

УДК 524.387-735

## МАССА КОМПАКТНОГО ОБЪЕКТА РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ 4U 1700-37

© 2004 г. М. К. Абубекеров

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 17.11.2003 г.; принята в печать 09.01.2004 г.

Изложены результаты статистического подхода к интерпретации сводных кривых лучевых скоростей рентгеновской двойной 4U 1700-37. На основе интерпретации сводной кривой лучевых скоростей в рамках модели Роша получена зависимость массы рентгеновского компонента от массы оптического компонента. С использованием параметров оптической звезды произведена оценка массы компактного объекта тремя способами. Масса компактного объекта на основе информации об ускорении силы тяжести на поверхности оптического спутника получилась по разным наблюдательным данным равной  $2.25_{-0.24}^{+0.23} M_{\odot}$  и  $2.14_{-0.43}^{+0.50} M_{\odot}$ . Масса компактного объекта с учетом информации о радиусе оптического компонента  $21.9 R_{\odot}$  составила  $1.76_{-0.21}^{+0.20} M_{\odot}$  и  $1.65_{-0.56}^{+0.78} M_{\odot}$ . Масса оптического спутника  $27.4 M_{\odot}$ , определенная по зависимости масса–светимость для рентгеновских двойных систем, дает оценку массы компактного объекта  $1.41_{-0.08}^{+0.08} M_{\odot}$  и  $1.35_{-0.18}^{+0.18} M_{\odot}$ .

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновская двойная система 4U 1700-37 открыта с борта спутника “Ухуру”, в декабре 1970 г. [1]. Последующие наблюдения выявили затменный характер излучения рентгеновского источника с периодом 3.412 дней. Система была отождествлена со сверхгигантом HD 153919 спектрального класса O6.5Iaf [2, 3], обладающим изменением блеска с тем же периодом. Система находится на расстоянии 1.8 кпк и представляет собой компактный объект, аккрецирующий вещество, поставляемое оптическим спутником.

Рентгеновское излучение двойной 4U 1700-37 имеет жесткий спектр [4, 5], похожий на спектр аккрецирующих нейтронных звезд. Вместе с этим от компактного объекта не наблюдается регулярных импульсов, связанных с эффектом маяка, возникающего при аккреции вещества на нейтронную звезду. Данное обстоятельство не позволяет построить кривую лучевых скоростей компактного объекта и, следовательно, определить массы компонентов двойной.

В ранней работе [6] решение наблюдаемой кривой лучевых скоростей было произведено методом наименьших квадратов в модели двух точечных масс. В предположении массы оптического компонента  $35 M_{\odot}$  и наклона орбиты  $90^{\circ}$  масса компактного объекта равна  $2.4 M_{\odot}$ .

В исследовании [7] оценка масс компонентов двойной произведена по алгоритму [8] с привлечением информации о длительности затмения и ра-

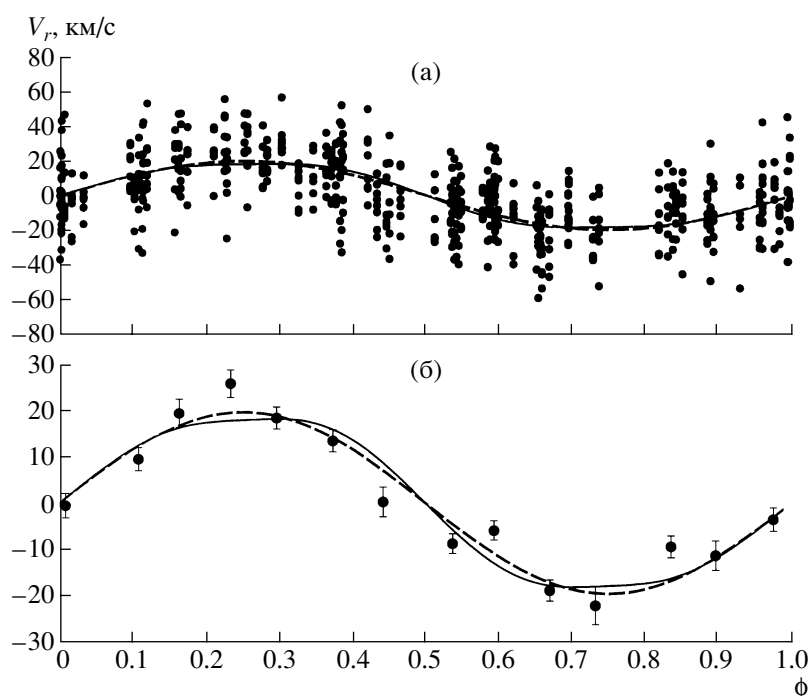
диуса оптического компонента. Исходя из предполагаемой массы оптического компонента  $52 \pm 2 M_{\odot}$  получена масса компактного объекта  $1.8 \pm 0.4 M_{\odot}$ . Предыдущее исследование [9], выполненное тем же методом, дало оценку массы релятивистского компонента  $1.3 M_{\odot}$  при массе оптического компонента  $27 M_{\odot}$ .

Метод Монте-Карло, использовавшийся авторами работы [10], дает оценку массы компактного объекта  $2.6_{-1.4}^{+2.3} M_{\odot}$  при массе оптического компонента  $30_{-7}^{+11} M_{\odot}$ .

Авторы работы [11], также использовавшие метод Монте-Карло, получили массу компактного объекта  $2.44 \pm 0.27 M_{\odot}$  при массе оптического спутника  $58 \pm 11 M_{\odot}$ . Моделирование в данном исследовании выполнено не совсем корректно. Вместо значения полуамплитуды кривой лучевых скоростей оптического компонента  $K_v = 18.7 \pm 1.0$  км/с, соответствующей круговой орбите, авторы приняли значение  $K_v = 20.6 \pm 1.0$  м/с, что привело к некоторому завышению массы компактного объекта.

Из всего сказанного видна неопределенность оценки массы рентгеновского компонента двойной 4U 1700-37. Рассмотрим причины, препятствующие точной оценке массы релятивистского компонента двойной системы.

Во-первых, неопределенность массы релятивистского компонента 4U 1700-37 кроется в неизвестной массе оптического спутника, определяе-



**Рис. 1.** (а) — Сводная кривая наблюдаемых лучевых скоростей рентгеновской ТДС 4U 1700-37. Темными кружками представлены лучевые скорости, полученные на основе линий поглощения водорода, из работы [12]. Для сравнения приведены теоретические кривые лучевых скоростей в модели Роша (сплошная линия) и модели точечных масс (штриховая линия) для массы  $m_x = 2.11M_\odot$ , соответствующей минимуму невязки в модели Роша при  $m_v = 50M_\odot$ , рассчитанной методом 2, т.е. без использования значений средней наблюдаемой лучевой скорости в фазовом интервале 0.4–0.6. Параметры модели Роша приведены в табл. 1. (б) — Лучевые скорости, усредненные внутри фазовых интервалов (темными кружками представлена средняя в фазовом бине лучевая скорость). Для сравнения приведена теоретическая кривая лучевых скоростей в модели Роша (сплошная линия) и модели точечных масс (штриховая линия) для  $m_x = 2.11M_\odot$  и  $m_v = 50M_\odot$ .

