

## СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.203.01

протокол № 101 от 20 октября 2016 г.

Председатель: доктор физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН  
Балега Юрий Юрьевич

Ученый секретарь: кандидат физ.-мат. наук  
Шолухова Ольга Николаевна

Состав совета - 19 человек, присутствуют — 14:

1. д.ф.-м.н, член-корр. Балега Ю. Ю. 01.03.02
2. д.ф.-м.н Клочкова В. Г. 01.03.02
3. к.ф.-м.н Шолухова О. Н. 01.03.02
4. д.ф.-м.н Афанасьев В. Л. 01.03.02
5. д.ф.-м.н Бескин Г. М. 01.03.02
6. д.ф.-м.н Богод В. М. 01.03.02
7. д.ф.-м.н Верходанов О. В. 01.03.02
8. д.ф.-м.н Глаголевский Ю. В. 01.03.02
9. д.ф.-м.н Караченцев И. Д. 01.03.02
10. д.ф.-м.н Мингалиев М. Г. 01.03.02
11. д.ф.-м.н Панчук В. Е. 01.03.02
12. д.ф.-м.н Романюк И. И. 01.03.02
13. д.ф.-м.н Трушкин С. А. 01.03.02
14. д.ф.-м.н Фабрика С. Н. 01.03.02

**Председатель:** Так, уважаемые коллеги, мы продолжим работу сегодняшнюю. Нам предстоит заслушать, обсудить и принять решение по диссертации Александра Сергеевича Винокурова «Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и сверхкритической дисковой аккреции». Работа выполнена в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. Научный руководитель доктор физ.-мат. наук Фабрика Сергей Николаевич. Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук профессор Постнов Константин Александрович, ГАИШ МГУ, и кандидат физ.-мат. наук доцент Шиманский Владислав Владимирович, Казанский Федеральный Университет. Ведущая организация — Институт космических исследований РАН. Прошу, уважаемый секретарь, что у нас с документами?

**Секретарь:** Все документы, которые необходимы для защиты кандидатской диссертации, представлены. Все кандидатские экзамены сданы на отлично. Претензий к документам нет.

**Председатель:** Есть ли у кого вопросы по документам? Нет. Тогда мы переходим к научному докладу, двадцать минут, пожалуйста.

**Винокуров А. С.:** Добрый день, уважаемые коллеги! Рад представить вам результаты диссертационной работы по теме «Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и сверхкритической дисковой аккреции». Работа выполнялась в нашей обсерватории под руководством Сергея Николаевича Фабрики.

Ультраяркие рентгеновские источники представляют собой переменные в рентгеновском диапазоне объекты, изотропная светимость которых превышает эддингтоновский предел для черных дыр звездных масс. Среди основных свойств объектов следует отметить следующие: их рентгеновские спектры обычно имеют двухкомпонентную форму с мягким избытком ниже  $\sim 1$  кэВ и жестким компонентом с перегибом на 3-5 кэВ. По своим рентгеновским свойствам они сильно отличаются от рентгеновских двойных с черными дырами нашей Галактики; оптические двойники ультраярких рентгеновских источников, а сейчас отождествлено около 20 объектов, имеют абсолютные звездные величины в диапазоне от -4 до -7.5 со средним значением -6. Спектральные распределения энергии оптических двойников ультраярких рентгеновских источников, как правило, являются голубыми имеют степенную форму; связаны они с молодым звездным населением, часто окружены туманностями.

Для объяснения феномена ультраярких рентгеновских источников обычно привлекаются две интерпретации. Согласно первой из них, они представляют собой сверхкритические аккреционные диски вокруг черных дыр звездных масс. Согласно второй — стандартные аккреционные диски вокруг так называемых черных дыр "промежуточных масс", имеющих массы от 100 до 10000 масс Солнца. В любом случае, требуется массивный донор на тесной орбите, способный обеспечить темп аккреции, достаточный для появления объекта с рентгеновской светимостью больше, чем  $10^{39}$  эрг/с.

Актуальность темы тем, что до сих пор не решен вопрос о массах черных дыр и темпах аккреции в ультраярких рентгеновских источниках.

