

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

Диссертация И.И.Антохина посвящена изучению звезд главной последовательности спектральных классов O и звезд Вольфа-Райе (WR). Отличительной особенностью этих объектов является интенсивная потеря массы в виде звездного ветра, что в значительной мере определяет их эволюцию. Свою жизнь эти массивные звезды заканчивают вспышкой сверхновой, но что останется после вспышки — нейтронная звезда, или черная дыра — зависит от массы предсверхновой, т.е. от того, какая доля массы будет потеряна звездой в процессе эволюции. Для решения этой проблемы необходимо в деталях понимать механизм потери массы массивными звездами, или, по крайней мере, уметь надежно определять темп потери массы из наблюдений. Однако из-за нестационарности ветров, их структурной неоднородности, а также по ряду других причин, о которых подробно сказано во Введении диссертации, решение этих задач продвигается очень медленно. Кроме того, у звезд Вольфа-Райе ветер настолько мощный, что фотосфера находится внутри него, вследствие чего параметры центральной звезды определяются с большой ошибкой. Из сказанного следует, что исследования диссертанта, направленные на решение проблем, связанных с определением структуры ветра и параметров горячих звезд весьма актуальны.

Сразу скажу, что я весьма высоко оцениваю диссертацию И.И. Антохина. Мне очень понравилась основная идея диссертации использовать спутник звезд Вольфа-Райе в качестве пробного тела, сканирующего ветер WR. Для реализации этой идеи диссертант тщательно изучил фотометрические наблюдения нескольких двойных систем WR+O и O+O, используя для

анализа разработанный им эффективный алгоритм решения интегрального уравнения Фредгольма первого типа и интегрального уравнения Абеля при весьма общих ограничениях на искомую функцию. Кроме того, автором разработана параметрическая модель и реализован в виде программного комплекса соответствующий алгоритм решения кривых блеска двойных систем. Все это позволило, в частности, надежно установить, что закон изменения скорости ветра звезд WR может качественно отличаться от стандартного β -закона. Согласен с диссертантом, что этот вывод принципиально важен для разработки теории звездных ветров горячих звезд. При этом особо отмечу два обстоятельства: во-первых, основная часть использованных для анализа наблюдательных данных была получена и обработана самим диссертантом, а, во-вторых, созданный им пакет программ оказался востребованным и в других областях науки.

Критический подход к отбору наблюдательного материала, полученного и обработанного при непосредственном участии диссертанта, позволил Антохину впервые сделать надежный вывод о том, что в рентгеновском диапазоне светимость и жесткость спектров двойных систем с компонентами ранних спектральных типов в среднем такая же, как и у одиночных звезд (Глава 3). Обсуждение возможных причин этого феномена показалось мне весьма интересным, и показало хорошее знакомство диссертанта с современными идеями физики ветра горячих звезд. Положительное впечатление у меня осталось и от Главы 4, в которой предложена сравнительно простая модель столкновения ветров, которую разумно использовать при анализе рентгеновских спектров двойных систем WR+O и O+O.

Тщательный подход к достоверности и анализу наблюдательных данных позволили И.И. Антохину показать, что в изменении орбитального периода двойной системы WR+c Cyg X-3, помимо постоянного члена, присутствует синусоидальная составляющая, вероятно, связанная либо с движением линии апсид, либо с наличием третьего маломассивного компонента. Приятно отметить, что вывод о наличии в этой уникальной

системе компактного источника инфракрасного излучения получен диссертантом на основе его наблюдений на 2.5 м телескопе КГО ГАИШ МГУ.

В Заключении автор обсуждает направления дальнейшей разработки проблем, рассмотренных в диссертации. Из соответствующего текста (стр. 294-297) я делаю вывод о том, что автор не собирается останавливаться на достигнутом, причем, разработанные им методы и полученные результаты открывают новые перспективы и направления в исследовании горячих массивных звезд.

В этой связи, в качестве пожелания на будущее, хотел бы обратить внимание на следующее. При расчете наблюдаемого рентгеновского спектра в модели столкновения звездных ветров (§4.1) автор учитывает поглощение излучения ударной волны в веществе ветра, не интересуясь, однако, судьбой поглощенного излучения, отмечая лишь, что оно будет нагревать и ионизовать вещество ветра — т. н. эффект «теплого поглощения» (стр. 198), учитываемый Антохиным при расчете наблюдаемого спектра. Между тем это «избыточное тепло» будет переизлучаться, причем, в основном, в линиях, что за счет эффекта Доплера приведет к периодическому изменению (с орбитальным периодом) профилей этих линий. Нельзя ли этот эффект наблюдать и использовать для диагностики ветра, например, используя данные с будущей обсерватории «Спектр-УФ»?

Завершая обзор научного содержания диссертации считаю нужным сказать, что автор в ней продемонстрировал высокую квалификацию и как астрофизик-теоретик и как программист. При этом на меня произвела сильное впечатление тщательность выполненного диссертантом анализа своих и чужих наблюдений, а также использование статистических критериев для оценки надежности моделей (гипотез), построенных на их основе. Выше-сказанное, а также детальное сравнение с результатами работ других авторов убеждают меня в достоверности вынесенных на защиту положений, которые, несомненно, являются новыми и нетривиальными.

Пять из 19 статей Антохина по теме диссертации опубликованы в *Астрономическом журнале*, а остальные — в высокоимпактных зарубежных журналах. Материалы диссертации также неоднократно докладывались на престижных конференциях и публиковались в материалах этих конференций. Судя по данным ADS результаты работы диссертанта хорошо известны и востребованы как в нашей стране, так и за рубежом: общее число ссылок на публикации Антохина — чуть больше тысячи, а индекс Хирша — 18. Кстати сказать, из-за необходимости перевода большого числа англоязычных публикаций на русский язык Игорь Иванович, по-видимому, воспользовался услугами интернет-переводчика, что привело к появлению в тексте диссертации выражений «открытые скопления» (open clusters) и «спектральные типы» (spectral types). Странно, что автор не заметил этих дефектов перевода, поскольку к оформлению диссертации он отнесся весьма ответственно: в тексте объемом более 300 страниц практически нет опечаток и/или стилистических погрешностей. Приятно отметить, что таблицы, иллюстрации, а также Приложения А и Б в полной мере дополняют основной текст. Единственное серьезное замечание, связанное с оформлением, — автор почти всегда называет штриховые линии пунктирными, а на стр.189 вообще написано: «Линейные аппроксимации ... показаны на Рис. 3.23 пунктирными и точечными прямыми соответственно.»

У меня нет никаких сомнений, что 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 безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник (ученое звание),
ведущий научный сотрудник
Лаборатории новых фотометрических методов
Государственного астрономического
института имени П. К. Штернберга
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский государственный
университет имени М.В.Ломоносова»

ЛАМЗИН Сергей Анатольевич

02 сентября 2024 года

Контактные данные:

тел.: +7-495-939-16-63, e-mail: lamzin@sai.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 01.03.02 - Астрофизика и звездная астрономия

Адрес места работы:

119234, г. Москва, Университетский проспект, д.13, ГАИШ МГУ

Тел.: +7-495-939-28-58; e-mail: director@sai.msu.ru

Подпись сотрудника МГУ С. А. Ламзина удостоверяю: