

Отзыв

официального оппонента о диссертации В. С. Петрова “Параметры рентгеновских двойных систем с учётом эффектов взаимной близости компонентов”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

Диссертационная работа В. С. Петрова посвящена актуальной проблеме определения масс компактных объектов и оптических компонентов в рентгеновских двойных системах. Знание такого фундаментального параметра звёзд важно для уточнения современных представлений об эволюции звёзд в двойных системах, о физических процессах на поздних стадиях эволюции двойных систем, таких как перетекание вещества, образование общей оболочки, потеря вещества в виде ветра. В рамках модели Роша в работе разработаны методы учета несферичности оптического компонента, неоднородного распределения температуры на его поверхности, облучения рентгеновским излучением компактного компонента при интерпретации наблюдаемых кривых лучевых скоростей. Теоретические разработки применены для уточнения масс компактного и оптического компонентов в 9 маломассивных рентгеновских двойных системах. Полученные массы оптических звёзд оказались меньше существующих определений в модели классического вращательного уширения, что усиливает противоречие с имеющимся в литературе эволюционным сценарием для маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами. Диссертантом рассчитаны обширные таблицы поправок к полуамплитуде кривой лучевых скоростей для шести конкретных массивных рентгеновских двойных систем с ОВ сверхгигантами, что позволит более корректно по сравнению с существующими методами определять массы компактных объектов в этих системах. Новизна, актуальность и научная значимость результатов диссертации В. С. Петрова не вызывают сомнения.

Диссертация состоит из Введения, 5 глав, Заключения, Приложения, включающего таблицы К-поправок для рентгеновских двойных систем с ОВ сверхгигантами, и списка цитированной литературы (123 наименования).

Во Введении дан обзор научной литературы по изучаемой проблеме, обоснована актуальность исследований, проводимых в диссертационной работе, сформулированы цели работы, новизна, научная и практическая ценность полученных результатов.

Главы 1 и 2 посвящены методическим вопросам. В главе 1 описаны методы расчёта профилей спектральных линий в рамках модели Роша, построения на этой основе теоретической кривой лучевых скоростей и расчёта К-поправок к полуамплитуде кривой лучевых скоростей центра масс звезды. Проанализирована зависимость К-поправок от метода расчёта профиля спектральной линии и параметров двойной системы.

В главе 2 оценивается точность определения отношения масс q по вращательному уширению линий поглощения при замене приливо-деформированной фигуры звезды в модели Роша равнообъемной сферой или диском. Рассчитаны поправки Δq к значениям, получаемым с использованием простых моделей при анализе наблюдений. В рамках модели Роша рассчитано влияние облучения рентгеновским излучением компактного объекта на вращательное уширение абсорбционных компонентов спектральных линий.

В 3-ей главе рассматриваются проблемы определения массы компактного объекта в пяти двойных системах с ОВ сверхгигантом и рентгеновским пульсаром и в массивной системе с черной дырой Cyg X-1. Для каждой системы рассчитано семейство кривых лучевых скоростей в рамках модели Роша и составлены обширные таблицы К-поправок, которые позволяют переводить наблюдаемую полуамплитуду кривой лучевых скоростей системы в полуамплитуду кривой лучевых скоростей центра масс звезды. Это позволит более корректно по сравнению с существующими подходами определять массы компактных объектов в этих системах.

Глава 4 посвящена уточнению масс компонентов в 9 маломассивных рентгеновских двойных системах из каталога Casares & Jonker (2014, Space Sci. Rev., 183, 223). В качестве исходных используются литературные данные о проекции скорости вращения на луч зрения, полученной в модели классического вращательного уширения, наблюдаемой полуамплитуде кривой лучевых скоростей, функции масс и наклонении орбиты. В диссертации рассчитаны поправки к отношению масс, которые учитывают отклонение формы оптической звезды от сферической, гравитационное потемнение и потемнение диска к краю, и поправки к функции масс за счёт перехода от наблюдаемой полуамплитуды кривой лучевых скоростей к полуамплитуде кривой лучевых скоростей центра масс звезды. Полученные массы оптических звёзд уменьшились в 1.5-2 раза по сравнению с теми, что определены в модели классического вращательного уширения, и это ещё больше обострило противоречие с эволюционными расчётами маломассивных рентгеновских систем. Для четырёх таких систем с известной эффективной температурой оптической звезды их светимости более, чем на порядок, выше светимости звёзд такой же массы в разделённых двойных системах. В диссертации обсуждаются возможные причины этих противоречий.

Опираясь на литературные данные, 5-ая глава анализирует распределение чёрных дыр в рентгеновских двойных системах по массе и его устойчивость с использованием методов непараметрической статистики.

В Заключение резюмируются результаты, полученные в работе.

По диссертации можно сделать следующие критические замечания.