Кроме того, исследование ультраярких рентгеновских источников тесно связано с такими важными задачами, как: физика сверхкритической аккреции на черные дыры и вопросы формирования ветров с поверхности аккреционного диска и формирования струйных выбросов в самых внутренних областях канала сверхкритического диска; эффективность энерговыделения в аккреционных дисках, а также темпа накопления массы черными дырами. Последнее является особенно важным для понимания как формировались сверхмассивные черные дыры в квазарах за первый миллиард лет их эволюции; зависимость массы черных дыр от масс рождающих их звезд, а также от их металличности; вопрос, связанный с эволюцией молодых скоплений и выбросом из них массивных двойных звезд, которые впоследствии могут рождать двойные черные дыры, как недавно открытый в рамках эксперимента LIGO объект, который позволил зарегистрировать гравитационно-волновое излучение.

Целями и задачами данной работы являлись: спектральное исследование выборки оптических двойников ультраярких рентгеновских источников, проведение их фотометрии по данным космического телескопа им. Хаббла с целью дальнейшего использования этих результатов фотометрии для проверки модели спектральных распределений энергии; проведение астрометрических исследований с целью поиска новых оптических отождествлений ультраярких рентгеновских источников; сравнение всех доступных оптических спектров ультраярких рентгеновских источников для определения типа их спектров, а также для выяснения, где же формируются спектры исследуемых объектов — возможны три варианта - либо звезда-донор, либо стандартный диск вокруг черной дыры промежуточной массы, или сверхкритический диск вокруг черной дыры звездной массы; моделирование спектральных распределений энергии

сверхкритических аккреционных дисков от рентгеновского до оптического диапазона с целью объяснения наблюдаемых распределений энергии ультраярких рентгеновских источников.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена основным наблюдательным свойствам рассматриваемых в диссертации ультраярких рентгеновских источников, описанию наблюдательных данных, использованных в работе, а также основных этапов редукции этих данных. В таблице указан полный список исследуемых в работе ультраярких рентгеновских источников; приведены их координаты, расстояния до родительских галактик, величины межзвездного покраснения — полное, определенное по линиям бальмеровской серии туманностей, окружающих исследуемые источники, а также поглощение в нашей Галактике; указаны рентгеновские светимости объектов в единицах  $10^{39}$  эрг/с и видимые звездные величины их оптических двойников. Отмечу, что все оптические двойники ультраярких рентгеновских источников имеют звездные величины слабее 21-ой, что позволяет проводить спектральные исследования этих объектов только на самых крупных телескопах мира.

Спектральные наблюдения проводились на телескопах БТА (на слайде указан список объектов) и Subaru. Кроме того, в работе были задействованы архивные данные телескопа VLT, а также данные из литературы. На вкладках представлены карты отождествления объектов, которые спектрально наблюдались на телескопах Subaru и БТА: показаны карты для Holmberg II X-1, для Holmberg IX X-1, NGC4559 X-7 и NGC5204 X-1. На БТА были проведена спектроскопия непосредственно оптического двойника ультраяркого рентгеновского источника NGC4395 ULX-1 (отмечу, что это 23-я звездная величина), и окружения объектов NGC4559 X-10 и NGC5474 X-1 — в данном случае сами оптические двойники снять не удалось, поскольку они имеют 25-ю звездную величину.

Вторая глава посвящена анализу спектров ультраярких рентгеновских источников, прежде всего тех данных, которые были получены на телескопе Subaru, поскольку эти данные являются уникальными по отношению сигнал-шум. Спектры объектов, которые мы наблюдали на Subaru представлены на этом слайде. На левой вкладке показаны калиброванные по потоку спектры. Во всех спектрах наблюдаются широкие эмиссионные

линии He II 4686, H beta, He I 5876, H alpha, и в некоторых объектах другие линии He I и He II. На центральной и правой вкладках крупно показаны области спектра, содержащие линии He II и H beta, а также H alpha и He I. Узкие абсорбционные линии, которые вы можете видеть на этих спектрах, являются результатом перевычитания вклада туманностей при экстракции спектров оптических двойников ультраярких рентгеновских источников.

