

Отзыв официального оппонента  
на диссертацию **Петрова Владислава Сергеевича**  
«Параметры рентгеновских двойных систем с учетом  
эффектов взаимной близости компаньонов»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Диссертация В.С.Петрова посвящена определению параметров двойных рентгеновских систем с учетом эффектов близости компаньонов и разработке методов, позволяющих уточнить существующие оценки масс оптических компаньонов и компактных объектов в таких системах. Тема диссертации представляется чрезвычайно актуальной, так как быстрое увеличение количества и существенное улучшение качества наблюдательных данных позволяет регистрировать все больше таких систем и определять их характеристики со все возрастающей точностью. Вместе с тем существует ряд все еще не решенных проблем, таких как сильное расхождение наблюдательных данных с предсказаниями популяционного синтеза, корректная интерпретация наблюдательных данных, и т.д. В частности, важнейшей задачей при определении параметров двойных систем является правильная интерпретация наблюдаемых профилей линий поглощения в спектрах оптических компаньонов и кривых лучевых скоростей. От этого, в первую очередь, зависит корректность определения масс компаньонов в двойных системах, а, следовательно, и возможных эволюционных сценариев, связанных с формированием таких систем.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 129 страниц и включает 38 рисунков, 35 таблиц, а также список литературы из 123 наименований.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, приведен обзор научной литературы, сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, и обоснована их достоверность, а также указаны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

Первая глава работы посвящена построению таблиц К-поправок на основе прямых расчетов кривых лучевых скоростей звезд. В главе приводится описание методики вычисления К-поправок и построения теоретических кривых лучевых скоростей в модели Роша на основании синтеза профиля линии поглощения. Для расчетов были использованы два алгоритма: более простой, с использованием известных таблиц Куруца, и усложненная версия, в которой локальный профиль линии для элементарной площадки вычисляется путем построения модели атмосферы в данной точке поверхности звезды. Было показано, что значения К-поправки существенно зависят от отношения масс компаньонов в системе  $q$ , коэффициента гравитационного потемнения  $\beta$ , и степени прогрева нормальной звезды

рентгеновским излучением компактного объекта. Кроме того, обнаружено, что полуамплитуда кривой лучевых скоростей звезды в модели Роша, и полуамплитуда кривой лучевых скоростей центра масс звезды могут существенно отличаться, что влияет на определение массы релятивистского компонента. Построены таблицы К-поправок для разных видов рентгеновских двойных систем, получены оценки на максимальную величину ошибки определения массы в модели материальных точек.

Во второй главе рассматривается влияние систематических неточностей разных методов определения вращательного уширения линий поглощения, регистрируемых в спектрах оптических звезд в маломассивных двойных системах, на определение масс самих звезд. В частности, были рассмотрены два метода: упрощенный метод, в котором звезда аппроксимируется плоским круглым диском, и более сложный подход, при котором звезда аппроксимируется сферой, объем которой равен объему полости Роша. В результате показано, что оба метода аппроксимации дают заниженные значения отношения масс  $q$ , причем это занижение особенно велико для широко используемой простой модели звезды в виде диска. Для обоих методов получены формулы, связывающие величину поправки  $\Delta q$  с приближенно определяемым значением  $q$ . В главе также проведены точные расчеты искаженного эффектами взаимной близости профиля линии Ca I 6439A в спектре оптической звезды маломассивной рентгеновской двойной системы, которые позволили получить аппроксимирующие формулы, которые связывают величину вращательного уширения линий поглощения в спектре оптической звезды с величиной отношения масс  $q$  при различной мощности рентгеновского прогрева.

Третья глава посвящена расчетам значений К-поправок для известных массивных рентгеновских двойных систем, в результате чего были получены новые оценки масс компактных объектов в этих системах.

В четвертой главе, с использованием результатов главы 2, уточняются оценки масс оптических компонентов и черных дыр для девяти маломассивных рентгеновских двойных систем с черными дырами. Кроме того показано, что учет погрешности при определении в модели звезды как круглого диска с постоянным локальным профилем и линейным законом потемнения к краю приводит к уменьшению массы оптического компонента. Масса черной дыры при этом практически не изменяется. В результате итоговое распределение масс оптических компонентов, определенных с использованием уточняющих методик и подходов, имеет максимум вблизи значения  $\approx 0.35M_{\odot}$ , а не  $0.6 M_{\odot}$ , как считалось ранее на основе модели звезды в виде круглого диска с постоянным локальным профилем линии и линейным законом потемнения диска к краю.

