

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук Рыспаевой Елизаветы Борисовны

на тему: «Механизмы формирования рентгеновского излучения звезд

ранних спектральных классов»

по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Актуальность темы диссертации.

Исследование процессов формирования рентгеновского излучения массивных звезд является актуальным по ряду причин. Во-первых, в настоящее время механизмы формирования рентгеновского излучения OB звезд изучены недостаточно, не существует единой теории, объясняющей его происхождение у всех OB звезд. Во-вторых, объяснение процессов, происходящих в фотосферах и ветрах звезд спектральных классов O и B и генерирующих их рентгеновское излучение, важно для понимания механизмов нагрева и охлаждения плазмы в ветрах звезд, обладающих мощными звездными ветрами. В-третьих, изучение возможного нетеплового рентгеновского излучения ранних звезд может пролить свет на детали механизмов ускорения электронов, протонов и других заряженных частиц и, тем самым, на процессы формирования космических лучей. Важной и мало изученной проблемой является также исследование влияния рентгеновского излучения OB звезд на их оптические спектры.

Общая характеристика диссертации.

В диссертационной работе Е. Б. Рыспаевой проанализированы гипотезы формирования рентгеновского излучения OB звезд на большом количестве объектов. С этой целью был осуществлен новый независимый анализ архивных наблюдений 102 OB звезд, полученных на орбитальной обсерватории «XMM-Newton». Были извлечены спектры высокого разрешения спектрографов RGS и спектры низкого разрешения из снимков, сделанных камерой EPIC (оба прибора установлены на спутнике). Проверены три возможных следствия из модели

ударной волны в звездном ветре, ограниченной магнитным полем (Magnetic confined wind shock model, MCWS). Установлено, что не все из этих следствий выполняются, что может указывать на присутствие в спектрах ОВ звезд дополнительных механизмов образования рентгеновского излучения. Важным выводом диссертации является заключение об отсутствии значимой корреляции между характеристиками рентгеновского излучения ОВ звезд и напряженностью их магнитных полей.

Аппроксимации спектров низкого разрешения, полученных с камеры EPIC, моделями излучения горячей плазмы, ионизация в которой поддерживается столкновениями с электронами, показали, что в спектрах ряда звезд действительно присутствует дополнительный компонент, возможно имеющий нетепловую природу. В связи с этим были проверены две гипотезы о нетепловом рентгеновском излучении ОВ звезд: модель Chen & White (1991), согласно которой рентгеновское излучение ОВ звезд с энергиями больше 2 кэВ имеет нетепловую природу и формируется в результате обратного комптоновского рассеяния ультрафиолетовых фотонов на релятивистских электронах, ускоренных ударными механизмами вблизи поверхности звезды; модель Leto et al. (2017), в рамках которой ОВ звезды с сильным магнитным полем могут генерировать нетепловое рентгеновское излучение в результате тормозного излучения нетепловых электронов. Было установлено, что гипотеза Chen & White (1991) подтверждается лишь для звезд – аналогов пекулярной звезды γ Cas.

Дополнительно в диссертации была выполнена проверка «парадигмы» Pollock (2007) о формировании рентгеновского излучения О звезд. Для этого были проанализированы звездные спектры высокого разрешения, отождествлены рентгеновские линии с учетом их блендирования с применением метода, разработанного совместно соискателем и руководителем диссертации А. Ф. Холтыгиным. Указанная «парадигма» была выдвинута на основании наблюдений только одного объекта. Выполненный диссертантом анализ её применимости к большому числу О и В звезд показал, что основные

выводы теории Pollock (2007) вызывают сомнения, а сама она может быть верна только для звезд с определенными характеристиками.

Предложенный диссертантом метод отождествления спектральных линий позволил определить центральные длины волн рентгеновских линий, смещения их положения от лабораторных длин волн, полные и полуширины линий на уровне половины максимума интенсивности (FWHM, HWHM), а также обнаружить асимметричные профили линий, указывающие на наличие сгущений в звездных ветрах. В результате проведенного в диссертации анализа звездных спектров высокого разрешения было выяснено, что большинство линий в рентгеновских спектрах ОВ звезд характеризуются отношением полной ширины на уровне половины максимума (HWHM) к терминальной скорости меньшим 0.2, что означает их формирование преимущественно вблизи звездных фотосфер. Линии высокоионизованных элементов более широкие, чем линии слабоионизованных элементов.

Научная новизна и достоверность результатов.

Рентгеновские спектры девяти рассмотренных ОВ звезд были проанализированы диссертантом впервые. Также впервые был выполнен поиск возможных корреляций между характеристиками рентгеновского излучения ОВ звезд и параметрами звезд для объектов, у которых магнитное поле не детектировано. Впервые был выполнен поиск степенных компонент (которые могут описывать возможное нетепловое рентгеновское излучение звезд) в рентгеновских спектрах всех исследованных ОВ звезд, что ранее применялось другими авторами, но только к единичным объектам. Впервые были выполнены поиск корреляций между характеристиками возможного нетеплового рентгеновского излучения ОВ звезд и параметрами звезд. Впервые были отождествлены рентгеновские линии с учетом их блендирования.

Представленные в диссертации результаты вполне достоверны. Это подтверждается использованием автором тестированных методик и сравнением с результатами других работ. Новизна большинства результатов диссертации

вполне убедительно показана автором. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Краткое содержание диссертации.