В результате работы были проанализированы спектры восьми ультраярких рентгеновских источников, которые представляют собой полную выборку объектов, для которых когда-либо была проведена глубокая спектроскопия в оптическом диапазоне. Оказалось, что эти объекты имеют один и тот же тип спектра. Сравнение спектров ультраярких рентгеновских источников со спектрами объектов других классов показало, что ультраяркие источники по типу своих спектров сходны со поздними звездами Вольфа-Райе азотной последовательности с линиями водорода и Голубыми Яркими Переменными, LBV, а также с единственным известным в Галактике сверхаккретором SS433. На рисунке представлены семи ультраярких рентгеновских источников в области от линии H gamma до линии H beta, для сравнения показан спектр SS433. Как видно из рисунка, набор основных широких эмиссионных линий во всех этих объектах один и тот же. В таблице представлены измерения эквивалентных ширин линий в спектрах ультраярких рентгеновских источников и их сравнение с таковыми в SS433. Как можно судить из последних трех отношений линий, отношение эквивалентной ширины линии He II к линиям водорода в ультраярких рентгеновских источниках в 6 раз больше, чем в SS433, тогда как отношение эквивалентной ширины линии He I к линиям водорода примерно соответствует тому, что наблюдается в SS433. Это может говорить в пользу более высоких температур излучающего газа в ультраярких рентгеновских источниках, чем в SS433, при солнечном содержании гелия и водорода.

На этом слайде представлена известная классификационная диаграмма WNL-звезд, представленная в работе Краутера и Смита и существенно дополненная в работе Шолуховой. Положение ультраярких рентгеновских источников и SS433 показаны красными заполненными кружками. Черным показано положение поздних Вольфа-Райе звезд азотной последовательности и LBV при переходах из горячего состояния. Ультраяркие рентгеновские источники на диаграмме занимают область, соответствующую переходам LBV-звезд. Не вдаваясь в подробности исследования, отмечу сильную переменность ширины линии He II в спектрах ультраярких

рентгеновских источников от ночи к ночи. Это резко отличается от того, что наблюдается у звезд, прежде всего масштабами и временами переменности линии He II – в LBV столь значительные изменения параметров линии происходят на временных интервалах месяцы-годы.

Четвертый раздел второй главы посвящен вопросу о возможных областях формирования спектров ультраярких рентгеновских источников. Рассматриваются три варианта: звезда-донор, стандартный аккреционный диск вокруг черной дыры промежуточной массы и сверхкритический аккреционный диск вокруг черной дырой звездной массы. Против того, что спектр формируется на звезде-доноре свидетельствуют три факта. Первое, наблюдаемая амплитуда лучевой скорости линии He II не согласуется с ожидаемыми скоростями звезд-доноров в системах с черными дырами промежуточных масс, где они должны достигать 2000 км/с. Здесь же характерная переменность составляет всего около 200 км/с. Вторым фактом является то, что звезды WNL-типа не способны обеспечить достаточные темпы истечения газа в ветре для того, чтобы в тесной двойной системе с аккрецией газа на черную дыру из ветра донора появился источник с рентгеновской светимостью, характерной для ультраярких рентгеновских источников, то есть со светимостью порядка  $10^{39}$  —  $10^{40}$  эрг/с. И наконец, продемонстрированная на предыдущем слайде с классификационной диаграммой переменность ширины и эквивалентной ширины линии He II в спектрах ULX на временных масштабах порядка одного дня также не соответствует тому, что может наблюдаться в звездах. В случае аккреционного диска ширина линии He II должна быть больше ширины линии H alpha, поскольку область излучения линии гелия располагается в аккреционном диске ближе к черной дыре, где кеплеровская скорость вращения газа выше. Такая картина наблюдается в спектрах транзиентных рентгеновских двойных с самопрогревающимися дисками во время их вспышек, которые показаны на графике соотношения ширины линии He II и H alpha красным цветом. В спектрах ультраярких рентгеновских источников, которые показаны на этом графике черным цветом, наблюдается обратная картина: линия H alpha шире, чем линия He II. Сходная картина наблюдается в SS433, LBV, звездах Вольфа-Райе, а также в горячих сверхгигантах. Это является существенным аргументом в пользу того, что оптические спектры ультраярких рентгеновских источников должны формироваться в ветрах сверхкритических аккреционных дисков.

