

**ОТЗЫВ официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук Антохина Игоря Ивановича на тему
«Горячие массивные звезды в двойных системах»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Массивные звезды играли и продолжают играть важнейшую роль в истории Вселенной, обогащая ее тяжелыми элементами в результате вспышек сверхновых и приводя к образованию релятивистских компактных объектов, таких как нейтронные звезды и черные дыры; они оказывают ключевое влияние на химическую эволюцию родительских галактик; столкновения мощнейших звездных ветров от таких объектов (прежде всего звезд класса O и WR) в двойных системах могут приводить к формированию жесткого рентгеновского излучения. В результате эволюции двойных систем с массивными звездами могут образовываться рентгеновские двойные системы с нейтронными звездами и черными дырами, являющиеся по сути природными лабораториями по исследованию взаимодействия плазмы с излучением в условиях сильнейших гравитационных и магнитных полей, при экстремальных температурах и гравитации, недостижимых в земных условиях. Наконец, эволюция таких систем может приводить к образованию двойных черных дыр, нейтронных звезд или пар черная дыра-нейтронная звезда, которые в результате слияния генерируют гравитационные волны и, в ряде случаев, короткие гамма-всплески. Таким образом, исследование качественных и количественных характеристик таких объектов, построение моделей, объясняющих их наблюдательные проявления, **безусловно, является актуальной задачей.**

Необходимо отметить, что актуальность тематики диссертации обуславливает и значительное количество исследований и публикаций, связанных с ее темой. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, остается значительное количество нерешенных проблем в рассматриваемой области. В частности, вопросы применимости «простого» закона, определяющего

кинематику ветра, вопросы корректного учета неоднородностей ветра и создания его полноценной трехмерной газодинамической модели требуют решения. Не менее важными и актуальными являются вопросы, связанные со столкновениями ветров, особенно в тесных системах, вопросы экстраполяции результатов моделирования сталкивающихся ветров в двойных системах на молодые звездные скопления, которые излучают не только в рентгеновском диапазоне, но и на энергиях вплоть до ГэВ и ТэВ, а также являются источниками космических лучей. Помимо исследования и изучения массивных звезд в целом как популяции, имеется целый ряд нерешенных проблем с пониманием физических механизмов формирования излучения и определении параметров конкретных массивных систем, в частности, уникальной системы Лебедь X-3. Поиску ответов на некоторые из этих вопросов и посвящена настоящая диссертация.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений и списка литературы. Объем диссертации составляет 337 страниц и включает 105 рисунков, 33 таблицы, а также список литературы из 364 наименования.

Во Введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены основные результаты, выносимые на защиту, и обоснована их научная новизна и достоверность, представлена информация о методологии и методах проведенного исследования, а также указаны сведения об апробации работы и публикациях по теме диссертации.

В главе 1 представлены параметрические и непараметрические методы решения для кривых блеска двойных систем с массивными горячими звездами ранних спектральных классов, такими как WR и O. В части непараметрических методов предложены новые методы решения добавления новых наборов априорных ограничений на неизвестную функцию. Важно отметить, что полученные варианты решений объединены в единый метод. Параметрический метод предложен в двух вариантах – не только для широких двойных систем, как обычно делалось другими авторами, но и для

тесных систем с приливно-деформированными компонентами. Хотелось бы отметить общую доступность разработанных кодов и библиотек.

Во второй главе приводятся результаты применения разработанных и описанных в первой главе методов к описанию и решению кривых блеска трех массивных двойных систем с WR и O звездами (V444Cyg, WR22, BAT99-129). В результате применения разработанных в диссертации методов определены параметры компонент двойных систем и звездного ветра звезд WR. В частности, для системы WR22 однозначно удалось определить класс светимости O компоненты, а также наклонение системы. На примере системы V444Cyg было показано, что «простой» β -закон не является хорошей аппроксимацией для ветра WR звезд. Оптических и рентгеновски

Третья глава посвящена сравнительному анализу наблюдаемых оптических и рентгеновских свойств одиночных и двойных звезд ранних спектральных классов, в том числе десятков таких звезд в ассоциации Carina OB1. Автором обращено внимание, что в среднем, эти характеристики не сильно отличаются у одиночных и двойных звезд данных спектральных классов.

В главе 4 представлена модель столкновения ветров в двойных системах с WR и O звездами. Модель представляет большой интерес, так как с одной стороны она более физична, чем стандартные модели, используемые в пакете XSPEC, а с другой стороны, за счет некоторых упрощающих предположений, она позволяет достаточно быстро и эффективно описывать наблюдаемые данные.

