рентгеновского прогрева при  $m_v = 2.4 M_\odot$  и  $i = 75^\circ$  минимуму невязки ( $\chi_{min}^2 = 356.7$ ) соответствует более значительная масса компактного объекта  $m_x = 3.05 M_\odot$ . Соответствующая кривая лучевых скоростей приведена на рис. 4 штриховой линией.

Рассмотрим дополнительно вопрос о форме линий поглощения оптической звезды при большом рентгеновском прогреве. Очевидно, что оценка массы компактного объекта в двойной системе напрямую зависит от точности определения “центра тяжести” линии поглощения в спектре оптической звезды. При исследовании формы модельных интегральных профилей линии погло-



**Рис. 5.** Модельные интегральные профили линии поглощения CaI 6439 Å, полученные в модели Роша при величине рентгеновского прогрева оптического спутника  $k_x = 10$  и при  $m_v = 2.4 M_\odot$ ,  $m_x = 2.35 M_\odot$ ,  $i = 75^\circ$ . Остальные параметры двойной системы приведены в табл. 1. Орбитальные фазы указаны на графике рисунке.

щения CaI 6439 Å мы столкнулись с проблемой определения “центра тяжести” линии.

Так, в двойной системе с массой оптической звезды  $m_v = 2.4 M_\odot$ , массой релятивистского спутника  $m_v = 2.35 M_\odot$  и наклонением орбиты  $i = 75^\circ$  на фазах 0.47–0.50 “центр тяжести” линии определяется неоднозначно. На рис. 5 представлены интегральные профили линии поглощения CaI 6439 Å в орбитальных фазах 0.45–0.50. Видно, что, начиная с орбитальной фазы 0.47, форма профиля линии поглощения имеет два минимума, что не позволяет корректно определить “центр тяжести” линии поглощения, и, следовательно, лучевую скорость. Поэтому на кривой лучевых скоростей на фазах 0.47 и 0.53 наблюдается излом (рис. 4).

Из-за неоднозначности формы профиля линии поглощения в двойных рентгеновских системах с прогревом оптической звезды при  $k_x \gtrsim 10$  построить удовлетворительную кривую лучевых скоростей весьма затруднительно. В связи с этим оценка массы релятивистских объектов должна производиться не по косвенным данным, какими являются кривые лучевых скоростей, а непосредственно по орбитальной переменности наблюдаемых профилей линии поглощения. Высокое качество необходимого наблюдательного материала способны обеспечить современные 8–10-м телескопы.

**Таблица 4.** Зависимость массы релятивистского компонента от массы оптического, полученная в модели Роша для наклона орбиты  $i = 75^\circ$  с учетом прогрева оптического спутника при  $k_x = 10$  и экранирования рентгеновского излучения аккреционным диском

$m_v, M_\odot$	$m_x, M_\odot$
1.0	1.70
1.9	2.15
2.4	2.40
2.9	2.60

*Модель 2. Анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей с учетом экранирования рентгеновского потока аккреционным диском*

В следующей части работы мы учли экранирование рентгеновского потока аккреционным диском. Полный угол раствора аккреционного диска принят равным  $5^\circ$  [26]. Полагалось, что аккреционный диск лежит в плоскости орбиты двойной системы. Часть элементарных площадок оптической звезды попадает в область теневой полосы рентгеновского излучения релятивистского объекта. Интенсивности линий поглощения для этих площадок вычислялись вышеописанным образом в предположении локального коэффициента прогрева  $k_x^{loc} = 0$ . Анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей проведен для дискретного набора значений масс оптической звезды  $m_v = 1.0, 1.9, 2.4, 2.9 M_\odot$  для наклона орбиты  $i = 75^\circ$ . Результат представлен в табл. 4.

Результаты оказались весьма близки (в случае массы  $m_v = 1.0 M_\odot$  и  $1.9 M_\odot$  тождественны) к результатам, полученным в модели Роша без учета экранирования рентгеновского потока аккреционным диском (табл. 2). Поэтому анализ для наклона орбиты  $i = 60^\circ$  и  $90^\circ$  нами не проводился. Теневая полоса рентгеновского излучения на оптическом компоненте оказалась слишком узкой, чтобы значительно повлиять на результаты.

