

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета МГУ.013.1

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

от 18 июня 2026 года

Защита диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Шапошников Иван Андреевич

**«Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в двойных системах типа
WR+OB как эволюционных предшественников релятивистских объектов»**

Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия

Научный руководитель

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

Официальные оппоненты

Винокуров Александр Сергеевич
кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией физики звезд
Специальной астрофизической
обсерватории Российской академии наук

Иванов Павел Борисович
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник отдела
теоретической астрофизики и космологии
Астрокосмического центра Физического
института имени П. Н. Лебедева Российской
академии наук

Юнгельсон Лев Рафаилович
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник отдела физики
и эволюции звезд Института астрономии
Российской академии наук

СТЕНОГРАММА

Заседания Диссертационного совета МГУ.013.1

от «18» июня 2026 год

Протокол № 67

Председатель

диссертационного совета МГУ.013.1

доктор физико-математических наук, профессор,

член-корреспондент РАН

К. А. Постнов

Ученый секретарь

диссертационного совета МГУ.013.1

доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

Присутствуют члены Совета:

Постнов К.А.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Жаров В.Е.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Калегаев В.В.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Богомазов А.И.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Алексеев И.И.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Алексеев С.О.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Антонова Е.Е.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Бусарев В.В.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Гусев А.С.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Емельянов Н.В.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Июдин А.Ф.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Кондратьев Б.П.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Малова Х.В.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Машонкина Л.И.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Милюков В.К.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Новиков Л.С.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Прохоров М.Е.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Пширков М.С.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Расторгуев А.С.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Руденко В.Н.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Сазонов С.Ю.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Свертилов С.И.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Сильченко О.К.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Тавров А.В.	д.т.н.	1.3.1
Черепашук А.М.	д.ф.-м.н.	1.3.1
Шустов Б.М.	д.ф.-м.н.	1.3.1

Постнов К.А. (председательствующий)

Уважаемые коллеги, начинаем работу! Предлагаю зарегистрироваться в явочном листе. (Проводится процедура регистрации присутствующих членов совета. Явочный лист прилагается) На основании явочного листа из 30 членов Совета присутствует 26 человек. Кворум имеется. Можем приступать к работе.

На повестке дня защита диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Шапошникова Ивана Андреевича. Тема диссертации: «Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в двойных системах типа WR+OB как эволюционных предшественников релятивистских объектов». Специальность 1.3.1. Физика космоса, астрономия. Научный руководитель — доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН Черепашук Анатолий Михайлович.

Официальные оппоненты — доктор физико-математических наук Иванов Павел Борисович, главный научный сотрудник отдела теоретической астрофизики и космологии Астрокосмического центра Физического института имени П. Н. Лебедева Российской академии наук, доктор физико-математических наук Юнгельсон Лев Рафаилович, ведущий научный сотрудник отдела физики и эволюции звезд Института астрономии Российской академии наук и кандидат физико-математических наук Винокуров Александр Сергеевич, заведующий лабораторией физики звезд Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. Оппоненты Иванов и Юнгельсон присутствуют в зале, оппонент Винокуров отсутствует по уважительной причине.

Какие будут предложения по повестке дня? Нет возражений? В таком случае, слово предоставляется ученому секретарю для ознакомления с документами аттестационного дела соискателя.

Богомазов А.И. (ученый секретарь)

Спасибо, Константин Александрович. Уважаемые коллеги!

(Зачитывает материалы аттестационного дела соискателя. Аттестационное дело прилагается).

В диссертационный совет поступили документы гражданина Российской Федерации Шапошникова Ивана Андреевича, 1998 года рождения. В период подготовки диссертации обучался (и продолжает обучение) в очной аспирантуре физического факультета Московского государственного университета на кафедре экспериментальной астрономии (с октября 2022 г. по сентябрь 2026 г.). Соискатель работает в должности младшего научного сотрудника в отделе физики эмиссионных звезд и галактик ГАИШ МГУ. Диссертация выполнена на кафедре экспериментальной астрономии физического факультета МГУ. Все кандидатские экзамены сданы. Антиплагиат по автореферату показал... Да, очки — это уже, к сожалению,

необходимость. Можно попросить самого соискателя зачитать эти цифры? Вот тут две цифры и тут две цифры.

Шапошников И.А. (соискатель)

Отчёт о проверке... Совпадение 19,48%. Оригинальность 80,52%. Это автореферат до обработки. После обработки: совпадение 0%, оригинальность 97,85%, самоцитирование 2,15%. Для диссертации до обработки: совпадение 16,34%. Оригинальность 83,66%. После обработки: совпадение 0%, оригинальность 86,07%, самоцитирование 13,93%.

Богомазов А.И. (ученый секретарь)

То есть совершенно отличные результаты, спасибо. Все объявления размещены вовремя и на сайте ВАК, и на сайте аттестационной комиссии МГУ, соответственно, представленные документы соответствуют требованиям, установленным положением о диссертационном совете и положением о присуждении учёных степеней в МГУ имени Ломоносова. Необходимые документы были размещены вовремя. На этом обзор материалов аттестационного дела закончен.

Постнов К.А. (председательствующий)

Хорошо, спасибо. Есть ли вопросы по делу? Вопросов нет. Тогда слово предоставляется соискателю. Пожалуйста, вам даётся 20 минут. Говорите громко.

Шапошников И.А. (соискатель)

Уважаемые коллеги, члены диссертационного совета, добрый вечер!

Тема моего диссертационного исследования «Спектральные исследования звезд Вольфа-Райе в двойных системах типа WR+OB как эволюционных предшественников релятивистских объектов». Позвольте мне приступить к изложению результатов данной работы.

Звезды типа Вольфа-Райе (сокращенно WR, «дубль-вэ эр») — это обнаженные гелиевые ядра массивных звезд, потерявшие за время своей эволюции водородные оболочки. Они являются непосредственными эволюционными предшественниками релятивистских объектов, таких как нейтронные звезды и черные дыры. Одна из характерных черт этой стадии, определяющая как наблюдательное проявления, так и особенности протекания эволюции — это мощный звёздный ветер. Многие звезды WR наблюдаются в составе двойных систем, преимущественно с массивными звездами спектральных классов O и B — это т. н. двойные системы типа WR+OB. Двойные системы типа WR+OB предоставляют уникальную возможность надежной динамической оценки массы звезд WR и темпов ее потери на основе спектральных наблюдений. Особенно стоит отметить, что измерение темпов потери массы звездами WR в двойных системах типа WR+OB является очень актуальной задачей, поскольку такие измерения могут быть проведены, как будет дальше показано, моделями независимыми методами. Также имеется возможность важного сравнения распределения масс звёзд WR с

учётом некоторой потери, то есть непосредственно масс массивных звёзд перед гравитационным коллапсом, с распределением масс известных чёрных дыр в звёздных системах объектов, в первую очередь чёрных дыр.

Целью диссертационной работы является комплексное спектроскопическое исследование звезд WR, входящих в состав двойных систем типа WR+OB, и их эволюционной взаимосвязи с компактными объектами (прежде всего – с черными дырами). В работе ставятся и решаются следующие задачи:

1. Анализ архивных наблюдательных данных по двойным системам типа WR+OB, получение и обработка новых данных по доступным для наблюдений объектам.

2. Динамическая оценка темпа изменения орбитального периода на основе сравнения наблюдательных данных, полученных в разные эпохи. Это кривые блеска для затменных систем, но в первую очередь в работе делается ставка на сравнение кривых лучевых скоростей.

3. Спектроскопическое исследование эффектов возможной анизотропии ветра WR, которая может быть обусловлена быстрым вращением ядра или влиянием массивного спутника, опять же, на основе спектральных наблюдений.

4. Исследование зависимости темпа потери массы звездами WR от их массы на основе модельно-независимых динамических оценок.

5. Сравнение статистических распределений конечных масс звезд WR и их СО-ядер с распределением масс известных ЧД в двойных звездных системах.

Я перехожу непосредственно к основному содержанию работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 155 страниц, включая 29 рисунков и 37 таблиц. Список литературы содержит 265 наименований (поскольку активно используются архивные наблюдательные данные).

