

Заключение диссертационного совета МГУ.013.1

по диссертации на соискание ученой степени доктора наук

Решение диссертационного совета от «19» сентября 2024 года № 41

О присуждении Антохину Игорю Ивановичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Горячие массивные звезды в двойных системах» по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия принята к защите диссертационным советом 20.06.2024, протокол № 38.

Соискатель Антохин, 1958 года рождения, в 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Исследование звезд Вольфа-Райе с возможными релятивистскими спутниками» в диссертационном совете К 053.05.26 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Соискатель работает в должности старшего научного сотрудника в отделе звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Диссертация выполнена в отделе звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Научный консультант:

— Черепашук Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН, заведующий отделом звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Официальные оппоненты:

— Бикмаев Ильфан Фяритович доктор физико-математических наук, доцент, академик Академии наук республики Татарстан, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории астрофотометрии и звездных атмосфер Института физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»;

— Ламзин Сергей Анатольевич 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»;

— Лутовинов Александр Анатольевич доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт космических исследований Российской академии наук» (ИКИ РАН);

дали положительные отзывы на диссертацию.

Дополнительных отзывов не поступало.

Соискатель имеет 28 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 28 работ, из них 19 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности. В 10 статьях (в рекомендованных изданиях) вклад соискателя составлял 70-100%, в 2 статьях 50%, в 7 статьях 10-40%:

1. Антохина Э. А., Антохин И. И. Определение параметров тесных двойных систем методами синтеза: от белых карликов до звезд Вольфа-Райе и черных дыр // *Астрономический журнал*. 2023. Т. 100, № 9. С. 772-784. Переводная версия: Antokhina E. A., Antokhin I. I. Determination of the Close Binary Systems Parameters by Synthesis Methods: from White Dwarfs to Wolf-Rayet Stars and Black Holes // *Astronomy Reports*. 2023. Vol. 67, no. 9. P. 876–887. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 40%. Объем 1.44 печатных листа.

2. Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M., Antokhina E. A., Tatarnikov A. M. Near-IR and X-Ray Variability of Cyg X-3: Evidence for a Compact IR Source and Complex Wind Structures // *The Astrophysical Journal*. 2022. Vol. 926, no. 2. article id. 123. 21 pp. Web of Science JIF2023=4.8. Личный вклад 80%. Объем 2.52 печатных листа.

3. Lenoir-Craig G., Antokhin I. I., Antokhina E. A., St-Louis N., Moffat A. F. J. On the nature of the single eclipse per 80d orbit of the H-rich luminous WN star WR22 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022. Vol. 510, no. 1. P. 246–259. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 40%. Объем 1.68 печатных листа.

4. Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M. The Period Change of Cyg X-3 // *The Astrophysical Journal*. 2019. Vol. 871, no. 2. article id. 244. 7 pp. Web of Science JIF2023=4.8. Личный вклад 90%. Объем 0.84 печатных листа.

5. Antokhin I. I. An efficient and flexible Abel-inversion method for noisy data // *Monthly Notices of*

the Royal Astronomical Society. 2016. Vol. 463, no. 2. P. 2079–2084. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 100%. Объем 0.72 печатных листа.

6. Antokhin I. I. Solving light curves of WR+O binaries by Tikhonov's regularization method // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2012. Vol. 420, no. 1. P. 495–504. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 100%. Объем 1.20 печатных листа.

7. Gosset E., De Becker M., Nazé Y., Carpano S., Rauw G., Antokhin I. I., Vreux J. M., Pollock A. M. T. XMM-Newton observation of the enigmatic object WR 46 // Astronomy & Astrophysics. 2011. Vol. 527. id. A66. 14 pp. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 20%. Объем 1.68 печатных листа.

8. Antokhin I. I., Rauw G., Vreux J. M., van der Hucht K. A., Brown J. C. XMM-Newton X-ray study of early type stars in the Carina OB1 association // Astronomy & Astrophysics. 2008. Vol. 477, no. 2. P. 593–609. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 90%. Объем 2.04 печатных листа.