Глава 5 посвящена анализу инфракрасных и рентгеновских наблюдений известного микроквара Cyg X-3. Несмотря на долгую историю исследований этого уникального источника, все еще остается много вопросов и о природе компактного объекта в системе, и о ее параметрах и о физических моделях, позволяющих объяснить наблюдаемые характеристики. В результате подробного и достаточно кропотливого исследования, проведенного диссертантом, удалось показать, что в долговременных

изменениях орбитального периода присутствует синусоидальная компонента, которая может быть связана либо с наличием в системе третьего тела, либо с движением линии апсид. Кроме того, на основе совместного анализа кривых блеска в рентгеновском и ИК диапазонах было показано присутствие в системе компактного ИК-источника. Хотелось бы отметить особую тщательность диссертанта, проявленную при анализе наблюдательных данных, и применение метода «бутстрап», позволившего обеспечить корректную оценку погрешностей.

В Заключение сформулированы полученные результатов и перспективы дальнейших исследований.

Основные результаты диссертации являются оригинальными, их научная новизна определяется не только новыми теоретическими подходами и моделями, но и использованием ранее неопубликованных данных наблюдений, в том числе, полученных на новом российском 2.5-метровом телескопе КГО МГУ. Выносимые на защиту положения хорошо обоснованы, достоверны и значимы для понимания эволюции массивных двойных систем и физических процессов, протекающих в таких объектах. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах и конференциях высокого уровня (российских и международных), опубликованы в высокорейтинговых научных журналах. Еще одним достоинством диссертации является хороший и понятный стиль изложения материала и минимальное количество опечаток.

У оппонента есть несколько замечаний и вопросов к диссертации:

1) В положении 4 сказано, что закон изменения скорости может качественно отличаться от стандартного β -закона. Однако о таком факте уже упоминалось в целом ряде работ, о чем автор честно пишет и в автореферате и в диссертации. Хотелось бы более четкой формулировки, которая бы отражала новизну результата.

2) В разделе Теоретическая и практическая значимость указана возможность использования разработанных автором моделей не только для астрономии. В каких областях уже применяются разработанные модели?

3) В каких единицах выражены температуры в таблице 3.3? В ней указаны мК (миллиК?)

4) В главах 3 и 4 при исследовании рентгеновских свойств одиночных и двойных звезд спектральных классов для учета межзвездного поглощения используется устаревшая модель wabs. Представляется разумным использовать более современную модель tbabs, в которую включены обновленные величины сечений взаимодействия, а также обилия. Принимая во внимание, что в работе модель wabs используется не только для описания межзвездного поглощения, но и локального для разных компонент излучения, использование обновленной модели может привести к изменению результатов моделирования. По крайней мере, было бы желательно это проверить на примере 2-3 объектов.

5) В той же главе 3 для определения светимостей источников используются расстояния из работ разных авторов, которые были опубликованы достаточно давно, и иногда разные для одних и тех же объектов (например, для звезды WR25 на стр. 129 указано расстояние 2.6 кпс, а на стр. 134 3.24 кпс). Принимая во внимание успешную работу обсерватории Гайя и новые каталоги звезд и расстояний до них, было бы разумно пересчитать светимости с использованием новых данных.

6) Возможно ли встроить разработанную модель столкновения ветров в двойных системах с массивными компаньонами в пакет XSPEC?

7) Представляется интересным и полезным попытаться применить разработанную модель столкновения ветров для объяснения наблюдаемого излучения молодых звездных скоплений типа Вестерлунд 1 или Вестерлунд 2, от которых регистрируется не только рентгеновское излучение, но и жесткое гамма-излучение на энергиях вплоть до ГэВ и ТэВ.

8) Недавно появились новые результаты исследований источника Суг Х-3, полученные по данным обсерватории IXPE, позволившие определить поляризацию рентгеновского излучения и предложить новую модель формирования рентгеновского излучения в системе. Насколько эти данные согласуются с результатами, представленными в диссертации, например, параметрами системы? Кроме того, возможно ли объяснение природы компактного ИК источника?

9) Несмотря на отмеченный выше хороший стиль изложения, у оппонента есть несколько небольших замечаний по оформлению диссертации: ссылки на работы даны то на русском, то на английском языке; присутствуют жаргонизмы, являющиеся транскрипцией терминов с английского языка, такие как «блоб», «симулированная кривая блеска», «симулированная модель»; некоторые рисунки сложно читаемы, в том числе из-за отсутствия буквенных обозначений на панелях (например, рис.2.1., справа); имеется несколько опечаток, а на стр.31 присутствует английский союз «and».

10) С точки зрения оппонента параграф Содержание диссертации в автореферате слишком краток. Все-таки желательно представлять более детальное описание, включая несколько ключевых рисунков.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,

на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Антохин Игорь Иванович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
заместитель директора по научной работе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований РАН»
(ИКИ РАН), заведующий отделом астрофизики высоких энергий,
Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт
космических исследований РАН» (ИКИ РАН)

Лутовинов Александр Анатольевич

30.08.2024

Контактные данные:

тел.: +7(495)3332222, e-mail: aal@iki.rssi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Адрес места работы:

117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН
Тел.: +74953332588; e-mail: iki@cosmos.ru

Подпись сотрудника Института космических
исследований РАН Лутовинова удостоверяю:

Ученый секретарь ИКИ РАН

А.М.Садовский

30.08.2024