В первой главе описывается методика и результаты спектральных наблюдений двойных систем типа WR+OB, проведенные на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ с применением спектрографа низкого разрешения TDS. Детально описываются результаты наблюдений пяти короткопериодических двойных систем типа WR+OB: CQ Сер, CX Сер, V444 Cyg, WR 127 и WR 141 (некоторые альтернативные обозначения также приведены на слайде), приводятся уточненные элементы их спектроскопических орбит и новые оценки масс звезд в этих системах. Подробные наблюдательные данные (журналы наблюдений, спектрограммы, измерения лучевых скоростей и т. д.) вынесены в отдельные Приложения.

В качестве примера на слайде продемонстрированы спектры систем V444 Лебедя, полученные в ходе нашей наблюдательной программы. Спектры отсортированы по орбитальной фазе, то есть уровень континуума приведён к орбитальной фазе. Видно хорошее качество спектров, даже в таком достаточно широком масштабе длины волн хорошо видны изменения профилей, связанные с орбитальным движением звёзд в системе. Также отмечены различные спектральные детали: красным — эмиссионных линий звезды в WR, синим — положения абсорбций звезды O, зелёным — некоторые межзвёздные детали. Все детали достаточно хорошо видны, что открывает возможность измерения лучевых скоростей непосредственно по отдельным линиям. На данном слайде демонстрируются кривые лучевых скоростей для данных пяти систем, полученные в ходе настоящей работы. Для системы CQ Цефея измерялись ключевые скорости только по эмиссионным линиям компонента WR с некоторыми предположениями об отношении масс. В случае остальных четырёх систем хорошо видны как эмиссионные линии WR, так и абсорбции звезды O, что позволяет проводить измерение лучевых скоростей в линиях обеих компонентов, и, соответственно, строить кривые лучевых скоростей для обеих звёзд системы. На верхних панелях показаны измерения в отдельных линиях (выделены отдельными цветами). На нижних панелях показаны измерения, приведённые к центру масс двойной системы: черным показана эмиссионная компонента, красным — лучевые скорости компоненты O.

Во второй главе описываются результаты динамического поиска эволюционных изменений орбитальных периодов данных пяти хорошо изученных тесных (короткопериодических) двойных систем типа WR+OB. Теоретической основой данной работы является квадратичная формула разности, наблюдаемой и предвычисленной по некоторым фиксированным элементам эпох. Формула приведена на слайде. Коэффициент при квадратичном члене как раз-таки задаёт изменение орбитального периода, коэффициенты B и C выражают отличие фиксированных элементов от средних. В качестве этих, собственно, наблюдательных эпох брались: для затменных двойных систем — эпохи минимумов блеска, уточнённые по архивным кривым блеска с помощью модифицированного метода Герцшпрунга, а также для всех пяти систем использовались моменты, полученные по сравнению кривых лучевых скоростей. Стоит отметить, что непосредственно по кривым лучевых скоростям без привлечения моментов минимума блеска до этого подобная работа не делалась, и сравнение для затменных систем обоих методов необходимо для апробации чисто спектрального подхода. Это сравнение показало хорошее согласие и что позволило нам корректно использовать скорости для оценки, для двух спектральных двойных звёзд. Результаты следующие. Для системы CQ Сер подтверждено ранее заподозренное медленное уменьшение орбитального периода со временем, в то время как для четырёх остальных

систем, обнаружено систематическое вековое возрастание периода со временем. На данном слайде представлены диаграммы «О-С» («о минус цэ») построенные для данных пяти систем. Первые три пары панелей — это затменные системы CQ Цефея, CX Цефея и V444 Лебедя. Верхние панели — это то, что было построено по фотометрическим данным, по кривым блеска, нижние панели — это расчёты отдельно по кривым лучевых скоростей. Видно, что точки группируются вдоль некоторых парабол, причём видно хорошее согласие спектральных измерений с чисто фотометрическими. На последней паре панелей — спектроскопические диаграммы «О-С», построенные по кривым лучевых скоростей для систем WR 127 и WR 141. Видно опять же, что мы наблюдаем группировку точек вдоль некоторых парабол с положительным главным коэффициентом, что подтверждает наблюдаемое увеличение орбитального периода в данном случае.

В третьей главе описаны наблюдательные исследования крупномасштабной структуры ветров звёзд WR в двойных системах типа WR+OB. Для чего сделалось это исследование? Динамическая оценка темпа потери массы звезды WR основана как раз на оценке изменения орбитального периода. Но простые формулы, такие как джинсовская мода потери массы, предполагают высокую степень изотропии ветра покидающего систему. Мы должны эту изотропию как-то эмпирически проверить. Она может нарушаться либо вследствие ускоренного вращения гидростатического ядра звезды WR, с которой начинается ускорение ветра, или же искажаться в случае двойных систем типа WR+OB влиянием близкого компонента, причём достаточно массивного. Поскольку данные системы — это системы уже проэволюционировавших звёзд, сосуществующих достаточно долгое время, для них естественным будет синхронизация вращения (собственных вращений звёзд с орбитальным). Тем самым указанные эффекты должны проявляться в виде некоторых корреляций доплеровских ширин эмиссионных линий с углом наклона плоскости орбиты. С целью поиска данного эффекта было исследовано около тридцати двойных систем типа WR+OB, как с имеющимися архивными данными по спектрам и оценкам углов наклона орбиты, так и некоторыми наблюдательными данными, полученные в ходе настоящей работы. Результаты анализа следующие. Проведённый анализ не выявил статистически значимой корреляции ширин линий с углом наклона орбиты ни для систем со звёздами WR азотной последовательности, ни для случая звёзд углеродных звезд WR. На данном слайде продемонстрированы параметрические аппроксимации профилей линий, на основе которых получались оценки полной ширины на половине интенсивности для каждой линии, которые затем исследовались для которых затем используется для исследования корреляции. На данном графике продемонстрированы двумерные графики зависимости измеренных ширин на половине интенсивности эмиссионных линий звёзд WR в двойных системах типа WR+OB от

числового значения спектрального подкласса звезды по одной оси и оценки угла наклона орбиты по второй оси. Также проведены фитирующие плоскости. Видно, что ни в случае звёзд азотной последовательности (графики на верхних панелях), ни для углеродных (графики на нижних панелях), эти плоскости не показывают значимого наклона вдоль той оси, соответствующей углу наклона орбиты. Основная зависимость у нас, проявляется, конечно, из-за спектрального класса. Более подробный анализ показывает, что данный фактор (угол наклона орбиты) не является существенным в формировании профиля линии.

Четвёртая глава посвящена оцениванию темпов потери массы звёздами WR в наших двойных системах типа WR+OB. Для этого мы используем оценки темпы увеличения орбитального периода для четырёх систем, которые мы получили во второй главе. На основе этих оценок и оценок масс, полученных в первой главе, мы строим эмпирическую зависимость темпы потери массы звездой WR в виде звёздного ветра от её массы. На графике справа как раз показана эта зависимость в логарифмических координатах. Синие точки с погрешностями — это результаты наших измерений для четырёх систем. Видно, что точки хорошо группируются вдоль некоторого линейного тренда (по крайней мере, в измеренном диапазоне масс), который соответствует степенной зависимости темпа потери массы звезды от массы с показателем степени около 1.7. Это главный результат данной главы.