мой по спектральному классу и классу светимости с большой погрешностью.

Во-вторых, следует отметить, что применяемый для оценки масс метод Монте-Карло, равно как и методы работ [7, 9], опирались на соотношения, полученные в формализме точечных масс. Модель, аппроксимирующая О-сверхгигант точечным источником электромагнитного излучения, не учитывает широкий круг явлений, связанных с взаимодействием компонентов. Поэтому в ее рамках корректная оценка массы рентгеновского спутника невозможна даже при точно известной массе оптического компонента.

В-третьих, метод Монте-Карло использует значение полуамплитуды кривой лучевых скоростей оптического компонента (известной лишь с точностью  $\sim(5-10)\%$ ) игнорируя информацию, содержащуюся в самой ее форме.

Из вышесказанного видно, что комплекс спектроскопических наблюдательных данных должен быть проинтерпретирован в рамках более адекватной действительности модели. Корректная оценка массы компонентов 4U 1700-37 станет еще

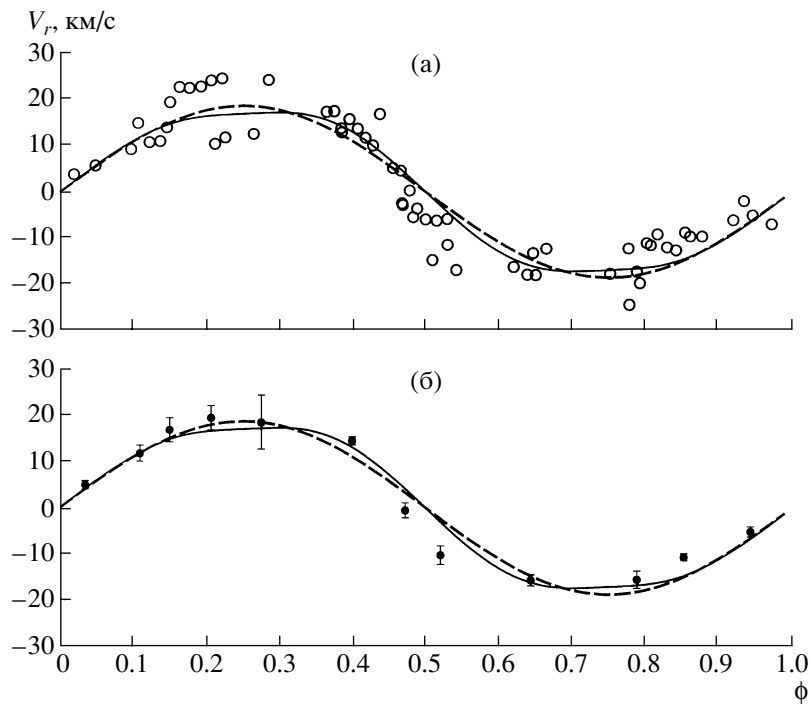
одним шагом в понимании природы рентгеновского источника, неустановленной до настоящего момента.

## 2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для сводной кривой лучевых скоростей привлечены данные из работ [12, 13]. За нулевую фазу в обоих случаях принят момент середины затмения рентгеновского компонента оптическим.

Спектральные данные, содержащиеся в работе [12], получены в течение 1973–1976 гг. на 152-см телескопе Южной Европейской обсерватории. Лучевые скорости определены по абсорбционным линиям водорода бальмеровской серии  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$ ,  $H8$ ,  $H9$ ,  $H10$ ,  $H11$ ,  $H12$ . Измерение лучевой скорости проводилось по абсолютному смещению ядра абсорбционной линии относительно ее лабораторного значения. Поэтому с нашей стороны возникла необходимость в коррекции спектральных данных за систематическую скорость перед их внесением в сводную кривую лучевых скоростей.

Отметим, что значение систематической скорости звездной системы, определенной по линиям поглощения водорода бальмеровской серии растет с



**Рис. 2.** (а) — Сводная кривая наблюдаемых лучевых скоростей рентгеновской ТДС 4U 1700-37. Светлыми кружками представлены лучевые скорости, определенные по спектральным данным IUE, из работы [13]. Для сравнения приведены теоретические кривые лучевых скоростей в модели Роша (сплошная линия) и модели точечных масс (штриховая линия) для массы  $m_x = 2.01M_\odot$ , соответствующей минимуму невязки в модели Роша при  $m_v = 50M_\odot$ , рассчитанной методом 2, т.е. без использования значений средней наблюдаемой лучевой скорости в фазовом интервале 0.4–0.6. Параметры модели Роша приведены в табл. 1. (б) — Лучевые скорости, усредненные внутри фазовых интервалов (темными кружками представлена средняя в фазовом бине лучевая скорость). Для сравнения приведена теоретическая кривая лучевых скоростей в модели Роша (сплошная линия) и модели точечных масс (штриховая линия) для  $m_x = 2.01M_\odot$  и  $m_v = 50M_\odot$ .

уменьшением порядкового номера линии в серии — так называемый бальмеровский прогресс [14, 15]. Так, например, для линий  $H\delta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\beta$  систематическая лучевая скорость составила  $-82.7$ ,  $-110.3$ ,  $-152.2$  км/с, соответственно. Рост систематической лучевой скорости с уменьшением номера серии абсорбционной линии, по которой она измерена, связан с формированием ядер линий начала серии в более высоких слоях звездной атмосферы, где уже формируется радиальное истечение в виде звездного ветра. Систематическая скорость, полученная на основе абсорбционных линий водорода бальмеровской серии более высокого порядка  $H10$ ,  $H11$ ,  $H12$ , равна  $-72.7$ ,  $-83.3$ ,  $-78.4$ , соответственно. Поскольку эти линии формируются у основания фотосферы оптической звезды и не испытывают сильного возмущения со стороны звездного ветра, то их среднее значение  $-78.1$  км/с может быть принято в качестве  $\gamma$ -скорости системы 4U 1700-37.

На основе работы [12] в нашем распоряжении оказалось 570 значений лучевых скоростей, приблизительно равномерно распределенных по фа-

зам. Сводная кривая лучевых скоростей представлена на рис. 1а.

К настоящему моменту спутником IUE отснято свыше 60 спектров рентгеновской двойной 4U 1700-37. Результат обработки этих высокоточных спектральных данных представлен в работе [13]. Приведенные в ней лучевые скорости получены методом кросс-корреляции участков спектра из диапазона  $1300\text{--}1850\text{\AA}$ . На основе работы [13] в нашем распоряжении оказалось 61 значение лучевой скорости. Кривая лучевых скоростей представлена на рис. 2а.