В пятой главе проведено моделирование распределения масс компактных объектов для 20 рентгеновских двойных систем. Для получения параметров итогового распределения использованы методы непараметрической статистики. В результате было показано, что так называемый «провал масс» компактных объектов в диапазоне  $3-5M_{\odot}$  является статистически значимым, а само наблюдаемое

распределение плотности вероятности масс является устойчивым относительно единичного засорения данных.

В Заключение кратко сформулированы полученные результаты.

Как было отмечено выше, корректность определения масс компаньонов в двойных системах является чрезвычайно важной и актуальной задачей современной астрофизики, в том числе и потому, что от этого зависят возможные эволюционные сценарии, связанные с формированием таких систем. В представленной работе сделан существенный шаг в решении этой задачи. В частности, разработан метод использования К-поправок для учета эффектов близости компаньонов; получены поправки к величине отношения масс при моделировании звезды равнообъемной сферой или диском; проведено моделирование масс оптических звезд и черных дыр, показавшее, что корректный учет деформации формы звезды приводит к значительному уменьшению массы оптического компаньона, что, в свою очередь, приводит к смещению максимума распределения масс оптических компаньонов в сторону их уменьшения. Полученные результаты приводят к еще большему расхождению, по сравнению с предыдущими измерениями, с предсказаниями популяционного синтеза, и поднимают вопросы, связанные с моделями происхождения и эволюции маломассивных двойных систем. Важно отметить, что в работе уже высказаны некоторые идеи, позволяющие согласовать теорию с новыми результатами.

В представленной работе получены новые, значимые результаты, как с наблюдательной точки зрения, так и в приложении к теории эволюции двойных систем. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в рецензируемых журналах, в 5 из 7 статей соискатель является первым автором.

У оппонента есть несколько небольших замечаний и вопросов к диссертации.

В главе 1 при рассмотрении массивных рентгеновских двойных систем характерная величина орбитального периода взята равной 1 дн (Таблица 1). В то же время известно, что орбитальные периоды в таких системах, как правило, длиннее – от нескольких дней до десятков дней. Изменяются ли и если да, то как, полученные выводы, если орбитальный период будет равен 5 дн? Кстати, именно такое значение периода было в дальнейшем использовано для расчетов маломассивных систем (см., например, таблицу 13).

Из рис.8 видно, что поведение К-поправки для массивных двойных систем сильно зависит от степени заполнения полости Роша, причем кардинальные отличия уже наблюдаются при ее изменении от 1.0 к 0.95 и далее. Считается, что в большинстве массивных рентгеновских двойных систем оптическая звезда недозаполняет полость Роша (исключение составляют LMCX-4, SMCX-1, Cen X-3 и т.д.). Каким образом изменится относительная недооценка массы релятивистского компаньона, если

степень заполнения полости Роша будет 0.85-0.9? Как это повлияет на выводы главы 3?

Стр.32. Каковы остальные параметры двойных систем, используемых в модельных расчетах? В частности, орбитальный период, эксцентриситет и т.д.

Глава 3. Системы LMC X-4 и Cen X-3 не относятся к сверхгигантам, звезды компаньоны в них имеют спектральные классы гигантов.

Таблица 17 на стр.71. Указано неправильное значение орбитального периода системы 4U1538-52.

Таблица 18. Новые значения масс нейтронных звезд весьма сильно отличаются от определенных другими, разными методами (см., например, Масон и др. 2011; Фаланга и др. 2015). Было бы желательно более подробно остановиться на причинах таких различий, а также привести ошибки на полученные величины К-поправок и соответствующих масс.

На рис.27 для наглядности и сравнения было бы желательно привести гистограмму распределения масс оптических звезд, полученные ранее, без учета эффектов взаимной близости компонентов.

Глава 4., стр. 94. Возможно ли оценить вероятность рождения и последующей эволюции такой тройной системы? В подборке из 9 рассматриваемых объектов 8 должны относиться к такому классу объектов.

В диссертации также присутствуют опечатки.

Вместе с тем, необходимо отметить, что указанные замечания не являются существенными и никак не влияют на высокое научное значение диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия, а ее автор **Петров Владислав Сергеевич**, заслуживает присвоения ему степени кандидата физико-математических наук.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Заведующий лабораторией релятивистских компактных объектов

и рентгеновской навигации отдела астрофизики

высоких энергий ФГБУН Институт космических

исследований Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН

А.А.Лутовинов

Почтовый адрес: 117997 Москва,  
ул. Профсоюзная 84/32,  
ФГБУН Институт космических  
исследований Российской академии наук  
Телефон: 495 3332222  
Электронный адрес: aal@iki.rssi.ru

Отзыв заверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН,  
доктор физико-математических наук



А.В. Захаров

22 февраля 2017 г.