В пятой главе показано эмпирическое соответствие распределения масс углеродно-кислородных (сокр. CO, «цэ о») ядер звёзд в WR перед коллапсом распределение масс чёрных дыр в двойных системах. Эта работа выполняется на основе данных по массам звёзд WR+OB в двойных системах типа WR+OB и чёрных дыр, построенных и по массам чёрных дыр примерно в пятидесяти двойных системах — в основном рентгеновских двойных, также использовались в данной выборке три значения масс чёрных дыр из широких пар, открытых спутником Gaia. Эмпирическая зависимость темпа потери массы звезды WR от её массы при некоторых теоретических предположениях о длительности стадии WR позволяет скорректировать наблюдаемые массы звёзд WR к массам, которые они будут иметь в конце стадии, то есть непосредственно перед коллапсом ядра и образованием чёрной дыры. Собственно, образование чёрной дыры в случае массивных ядер с массой, превышающей предел Оппенгеймера-Волкова, представляется более вероятным. Анализ и сравнение данных распределений показывает, что они могут быть связаны соотношением, близким к теоретической зависимости массы CO от ядра гелиевой звезды от её полной массы, что фактически подтверждает эволюционную связь звёзд Вольфа с чёрными дырами, которая осуществляется через гравитационный коллапс углеродно-кислородного ядра звезды WR. На данном слайде это демонстрируется. Слева показаны графики построенных распределений масс звезд WR с учётом потери массы на данной стадии, справа — распределение масс

чёрных дыр, соответственно, в виде графиков плотности вероятности и кумулятивной функции распределения. Оба эти распределения очень хорошо описываются известной функцией логнормального распределения (на графике показано красным). Также на слайде приведены параметры фиксирующих распределений. Как хорошо известно, если два статистических распределения некоторых величин описываются логнормальным законом с какими-то коэффициентами, то между этими двумя распределениями можно построить простое преобразование (от одной величины к другой), которое будет вычисляться через значение конкретных параметров этих распределений и иметь вид вот такой степенной функции (показана в рамочке на слайде). Представлена функция этой эмпирической связи, которую мы построили по наблюдаемым распределениям масс данных объектов. Хорошо видно, что сравнение с теоретической зависимостью массы СО ядра для гелиевой звезды (для WR), например, по вычислениям из недавней работы Такахаши и коллег, показывает очень хорошее согласие даже на уровне отдельных коэффициентов, что фактически позволяет нам с известной степенью точности отождествить массы чёрных дыр с массами углеродно-кислородных ядер звёзд WR в финале стадии WR, то есть непосредственно перед гравитационным коллапсом.

Результаты работ неоднократно докладывались на конференциях различного уровня, в основном всероссийских, там где-то с международным участием. На слайде перечислены 10 мероприятий, в которых я принимал участие как докладчик. По результатам диссертации опубликовано шесть статей, две в отечественном «Астрономическом Журнале», четыре в ведущих международных изданиях. В трёх статьях я являюсь первым автором, в одной — единственным, во всех работах мой вклад является важным и определяющим.

Таким образом, по итогу всего вышесказанного на защиту выносятся следующие положения:

1) Использование кривых лучевых скоростей тесных двойных систем типа WR+OB, подобно кривым блеска затменных систем, позволяет получить динамическую оценку темпа векового изменения орбитального периода методом «О-С». Для затменных систем V444 Cyg, CQ Сер и CX Сер значения темпа изменения периода, определённые спектроскопическим методом «О-С», согласуются с оценками, полученными методом «О-С» из фотометрических кривых блеска. Системы WR 127 = Hen 3-1772 и WR 141 = V2183 Cyg обладают вековым увеличением орбитальных периодов.

2) Эмпирическая зависимость темпа потери массы звезды WR от её текущей массы, построенная по динамическим оценкам в четырех системах типа WR+OB с массами звезд WR в диапазоне 10-25 масс Солнца, имеет степенной характер с показателем степени около 1.7.

3) Распределение масс звезд WR перед гравитационным коллапсом связано с распределением масс черных дыр в двойных звездных системах степенным преобразованием, близким к теоретической зависимости массы СО-ядра звезды WR от ее массы.

4) Доплеровские ширины эмиссионных линий WR в спектрах нескольких десятков двойных типа WR+OB не показывают значимой корреляции с углом наклона орбиты ни в случае систем со звездами WR спектрального подкласса WN, ни для систем со звездами WC.

На этом мой доклад завершен. Благодарю всех за внимание!

(Автореферат диссертации прилагается).

Постнов К.А. (председательствующий)

Спасибо большое, Иван Андреевич. Вопросы, пожалуйста. Пожалуйста, Максим Сергеевич.

Пширков М.С. (член диссертационного совета)

Вопрос не по докладу, а по формальным показателям работы. Неужели такой маленький импакт-фактор у Monthly Notices?

Богомазов А.И. (ученый секретарь)

Я могу ответить это зависит от системы. Это т. н. JCI, который мы тоже называем импакт-фактором, но на самом деле он меньше.

Шапошников И.А. (соискатель)

Реально там около пяти.

Пширков М.С. (член диссертационного совета)

Очень интересно.

Постнов К.А. (председательствующий)

Пожалуйста, Борис Петрович.

Кондратьев Б.П. (член диссертационного совета)

Поясните, Иван. Значит, по четырём из пяти систем у вас dP/dr («пэ с точкой») больше нуля. А по одному всё-таки меньше нуля. Чем вы это поясните? Чисто физически.

Шапошников И.А. (соискатель)

Чисто физически отдельно скажу, что вот эта система (CQ Cep) очень загадочная. Её нам ещё предстоит исследовать долго. Но наше рабочее объяснение, которое в том числе приведено, обсуждается в диссертации, это перетекание массы с более массивной звезды O на ядро звезды WR. То есть такая очень хитрая газодинамическая конфигурация.

Кондратьев Б.П. (член диссертационного совета)

Тогда там должен быть критический режим в таком случае?

Постнов К.А. (председательствующий)

Вот он это и нашёл.

Шапошников И.А. (соискатель)

Да. Эту систему можно считать фактически самым надёжным кандидатом в массивные тесные двойные системы, у которых звезда О находится вблизи заполнения полости Роша.

Кондратьев Б.П. (член диссертационного совета)

Спасибо.

Постнов К.А. (председательствующий)

Ещё вопросы, пожалуйста. Сергей Юрьевич.

Сазонов С.Ю. (член диссертационного совета)

Скажите, а вот вы ищите зависимость темп, ну, вот этого оттока, да, от массы? А это обязательно единственный параметр? То есть не может во время явно входить?

Шапошников И.А. (соискатель)

От времени оно будет зависеть, как минимум, потому что масса зависит от времени. То есть это здесь вот учитывается как раз в процедуре учёта потери массы до финального состояния. Про другие параметры вообще, конечно, да, в теоретических работах рассматривается зависимость темпа потери массы таких звёзд в виде звёздного ветра, прежде всего от светимости и металличности. Мы же ставили своей целью исследование зависимости именно от массы, поскольку этот параметр наиболее важный для эволюционных расчётов, и что существенно он определяется гораздо проще, чем светимость v , особенно в таких двойных системах. Как минимум не зависит от расстояния. Но скажу сразу, мы планируем продолжать данные работы по уточнению нашей эмпирической зависимости, в том числе рассмотрением зависимости от эмпирических оценок светимости. Ну, опять же, можно сказать, что для звёзд разных классов есть зависимости типа масса-светимость, масса-радиус и т. д. То есть так или иначе физически это можно свести к зависимости только от массы.

Постнов К.А. (председательствующий)

Пожалуйста, Сергей Игоревич.

Свертилов С.И. (член диссертационного совета)

В тему предыдущих вопросов: скажите, пожалуйста, а почему мы отобрали вот такие системы WR+OB ведь, наверное, и другие классы могут быть компаньонами WR и быть предшественниками компактных объектов?

Шапошников И.А. (соискатель)

Это совершенно верный вопрос. Действительно, мы брали, например, массы чёрных дыр в том числе для маломассивных рентгеновских двойных, которые могут иметь несколько иной путь формирования. Там массивная звезда, она может проходить через похожую стадию, то есть также она теряет свою водородную оболочку, но компаньоном у неё будет маломассивная звезда. Здесь же ответ, почему именно такие системы простой. Массивные

звёзды чаще наблюдаются с массивными. То есть, звёзды WR — это проэволюционировавшие массивные звёзды в паре с такими же массивными звёздами, но менее проэволюционировавшими. Есть двойные системы типа WR+WR, но там очень сложные эффекты столкновений, взаимодействия ветров. Да, и что важно — темпы потери масс звёздами O (или ранних подклассов B) существенно меньше, чем таковые для WR, то есть не нужно учитывать детально этот фактор. Я рассматриваю как некоторую поправку небольшую. Двойных систем со звёздами WR в паре с какой-нибудь маломассивной звездой пока достоверно неизвестно. Это такой непростая наблюдательная задача. Опять же, это эффект селекции.