Сложные процессы на поверхности оптического компонента и в газовых структурах двойной не позволяют определить истинную лучевую скорость оптического спутника. Наблюдаемая лучевая скорость неизбежно искажена случайными ошибками. С целью уменьшения влияния случайных ошибок лучевые скорости были усреднены внутри фазовых интервалов. Усредненные кривые наблюдаемых лучевых скоростей представлены на рис. 2а и рис. 2б под соответствующими кривыми наблюдаемых лучевых скоростей. Следует сказать, что в све-

**Таблица 1.** Численные значения параметров, используемых для синтеза кривых лучевых скоростей рентгеновской ТДС 4U 1700-37 в модели Роша.

$P$ , сут	3.411581	Период
$e$	0.0	Эксцентриситет
$\omega$ , град.	0.0	Долгота периастра оптического компонента
$i$ , град.	67*	Наклонение орбиты
$\mu$	0.93*	Коэффициент заполнения полости Роша оптическим компонентом в периастре орбиты
$f$	0.9	Коэффициент асинхронности вращения
$T_{\text{эф}}$ , К	36 000**	Эффективная температура оптического компонента
$\beta$	0.25	Коэффициент гравитационного потемнения
$k_x$	0.0005	Отношение рентгеновской светимости релятивистского компонента к болометрической светимости оптического компонента $L_x/L_v$
$A$	0.5	Коэффициент переработки рентгеновского излучения
$u$	0.3***	Коэффициент потемнения к краю

\* — данные взяты из работы [17].

\*\* — данные взяты из работы [11].

\*\*\* — данные взяты из работы [20].

те недавнего исследования [16] ошибки, приносимые в наблюдаемую лучевую скорость оптической звезды приливно-гравитационными волнами, также имеют случайный характер и могут быть подавлены усреднением по многим ночам наблюдений.

### 3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ КРИВЫХ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

В тесной двойной системе (ТДС) 4U 1700-37 оптический компонент близок к заполнению критической полости Роша [17]. Вследствие приливного воздействия со стороны релятивистского спутника форма оптического компонента отличается от сферической. Обращенная к релятивистскому компоненту сторона прогрета исходящим от него, рентгеновским излучением. Перечисленные эффекты взаимодействия компонентов должны быть приняты в рассмотрение при интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей 4U 1700-37. Поэтому интерпретация усредненных лучевых скоростей была выполнена в модели Роша, позволяющей в первом приближении учесть вышеперечисленные эффекты взаимодействия компонентов. Подробное описание модели Роша уже содержится в работах [18, 19] и в данном исследовании не приводится. Численные значения параметров модели Роша рентгеновской двойной 4U 1700-37 приведены в табл. 1.

За неизвестные параметры были приняты массы обоих компонентов. Обратная задача в такой формулировке достаточно громоздка. По этой

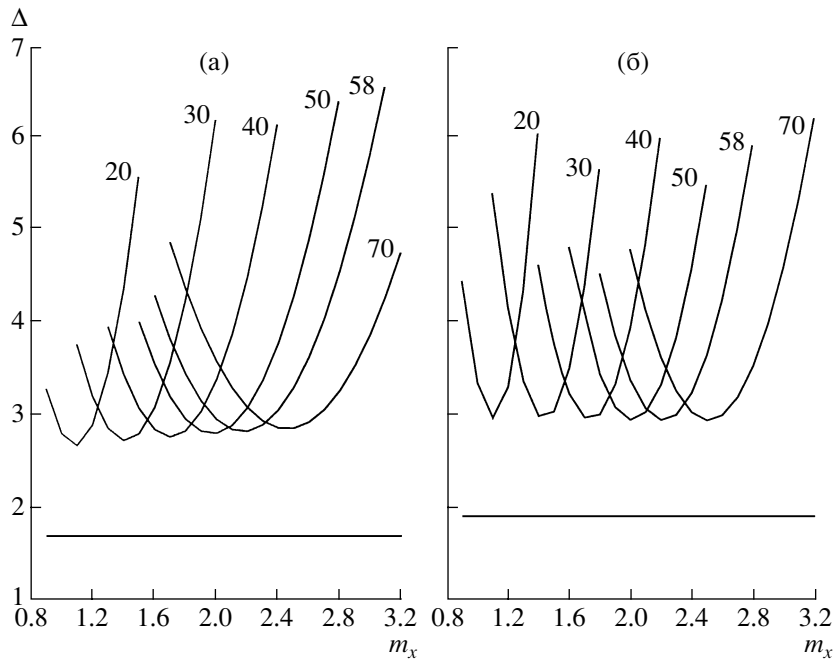
причине нами использовался метод перебора по параметрам и многократного решения прямой задачи. Для каждого значения массы оптического компонента  $m_v$  из дискретного набора значений 20, 30, 40, 50, 58,  $70M_{\odot}$  производился перебор по массе компактного объекта  $m_x$ . Результатом явилась зависимость массы компактного объекта от массы оптического.

Невязка между усредненной наблюдаемой кривой лучевых скоростей и теоретической вычислялась по формуле

$$\Delta(m_x) = \frac{\sum_{j=1}^M (n_j - 1) \sum_{j=1}^M n_j (V_j^{teor} - \bar{V}_j^{obs})^2}{M \sum_{j=1}^M n_j (n_j - 1) \sigma_j^2}, \quad (1)$$

где  $\bar{V}_j^{obs}$  — наблюдаемое среднее значение лучевой скорости на фазовом интервале с центром на фазе  $\bar{\phi}_j$ ,  $V_j^{teor}$  — теоретическое значение лучевой скорости на этой фазе,  $\sigma_j$  — среднеквадратичное отклонение  $\bar{V}_j^{obs}$  от наблюдаемых значений лучевой скорости в данном фазовом интервале с центром в  $\bar{\phi}_j$ ,  $M$  — количество фазовых интервалов,  $n_j$  — число усредненных наблюдений лучевых скоростей в данном фазовом интервале.

Величина  $\Delta(m_x)$  распределена по закону Фишера  $F_{M, \sum_{j=1}^M (n_j - 1), \alpha}$  [21]. Задавшись уровнем зна-



**Рис. 3.** (а) — Значения невязок, полученных методом 1, т.е. с использованием всех значений средней наблюдаемой лучевой скорости, между средней наблюдаемой кривой лучевых скоростей 4U 1700-37 по данным работы [12] и синтезированной кривой в модели Роша. Горизонтальная линия соответствует критическому уровню критерия Фишера  $\Delta_{14,570} = 1.69$  по уровню значимости 5%. Масса оптического компонента, при которой получена невязка, указана около кривых в массах Солнца. (б) — То же с использованием работы [13]. Горизонтальная линия соответствует критическому уровню критерия Фишера  $\Delta_{12,61} = 1.916$  по уровню значимости 5%.

чимости  $\alpha$ , можно найти доверительное множество для искомого параметра  $m_x$  при фиксированном значении  $m_v$ . Оно состоит из тех значений  $m_x$ , для которых выполняется условие

$$\Delta(m_x) \leq F_{M, \sum_{j=1}^M (n_j - 1), \alpha}.$$

Решение обратной задачи помимо модели Роша выполнено и в модели точечных масс. Последняя использовалась лишь с целью выявления расхождения результатов моделей. Интерпретация средней кривой лучевых скоростей ТДС проводилась для спектральных данных работ [12] и [13] индивидуально.