Настоящая диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и 3 приложений. Полный объем работы составляет 136 страниц текста с 22 рисунками и 8 таблицами.

Во *Введении* (первой главе) дан обзор литературы о процессах формирования рентгеновского излучения ОВ звезд, сформулированы гипотезы, которые были проверены в диссертации, описаны основные характеристики ОВ звезд и выделенные в статьях подклассы ОВ звезд с особенностями, которые могут играть существенную роль в процессах формирования рентгеновского излучения объектов. Сформулированы научная новизна диссертации, ее научная и практическая значимость, апробация работы, объект и предмет исследований, методология и методы исследований, список публикаций по теме диссертации и личный вклад соискателя.

Во *второй главе* даны сведения об 102 изученных в работе звездах и проанализированных архивных наблюдениях. Детально описаны процедуры первичной обработки данных и извлечения звездных спектров с применением специального программного пакета «SAS 17.0».

В *третьей главе* описана проверка следствий из модели MCWS. Подробно изложена методика моделирования спектров звезд низкого разрешения с использованием программного пакета «XSPEC 12.10.0». Исследованы зависимости характеристик рентгеновского излучения звезд от параметров звезд. Проведен регрессионный анализ этих зависимостей и установлено, какие из них значимы.

В *четвертой главе* выполнена проверка «парадигмы» Pollock (2007) для большого числа звезд и проведен общий статистический анализ ширин линий в спектрах ОВ звезд для исследования характеристик сгущений в звездных ветрах. Описана методика отождествления линий в рентгеновских спектрах

звезд с учетом блендирования. Получены различные варианты отождествления профилей линий и составлены гистограммы количеств возможных линий с определенными отношениями HWHM к терминальным скоростям звездного ветра для O и B звезд.

В пятой главе проведено исследование возможного нетеплового рентгеновского излучения OB звезд. Выполнена статистическая проверка двух гипотез о его формировании к большому числу объектов. Приведен результат регрессионного анализа корреляций между характеристиками возможного нетеплового рентгеновского излучения OB звезд от других параметров звезд. Определено, насколько справедливы найденные зависимости для OB звезд с особенностями, которые могут повлиять на формирование возможного нетеплового излучения OB звезд. Выполнено сравнение температур излучающей плазмы в предположениях о полностью тепловом и частично нетепловом рентгеновском излучении OB звезд.

Отдельным параграфом главы рассмотрено рентгеновское излучение загадочных звезд – аналогов γ Cas, выполнено моделирование их спектров. Показано, что в предположении о полностью тепловой природе рентгеновского излучения аналогов γ Cas их температуры плазмы могут достигать экстремальных для спектральных классов O и B значений 10-20 кэВ. В то же время, при учете возможного вклада степенного компонента в рентгеновское излучение этих звезд, температура плазмы снижается, а доля нетепловой компоненты в спектрах, описываемых степенным законом, составляют 80-90%. Это дает основание предположить о наличии в рентгеновских спектрах аналогов γ Cas нетеплового излучения, формирующегося в результате обратного комптоновского рассеяния звездных фотонов на электронах высоких энергий.

В заключении приведено обсуждение всех полученных в работе результатов, даны общие выводы и указаны перспективы дальнейшего развития полученных результатов.

К недостаткам работы следует отнести:

1. Следовало бы привести основные характеристики EPIC и RGS – пространственное и энергетическое разрешение.
2. В диссертации обсуждается рентгеновское излучение, однако, выражения для потока излучения не приводится. Это затрудняет понимание механизма излучения – совокупность многочисленных линий высокоионизованных элементов с присутствием (или нет) вклада излучения континуума и моделей излучения – тепловые и не тепловые.
3. Обилие процедур, команд, скриптов, приведенных в Главе 2, затрудняет понимание качества первичной обработки данных и не позволяет адекватно оценить роль диссертанта в подобном исследовании
4. Тепловая модель рентгеновского излучения OB звезд определяется температурой горячего газа, параметрами Abundance и norm. Из текста диссертации не ясно, как определялись последние 2 параметра. Какие рассматривались спектральные линии?
5. Не ясно, как производилось покомпонентное разложение спектров для тепловой модели (рис.5) и с добавлением нетепловой компоненты (рис.16)
6. Как получен вклад степенной компоненты (зеленая кривая на рис.16), и по какой причине на этой кривой имеются участки с нарастанием потока и его спадом. Степенной спектр не предполагает такую зависимость.
7. Имеются замечания по тексту диссертации – пропуски букв, согласование окончаний, не литературное построение некоторых фраз.

В целом, диссертантом проделана важная работа по исследованию рентгеновского излучению OB звезд, проведена проверка некоторых гипотез и моделей генерации этого излучения. Получены научные результаты, сведенные в Таблицы и удобные для использования учеными, исследующими подобные проблемы.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

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 паспорту специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия» (по физико – математическим наукам), 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 приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Рыспаева Е.Б. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия»

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук

Чариков Юрий Евгеньевич

20 апреля 2021г.

Контактные данные

Тел.: +7(812)2927167 E-mail: Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru

Научная специальность: 01.04.02 – «Теоретическая физика»

Должность: старший научный сотрудник лаборатории космических лучей

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Адрес места работы: 194021 г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26

Тел.: +7(812)297-2245 E-mail: post@mail.ioffe.ru