Третья глава посвящена новым оптическим отождествлениям ультраярких рентгеновских источников. В данной главе представлено отождествление трех объектов: NGC 5474 X-1

(представлен на левой вкладке), M66 X-1 (представлен на центральной вкладке), NGC 4559 X-10 (представлен на правой вкладке). Использование от 3 до 6 опорных источников позволило получить высокую точность астрометрии (лучше, чем 0.2 угловых секунды), в результате для каждого объекта удалось выделить единственный оптический источник, попадающий в кружок ошибок рентгеновских координат, поэтому все отождествления являются уникальными. Анализ отношения рентгеновской к оптической светимости отождествленных и других хорошо исследованных ультраярких рентгеновских источников показал, что NGC 5474 X-1 и M66 X-1 являются одними из самых слабых ультраярких рентгеновских источников в оптическом диапазоне, кроме того, они обладают наибольшим среди хорошо изученных ULX отношением рентгеновской к оптической светимости порядка 7000-8000. Также мы показали, что ультраяркие рентгеновские источники имеют отношение рентгеновской к оптической светимости больше 100–200, что может являться надежным критерием для выделения этих источников среди других объектов.

Отождествленные ультраяркие рентгеновские источники по типу спектральных распределений энергии оказались сходными с холодными сверхгигантами спектральных классов F-G, чем сильно отличаются от более ярких оптических двойников ультраярких рентгеновских источников, которые имеют горячие степенные спектры.

Исследование распределения ULX по абсолютным звездным величинам показало, что объекты имеют абсолютные звездные величины в диапазоне от -4 до -7.5 (серым показан SS433) с явным максимумом на значении абсолютной звездной величины -6. Резкое уменьшение числа объектов с уменьшением абсолютной звездной величины может быть связано либо с эффектами наблюдательной селекции, либо с физикой самих объектов. В работе показано, что оптическая светимость ультраярких рентгеновских источников как сверхкритических аккреционных дисков может сильно зависеть от темпов аккреции в этих объектах. С этим может быть связано наблюдаемое уменьшение числа объектов с уменьшением абсолютной звездной величины, поскольку при уменьшении темпов аккреции уменьшается оптическая светимость ветра сверхкритического диска.

В четвертой главе представлена модель сверхкритического аккреционного диска, разработанная на основе приближения Шакуры-Сюняева и идей, изложенных в работах Липуновой и Поутанена. На данном слайде схематически представлен сверхкритический аккреционный диск. Выше радиуса сферизации находится стандартный диск, ниже –

сверхкритический диск, с поверхности которого истекает ветер. Этот ветер формирует канал, ограниченный радиусом фотосферы.

Выделяются четыре области с разным спектром излучения: ниже радиуса сферизации основной вклад в излучение дает сверхкритический диск (в рентгеновском диапазоне имеет плоский спектр); выше радиуса сферизации в основном светит ветер сверхкритического аккреционного диска; на радиусе фотосферы — Релей-Джинсовская область чернотельного спектра. В модели имеется четыре основных параметра: масса черной дыры; темп аккреции; доля болометрического потока, перерабатываемого в ветровом канале и радиус фотосферы ветра.

Применение модели для анализа спектров ультраярких рентгеновских источников демонстрирует хорошее согласие наблюдательных данных и модели. Черными точками с барами ошибок показаны исправленные за поглощения оптические потоки ультраярких рентгеновских источников, черными крестами показаны поглощенные рентгеновские спектры. Красным показан интегральный модельный спектр, который хорошо описывает оптические потоки от объектов, синяя кривая представляет собой тот же модельный спектр, но с учетом поглощения — он хорошо воспроизводит поглощенные рентгеновские потоки.

В таблице приведены результирующие параметры. Отмечу, что полученные массы черных дыр находятся в диапазоне от 8 до 20 масс Солнца, темпы аккреции являются сверхкритическими — все больше 100 эддингтоновских величин.

На этом слайде представлены результаты развития нашей модели — учтена комптонизация излучения. В результате применения этой модели к объекту NGC5408 X-1 показано, что оценки массы черной дыры и темпов аккреции, полученные как в уточненной модели, так и в выше описанной, хорошо согласуются.