Особо следует оговорить ситуацию со звездным ветром оптического компонента в рентгеновской двойной 4U 1700-37. Оптической звездой в системе является О-сверхгигант. Неоднородность силы тяжести на его поверхности и прогрев поверхности звезды, обращенной к релятивистскому спутнику, нарушает изотропность истечения звездного ветра. Скорость ветра вблизи точки Лагранжа  $L_1$  возрастает, что проявляется в избытке отрицательной лучевой скорости близ фазы 0.5 (рентгеновский источник впереди О-сверхгиганта; рис. 1б и рис. 2б.) Анизотропия звездного ветра привносит систематические ошибки в кривую наблюдаемых

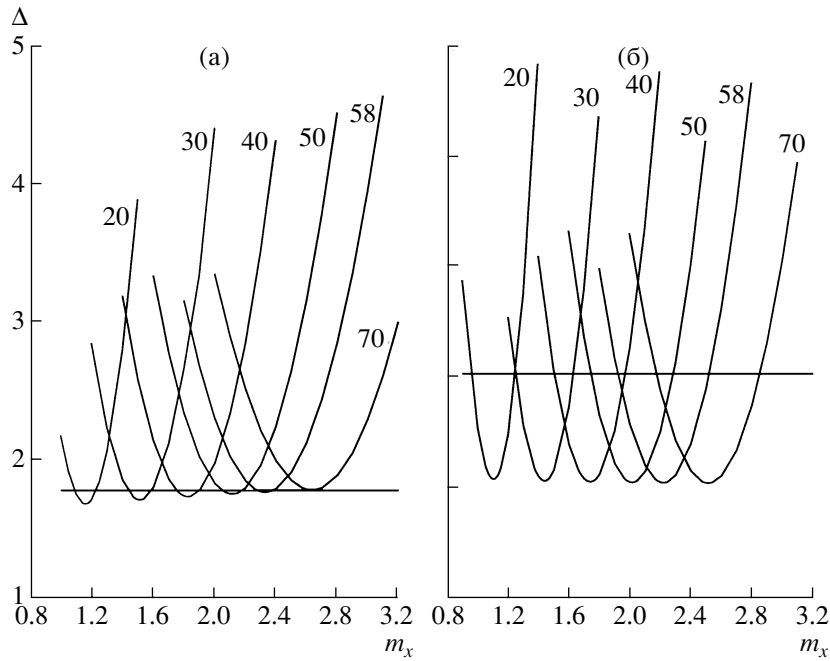
лучевых скоростей. Поэтому интерпретация усредненных кривых наблюдаемых лучевых скоростей была проведена двумя методами:

*Метод 1.* По всем средним значениям наблюдаемых лучевых скоростей.

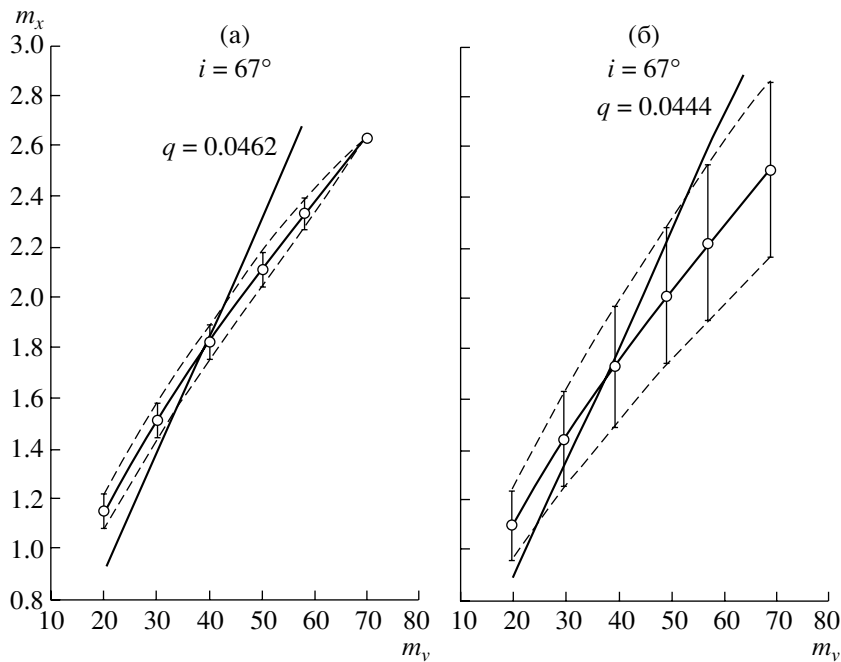
*Метод 2.* Без учета средних значений наблюдаемых лучевых скоростей, лежащих на фазовом интервале 0.4–0.6, как наиболее сильно искаженных эффектом анизотропии звездного ветра.

Для работы был выбран уровень значимости 5%. Интерпретация методом 1 спектральных данных работ [12, 13] не позволила принять ни модель Роша, ни модель точечных масс по выбранному уровню значимости. Поведение невязки, возникающей в ходе интерпретации наблюдательных данных работ [12, 13] в модели Роша, представлено на рис. 3а, 3б. Построить зависимость между массами компонентов в этом случае не представлялось возможным.

Интерпретация средних наблюдаемых кривых лучевых скоростей с косвенным учетом анизотропии ветра (метод 2) позволила принять модели по уровню значимости 5%. Данный факт говорит о важности учета анизотропии звездного ветра при интерпретации кривой лучевых скоростей ОВ-звезд, входящих в ТДС [22]. Поведение невязки, полученной в ходе анализа средних наблюдаемых кривых лучевых скоростей в модели Роша,



**Рис. 4.** (а) — Значения невязок, полученных методом 2, т.е. без использования значений средней наблюдаемой лучевой скорости в фазовом интервале 0.4–0.6, между средней наблюдаемой кривой лучевых скоростей 4U 1700-37 по данным работы [12] и синтезированной кривой в модели Роша. Горизонтальная линия соответствует критическому уровню критерия Фишера  $\Delta_{11,428} = 1.79$  по уровню значимости 5%. Масса оптического компонента, при которой получена невязка, указана около кривых в массах Солнца. (б) — То же с использованием работы [13]. Горизонтальная линия соответствует критическому уровню критерия Фишера  $\Delta_{10,48} = 2.03$  по уровню значимости 5%.



**Рис. 5.** (а) — Зависимость массы компактного объекта рентгеновской ТДС 4U 1700-37 от массы оптической звезды при наклонении орбиты  $67^\circ$ . Получена интерпретацией в модели Роша лучевых скоростей, определенных по линиям поглощения водорода из работы [12] методом 2, т.е. без использования значений средней наблюдаемой лучевой скорости в фазовом интервале 0.4–0.6. Прямая линия соответствует связи между  $m_x$  и  $m_v$  при отношении масс компонентов  $q = 0.0462$ , найденном из уравнения (4). (б) — То же с использованием спектральных данных IUE из работы [13]. Прямая линия соответствует связи между  $m_x$  и  $m_v$  при отношении масс компонентов  $q = 0.0444$ , найденном из уравнения (4).