9. Антохин И. И., Черепашук А. М. Затменная двойная система WN3(h)+O5V BAT99-129: Анализ кривой блеска МАСНО и характеристики компонент // Астрономический журнал. 2007. Т. 84, № 6. С. 542-556. Переводная версия: Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M. The eclipsing WN3(h)+O5V binary BAT99-129: Light curve analysis and parameters of its components // Astronomy Reports. 2007. Vol. 51, no. 6. P. 486–499. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.68 печатных листа.

10. Nazé Y., Antokhin I. I., Sana H., Gosset E., Rauw G. Optical spectroscopy of X-Mega targets - V. The spectroscopic binary HD 93161 A and its visual companion HD 93161 B // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2005. Vol. 359, no. 2. P. 688–698. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 40%. Объем 1.32 печатных листа.

11. Antokhin I. I., Owocki S. P., Brown J. C. A Steady, Radiative-Shock Method for Computing X-Ray Emission from Colliding Stellar Winds in Close, Massive-Star Binaries // The Astrophysical Journal. 2004. Vol. 611, no. 1. P. 434–451. Web of Science JIF2023=4.8. Личный вклад 70%. Объем 2.16 печатных листа.

12. De Becker M., Rauw G., Pittard J. M., Antokhin I. I., Stevens I. R., Gosset E., Owocki S. P. An XMM-Newton observation of the massive binary HD 159176 // Astronomy & Astrophysics. 2004. Vol. 416. P. 221–233. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 15%. Объем 1.56 печатных листа.

13. Raassen A. J. J., van der Hucht K. A., Mewe R., Antokhin I. I., Rauw G., Vreux J. M., Schmutz W., Güdel M. XMM-Newton high-resolution X-ray spectroscopy of the Wolf-Rayet object WR 25 in

the Carina OB1 association // *Astronomy & Astrophysics*. 2003b. Vol. 402. P. 653–666. Web of Science JIF2023=5.4. Личный вклад 50%. Объем 1.68 печатных листа.

14. Rauw G., Sana H., Antokhin I. I., Morrell N. I., Niemela V. S., Albacete Colombo J. F., Gosset E., Vreux J. M. Optical spectroscopy of XMEGA targets in the Carina Nebula - III. The multiple system Tr 16-104 (\equiv CPD -59° 2603) // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2001. Vol. 326, no. 3. P. 1149–1160. Web of Science JIF2023=4.7. Личный вклад 15%. Объем 1.44 печатных листа.

15. Антохин И. И., Черепашук А. М. Интерпретация кривой блеска затменной двойной системы V444 Cyg на множестве выпукло-вогнутых функций // *Астрономический журнал*. 2001. Т. 78, № 5. С. 432-443. Переводная версия: Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M. Interpretation of the Light Curve of the Eclipsing Binary V444 Cyg on the Set of Convexo-Concave Functions // *Astronomy Reports*. 2001a. Vol. 45, no. 5. P. 371–381. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.32 печатных листа.

16. Антохин И. И., Черепашук А. М. Поле скоростей в ветре звезды Вольфа-Райе в затменной системе V444 Cyg: Параметрическая модель // *Астрономический журнал*. 2001. Т. 78, № 4. С. 313-326. Переводная версия: Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M. Velocity Field of the Stellar Wind of the Wolf-Rayet Star in the V 444 Cyg Binary System: A Parametric Model // *Astronomy Reports*. 2001b. Vol. 45, no. 4. P. 269–280. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 80%. Объем 1.44 печатных листа.

17. Lépine S., Moffat A. F. J., St-Louis N., Marchenko S. V., Dalton M. J., Crowther P. A., Smith L. J., Willis A. J., Antokhin I. I., Tovmassian G. H. Wind Inhomogeneities in Wolf-Rayet Stars. IV. Using Clumps to Probe the Wind Structure in the WC8 Star HD 192103 // *The Astronomical Journal*. 2000. Vol. 120, no. 6. P. 3201–3217. Web of Science JIF2023=5.1. Личный вклад 10%. Объем 2.04 печатных листа.

18. Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M., Yagola A. G. Velocity Law in the Extended Photosphere of the WN5 Star in the Eclipsing Binary V444 Cygni // *Astrophysics and Space Science*. 1997. Vol. 254, no. 1. P. 111–131. Web of Science JIF2023=1.8. Личный вклад 80%. Объем 2.52 печатных листа.