Положения, выносимые на защиту. Результаты спектроскопии и анализа спектров оптических двойников семи ультраярких рентгеновских источников. Сделан вывод, что эти объекты обладают одним и тем же типом спектра, сходным со спектрами звезд LBV в их горячей фазе или звездами WNLh, а также спектром SS433. Зависимость оптической светимости ультраярких рентгеновских источников как сверхкритических аккреционных дисков от темпа аккреции: при снижении темпа аккреции оптическая светимость



уменьшается, температура ветра сверхкритического диска возрастает. Вывод о том, что источник с отношением рентгеновской к оптической светимости больше 100-200 является надежным кандидатом в ультраяркие рентгеновские источники. Модель сверхкритического аккреционного диска на основе приближения Шакуры-Сюняева, которая объясняет спектральные распределения энергии ультраярких рентгеновских источников от оптического до рентгеновского диапазона. Отождествление в оптическом диапазоне двух ультраярких рентгеновских источников в галактиках NGC 5474 и M66, которые по типу своих спектров представляют собой холодные сверхгиганты спектрального класса F-G.

Новизна работы сильно совпадает с положениями, выносимыми на защиту. Кроме указанного выше, научной новизной является отождествление в оптическом диапазоне еще NGC4559 X-10, а также соотношение ширин линий He II и H alpha в спектрах ультраярких рентгеновских источников.

Апробация работы была проведена на семинарах нашей обсерватории, в университете г. Киото в Японии, университете г. Потсдам в Германии, а также на пяти российских и международных конференциях. Список публикаций включает шесть статей, три из них — в рецензируемых изданиях. Личный вклад автора заключается в участии в наблюдениях, обработке всех наблюдательных данных, разработке модели сверхкритического аккреционного диска и интерпретации результатов наравне с соавторами.

Спасибо за внимание.

**Председатель:** Вопросы пожалуйста. Ченцов.

**Ченцов Е.Л.:** Почему не исследовались вот эти ваши объекты в более близких галактиках, в том числе и нашей собственной? Потому что они неизвестны здесь или нужны какие-то специфические типы галактик? В чем дело? — это странно.

**Винокуров А. С.:** В нашей собственной галактике подобного типа объект только один, вероятно. Это SS433. Больше ультраярких рентгеновских источников, именно классических, с рентгеновскими светимостями больше  $10^{39}$  эрг/с, нет. В близких галактиках, начиная с галактик на 3 Мпк. Есть в M31 источник, но он слегка меньше, чем  $10^{39}$  эрг/с, поэтому не является классическим ультраярким рентгеновским источником.

**Председатель:** Еще вопросы? Горанский.

**Горанский В. П.:** Вы сказали о сходстве спектра с SS433. Возникает такой вопрос: вы имели в виду оптический спектр или вообще? Дело в том, что рентгеновские спектры SS433 имеют кТ порядка 20-ти кэВ, а у вас меньше единицы.

**Винокуров А. С.:** Температура горячих электронов в ультраярких рентгеновских источниках порядка 2-3 кэВ обычно. Чем отличаются.. Да, в SS433 температура выше, возможно некоторые параметры комптонизированного излучения другие, и, собственно, состояние вещества. Однако, следует отметить, что SS433 мы видим сбоку, мы не заглядываем напрямую в канал сверхкритического диска. Поэтому и возможны несколько другие характеристики наблюдаемого излучения. Кроме того, соотношение жесткой и мягкой части спектра SS433 показывает, что в мягкой части излучается примерно в 20 раз больше, чем в жесткой. Здесь же излучается примерно поровну в мягком и жестком диапазоне. Мы предполагаем, что в ультраярких рентгеновских источниках реализуются меньшие темпы аккреции — с этим могут быть связаны физические различия.

**Председатель:** Еще вопросы? Афанасьев.

**Афанасьев В. Л.:** Скажите, а какой смысл вы вкладываете в слово двойник оптический? Слово двойник подразумевает нечто другое, похожее на то, что вы исследуете.

**Винокуров А. С.:** Здесь это оптический источник, с которым отождествлен рентгеновский источник при астрометрии.

**Афанасьев В. Л.:** То есть, это неудачный перевод английского термина.

**Винокуров А. С.:** Да.

**Председатель:** Еще вопросы? Клочкова.

**Клочкова В. Г.:** Вы сказали, что эти очень интересные объекты в основном все находятся в звездных скоплениях. А что-то известно об этих скоплениях, об их звездном составе? Что-то можно сказать, или это настолько слабые объекты, что нет?