Аналогично мы выполнили анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей с учетом экранирования рентгеновского потока аккреционным диском для коэффициента прогрева оптической звезды  $k_x = 30$ . Также, как и в предыдущем случае, наклон орбиты  $i$  полагалось равным  $75^\circ$ . Интерпретация выполнена для значений массы оптической звезды  $m_v = 1.0, 1.9, 2.4, 2.9 M_\odot$ . Результаты представлены в табл. 5. Полученные массы приведены без интервала ошибок, поскольку все модели двойной системы отвергались по уровню значимости 1 и 5%. Приведенные значения  $m_x$  соответствуют минимуму невязки  $\chi^2$ .

**Таблица 5.** Зависимость массы релятивистского компонента от массы оптического, полученная в модели Роша с учетом прогрева оптического спутника при  $k_x = 30$  для наклона орбиты  $i = 75^\circ$

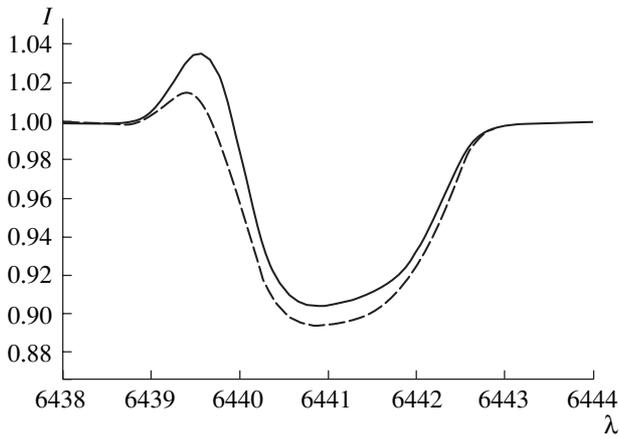
$m_v, M_\odot$	$m_x, M_\odot$	
	С учетом экранирования рентгеновского излучения	Без учета экранирования рентгеновского излучения
1.0	1.65	1.60
1.9	2.08	2.05
2.4	2.30	2.28
2.9	2.50	2.45

Как следует из табл. 5, учет экранирования рентгеновского потока, имеющего величину  $L_x = 30 L_v$ , аккреционным диском слабо отражается на результатах. Максимальное различие массы, полученное в двух разных моделях, составляет  $0.05 M_\odot$  (табл. 5). В случае меньшего коэффициента прогрева эффект экранирования излучения будет еще менее заметен. Поэтому значения масс рентгеновских пульсаров, полученные нами ранее в работе [27] без учета эффекта экранирования рентгеновского потока аккреционным диском, можно считать достоверными.

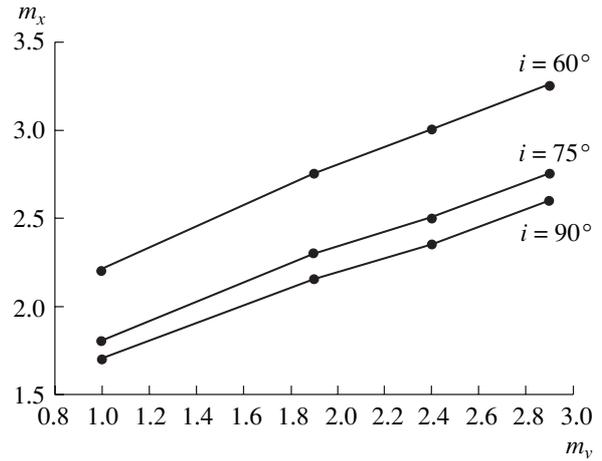
*Модель 3. Анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей в предположении анизотропного рентгеновского излучения аккреционного диска*

Для полноты исследования мы рассмотрели гипотезу присутствия в двойной системе 2S 0921–630 маломассивной черной дыры. В этом случае необходимо принять во внимание эффект анизотропии рентгеновского излучения от аккреционного диска, приводящий к ослаблению рентгеновского излучения в орбитальной плоскости. Отметим, что присутствие сильных эмиссионных компонент у многих линий поглощения в спектре оптического спутника [17] в системе 2S 0921–630 делает гипотезу изотропного рентгеновского источника более предпочтительной. Эмиссионные линии в спектре оптической звезды, указывающие на значительный рентгеновский прогрев оптического спутника, являются еще одним из косвенных указаний на наличие в системе нейтронной звезды.