**Таблица 2.** Значения массы релятивистского компонента рентгеновской ТДС 4U 1700-37, полученные в результате интерпретации спектроскопических данных работы [12] в модели Роша (отмечено “R”) и модели точечных масс (отмечено “P”)

$m_v, M_\odot$	$m_x(P), M_\odot$	$m_x(R), M_\odot$
20	$1.15^{+0.13}_{-0.12}$	$1.15^{+0.08}_{-0.06}$
30	$1.51^{+0.16}_{-0.16}$	$1.51^{+0.08}_{-0.07}$
40	$1.82^{+0.20}_{-0.20}$	$1.82^{+0.08}_{-0.07}$
50	$2.11^{+0.23}_{-0.23}$	$2.11^{+0.07}_{-0.06}$
58	$2.32^{+0.26}_{-0.25}$	$2.33^{+0.05}_{-0.06}$
70	$2.64^{+0.28}_{-0.30}$	2.64*

\* Доверительный интервал не указан, поскольку модель по уровню значимости 5% отвергается.

**Таблица 3.** Значения массы релятивистского компонента рентгеновской ТДС 4U 1700-37, полученные в результате интерпретации спектроскопических данных работы [13] в модели Роша (отмечено “R”) и модели точечных масс (отмечено “P”)

$m_v, M_\odot$	$m_x(P), M_\odot$	$m_x(R), M_\odot$
20	$1.09^{+0.10}_{-0.10}$	$1.10^{+0.15}_{-0.14}$
30	$1.42^{+0.13}_{-0.13}$	$1.44^{+0.19}_{-0.19}$
40	$1.72^{+0.16}_{-0.16}$	$1.73^{+0.25}_{-0.23}$
50	$1.99^{+0.18}_{-0.19}$	$2.01^{+0.28}_{-0.27}$
58	$2.19^{+0.21}_{-0.20}$	$2.22^{+0.31}_{-0.31}$
70	$2.49^{+0.23}_{-0.24}$	$2.51^{+0.35}_{-0.34}$

представлено на рис. 4а и 4б. По результатам интерпретации построена зависимость массы рентгеновского компонента от массы оптического (см. рис. 5а и 5б). Для массы оптического компонента  $69M_\odot$  минимальное значение невязки, достигаемое при  $m_x = 2.61M_\odot$  в процессе интерпретации спектральных данных работы [12], равно значению квантиля. Поэтому коридор ошибок зависимости масс компонентов на рис. 5а обрывается на значении массы оптической звезды  $69M_\odot$ . Численно результат интерпретации спектральных данных работы [12] и работы [13] в модели точечных масс и модели Роша представлен в табл. 2 и в табл. 3.

Из табл. 2 и 3 видно, что массы компактного объекта, полученные в модели Роша и модели точечных масс, близки. Это объяснимо двумя причинами. Во-первых, вследствие малого значения

ускорения силы тяжести близ точки Лагранжа  $L_1$ , температура “носика”, оптической звезды ниже температуры остальной ее поверхности (гравитационное потемнение). Во-вторых, прогрев обращенной к рентгеновскому источнику части оптической звезды крайне низок ( $k_x = 0.0005$ ). Поэтому вклад излучения “носика”, вносящего наибольшее возмущение в наблюдаемую кривую лучевых скоростей, в интегральное излучение оптического компонента мал. В излучении оптического компонента доминирует сферически симметричная часть поверхности, что объясняет близость результатов модели Роша и модели точечных масс. Более подробно влияние коэффициента прогрева на форму кривой лучевых скоростей обсуждается в работе [18].

Зависимости между массой оптического компонента и рентгеновского, полученные при интерпретации данных работ [12] и [13], в пределах ошибок показывают хорошее согласие между собой (рис. 5а и 5б, табл. 2 и 3).

По причине того, что наклонение орбиты определено не точно, была дополнительно проведена интерпретация методом 2 спектральных данных работы [13] для углов наклонения орбиты  $62^\circ$  и  $72^\circ$ . Значения остальных параметров модели Роша приняты прежними (табл. 1). Результат интерпретации численно представлен в колонке (1) табл. 4 и 5. Графически результат интерпретации представлен на рис. 6а и 6б.

Зависимость массы компактного объекта от угла наклона в рамках модели точечных масс задается соотношением  $m_v \sim \sin^{-3} i$ . Чтобы проверить, насколько точно выполняется данная зависимость для модели Роша, нами был проведен тест, аналогичный тесту работы [23].

Значения масс компактного объекта, определенных в модели Роша при наклонении орбиты  $i = 67^\circ$ , были пересчитаны по формулам (2), (3) для углов наклона орбиты  $i = 62^\circ$  и  $i = 72^\circ$ :

$$m_x(62^\circ) = m_x(67^\circ) \frac{\sin^3 67^\circ}{\sin^3 62^\circ}, \quad (2)$$

$$m_x(72^\circ) = m_x(67^\circ) \frac{\sin^3 67^\circ}{\sin^3 72^\circ}. \quad (3)$$

Здесь  $m_x(62^\circ)$ ,  $m_x(67^\circ)$  и  $m_x(72^\circ)$  обозначают массы релятивистского компонента для наклонения орбиты  $62^\circ$ ,  $67^\circ$  и  $72^\circ$ , соответственно. Результат пересчета массы компактного объекта посредством соотношения (2) представлен во второй колонке (2) табл. 4. Результат пересчета массы компактного объекта посредством соотношения (3) представлен в колонке (2) табл. 5.

Из сравнения колонок (1) и (2) табл. 4 и табл. 5 видно, что соотношение  $m_v \sim \sin^{-3} i$  дает результат,

близкий к результату модели Роша, но не строго совпадающий с ним. Тем не менее значение массы лежит в пределах ошибок (рис. 6а, 6б). Поэтому при уточнении величины наклона орбиты  $i$  масса компактного объекта  $m_x$  может быть приближенно пересчитана согласно зависимости  $m_x \sim \sin^{-3}i$ . Точное определение масс компонентов для других значений  $i$  может быть выполнено путем интерполяции результатов табл. 2, 3, 4 и 5 (см. также рис. 5 и 6).