**Винокуров А. С.:** Они достаточно яркие, это молодые скопления..

**Клочкова В. Г.:** ..молодые, так.

**Винокуров А. С.:** В статье Поутанена 2013-го года, где изучались ультраяркие рентгеновские источники в галактиках «Антенна», показано, что эти источники связаны с молодыми звездными скоплениями. Возраст этих скоплений — 3-5 миллионов лет.

**Клочкова В. Г.:** Спасибо. У меня второй вопрос. Вот подобие спектров изученных источников и источника SS433.. Все-таки, основные особенности не найдены ни у одного объекта? - вот то, что наблюдается у SS433 — это движутся высокоскоростные компоненты. Есть такое где-то еще?

**Винокуров А. С.:** Оптических линий струй нигде не найдено. Однако, например в объекте нашего интереса Holmberg II X-1 в радиодиапазоне найдены свидетельства струйной активности. Явные свидетельства..

**Клочкова В. Г.:** Спасибо.

**Председатель:** Караченцев.

**Караченцев И. Д.:** У меня вопрос в продолжение к тому, что Евгений Леонидович спрашивал — по частоте встречаемости таких объектов в галактиках разной светимости, разной структуры.. Если считать, что их количество пропорционально светимости, то, скажем, Holmberg IX — это очень слабая галактика, по сравнению с Андромедой: в сотни раз меньше светимость. Если считать, что корреляция идет не с интегральной светимостью звезд галактики, а только с молодыми звездами в очагах звездообразования, то тоже можно привести целый ряд примеров близких галактик, у которых очень мощное звездообразование, но эти галактики не присутствуют в вашем списке. Может здесь, все-таки, играет существенную роль избирательность? Если очень плотный фон молодых звезд и НП-областей, то там трудно выделить такой источник? В чем дело?

**Винокуров А.С.:** Вы правы, количество ультраярких рентгеновских источников связано именно с темпами звездообразования. Что касается списка объектов, это не все ультраяркие рентгеновские источники: в рентгеновском диапазоне сейчас известно около

500 кандидатов в относительно близких галактиках, где-то до 50 Мпк, но в оптическом диапазоне отождествлены около 20 объектов — большую их часть я и рассматривал, поскольку мы больше интересуемся их оптическими свойствами, нежели свойствами в рентгеновском диапазоне. Это дальнейшая работа по отождествлению остальных известных ультраярких рентгеновских источников, она сейчас ведется как в нашей группе, так и в зарубежных.

**Председатель:** Еще вопросы? Габдеев.

**Габдеев М. М.:** Я хотел уточнить, как проводилось сравнение отношений линий водорода и гелия, когда одни там в абсорбции, другие в эмиссии, причем вклад какой-то есть еще от туманности, который вы вычитали. Поясните, пожалуйста.

**Винокуров А. С.:** Вот эти графики со спектрами, которые я демонстрировал, больше имеют презентационный характер. Естественно исследовались спектры, где вклад туманности был полностью сохранен. Проводился гаусс-анализ, то есть, находилась широкая компонента линии и узкая компонента, принадлежащая туманности. Мы уверены, что широкая компонента принадлежит непосредственно источнику, поскольку параметры этой широкой компоненты менялись от ночи к ночи, что невозможно для линий туманности. Так и были выделены и измерены все параметры линий.

**Председатель:** Афанасьев.

**Афанасьев В. Л.:** Вот график, по одной оси эквивалентная ширина линии, а по другой оси — собственная ширина линии. Вы ведь наблюдаете эмиссионные линии, выводы сделали по эмиссионным линиям. Скажите, пожалуйста, какой смысл имеет эквивалентная ширина (понятие из звездной спектроскопии) для эмиссионной линии? Вы, фактически, в единицах континуума показываете линию. А если будет меняться континуум — что вы получите? — ни слова вы не произнесли о континууме. Все-таки, какой смысл у этого графика?

**Винокуров А. С.:** Здесь эквивалентная ширина линии характеризует темпы потери массы в ветрах. В этом заключается ее физический смысл в данном случае.