Аккреционный диск полагался оптически тонким и лежащим в плоскости орбиты двойной системы. Анизотропия рентгеновского излучения ак-



**Рис. 6.** Модельные интегральные профили линии поглощения CaI 6439 Å оптического спутника двойной рентгеновской системы 2S 0921–630 в орбитальной фазе 0.25. Профили получены в модели Роша при  $m_x = 2.35 M_\odot$ ,  $m_v = 2.4 M_\odot$ ,  $i = 90^\circ$  и при значении коэффициента рентгеновского прогрева  $k_x = 10$ . Сплошная линия – профиль линии поглощения в предположении изотропии излучения рентгеновского источника. Штриховая линия – профиль линии поглощения в случае анизотропного рентгеновского источника. Оба модельных интегральных профиля свернуты с аппаратной функцией спектрографа с величиной FWHM = 0.5 Å.



**Рис. 7.** Зависимость между массой оптической звезды и массой релятивистского спутника в двойной системе 2S 0921–630, полученная путем интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей в модели Роша при величине рентгеновского прогрева оптической звезды  $k_x = 10$  в предположении анизотропии излучения аккреционного диска. Более подробно см. текст.

креационного диска задавалась выражениями (1) и (2) [28]:

$$\frac{dL}{d\Omega} = \frac{L_x F(\theta)}{4\pi}, \tag{1}$$

$$F(\theta) = \frac{6}{7} \cos \theta (1 + 2 \cos \theta), \tag{2}$$

где  $\theta$  – угол между нормалью к плоскости диска и направлением элементарного телесного угла  $d\Omega$ . Геометрия двойной системы в модели Роша с параметрами, представленными в табл. 1, такова, что

**Таблица 6.** Зависимость массы релятивистского компонента от массы оптического, полученная в модели Роша с учетом прогрева оптического спутника рентгеновским излучением при  $k_x = 10$  в предположении анизотропии излучения рентгеновского диска для углов наклона орбиты  $i = 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$

$m_v, M_\odot$	$m_x, M_\odot$		
	$i = 60^\circ$	$i = 75^\circ$	$i = 90^\circ$
1.0	2.20	1.80	1.70
1.9	2.75	2.30	2.15
2.4	3.00	2.50	2.35
2.9	3.25	2.75	2.60

на оптический спутник падает поток рентгеновского излучения в области значений  $\theta \simeq 70^\circ - 90^\circ$ . Как видно из выражения (2), при таких значениях  $\theta$  рентгеновский поток значительно ослаблен. На рис. 6 представлены модельные интегральные профили линии поглощения CaI 6439 Å в орбитальной фазе 0.25. Видно, что эмиссионная составляющая интегрального профиля линии ослаблена по сравнению со случаем изотропного рентгеновского потока.

Для случая анизотропного рентгеновского излучения аккреционного диска результаты интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей представлены в табл. 6, графически результаты представлены на рис. 7. Поскольку модели двойной системы отвергались по уровню значимости  $\alpha = 1$  и 5%, то центральные значения приведены без ошибок. При массе оптического спутника  $m_v = 1.0 - 2.9 M_\odot$  масса черной дыры заключена в пределах 1.70–3.25  $M_\odot$ . Напомним, что масса компактного объекта в случае изотропного рентгеновского излучения  $k_x = 10$  лежит в пределах  $m_x = 1.55 - 3.0 M_\odot$ . Таким образом, предположение об анизотропии рентгеновского потока аккреционного диска увеличивает массу компактного объекта на  $\sim 0.2 M_\odot$  по сравнению со случаем изотропного рентгеновского излучения.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты анализа высокоточной кривой лучевых скоростей [17] (рис. 1) в предположении наклона орбиты  $i = 60^\circ - 90^\circ$  и массы оптического спутника  $m_v = 1.0 - 2.9 M_\odot$  представлены в

табл. 7. В качестве основного результата работы мы приняли значение массы компактного объекта, полученное в модели 1.