1. В главе 3 обсуждаются избытки светимости ОВ звёзд в массивных рентгеновских двойных системах по сравнению с ОВ звёздами в невзаимодействующих двойных системах. Параметры звёзд (Табл. 21) взяты из литературы, и диссертант не может нести ответственность за их точность. Но критический анализ исходных данных сделать было необходимо. Утверждение на с. 78 о надёжности определения болометрических светимостей оптических компонентов массивных рентгеновских компонентов является слишком оптимистичным. Для части звёзд в Табл. 21, например, система Cyg X-1, светимость вычислена через эффективную температуру ($T_{\text{эфф}}$) и радиус (R_v), для других, например, в системе 4U 1700-37, с использованием фотометрии и расстояния до объекта. Оба метода связаны с большими неопределённостями, если учесть, о каких объектах идет речь. Даже наиболее сложные современные модели звёздных атмосфер - с учетом звёздного ветра и отклонений от ЛТР - рассчитаны в рамках простой сферически-симметричной геометрии, т.е. не учитывают искажение формы звезды из-за вращения и приливного воздействия компонента в тесной двойной системе. Для Cyg X-1 эффективная температура оптического компаньона варьируется в разных работах от 28000 К до 32000 К, и радиус — это вычисляемая, а не измеряемая величина. Во втором методе источники неопределённости связаны с учётом межзвёздного поглощения и болометрической поправки. Поэтому указанные ошибки светимости — 0.04-0.06 dex представляются сильно заниженными. Это можно показать на следующих примерах. Для первых трёх звёзд в Табл. 21 источник $T_{\text{эфф}}$ и L_v не указан. Дается ссылка на [60], но в работе Rawls et al. (2011, ApJ, 730, id.25) приводятся только массы и радиусы звёзд. И всё-таки воспользуемся этими данными. Для двух первых систем - Cen X-3 и Vela X-1 - светимости ОВ звёзд соответствуют указанным $T_{\text{эфф}}$ и R_v , но ошибки составляют 0.14 dex и 0.25 dex, а не 0.04 dex. Для третьей системы - 4U 1538-52 светимость, соответствующая $T_{\text{эфф}}$ и R_v , получается меньше - на 0.23 dex по сравнению с той, что приведена в Табл. 21, и ошибка составляет 0.3 dex, а не 0.06 dex. Система 4U 1538-52 является наименее массивной из исследованных. А у наиболее массивной системы - 4U 1700-37 масса оптической звезды, фактически, не определена. По эволюционным трекам она оценивается в $58 M_{\text{sun}}$, но с использованием более ранней эмпирической зависимости $L_v - M_v$ для ОВ звёзд, входящих в рентгеновские двойные системы, она была зафиксирована Абубекеровым и др. (2004, АЖ, 81, 108) на уровне $28 M_{\text{sun}}$. Поэтому

надежность формулы (20), выведенной в диссертации для оценки масс релятивистских объектов в массивных рентгеновских двойных системах, вызывает сомнение.

2. Во Введении, «Новизна», п. 4 (стр. 15) и Заключение, стр. 114, п. 4 утверждается, что «Предложен сценарий образования маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами из тройной системы.» Но этот сценарий был предложен Eggleton, Verbunt «Triple star evolution and the formation of short-period, low-mass X-ray binaries» (1986, MNRAS, 220, 15). Диссертант знает об этой работе, в списке литературы она указана даже дважды под номерами [48] и [80]. На стр. 94-95 при обсуждении эволюционных аспектов правильно дается ссылка на работу [80]. В Автореферате, «Практическая значимость», стр. 10 тоже правильно указываются авторы идеи, а пункт «Новизна» сформулирован иначе, чем в тексте диссертации. Могу предположить, что некорректные формулировки в тексте диссертации — это следствие невнимательности, но досадно, что они касаются такого важного пункта как «Новизна полученных результатов».

3. Во Введении, стр. 14, п. 1 «Новизны» и Заключение, стр. 113, п. 1 утверждается, что «Разработан и применен метод использования К-поправок для полуамплитуд кривой лучевых скоростей в массивных рентгеновских двойных системах, в том числе с сильным рентгеновским прогревом $k_x \sim 50$.» В действительности, для массивных рентгеновских двойных систем нигде в работе k_x не превышает 1.4.

И сразу замечание к началу этой фразы. Было бы точнее, на мой взгляд, сформулировать её как «Разработан и применен метод РАСЧЁТА К-поправок К полуамплитуде кривой лучевых скоростей в массивных рентгеновских двойных системах, ...».

Замечания по тексту.

4. с. 29: путаница со ссылками на рисунки 7 и 8.

5. с. 93: формула (34) получена для масс менее $0.4 M_{\text{sun}}$, а не $0.5-1 M_{\text{sun}}$.

6. с. 94: фраза «Современные обзоры показывают, что большая часть звезд входят в системы с тремя и более членами [78, 79]» является сильным преувеличением. В работе [79] (Tokovinin, 2014, *Astrophys. J.*, V.147. P 86) соотношение систем с тремя и более членами к двойным системам дается как 361/2196.

7. с. 94: неизвестная ссылка

8. Отсутствие нумерации частей текста внутри глав затрудняет ссылки на предыдущие результаты. В тексте встречаются ссылки на главу 2.3, главу 3.3, но таких номеров нет в структуре диссертации.

9. Список литературы.

[13], [47], [99] опубликованы, но цитируются либо как arXiv, либо (в печати),

[70], [79] — ошибки в выходных данных,

одна и та же работа под номерами [80] и [48], [120] и [9].

Сделанные замечания не влияют на оценку диссертации как законченного исследования, выполненного на современном научном уровне. Новизна и научная значимость результатов диссертации несомненны. Методическую и практическую значимость имеют разработанные методы расчёта К-поправок к полуамплитуде кривой лучевых скоростей в массивных рентгеновских двойных системах и таблицы К-поправок для конкретных систем, аппроксимационные формулы для расчёта поправки к отношению масс, которая учитывает эффекты приливно-вращательной деформации оптической звезды, гравитационного потемнения, потемнения к краю, облучения рентгеновским излучением компактного объекта. Результаты диссертации могут быть использованы в Институте космических исследований РАН, Институте астрономии РАН, САО РАН, ГАО РАН, КрАО РАН, Казанском федеральном университете и других астрономических учреждениях.

Результаты диссертации опубликованы в шести статьях в рецензируемых журналах. Автореферат, в целом, отражает текст диссертации.

Все сказанное позволяет заключить, что работа В. С. Петрова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, и В. С. Петров заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук

Л.И. Машонкина

1 марта 2017 года

Подпись Л. И. Машонкиной заверяю
ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт астрономии Российской академии наук



А. М. Фатеева

1 марта 2017 года