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС КОМПОНЕНТОВ

*На основе значения ускорения силы тяжести оптического компонента*

В работе [11] выполнен тонкий неЛТР-анализ спектров оптической звезды системы 4U 1700-37. Величина ускорения силы тяжести  $\lg g$ , определенная по крыльям абсорбционных линий водорода бальмеровской серии и HeI в спектре оптического компонента HD 153919, заключена в интервале 3.45–3.55 [11]. Найденная в этой же работе болометрическая светимость оптического компонента  $\lg(L/L_\odot) = 5.82$  и эффективная температура  $35000 \pm 1000$  К, дают значение радиуса  $21.9R_\odot$ . Исходя из значения  $\lg g = 3.45 - 3.55$  и радиуса  $21.9R_\odot$ , получаем нижний предел массы оптического спутника  $55_{-6}^{+7}M_\odot$ . Масса оптического компонента, определенная на основе наблюдаемого ускорения свободного падения, является минимальной оценкой, вследствие уменьшения его реального значения центробежными силами. Авторы работы [11] предполагают, что нижнее значение массы оптического компонента близко к  $50M_\odot$ , а верхнее, получаемое из анализа положения HD 153919 на диаграмме Герцшпрунга–Рессела, не достигает  $60M_\odot$ . Масса компактного объекта, соответствующая массе оптической звезды  $55_{-6}^{+7}M_\odot$  при наклоне орбиты  $67^\circ$  по зависимости между массами компонентов, построенной по спектральным данным на основе линий абсорбции водорода, равна  $2.25_{-0.24}^{+0.23}M_\odot$  (рис. 5а). Зависимость между массами компонентов, построенная на основе спектральных данных IUE, в этом случае дает значение массы релятивистского компонента  $2.14_{-0.43}^{+0.50}M_\odot$  (рис. 5б).

При наклоне орбиты  $62^\circ$  и  $72^\circ$  масса релятивистского спутника, которая получается по зависимости между массами компонентов, построенной на основе спектральных данных IUE, соответственно, равна  $2.26_{-0.44}^{+0.49}M_\odot$  и  $2.06_{-0.39}^{+0.47}M_\odot$  (рис. 6б).

**Таблица 4.** Колонка (1) — значения массы релятивистского компонента рентгеновской ТДС 4U 1700-37, полученные в результате интерпретации методом 2 спектральных данных работы [13] в модели Роша для наклона орбиты  $i = 62^\circ$ . Колонка (2) — результат пересчета по формуле (2) массы компактного объекта, полученной в модели Роша при  $i = 67^\circ$  (подробнее см. текст)

$m_v, M_\odot$	$m_x, M_\odot$	
	(1)	(2)
20	$1.16_{-0.15}^{+0.15}$	1.25
30	$1.51_{-0.20}^{+0.20}$	1.63
40	$1.82_{-0.24}^{+0.24}$	1.96
50	$2.11_{-0.28}^{+0.28}$	2.28
58	$2.33_{-0.31}^{+0.30}$	2.52
70	$2.63_{-0.34}^{+0.35}$	2.84

**Таблица 5.** Колонка (1) — значения массы релятивистского компонента рентгеновской ТДС 4U 1700-37, полученные в результате интерпретации методом 2 спектральных данных работы [13] в модели Роша для наклона орбиты  $i = 72^\circ$ . Колонка (2) — результат пересчета по формуле (3) массы компактного объекта, полученной в модели Роша при  $i = 67^\circ$  (подробнее см. текст)

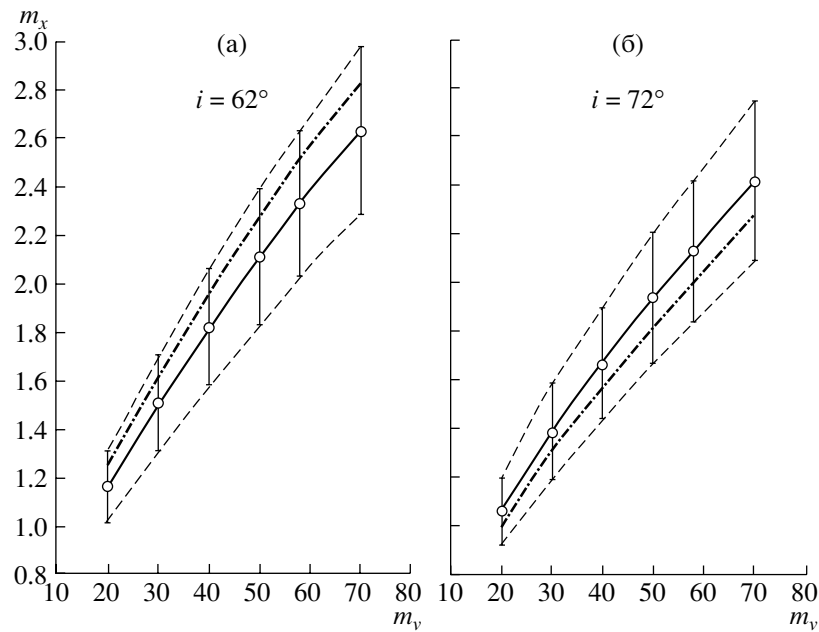
$m_v, M_\odot$	$m_x, M_\odot$	
	(1)	(2)
20	$1.06_{-0.14}^{+0.15}$	1.00
30	$1.39_{-0.20}^{+0.19}$	1.31
40	$1.67_{-0.23}^{+0.24}$	1.57
50	$1.94_{-0.27}^{+0.27}$	1.82
58	$2.13_{-0.29}^{+0.30}$	2.01
70	$2.51_{-0.33}^{+0.33}$	2.28

*На основе информации о радиусе оптического компонента*

Радиус оптического компонента  $R_v$ , коэффициент заполнения полости Роша  $\mu$ , эксцентриситет  $e$ , наклон орбиты  $i$ , орбитальный периода двойной  $P$ , функция масс оптического компонента  $f_v(m)$  и отношение масс компонентов  $q = m_x/m_v$  связаны соотношением (4) (см., например, [17]).

$$\sin i = \frac{0.38\mu}{R_v} \left( \frac{GP^2 f_v(m)}{4\pi^2} \right)^{1/3} \frac{1+q}{q^{1.208}}, \quad (4)$$





**Рис. 6.** (а) — Зависимость массы компактного объекта рентгеновской ТДС 4U 1700-37 от массы оптической звезды при наклонении орбиты  $62^\circ$ . Получена интерпретацией в модели Роша спектральных данных IUE из работы [13] методом 2 (т.е. без использования значений средней наблюдаемой лучевой скорости в фазовом интервале 0.4–0.6). Штрих-пунктирная линия соответствует массе компактного объекта, полученной пересчетом по соотношению (2) массы релятивистского компонента, определенного в модели Роша для наклонении орбиты  $67^\circ$ . (б) — То же для наклонения орбиты  $72^\circ$ . Штрих-пунктирная линия соответствует массе компактного объекта, полученной пересчетом по соотношению (3) массы релятивистского компонента, определенного в модели Роша для наклонении орбиты  $67^\circ$ .

где  $f_v(m)$  — функция масс оптического компонента, определяемая как

$$f_v(m) = \frac{P(1 - e^2)^{3/2}}{2\pi G} K_v^3.$$

Следовательно, располагая информацией о радиусе оптического компонента и остальных параметрах двойной системы, входящих в соотношение (4), можно определить отношение масс компонентов  $q$ .