Как упоминалось ранее, в двойной системе наблюдаются рентгеновские затмения, что говорит о высоком значении наклона орбиты:  $i \simeq 70^\circ - 90^\circ$  [16]. Отсутствие рентгеновских дипов позволяет предположить наклонные орбиты  $i > 80^\circ$  [18]. При оценке массы мы предполагали значение наклона орбиты  $i = 75^\circ - 90^\circ$ . В этом случае в предположении массы оптического спутника  $m_v = 1.0 - 2.9 M_\odot$  значение массы компактного объекта составляет  $m_x \simeq 1.55 - 2.55 M_\odot$  (рис. 2). Принимая во внимание спектральный класс оптического спутника K0III ( $m_v \simeq 2.9 M_\odot$  [29]), мы получаем, что масса компактного объекта составляет  $m_x = 2.45 - 2.55 M_\odot$  (рис. 2).

Реальное значение массы оптической звезды  $m_v$  во взаимодействующей двойной системе может отличаться от оценки, производимой по спектральному классу. Так, например, в маломассивных транзитных рентгеновских двойных системах V404 Cyg (спектральный класс оптической звезды K0IV) и GRS 1915+105 (спектральный класс оптической звезды KIII) оценки массы, полученные по вращательному уширению линий поглощения, составляют  $0.7 \pm 0.1 M_\odot$  [30] и  $0.81 \pm 0.53 M_\odot$  [31], соответственно. В то же время, оценки массы оптических спутников на основе их спектрального класса и класса светимости в системе V404 Cyg и GRS 1915+105 равны  $\sim 1.3 M_\odot$  и  $\sim 2.3 - 2.9 M_\odot$ , соответственно [29]. Таким образом, оценка массы оптического спутника, выполненная по спектральному классу, оказывается завышенной почти в  $\sim 2$  раза по сравнению со спектроскопическим значением  $m_v$ . Этот вывод согласуется с современными теоретическими представлениями об эволюции звезд в маломассивных тесных двойных системах. Согласно расчетам, выполненным на “Машине сценариев” [11], оптический спутник с начальной массой  $\sim 3 M_\odot$  на стадии обмена веществом теряет более  $\sim 1 M_\odot$  [12].

Оптические звезды рентгеновских двойных систем V404 Cyg, GRS 1915+105 и 2S 0921-630 близки по спектральному классу и классу светимости [16, 31]. Полагая, что звезда K0III в системе 2S 0921-630 потеряла в результате обмена значительную часть массы, и ее масса составляет, подобно системе GRS 1905+105,  $m_v \simeq 1 M_\odot$ , получаем массу компактного объекта в системе 2S 0921-630 равной  $m_x \simeq 1.6 - 1.7 M_\odot$  (в предположении  $i = 75^\circ - 90^\circ$ ). Это близко к средней массе нейтронной звезды, что делает вероятной гипотезу присутствия в двойной системе 2S 0921-630 аккрецирующей нейтронной звезды.

**Таблица 7.** Масса компактного объекта рентгеновской двойной системы 2S 0921-630 в разных моделях в предположении коэффициента рентгеновского прогрева оптического спутника  $k_x = 10$

Модель*	$m_x, M_\odot$
1	1.55-3.0
2	1.55-3.0
3	1.70-3.25

\* Модель 1 — изотропный источник рентгеновского излучения без учета экранирования рентгеновского потока аккреционным диском; модель 2 — изотропный источник рентгеновского излучения с учетом экранирования рентгеновского потока аккреционным диском; модель 3 — анизотропный источник рентгеновского излучения без учета экранирования рентгеновского потока аккреционным диском.

Для более исчерпывающего анализа наблюдательных данных двойной системе 2S 0921-630 мы рассмотрели гипотезу о близости массы компактного объекта к стандартному значению массы нейтронной звезды  $m_x = 1.4 M_\odot$ . В этом случае масса оптического спутника заключена в диапазоне  $m_v = 0.65 - 0.75 M_\odot$ . Здесь мы положили наклонение орбиты  $i = 75^\circ - 90^\circ$ , ввиду того, что в системе наблюдаются частные рентгеновские затмения [16]. Формально с точки зрения теории звездной эволюции одиночные звезды таких масс не могут превратиться в гиганты за хаббловское время. Наличие релятивистского спутника позволяет в этом случае звезде с начальной массой  $\gtrsim 0.8 M_\odot$  потерять часть своей массы на полуразделенной фазе [32].