19. Антохин И. И., Черепашук А. М. UBV фотометрия комплекса Eta Carina в 1980 и 1991 гг. // *Астрономический журнал*. 1993. Т. 70. С. 292-306. Переводная версия: Antokhin I. I., Cherepashchuk A. M. UBV photometry of the η Carinae complex in 1980 and 1991 // *Astronomy Reports*. 1993. Vol. 37, no. 2. P. 152–158. Web of Science JIF2023=1.1. Личный вклад 50%. Объем 0.84 печатных листа.

Выбор официальных оппонентов обосновывался их высокой квалификацией, опытом работы в области физики космоса и астрономии, а также значительным количеством публикаций по теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что в работе исследуются качественные и количественные характеристики горячих массивных звезд ранних спектральных типов, а также процессы, протекающие в двойных системах, включающих такие звезды. Созданы эффективные параметрические и непараметрические методы решения кривых блеска двойных систем с компонентами Вольфа-Райе (WR) и O. Эти методы применены к анализу кривых блеска нескольких систем, определены их параметры, сделаны качественные выводы о законе изменения скорости в ветре компоненты WR. С использованием оптических и рентгеновских данных проведены исследования наблюдательных свойств большого числа одиночных и массивных звезд ранних спектральных типов. Определены рентгеновские светимости, характерные температуры плазмы, излучающей в рентгеновском диапазоне, получены данные о рентгеновской переменности. Проведено сравнение отношения рентгеновской и болометрической светимостей для большого числа одиночных и двойных звезд. Разработана стационарная модель столкновения звездных ветров в двойных системах WR+O и O+O, позволяющая рассчитывать теоретические рентгеновские спектры и кривые блеска. Модель использована при анализе рентгеновских наблюдений двойной системы HD 159176. Выяснены причины изменения орбитального периода уникальной системы Cyg X-3, состоящей из звезды WR и релятивистского объекта. Показано, что помимо постоянного изменения периода из-за потери углового момента в ветре компоненты WR, в изменениях периода присутствует синусоидальная составляющая. Объяснена ее природа. С использованием специально разработанной для Cyg X-3 модели системы проанализированы ее рентгеновские и инфракрасные кривые блеска. Доказано, что в системе существуют сложные структуры, объясняющие наблюдаемую переменность, определены параметры этих структур, а также скорость потери массы в ветре компоненты WR и вероятная масса релятивистского объекта..

Диссертация представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Положения, выносимые на защиту, содержат новые научные результаты и свидетельствуют о личном вкладе автора в науку:

1. Непараметрический алгоритм решения интегральных уравнений Фредгольма и Абеля первого рода позволяет находить неизвестную функцию, используя априорные ограничения, условия гладкости (регуляризация Тихонова), или любую их комбинацию. Созданная на основе него компьютерная программа позволяет решать кривые блеска двойных систем WR+O и O+O.

2. Параметрический алгоритм учета ветра одной из компонент двойной системы позволяет решать кривые блеска двойных систем WR+O и O+O в двух вариантах: для широких двойных систем с шарообразными компонентами и для тесных двойных систем, в которых форма компонент вычисляется в модели Роша. Параллельное использование параметрического и непараметрического анализа позволяет оценить надежность получаемых результатов.
3. Стационарная модель столкновения звездных ветров в двойных системах позволяет вычислять теоретические рентгеновские спектры и кривые блеска систем WR+O и O+O.
4. Согласно решениям кривых блеска ряда двойных систем WR+O с использованием параметрической и непараметрической моделей, скорость ветра звезд WR может увеличиваться наружу заметно медленнее, чем это общепринято; кроме того, закон изменения скорости может качественно отличаться от стандартного β -закона.

На заседании 19 сентября 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Антохину Игорю Ивановичу ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 27 человек, из них 27 докторов наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (отрасль наук — физико-математические), участвовавших в заседании, из 30 человек, входящих в состав совета по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия, проголосовали: за – 27, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель диссертационного совета

К. А. Постнов

Ученый секретарь диссертационного совета

А. И. Богомазов

19 сентября 2024 года