Значение коэффициента заполнения полости Роша  $\mu$ , эксцентриситета  $e$ , орбитального периода двойной  $P$  и наклонения орбиты  $i$  были взяты из табл. 1. Поиск скорости движения центра масс оптического компонента  $K_v$  производился в модели точечных масс. Для каждой пары масс компонентов, определенных в модели Роша (табл. 2 и 3), была построена кривая лучевых скоростей в модели точечных масс. Далее определено среднее значение  $K_v$ . Для спектральных данных на основе линий абсорбции водорода [12]  $K_v$  составило  $19.72 \pm 0.02$  км/с, по спектральным данным IUE [13] величина  $K_v$  равна  $18.81 \pm 0.01$  км/с.

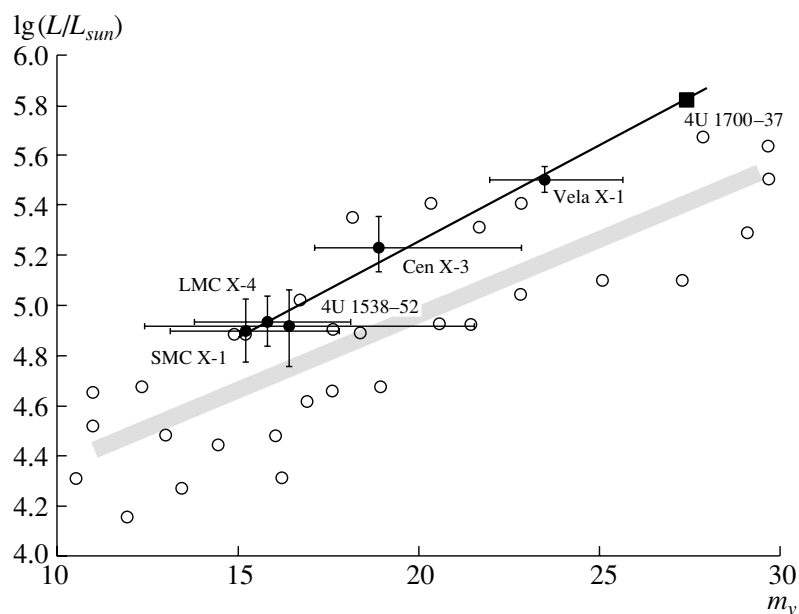
Подставив в (4) радиус оптической звезды  $R_v = 21.9R_\odot$  [11], получим уравнение относительно  $q$ . Решив уравнение (4), получаем для полуамплитуды  $K_v = 19.72$  км/с, измеренной по спектральным данным на основе линий абсорбции водорода [12],

отношение масс  $q = 0.0462$ . Для полуамплитуды  $K_v = 18.81$  км/с, измеренной по спектральным данным IUE [13], отношение масс  $q = 0.0444$ .

На зависимости масс компонентов двойной системы на рис. 5а, б отложены соответствующие прямые. Пересечение прямой с областью допустимых значений масс позволило определить массу компактного объекта. По зависимости между массами компонентов, построенной по спектральным данным на основе линий абсорбции водорода [12], масса релятивистского спутника получается равной  $1.76_{-0.21}^{+0.20} M_\odot$  (рис. 5а). По зависимости между массами компонентов, построенной на основе спектральных данных IUE [13], масса компактного объекта равна  $1.65_{-0.56}^{+0.78} M_\odot$  (рис. 5б).

#### На основе зависимости масса—светимость

Масса оптического компонента, определенная по средней линии зависимости масса—светимость для невзаимодействующих двойных звезд главной последовательности, составляет  $49.5M_\odot$  [24]. Данному значению массы оптического спутника, которое получено по зависимости между массами компонентов, построенной по спектральным данным на основе линий абсорбции водорода [12], соответствует масса компактного объекта  $2.08_{-0.07}^{+0.07} M_\odot$



**Рис. 7.** Зависимость масса—светимость для ОВ-сверхгигантов, входящих в рентгеновские двойные системы (тонкая черная линия). Темными кружками отмечено положение ОВ-гигантов по данным работ [26, 27], рядом приведены названия рентгеновских двойных систем. Темным квадратиком отмечено положение оптического компонента системы 4U 1700-37 на основе значения светимости  $\lg(L/L_{\odot}) = 5.82$  [11]. Светлые кружки — положения ОВ-сверхгигантов невзаимодействующих двойных звезд на зависимости масса—светимость по данным работы [24], серая широкая линия — линейная аппроксимация этой зависимости методом наименьших квадратов.

(рис. 5а). Графическая зависимость между масса—двойной, построенная на основе спектральных данных IUE [13], дает массу компактного объекта  $1.98^{+0.27}_{-0.26} M_{\odot}$  (рис. 5б).

Однако зависимость масса—светимость для оптических компонентов рентгеновской двойной системы отличается от зависимости масса—светимость одиночных звезд [25]. Оптическая звезда в ТДС при заполнении полости Роша или же интенсивном звездном ветре теряет верхние слои атмосферы, вследствие чего температура ее поверхности и светимость выше, чем у одиночных звезд той же массы. Наблюдаемый избыток углерода и азота на поверхности оптического спутника [11] подтверждает потерю верхних слоев атмосферы оптическим спутником 4U 1700-37. На рис. 7 по данным работ [26] и [27] построена зависимость масса—светимость для ОВ-звезд, входящих в рентгеновские двойные системы. Из зависимости, представленной на рис. 7, видно, что светимости оптического компонента  $\lg(L/L_{\odot}) = 5.82$  [11] соответствует масса  $27.4 M_{\odot}$ . При массе оптического компонента  $27.4 M_{\odot}$  масса релятивистского спутника, которая следует из зависимости масс компонентов, построенной по спектральным данным на основе линий поглощения водорода [12], равна  $1.41^{+0.08}_{-0.08} M_{\odot}$  (рис. 5а). Зависимость между массами двойной, построенная

на основе спектральных данных IUE [13], дает массу компактного объекта  $1.35^{+0.18}_{-0.18} M_{\odot}$  (рис. 5б).

Таким образом, исходя из зависимости масса—светимость для рентгеновских двойных систем с ОВ-звездами, масса релятивистского объекта в системе 4U 1700-37 в пределах ошибок не отличается от средней массы нейтронных звезд  $1.35^{+0.04}_{-0.04} M_{\odot}$  [28].

### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом работы являются зависимости между массой оптического и релятивистского компонента рентгеновской двойной системы 4U 1700-37, полученные для наклонений орбиты  $62^{\circ}$ ,  $67^{\circ}$  и  $72^{\circ}$  (рис. 5 и 6). Помимо этого, в работе даны оценки массы компактного объекта системы 4U 1700-37 на основе известных параметров оптического компонента. В рентгеновской системе 4U 1700-37 до сих пор окончательно не установлен, является ли компактный объект маломассивной черной дырой или же нейтронной звездой. Наше исследование говорит в пользу нейтронной звезды.