Свертилов С.И. (член диссертационного совета)

А ещё у меня второй вопрос конкретный. Там, по-моему, вторая вот картинка была, где кривые у одного объекта они фазные, а у вторых противофазные, как объяснить можно?

Постнов К.А. (председательствующий)

Это кривые лучевых скоростей.

Свертилов С.И. (член диссертационного совета)

А почему как они выглядят? Они в разную сторону вращаются что ли?

Шапошников И.А. (соискатель)

Просто для четырёх систем получилось надёжно измерить лучевые скорости обеих компонентов, то есть как бы у нас обе звезды крутятся друг вокруг общего центра масс. Для системы CQ Сер, как раз у которой $dP/dt < 0$...

Свертилов С.И. (член диссертационного совета)

А, там просто это не получилось второй?

Шапошников И.А. (соискатель)

Да, я говорил, это очень загадочная система. Но мы используем некоторые предположения об отношении масс.

Постнов К.А. (председательствующий)

Еще вопросы? Игорь Иванович, пожалуйста.

Алексеев И.И. (член диссертационного совета)

Я прошу прощения, может зря отнимаю время, просто хочу заодно своё образование повысить. Ну, во-первых, традиционный вопрос, который я, по-моему, уже всем задаю. Значит, что с магнитным полем? Казалось бы, на этот процесс магнитное поле должно влиять очень сильно. А и сразу следующую задам. Значит, чёрная дыра — это один из вариантов, да? Ещё у нас может быть белый карлик и нейтронная звезда, но в итоге Вы почему-то говорите только чёрной дыра.

Шапошников И.А. (соискатель)

Хорошо, начну с ответа на первый вопрос. Всё-таки магнитное поле — это такой фактор, который, конечно, мы планируем учитывать в будущих исследованиях, но стоит сказать, что у массивных звёзд спектрального класса О, по сравнению с теми же звёздами класса В, менее массивными, мощные магнитные поля встречаются значительно реже. У этих звёзд нет какого-то собственного внутреннего динамо-механизма, который мог, как у Солнца, который мог бы генерировать сильные магнитные поля. Насколько я помню статистику, не более 10% звёзд О (ну и звёзд WR, которые потом из них получаются), не имеют поверхностных магнитных полей сильнее 100 Гс. Рассматриваются варианты кГс, но это уже менее массивные звёзды, ближе к середине спектрального класса В. Есть ещё такой аргумент: магнитные поля в подобных звёздах имеют скорее реликтовый характер. То есть это то, что осталось, грубо говоря, после конденсации родительского молекулярного облака. И дальше эти поля со временем диссипируют. Наши системы уже проэволюционировавшие, и если какая-то диссипация есть, то она эти магнитные поля разрушает. Это по поводу первого вопроса. Второй вопрос. Белые карлики — это вариант вообще не наш. Белые карлики — это результат конечного продукта эволюции звёзд малых и промежуточных масс. У нас звёзды массивные с начальными массами от двадцати масс Солнца и выше. Логично, конечно, рассмотреть взаимосвязь с распределением нейтронных звёзд. Но здесь есть как и такие чисто физические аргументы (я об этом вскользь сказал), эти массы углеродо-кислородных ядер этих звёзд, которые непосредственно коллапсируют, практически во всех случаях (даже в самом краю распределения масс) превосходят три массы Солнца — ориентировочный предел Оппенгеймера-Волкова. То есть коллапс чёрной дыры является более вероятным. Второй момент — это то, что распределение наблюдаемых масс нейтронных звёзд, оно, всё-таки, поскольку сами нейтронные звёзды менее массивные (примерно полторы массы Солнца), подвержено (особенно в двойных системах) влиянию аккреции и других эффектов. То есть, если вы, например, на нейтронную звезду в полторы массы Солнца аккрецируете полмассы Солнца, то для неё это будет достаточно существенное увеличение, которое искажает статистику. Даже если на чёрную дыру как-то набросить полмассы Солнца, которая изначально весила 10 масс Солнца, то она особо ничего не «почувствует». Хотя, была недавно была работа коллег из Китая, они некоторыми своими методами оценили, как они это называют, *birth mass function* для нейтронных звёзд. И она, кстати, тоже имеет вид, очень похожий логнормальный. То есть, там пик в районе 1.4 массы Солнца с некоторым спаданием там до двух масс Солнца (до какой точно границы никто не знает, это уже вопрос, связанный с уравнением состояния недр нейтронных звезд). Но не очень понятно, как интерпретировать подобное сравнение в теоретических рамках. И здесь (в настоящей работе) очень всё удачно оказалось объяснено теоретической зависимостью для массы СО ядра. Для нейтронных звёзд

можно, конечно, как-то связать с массой железного ядра, но насколько я знаю, таких простых теоретических аппроксимаций для массы железного ядра нет (здесь надо очень долго рассчитывать самые поздние стадии эволюции). Тут больше произвола. Надеюсь, я ответил на ваши вопросы.

Постнов К.А. (председательствующий)

Хорошо. Пожалуйста. Александр Сергеевич Гусев.

Гусев А.С. (член диссертационного совета)

А можно последний слайд, где Вы рассматриваете темп потери массы, вот массы? Да-да-да. Вот я смотрю, для самых высокомассивных звёзд у вас как бы зависимость она на плато выходит, то есть уже корреляции нет.

Шапошников И.А. (соискатель)

Да, но здесь, видите, здесь нет синих точек, у нас максимальная — это около двадцати четырёх масс Солнца. То есть... Да, ну вот я смотрю более массивные...

Гусев А.С. (член диссертационного совета)

Вот у других авторов, у них получается уже зависимости вот такой нету. То есть она как бы выполаживается, это физика или это что? Эффекты селекции какие-то?

Шапошников И.А. (соискатель)

Этот вопрос требует отдельного исследования. Но вообще, да, обсуждается, что всё-таки в случае самых массивных звёзд эта зависимость уже не будет такой простой. Могу так от себя сказать, что более массивные звёзды ЦК, там по 30—40 и более масс Солнца (есть даже по 70—80 кандидаты) — это звёзды не совсем такие, которые у нас здесь. Звёзды, которые у нас, лишились своей водородной оболочки в ходе совместной эволюции. Звёзды же более массивные эволюционируют гораздо быстрее просто за счёт большой массы, и в их внешних оболочках ещё довольно много водорода. У них сильные линии именно водородные. А примесь водорода в звёздном ветре очень сильно влияет на его темп, то есть на темп потери массы таких звёзд. Здесь скорее всего как раз-таки эффект металличности. Но опять же, нам не хватает модельно-независимых динамических оценок.

Постнов К.А. (председательствующий)

Так, ещё вопросы? Вопросов нет. Спасибо большое. Тогда переходим к выступлению официальных оппонентов... Прошу прощения, по регламенту сначала выступление научного руководителя. Слово предоставляется научному руководителю, доктору физико-математических наук, академику РАН Анатолию Михайловичу Черепашуку.

Черепашук А.М. (научный руководитель, член диссертационного совета)

Разрешите мне для краткости зачитать свой отзыв.

(Оглашает положительный отзыв. Отзыв прилагается).

Постнов К.А. (председательствующий)

Всё? Дорогие коллеги, есть вопросы к научному руководителю? Пожалуйста.

Бусарев В.В. (член диссертационного совета)

Скажите, пожалуйста, в чём физический смысл и новизна пятого результата, который выносится на защиту?

Черепашук А.М. (научный руководитель, член диссертационного совета)

Физический смысл и новизна в том, что были довольно много работ, в которых утверждалось, что очень мощный ветер от звезды в WR объясняется не только давлением радиации горячего ядра, но и быстрым осевым вращением звезды в WR. Так вот оказалось, что анализ ширин линий, вот наклоны орбит в двойных системах показывает, что такой зависимости нет. Это говорит о том, что вращательная компонента ветра пренебрежимо мала по сравнению с радиальной компонентой, которая достигает 2—3 000 км/с. Это очень важное экспериментальное доказательство изотропии звёздного ветра, которое необходимо для того, чтобы применять джинсовскую моду. Вы знаете, что если в двойной системе у вас звезда строго симметрично истекает, тогда существует простое соотношение между увеличением орбитального периода и темпом потери массы звезды. Вот чтобы его применять, надо обосновать это. Вот это он сделал, это очень важный результат, отдельный результат работы.