Результатом эволюции гиганта с массой  $\sim 0.6 - 0.7 M_\odot$  является гелиевый белый карлик с массой  $\sim 0.3 - 0.4 M_\odot$  [32]. Таким образом, вполне обоснованно можно предположить, что результатом дальнейшей эволюции рентгеновской двойной системы 2S 0921-630 будет миллисекундный радиопульсар в паре с гелиевым белым карликом. Эта гипотеза находится в хорошем количественном согласии с модельными расчетами [32] и эмпирической зависимостью между орбитальным периодом и массой вторичного компонента (белого карлика) двойных систем с миллисекундным радиопульсаром (см. работы [32, рис. 4] и [33, рис. 9]).

Подчеркнем еще раз, что все модели рентгеновской двойной системы отвергаются по выбранным уровням значимости  $\alpha = 1$  и 5%. В табл. 2-7 приведены значения  $m_x$ , соответствующие минимуму невязки  $\chi^2$ . При этом следует иметь ввиду, что поскольку во всех случаях принятая нами модель не является адекватной наблюдательным данным, полученные оценки параметра  $m_x$  нельзя считать окончательными.

Обратим внимание на важность методических результатов нашей работы. Расчеты, выполненные в модели Роша, показали, что форма профиля линии поглощения в случае сильного рентгеновского прогрева достаточно сложна и претерпевает значительные изменения при орбитальном движении (рис. 3, 5). Поэтому оценки параметра  $q$ , полученные на основе вращательного уширения профиля линии поглощения в маломассивных рентгеновских двойных системах с сильным рентгеновским прогревом нельзя считать надежными. В дальнейшем мы планируем исследовать этот вопрос.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принимая во внимание большое значение наклонения орбиты  $i = 75^\circ - 90^\circ$  и полученные в работе зависимости между массами компонентов в системе 2S 0921–630 (рис. 2), можно заключить, что масса компактного объекта находится в пределах  $m_x \simeq 1.55 - 2.55 M_\odot$  при массе оптической звезды  $m_v = 1.0 - 2.9 M_\odot$ . В работе показано, что если учесть возможную потерю массы оптического спутника вплоть до значения  $m_v = 1 M_\odot$ , то в двойной системе 2S 0921–630 наиболее вероятно присутствие аккрецирующей нейтронной звезды с массой  $m_x \simeq 1.6 - 1.7 M_\odot$ . Наблюдаемый рентгеновский спектр [24] компактного объекта 2S 0921–630 может соответствовать как черной дыре, так и нейтронной звезде со слабым магнитным полем. Однозначный вывод в пользу той или иной природы компактного объекта пока сделать трудно.

В работе продемонстрирована необходимость использования спектрограмм высокого разрешения ( $\lambda/\Delta\lambda = 50\,000 - 100\,000$ ) для оценки массы компактного объекта. Корректная оценка массы, а следовательно, и вывод о природе компактного объекта могут быть получены при интерпретации орбитальной переменности профилей линий поглощения в спектре оптического спутника.