Значение массы релятивистского спутника, полученное с привлечением зависимости масса—светимость для рентгеновских двойных систем с ОВ-звездами, составляет  $1.41^{+0.08}_{-0.08} M_{\odot}$  и

$1.35_{-0.18}^{+0.18} M_{\odot}$ , что в пределах ошибок согласуется со средним значением массы нейтронных звезд  $1.35_{-0.04}^{+0.04} M_{\odot}$  [28]. Масса компактного объекта 4U 1700-37, полученная по значению ускорения силы тяжести на поверхности оптического компонента, равна  $2.25_{-0.24}^{+0.23} M_{\odot}$  и  $2.14_{-0.43}^{+0.50} M_{\odot}$ , а полученная с использованием значения радиуса оптического компонента —  $1.76_{-0.21}^{+0.20} M_{\odot}$  и  $1.65_{-0.56}^{+0.78} M_{\odot}$ . Данные значения массы компактного объекта 4U 1700-37 в пределах ошибок сравнимы с массой рентгеновского пульсара системы Vela X-1, равной  $1.93_{-0.21}^{+0.19} M_{\odot}$  [23]. Возможно, что аналогично ситуации в Vela X-1, в системе 4U 1700-37 компактный объект представляет собой массивную нейтронную звезду. В пользу того, что компактный объект является нейтронной звездой, также говорит жесткий спектр рентгеновского излучения 4U 1700-37, похожий на спектры рентгеновских пульсаров [4, 5]. Отсутствие периодических рентгеновских импульсов от системы 4U 1700-37, связанных с вращением аккрецирующей нейтронной звезды, можно объяснить соосностью вектора магнитного диполя с осью вращения.

Дать однозначную оценку массы релятивистского компонента 4U 1700-37 в настоящий момент не представляется возможным. Для уточнения массы релятивистского спутника рентгеновской системы 4U 1700-37 необходимы дополнительные сведения об оптическом компоненте. Так, например, в космическом астрометрическом проекте ГАЙЯ, планируемом Европейской Южной обсерваторией, будут измерены тригонометрические параллаксы и расстояния до миллионов звезд Галактики. Знание расстояния до системы 4U 1700-37 позволит произвести прямое определение радиуса оптической звезды, что даст возможность надежной оценки массы компактного объекта. Также представляются важными и дальнейшие тщательные поиски феномена рентгеновского пульсара в системе 4U 1700-37.

Работа поддержана грантом “Ведущие научные школы России”. Выражаю благодарность А.М. Черепашуку, Э.А. Антохиной и В.М. Липуну за полезные консультации и советы. Благодарю д-ра Хаммершлаг-Хенсберга (G. Hammerschlag-Hensberge), любезно предоставившего спектральные данные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Jones, W. Forman, H. Tananbaum, *et al.*, *Astrophys. J.* **181**, 43 (1973).
2. C. Jones, W. Forman, W. Liller, *et al.*, *Bull. Amer. Astr. Soc.* **4**, 329 (1972).
3. C. Jones and W. Lillei, *IAU Circ.* № 2503 (1973).
4. A. P. Reynolds, A. Owens, L. Kaper, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **349**, 873 (1999).
5. L. Kaper and A. Cherepashchuk, in *Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei: Diagnostic, Demography and Formation* (ESO Astrophys. Symposia, Eds L. Kaper, E. P. J. van Heuvel, and P. A. Woudt) (Berlin: Springer, 2001), p. 289.
6. J. B. Hutchings, A. D. Thackeray, B. L. Webster, and P. J. Andrews, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **163**, 13 (1973).
7. S. R. Heap and M. F. Corcoran, *Astrophys. J.* **387**, 340 (1992).
8. R. G. Aitken, *The Binary Stars* (New York: Dover, 1964).
9. P. S. Conti and A. P. Cowley, *Astrophys. J.* **200**, 133 (1975).
10. B. C. Rubin, M. H. Finger, B. A. Harmon, *et al.*, *Astrophys. J.* **459**, 259 (1996).
11. J. S. Clark, S. P. Goodwin, P. A. Growther, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **392**, 909 (2002).
12. G. Hammerschlag-Hensberge, C. De Loore, and van Den Heuvel, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **32**, 375 (1978).
13. G. Hammerschlag-Hensberge, M. H. van Kerkwijk, and L. Kaper, *Astron. and Astrophys.* **407**, 685 (2003).
14. J. B. Hutchings, *Astrophys. J.* **235**, 413 (1980).
15. D. Crampton, J. B. Hutchings, and A. P. Cowley, *Astrophys. J.* **299**, 839 (1985).
16. H. Quantrell, A. J. Norton, T. D. C. Ash, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **401**, 313 (2003).
17. А. В. Гончарский, С. Ю. Романов, А. М. Черепашук, *Конечно-параметрические обратные задачи* (Изд. Московский Университет, 1991), с. 107, 99.
18. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **71**, 420 (1994).
19. Э. А. Антохина, *Астрон. журн.* **73**, 532 (1996).
20. А. А. Рубашевский, *Астрон. журн.* **68**, 799 (1991).
21. Д. Худсон, *Статистика для физиков* (М.: Мир, 1970).
22. M. Milgrom, *Astron. and Astrophys.* **70**, 763 (1978).
23. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **81**, 108 (2004).
24. A. Herrero, *A massive star odyssey: from main sequence to supernova* (IAU Symposium № 212, Eds. Karel van der Hucht, Artemio Herrero, Cesar Esteban) (Publ. The astronomical society of the Pacific, 2003), p. 3.
25. J. Ziolkowski, *Nonstationary Evolution of Close Binaries* (Ed. A.N. Zitikov) (Publ. Warsaw: PWN, 1978), p. 29.
26. А. М. Черепашчук, N.A. Katysheva, T. S. Khruzina, and C. Yu. Shugarov, *Highly evolved close binary stars: catalog* (Netherlands Gordon and Breach Science Publishers SA, 1996a), V. 1, Part 1, p. 82.
27. M.H. van Kerkwijk, J. van Paradijs, and E.J. Zuiderwijk, *Astron. and Astrophys.* **303**, 497 (1995).
28. S. E. Thoresett and D. Chakrabarty, *Astrophys. J.* **512**, 288 (1998).

## The Mass of the Compact Object in the X-Ray Binary 4U 1700-37

**M. K. Abubekero**

The results of a systematic analysis of master radial-velocity curves for the X-ray binary 4U 1700-37 are presented. The dependence of the mass of the X-ray component on the mass of the optical component is derived in a Roche model based on a fit of the master radial-velocity curve. The parameters of the optical star are used to estimate the mass of the compact object in three ways. The masses derived based on information about the surface gravity of the optical companion and various observational data are  $2.25^{+0.23}_{-0.24}M_{\odot}$  and  $2.14^{+0.50}_{-0.43}M_{\odot}$ . The masses based on the radius of the optical star,  $21.9R_{\odot}$ , are  $1.76^{+0.20}_{-0.21}M_{\odot}$  and  $1.65^{+0.78}_{-0.56}M_{\odot}$ . The mass of the optical component derived from the mass–luminosity relation for X-ray binaries,  $27.4M_{\odot}$ , yields masses for the compact object of  $1.41^{+0.08}_{-0.08}M_{\odot}$  and  $1.35^{+0.18}_{-0.18}M_{\odot}$ .