Постнов К.А. (председательствующий)

Хорошо. Ещё вопросы? Спасибо.

Слово предоставляется ученому секретарю для ознакомления с заключением кафедры (организации) и отзывами на автореферат, если такие есть.

Богомазов А.И. (ученый секретарь)

В аттестационном деле соискателя есть заключение кафедры экспериментальной астрономии физического факультета МГУ. Заключение положительное, замечаний нет, дополнительных отзывов тоже не было.

(Зачитывает заключение кафедры. Заключение прилагается).

Постнов К.А. (председательствующий)

Вопросы? Вопросов нет. Тогда переходим к выступлению официальных оппонентов. Слово предоставляется Павлу Борисовичу Иванову, доктору физико-математических наук, главному научному сотруднику отдела теории астрофизики и космологии АКЦ ФИАН. Пожалуйста, Павел Борисович.

Иванов П.Б. (официальный оппонент)

(Оглашает положительный отзыв. Отзыв прилагается).

Постнов К.А. (председательствующий)

Так, вопросы, пожалуйста. Вопросов нет. Иван Андреевич, будете ли вы отвечать на все замечания сразу или последовательно?

Шапошников И.А. (соискатель)

Давайте на все сразу.

Постнов К.А. (председательствующий)

На все сразу. Это Ваше право. Тогда слово предоставляется второму оппоненту. Юнгельсон Лев Рафаилович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела физики и эволюции звёзд Института астрономии РАН.

Юнгельсон Л.Р. (официальный оппонент)

Уважаемый председатель, уважаемые коллеги! Не для протокола я хотел бы сказать, что мне очень приятно выступать в этом зале именно сегодня, потому что ровно 53 года назад, день в день буквально, я в этом же зале защищал тоже кандидатскую диссертацию. И моим оппонентом, одним из моих оппонентов был Анатолий Михайлович. Вторым был Дмитрий Яковлевич. Так что это двойное удовольствие, так сказать.

(Оглашает положительный отзыв. Отзыв прилагается).

Постнов К.А. (председательствующий)

Спасибо. Есть ли вопросы? Вопросов нет. И третий оппонент у нас Винокуров Александр Сергеевич. Он отсутствует, поэтому требуется отзыв зачитать полностью. Пожалуйста, Алексей Иванович.

Богомазов А.И. (ученый секретарь)

(Зачитывает положительный отзыв А.С. Винокурова. Отзыв прилагается).

Постнов К.А. (председательствующий)

Спасибо. Все отзывы были зачитаны, и теперь время пришло отвечать на все замечания.

Шапошников И.А. (соискатель)

Мои ответы на замечания оппонентов ранжированы по алфавитном порядке по фамилиям оппонентам. Я приведу ответы на основные замечания физического характера, не касаясь стилистических ошибок или неоптимальных редакционных решений. К сожалению, здесь вынужден извиниться и сказать, что в будущих работах я постараюсь их учесть.

Я начинаю с замечаний Александра Сергеевича Винокурова. В первой главе описываются инструменты и наблюдательная программа, в ходе которой получены спектральные данные. Однако отсутствует информация о фактических размерах звёздных изображений, поскольку, имеются некоторые эффекты, которые важны для оценки погрешности измерения лучевых скоростей. Да, к сожалению, я не отразил в должной мере при каких погодных условиях реализуется программа. При наблюдениях с TDS с целью определения лучевых скоростей наилучшие результаты достигается при использовании самой

узкой щели (секундной) и при сравнительно низком качестве изображения - от полутора секунд и хуже. Медианное качество изображения, при которых получены наблюдательные данные, получается около двух угловых секунд (я посмотрел отдельно по заголовкам fits-файлов, записанным по данным астроклиматического монитора). Также хочу отметить, что эффекты, связанные с центрированием и размером изображения, как бы его влиянием на оценку лучевых скоростей, они отдельно исследовались нашими коллегами. Здесь приведены некоторые измерения на графичике, слева показана как раз погрешность определения лучевой скорости для некоторой стандартной звезды при её смещении по щели, то есть от центра на 0.5 секунд. Точками показаны измерения при значении качества изображения около 1.3-1.4 секунды, то есть заведомо изображение более компактное, чем то, что применялось в нашей работе. Красными здесь показаны некоторые модельные оценки данного эффекта. В общем, что я хочу сказать по этому поводу? В условиях, в которых получились наблюдательные данные в контексте нашей работы этот эффект не оказывается очень существенным. То есть при вариациях положения изображения центра изображения звезды относительно центрального пикселя щели погрешность получается не более 2 км/с. Здесь также на слайде приведены погрешности, характерные для измерения скоростей во всём диапазоне прибора. Но я здесь сразу хочу сказать, что прибор получает данные в двух каналах, условно в синем (от 3500 до 5700 ангстрем) и красном канале (от 5700 до 7300 ангстрем). Наши измерения скоростей, они относятся к синему каналу, с чуть более низким разрешением. Это связано с особенностями линий звёзд WR и OB. Основные линии наиболее надёжные (N V для WR, высшие члены Бальмерской серии водорода для абсорбций звезды O), как раз в синем канале находятся, и погрешности вот такого плана (1—2 км/с) большой роли не играют. Точками здесь показаны измерения также для некоторой модельной звезды, но она опять же сильно отличается от WR, поэтому здесь надо смотреть вот на вот эти вот на пунктирные кривые, которые как раз дают некоторое среднее качество оценки лучевых скоростей по итогам нескольких наблюдательных программ.

Так, следующее замечание. Ни в таблице один, ни где-либо ещё я не привожу данные о принятых расстояниях до объектов, об их точностях, и, соответственно, не учитываю соответствующие неопределённости в ошибках параметров. Здесь ответ простой. Все оценки параметров, которые я так или иначе получаю или использую в работе, они не завязаны на знании расстояния до объектов. Например, какая-то линейная мера размера орбиты, оценка размера звезды по решению кривой блеска, это вещи всё связанные вот именно с внутренними данными. Оценки массы, полученные по решению спектроскопической орбиты (кривых лучевых скоростей), они, в принципе, расстояния не зависят. Но в то же время мы планируем продолжать работу, например, с определением отношения светимости и абсолютных

светимостей. Там непосредственно оценки расстояний будут нужны, поэтому я считаю это замечание очень полезным, которое я в будущих работах обязательно учту. Но здесь это опять же не очень существенно.

Так, здесь я сразу зачитаю замечания, которые были в третьей главе. «В ряде важных случаев при описании проблематики результатов наблюдения автор приводит ссылки на классические работы, но не представляет более свежие данные расчёты». Например, я в начале третьей главы ссылаюсь на работу Ламерса и Кассинелли. Это достаточно известная книга по теории звёздных ветров разных типов. Но в то же время, имеются определённые достижения в этой области, мне стоило бы учесть в обзоре. И второе замечание, то, что я указываю, «что эффекты быстрого вращения ядер звёзд WR должны сильнее всего сказываться на профилях линии N V», то есть это область наиболее высокой степени ионизации, которая даёт линии в видимом диапазоне. Я утверждаю, что да, здесь влияние возможного быстрого вращения должно быть наибольшим, потому что область его формирования лежит ближе к ядру. Оппонент считает, что это утверждение достаточно спорным и за счёт высокой плотности и протяжённости зоны ускорения ветра. Области формирования различных линий, они могут лежать на больших расстояниях гидростатического радиуса звезды. Я скажу так: в пределах двух радиусов ветер практически выходит на плато скорости и в этом диапазоне лежат как раз-таки области формирования всех основных линий. То есть, насколько, собственно, насколько эффективны эти измерения, если так я ещё раз зачитаю вопрос автора: «Насколько эффективны измерения ширины этих линий для оценки скорости вращения звёзд»? Опять же, я согласен, что мне стоило дать более такой детальный теоретический обзор, сослаться на те же там работы Графенера. Но в то же время я хочу сказать, что целью работы, изложенной в третьей главе, не была проверка конкретной модели ветра. То есть по одним профилям, там я не говорю уже о том, что по измерениям там только одних ширин в некотором месте, ну, это нельзя сделать, потому что там сложная зависимость оптической толщины от расстояния. Строго говоря, там надо решать интегральные уравнение Абеля, если ещё учитывать различные эффекты движения, то есть это именно теоретически достаточно сложная задача. Я искал именно так сказать, в лоб эмпирическую корреляцию. То есть, если бы она. Была, то это было бы явным указанием на то, что да, действительно, у нас быстрое вращение ядра или для более внешних слоёв близость массивного спутника сильно искажает изотропию ветра. В то же время хочу сказать, что я это рано или поздно планирую сделать с привлечением, может быть, более подробных данных: спектроскопии высокого разрешения, узкополосной фотометрии для затменных систем со звёздами WR. Опять же, то, что касается вопроса об измерении скорости вращения. Я не ставил своей целью конкретно измерение скорости вращения, потому что, ну, опять же, едва