Благодарим А.В. Тутукова за ценные замечания. Выражаем благодарность за финансовую поддержку работы Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 05-02-17489), грантом Программы “Ведущие научные школы России” (НШ-388.2003.2) и грантом Президента РФ (МК-2633.2005.2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. E. Thorsett and D. Chakrabarty, *Astrophys. J.* **512**, 288 (1999).
2. A. G. Lyne, M. Burgay, M. Kramer, *et al.*, *Science* **303**, 1153 (2004).
3. S. E. Woosley, A. Heger, and T. A. Weaver, *Rev. Mod. Phys.* **74**, 1015 (2000).
4. F. X. Timmes, S. E. Woosley, and T. A. Weaver, *Astrophys. J.* **457**, 834 (1996).
5. C. L. Fryer and V. Kalogera, *Astrophys. J.* **554**, 548 (2001).
6. P. Haensel, *EAS Publications Series*, eds C. Motch and J.-M. Hameury (2003), Vol. 7, p. 249.
7. R. Ouyed and M. Butler, *Astrophys. J.* **522**, 453 (1999).
8. T. H. R. Skyrme, *Proc. Roy. Soc. London A* **267**, 127 (1962).
9. R. Ouyed, *Astron. and Astrophys.* **382**, 939 (2002).
10. R. Ouyed, *astro-ph/0402122* (2004).
11. V. M. Lipunov, K. A. Postnov, and M. E. Prokhorov, *The Scenario Machine: Binary Star Population Synthesis*, ed. R. A. Sunyaev, *Astrophys. and Space Phys. Rev.* **9** (Harwood Academic Publishers, 1996).
12. А. И. Богомазов, М. К. Абубекеров, В. М. Липунов, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **82**, 331 (2005).
13. S. B. Popov and M. E. Prokhorov, *Astron. and Astrophys.* **434**, 649 (2005).
14. F. K. Li, G. W. Clark, J. G. Jernigan, *et al.*, *Nature* **276**, 799 (1978).
15. G. Branduardi-Raymont, R. H. D. Corbert, K. O. Mason, *et al.*, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **205**, 403 (1983).
16. T. Shahbaz, E. Kuulkers, P. A. Charles, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **344**, 101 (1999).
17. P. G. Jonker, D. Steegh, G. Nelemans, and M. van der Klis, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **356**, 621 (2005).
18. J. Frank, A. R. King, and J.-P. Lasota, *Astron. and Astrophys.* **178**, 137 (1987).
19. R. A. Wade and K. Horne, *Astrophys. J.* **324**, 411 (1988).
20. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **71**, 420 (1994).
21. Э. А. Антохина, *Астрон. журн.* **73**, 532 (1996).
22. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Изв. АН. Сер. физ.* **67** (3), 293 (2003).
23. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **82**, 131 (2005).
24. T. R. Kallman, L. Angelini, B. Boroson, and J. Cottam, *Astrophys. J.* **583**, 861 (2003).
25. А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **70**, 1157 (1993).
26. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.* **24**, 337 (1973).
27. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **81**, 108 (2004).
28. Н. Г. Бочкарев, Р. А. Сюняев, Т. С. Хрузина и др., *Астрон. журн.* **65**, 778 (1988).
29. В. Страйжис, *Звезды с дефицитом металлов* (Вильнюс: Мокслас, 1982).
30. J. Casares and P. A. Charles, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **271**, L5 (1994).
31. E. T. Harlaftis and J. Greiner, *Astron. and Astrophys.* **414**, L13 (2004).
32. А. В. Тутуков, А. В. Федорова, *Астрон. журн.* **80**, 652 (2003).
33. D. R. Lorimer, *astro-ph/0511258* (2005).

## The Mass of the Compact Object in the Low-Mass X-ray Binary 2S 0921–630

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

We interpret the observed radial-velocity curve of the optical star in the low-mass X-ray binary 2S 0921–630 using a Roche model, taking into account the X-ray heating of the optical star and screening of X-rays coming from the relativistic object by the accretion disk. Consequences of possible anisotropy of the X-ray radiation are considered. We obtain relations between the masses of the optical and compact (X-ray) components,  $m_v$  and  $m_x$ , for orbital inclinations  $i = 60^\circ$ ,  $75^\circ$ , and  $90^\circ$ . Including X-ray heating enabled us to reduce the compact object's mass by  $\sim 0.5\text{--}1 M_\odot$  compared to the case with no heating. Based on the K0III spectral type of the optical component (with a probable mass of  $m_v \simeq 2.9 M_\odot$ ), we concluded that  $m_x \simeq 2.45\text{--}2.55 M_\odot$  (for  $i = 75^\circ\text{--}90^\circ$ ). If the K0III star has lost a substantial part of its mass as a result of mass exchange, as in the V404 Cyg and GRS 1905+105 systems, and its mass is  $m_v \simeq 0.65\text{--}0.75 M_\odot$ , the compact object's mass is close to the standard mass of a neutron star,  $m_x \simeq 1.4 M_\odot$  (for  $i = 75^\circ\text{--}90^\circ$ ). Thus, it is probable that the X-ray source in the 2S 0921–630 binary is an accreting neutron star.