ли это можно сделать, поскольку мы видим поскольку мы не видим напрямую ядро звезды WR, то есть область, откуда начинается ускорение ветра, она достаточно глубоко лежит и погребена вот в этой протяжённой, широкой ускоряющейся атмосфере. Но в то же время эти эффекты, если бы они были, то так или иначе проявлялись бы. То есть была бы некая радикальная и некая круговая компонента скорости, которая искажала бы этот радиальный поток. Мы ничего подобного в наших данных не видим. Я считаю, это достаточно сильный аргумент. Опять же, что касается использования линий ионов с более высоким потенциалом ионизации, то, ну, очевидно, что больше у нас, чем выше плотность излучения, тем у нас в зависимости от расстояния звезды, тем выше степень ионизации ветра, который мы можем наблюдать. Очевидно, что ближе к ветру, ближе к основанию ветра, плотность излучения будет выше, соответственно, там мы будем наблюдать линии более высоких потенциалов ионизации. Насколько далеко они будут — это вопрос конкретной модели, но очевидно, что N V будет лежать ближе, чем там N IV или He II. И, как показывают работы как классические, так и более поздние, это расстояние будет, определяться одним-двумя гидростатическими радиусами звезды, что при в случае даже самых тесных систем из нашей выборки это всё-таки заметно меньше размера орбиты. То есть это внутренняя область, на которая влияет именно вращение самой звезды, а не внешняя область, где уже у нас влияет звезда. У систем типа CX Ser области He II уже могут «чувствовать» соседнюю звезду.

Так, по поводу зависимости темпа потери массы от массы. Я показывал погрешности данных, которые получены в настоящей работе. Также я там приводил результаты измерений других авторов, полученных другими методами. Во многих этих работах просто не приведена какая-то конкретная погрешность, поскольку большинство методов, например определение по спектральному индексу в длинноволновом диапазоне спектра, завязаны на большом количестве трудноопределяемых параметров: начиная с расстояния, которое уже обсуждалось до более тонких вещей, например, клочковатости звездного ветра WR. Как показал Анатолий Михайлович в своё время, звёздный ветер WR неоднороден, он имеет некую скважность, и это учитывается в моделях в виде некоторого параметра. Но наши динамические оценки от этого параметра совершенно не зависят. Что касается учёта различных подтипов, это на самом деле очень интересный вопрос, который требует дальнейших исследования. Здесь могу ответить так. Я ожидаю, что мы сможем получить динамические оценки для систем со звёздами WR уже других типов, не только азотных, но, например, и углеродных. Например, есть звезда в системе CV Ser углеродная, вот над ней сейчас работаем.

«Большую неопределённость в оценке финальных масс вносит принятая продолжительность стадии WR. Обсуждение этой проблемы всего выделено всего около одной страницы текста...» Последовательность WN-WC-WO представляет собой

эволюционную последовательность. То есть у нас сначала звезда атмосфера звезды обогащена азотом, то есть как таким наиболее задерживающимся продуктом CNO-цикла, затем уже обогащается углеродом и кислородом. Собственно, вопрос, представляет ли WO следующую стадию после WC? Здесь, по последним данным, есть сомнения, это скорее одна такая подстадия, то есть примерно с одним возрастом, но просто с несколько отличными условиями. Что касается того, стоило ли проверить несколько каких-то простых возможностей и дать какой-то диапазон, чем пытаться придумать что-нибудь реалистичное, я могу сказать, что это было сделано в нашей работе, в том числе на которой основе диссертация, мы проделали такой анализ для двух крайних предположениях. В первом случае мы считали все наблюдающиеся массы звёзд WR находящимися в начале стадии, то есть считали потерю массы всех звёзд максимально возможной, следующей из там полного продолжительности стадии WR. Вторая крайняя возможность заключалась в том, что все звёзды WR у нас вот-вот сколлапсируют, соответственно, никакой коррекции за потерю массы мы не вводим. Анализ статистического преобразования, он показывает, что вот если пересчитывать его в массу CO ядер, то получается близкое преобразование, но с, возможно, с некоторым небольшим дефектом масс (от 0.8 до чуть больше единицы для крайних возможностей). При более реалистичном допущениях, как показано у меня в работе, этот диапазон фактически сужается до области вблизи единицы. На самом деле, допускает дефект масс порядка 10% при коллапсе, но это могут быть уже более тонкие вещи, связанные, видимо, с механизмом самого коллапса. Это, опять же, то, что планируется изучать в дальнейшем.

Так, я ответил на замечания Александра Сергеевича Винокурова. Я перехожу к замечанию...

Постнов К.А. (председательствующий)

Простите, коллеги, по процедуре мы должны ему послать эти ответы письменные и ждать его реакции, или мы должны сами оценить, насколько полно ответил диссертант на вопросы оппонента, который отсутствует? Как вы полагаете, исчерпывающее? Мы ему дали время для второго доклада.

Шапошников И.А. (соискатель)

Я общался с оппонентом по электронной почте, он моими ответами вполне удовлетворён.

Постнов К.А. (председательствующий)

Удовлетворён. Поверим.

Шапошников И.А. (соискатель)

Хорошо, теперь перехожу к замечанию Павла Борисовича Иванова. Я счёл корректным не перепечатывать полностью эту часть отзыва, поскольку она достаточно ёмко может быть сведена к некоторым моментам, касающимся принятой в моей работе модели орбитальной эволюции тесной двойной системы. Где я учитываю радиальную потерю массы звездой WR, находящейся на круговой орбите данной системе со спутником типа О. Для наиболее тесных звезд я учитываю конечный радиус звезды WR, то есть то, что у меня уход вещества происходит не из какой-то точки, а с некоторой сферической поверхности. Но в то же время, как указывает оппонент, я не учитываю в своей работе некоторые важные эффекты. Они разбиты на две части, как это было в непосредственно в отзыве. Первое — это вклад моментов собственного вращения звезды, возможность аккреции вещества из ветра друг на друга. И второе — это эллиптическая орбита, нарушение синхронизации вращения, приливное взаимодействие между звёздами, а также магнитное поле.

Я начну с первого. Действительно, у меня в модели из такого самого важного не учитывается напрямую момент собственного вращения звезды. То есть, как бы считается, да, что у нас с одной стороны звезда конечных размеров, но с другой стороны, всё-таки у неё нет какого-то такого заметного распределения по массе. Видна сильная концентрация к центру. На самом деле, легко показать, что эта поправка не будет существенной. На слайде здесь записана формула для полного момента вращения синхронизированной двойной системы. Первый член — это орбитальный момент (кеплеровский), вот эти два — это вращение, собственно, двух звезд с радиусами R_i и массами M_i , коэффициент k_i — это некоторые безразмерные моменты инерции (коэффициенты при моменте инерции, вот которые после MR^2). Я не стал здесь проверять подробные выкладки: продифференцировав это выражение по времени немножко там поигравшись с ним, можно получить вот такую формулу, которая от того, что я применяю в диссертации, отличается по сути, вот этим знаменателем и вот этими вот поправочками (было две трети, здесь два минус $3k_i$). У нас массивные звёзды невырожденные, для их структурах характерна сильная концентрация к центру, и эти параметры k_i можно смело принять не превосходящими одну десятую. Здесь я привожу оценки учёта собственного моментов собственного вращения для системы CX Сер, для которой эффекты радиуса оказались существенными. Я здесь это привожу в табличке, например, как у меня было сделано диссертации, в виде некоторой связи логарифмической производной орбитального периода с логарифмической производной массы звезды WR через этот фактор, их как бы связывающий. Вот я здесь его привожу. Значит, первые два значения — это классическая джинсовская мода, когда мы радиус вообще никак не учитываем, он равен нулю. Значение x — это отношение темпа потери массы звезды ОВ к темпу потери массы WR. Опять же, можно считать, что x не превосходит одной десятой. Здесь мы видим коэффициенты

порядка 0.7. При учёте радиуса у нас этот коэффициент оказывается порядка 0.4, а при добавлении коэффициентов k_i (то есть учёта собственных моментов инерции), у нас эта поправка оказывается нескольких процентов, что вообще-то «убивается» прочими неопределённостями, которые заложены в оценку темпа потери массы. То есть этот эффект, он, да, он важен, он обязательно будет учтён в следующих работах, но всё-таки на масштабе порядка восьмидесяти лет, по которому оценен темп эволюции орбитального периода, на которых, собственно, смотрится темп потери массы, этот эффект я считаю несущественным.

Далее, ответ на замечание два. Эллиптические орбиты. Анализ кривых лучевых скоростей, проведённый в главе 1, не выявил значимых отличий орбит от круговых. Это такое хорошее на самом деле подспорье в моём анализе считать все орбиты круговыми. Вот то, что вот действительно интересно, что не может быть учтено так просто, но обязательно будет сделано в последующих работах — это учёт возможного нарушения синхронизации. Но даже не того, который возникает в ходе потери массы там за счёт перераспределения этого момента между орбитальным и собственным, а, собственно, даже за счёт того, что изначально эта синхронизация может быть по модулю угловых скоростей неидеальной. Формула на слайде дополнена некоторыми коэффициентами, где, ω большое — это собственная угловая скорость вращения. Но опять же можно ожидать слабого нарушения синхронизации в наших случаях. В работах, которые вот цитирует оппонент в своём отзыве, при достаточно специфических условиях можно получить отличия порядка полутора от орбитальной (угловой скорости). Но всё-таки это про какие-то сильные магнитные поля, что в нашем случае не так существенно, но в будущем это может быть учтено рассмотрено. Каким образом? Просто в этой формуле нужно рассмотреть отдельно вот эти угловые скорости независимо от ω -маленького (угловой скорости орбитального вращения), а также дополнить это уравнение выражением для связи между ω -большим и ω -маленьким (например, в рамках той же теории Зана, где будет сильная зависимость от радиуса конвективного ядра). Эффекты, связанные с приливным взаимодействием, будут наиболее себя мощно проявлять в системах звёзд маломассивных. У нас звёзды массивные, с широкими лучистыми оболочками. Про магнитные поля я, кажется, уже отвечал. Всё-таки для массивных звёзд это будет не такой актуальной историей, как, например, для звёзд, скажем, класса В или систем с Ве-звёздами. Всё-таки это не наш случай, но было бы, конечно, интересно в будущем это рассмотреть.

Постнов К.А. (председательствующий)

Спасибо, Иван Андреевич. Павел Борисович, Вы удовлетворены ответом?

Иванов П.Б. (официальный оппонент)

Удовлетворен.

Шапошников И.А. (соискатель)

Я перехожу к замечаниям Юнгельсона Льва Рафаиловича.

В главе 1 я привожу новое определение масс компонентов пяти системы, но не привожу сравнение с литературными данными, которые позволили бы понять значимость уточнений и отдельно, что для систем CQ Сер и CX Сер мои оценки существенно ниже, чем приводимые в литературе. Да, мне, наверное, стоило дать какую-то табличку сводную. Скажу, что для трёх остальных систем там уточнение в целом согласуется с работами предыдущих авторов - там по каждой системе по четыре-пять работ с архивными кривыми лучевых скоростей, где как раз приводятся спектроскопические оценки массы. Там всё более-менее сходится. Вот для CQ Сер — это, как я уже сегодня неоднократно говорил, очень интересная система, и для неё все оказывается сложнее. В чём её интересность? По всему следует, что звезда O в этой системе более массивная, но в то же время мы практически не видим её спектральных следов, поэтому там не получается, как для остальных четырёх систем, красивым образом построить две кривые лучевых скоростей. Приходится ограничиваться одной с некоторыми предположением об отношении масс. Я использовал значение q (то есть отношение массы WR к массе звезды O) порядка 0.6, которое получено в моей работе, но не на основе построения индивидуальной, как бы кривой лучевых скоростей о звезды, а по наблюдениям некоторых деталей в сложном бленде, которые мы и некоторые другие авторы интерпретировали как линии Si IV в спектре от звезды O. Это находится в хорошем соответствии с достаточно старой работы Карташовой и Снежко (1985 года), которые анализировали спектроскопию высокого разрешения, полученную на БТА. Там, несмотря на солидный возраст работы, данные очень качественные, этим данным, я считаю, можно верить. Для CX Сер некоторое отличие может быть связано с уточнением полуамплитуды лучевых скоростей для более массивной компоненты. И также ещё, что важно для оценки итоговой массы, это какое мы берём значение угла отклонения орбиты.

В гл. 2 утверждается, что «Для кривых лучевых скоростей использование только приведенных в литературе средних эпох также может приводить к ошибкам. Поэтому для корректного построения диаграммы «O-C» разумно уточнить эти эпохи непосредственно по наблюдательным данным с помощью метода Герцшпрунга.» Да, я действительно я не просто брал там какую-то одну цифру из архивной работы, что вот там эпоха минимума наблюдалась вот в такой-то день, плюс-минус столько-то. Нет, я для каждой работы я находил временные ряды достаточно подробные, с кривыми блеска и кривыми лучевых скоростей, анализировал эти ряды и по ним независимо уточнял каждую эпоху. И это на самом деле не то чтобы корректная методика, она, я считаю, единственно верная, поскольку когда поднимаешь данные за порядка восьмидесяти, а где-то даже и ста лет, понятно, что они очень разнородные, и нужна общая методика для их корректного сравнения. Поэтому я использую

модифицированный метод Герцшпрунга, то есть сравнение непосредственно по некоторым участкам кривых блеска или кривых лучевых скоростей. Я считаю это необходимыми процедурами в данной работе.

Так, «в разделе 4.2.1. упоминается, что для наиболее тесных систем возможен также перенос массы между компонентами, приводящий к орбитальной эволюции в медленной моде. Системы с звездой О, заполняющей полость Роша неизвестны.» Я как раз-таки утверждаю (как и работы, на которые я ссылаюсь), что система CQ Сер (для которой показано систематическое уменьшение орбитального периода со временем) является самым надёжным кандидатом в подобные системы. Это действительно очень редкая ситуация, когда массивная звезда заполняет полость Роша, что-то похоже есть в разве что микрокваре SS 433, но здесь вот, пожалуйста, ещё один кандидат.

«Не недостаток, но пожелание – сравнить полученные оценки скорости потери массы не только с «законом» Нугиса-Ламерса (рис. 4.2), но и с другими «законами», например, Финка (2017), Ёона (2017), которые часто используются в расчетах эволюции звезд и связывают dM/dt с эффективной температурой и обилием гелия на поверхности звезд.» Здесь я сравниваю не совсем именно с законом Нугиса-Ламерса, а с их наблюдательными данными, полученными по радио- и ИК-потокам (по спектральному индексу). И отдельно отмечу, что все эти формулы завязаны как раз-таки на светимость, на температуру в некотором роде, и, конечно, на металличность. Но можно как бы сказать, что у нас есть зависимость масса-светимость, которая вырождает эту всю тенденцию к одной зависимости от массы. Я считаю необходимым в дальнейших исследованиях уточнить, как будет меняться эта эмпирическая зависимость при надёжных оценках светимости. Это сделать можно вычислив, отношение светимостей звезд в двойных системах типа WR+OB по их спектрам, это очень непростая задача. Это сравнение будет проведено, но уже в рамках дальнейших работ.

«Найденное в Гл. 5 соотношение между массами звезд перед коллапсом и массами черных дыр безусловно является упрощением...» - я согласен с этим полностью. Это это да, это упрощение. Необязательно эта зависимость может быть монотонной, но исходя из того уровня наблюдательных данных, который мы имеем: размер выборки, качество отдельных измерений и так далее, всё-таки даже такая простая параметрическая монотонная зависимость масс до и после коллапса — это важный шаг. Я в диссертации кратко обсуждаю некоторые методы, как это можно сделать без привязки к конкретному виду аппроксимирующего закона распределения. Здесь на графике приведены оценки эмпирические распределений, полученные без каких-либо предположений общем фиксирующем законе (такие вот получаются синие облачка размытые). Красным также показаны логнормальные аппроксимации, которые, как я уже говорил, хорошо описывают данные. Но опять же видны

какие-то, может быть, местами не монотонности. И по вот этим двум графикам можно сразу построить модельно независимо, без каких-то там законов преобразования, просто связь двух распределений, по т. н. квантиль-квантильному графику. Эти распределения рассчитываются для каждого значения массы и каждого значения полной вероятности на некоторой сетке, задаются некоторой вероятностной величиной и могут быть представлены в виде матриц. Вот эта картинка получена по сути матричным перемножением вот этих двух первых, а нормировка соответствует наиболее представленной области данными в этом диапазоне. Мы видим, что да, эмпирическая зависимость хорошо прописывается там в диапазоне там масс чёрных дыр от пяти масс Солнца до примерно 12-15. Она хорошо ложится на вот этот степенной закон, но опять же видны какие-то небольшие от него отличия. На вопрос, насколько они обусловлены именно структурой данных, а не физическими эффектами, пока нельзя ответить. Я надеюсь, что когда у нас счёт известных чёрных дыр и звёзд WR пойдёт хотя бы на малые сотни, это можно будет уже сделать более надёжно. По крайней мере, этот подход даёт некоторую основу для проведения такой работы в будущем.

Мне кажется, я учёл все основные замечания.

Постнов К.А. (председательствующий)

Лев Рафаилович, Ваше мнение?

Юнгельсон Л.Р. (официальный оппонент)

Ответ меня устраивает.

Постнов К.А. (председательствующий)

Спасибо, Иван Андреевич, пожалуйста, садитесь. Дорогие коллеги, мы закончили выступление официальных оппонентов и ответы на замечания, и переходим к дискуссии. Кто желает взять слово? Пожалуйста. Можно задавать вопросы. Да, пожалуйста, Михаил Евгеньевич.

Прохов М.Е. (член диссертационного совета)

Диссертант отвечал на вопросы оппонентов вдвое дольше, а может, и втрое, чем было дано время на основной доклад. Ведь с этими вопросами он был знаком за несколько дней до защиты. Надо было сделать так, чтобы в основном докладе все практически все ответы прозвучали, и в конце было на что сослаться. Вот. Думаю, диссертант честно этими ответами заработал себе несколько чёрных шаров при голосовании.

Постнов К.А. (председательствующий)

Не согласен.

Алексеев И.И. (член диссертационного совета)

Возражу выступавшему прямо передо мной Михаилу Евгеньевичу.

Приписывают какому-то мудрецу, арабскому, что когда его спросил ученик, почему у тебя много вопросов, а мне всё ясно. Он ему нарисовал, значит, большой круг в пустыне и говорит: «Вот граница этого круга, то, что внутри круга - это то, что я знаю, а граница — это как мои знания граничат с незнанием». А ты ткнул точку, это вот, значит, твои знания и, соответственно, граница с незнаниями. И я хочу сказать, что, конечно есть, так сказать, диалектическое противоречие в том плане, что чем больше вопросов, так сказать, более глубокий анализ, да, тем больше вопросов возникает. Это к этому докладывав полной мере относится. Я имею в виду, что ну какое тут магнитное поле? Тут нет ответа на такой вопрос. Само по себе совпадение распределений ещё не говорит о том, какая доля массы пошла в чёрную дыру, а какая доля улетела. А это как бы для нас принципиальный вопрос, потому что то, что улетело, потом в виде прототуманности остаётся в нашей Вселенной. А то, что упало в чёрную дыру - всё, уже пропало. Да, пропало. И я хочу сказать, что тем не менее работа хорошая, и чёрных шаров не надо.

Постнов К.А. (председательствующий)

Ну, позвольте мне сказать пару слов. Как вы видели, там я соавтор нескольких статей и должен отметить, что Иван Андреевич обладает невероятно, как мы смогли в этом убедиться, въедливым таким характером. Значит, если вы ему задаёте вопрос, а он вам на него начинает отвечать так, как вот он по Гамбургскому счёту отвечал бы, как вот он это понимает досконально. Это, на мой взгляд, это очень хорошее качество. И, значит, все, так сказать, замечания, которые по сути были высказаны, он, конечно же, учтёт в будущем, я предлагаю нам всем проголосовать за присуждение ему искомой степени, которую он, безусловно, заслужил. Диссертация удовлетворяет с лихвой всем необходимым критериям, которые мы к таким диссертациям предъявляем.

Нет желающих ещё высказаться? Тогда слово предоставляется диссертанту для краткого заключительного слова.

Шапошников И.А. (соискатель)

Спасибо уважаемым членам совета и гостям за замечания. Конечно, да, стоило покомпактнее ответить на замечания, но всё же мне хотелось, с другой стороны, чтобы осталось поменьше вопросов уже по итогам всего доклада. По правде говоря, сейчас мне уже нечего добавить. Я считаю, что я сказал всё, что мог сказать, и смиренно надеюсь на положительное решение. Спасибо.

Постнов К.А. (председательствующий)

Спасибо. В таком случае мы должны перейти к выборам к счетной комиссии. Значит, в счетную комиссию предлагаются следующие член диссертационного совета — Малова

Хельми Витальевна, Пширков Максим Сергеевич и Сильченко Ольга Касьяновна. Кто «за»? «Против»? Есть ли воздержавшиеся? Все за.

Дорогие коллеги, если нет возражений, прошу приступить к процедуре голосования.
(Объявляется технический перерыв и проводится процедура тайного голосования)

Постнов К.А. (председательствующий)

Дорогие коллеги, прошу садиться. Счетная комиссия закончила свою работу и сейчас огласит результат подсчета голосования. Пожалуйста, Максим Сергеевич.

Пширков М.С. (председатель счетной комиссии):

(Зачитывает протокол счетной комиссии).

Состав диссертационного совета – 30 человек (на разовую защиту включено – 0 человек). Присутствует на заседании 26 членов совета. Роздано бюллетеней – 26. Осталось не розданных бюллетеней – 4. Оказалось в урне бюллетеней – 0.

Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата физико-математических наук Шапошникову И.А.: «за» – 26, «против» – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Постнов К.А. (председательствующий)

Кто за то, чтобы утвердить результаты голосования? Против нет. Воздержавшихся нет. Все за. Спасибо. Утверждаем.

Таким образом, на основании результатов тайного голосования Шапошникову И.А. присуждается ученая степень кандидата физико-математических наук.

Теперь надо утвердить открытым голосованием заключение диссертационного совета по диссертации Шапошникова И.А.

(Обсуждается проект заключения).

Кто «за» принятие заключения? Кто «против»? Нет. Кто «воздержался»? Все за. Таким образом, процедура защиты на этом заканчивается. Можно заканчивать. Поздравляем.

Председатель
диссертационного совета МГУ.013.1
доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

К. А. Постнов

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.013.1
доктор физико-математических наук

А. И. Богомазов

18 июня 2026 года