**Афанасьев В. Л.:** Линия излучения характеризует, ну скажем так, оптическую толщину. Для

эмиссионной линии.. Давний спор идет с людьми, которые строят эмиссионные линии в галактиках и это лишено смысла — эквивалентная ширина эмиссионной линии, поскольку мы тут же должны говорить о континууме. Если у вас будет меняться континуум, будет меняться и эквивалентная ширина. А континуум непонятно как связан с тем, что вы исследуете. Вопрос в этом.

**Винокуров А. С.:** Эквивалентная ширина зависит не только от плотности ветров, но и от температуры этих ветров, то есть подсвечивающего излучения.

**Афанасьев В. Л.:** Я понял, спасибо.

**Председатель:** Клочкова.

**Клочкова В. Г.:** Немного я не поняла: в первом результате, выносимом на защиту, сказано про однородный класс объектов. Понятие однородность несколько смущает, поскольку в самом докладе вы говорили, что выделяются группы объектов, в которых линия гелия шире водорода и наоборот. То есть, в каком смысле «однородность» - по энергетике?

**Винокуров А. С.:** Объясню. В спектрально исследованных ультраярких рентгеновских источниках линии водорода шире, чем линия гелия. Сравнение проводилось с так называемыми рентгеновскими транзиентами — в них линия He II шире. То есть, это совершенно другие объекты.

**Клочкова В. Г.:** Спасибо.

**Председатель:** Еще вопросы, коллеги? Пожалуйста Горанский.

**Горанский В. П.:** У меня такой вопрос. Вы говорили, что различия SS433 и ULX зависит от того под каким углом мы заглядываем в канал сверхкритического аккреционного диска. Вычисляли ли вы положение линии H alpha, то есть ее сдвиг? Попадает ли она в диапазон спектров и имело ли смысл ее искать в ваших спектрах, если мы наблюдаем релятивистские линии именно со стороны оси.

**Винокуров А. С.:** В наш диапазон попадает линия H alpha. Релятивистских линий в

оптическом диапазоне мы не видим ни в одном из объектов. Вероятно, что это связано с более низкими темпами истечения вещества в ветре. Может быть, просто напросто, нет условий для коллимации струй в этих источниках, поэтому релятивистских линий мы не видим.

**Председатель:** Есть еще вопросы, коллеги? Спасибо. Присаживайтесь. Переходим к отзывам. Первым будет отзыв научного руководителя.

**Фабрика С. Н.:** Добрый день. Мне придется отзыв зачитать, так как он большой и еще будут ряд комментариев. Диссертация Винокурова посвящена исследованию нового класса астрофизических объектов — ультраярких рентгеновских источников, далее ULX. Эти объекты были выделены в галактиках в 2000-м году в результате наблюдений рентгеновской обсерватории Chandra, благодаря рекордному пространственному разрешению ее телескопа — около одной угловой секунды. До наблюдений Chandra подобные рентгеновские источники считались активными ядрами галактик. Исследованию этих недавно выделенных источников посвящено уже более тысячи публикаций. Их рентгеновские светимости в сотни и тысячи раз выше, чем светимости ярчайших черных дыр Галактики. В литературе обсуждаются две модели ULX — об этом Александр рассказал, поэтому я это пропущу. При этом, черные дыры промежуточных масс могли формироваться из так называемых звезд населения III — это на красных смещениях 15-20-25 звезды с массой 1000 масс Солнца. Потом эти черные дыры будут захватываться галактиками. Независимо от собственных представлений все астрофизики сходятся во мнении, ULX есть самые лучшие кандидаты в черные дыры. Тема диссертации, соответственно, актуальна. За первые 15 лет исследования объектов ULX в рентгеновском диапазоне с привлечением всех космических обсерваторий мира дали очень неожиданных результатов. В рентгеновском диапазоне объекты ULX достаточно яркие. Однако, несмотря на огромную активность исследователей всего мира и большое количество новых данных, их природа до сих пор не прояснилась. Наиболее информативным является оптический диапазон, где эти объекты экстремально слабые — порядка 22-23-й звездной величины и более слабые.

Винокурову Александру была предложена тема диссертации исследование объектов ULX в оптическом диапазоне. В основном это спектроскопия на телескопе Subaru, и также на телескопе VLT. Ему удалось получить спектр, о котором он рассказал, объекта 23-й величины на телескопе БТА и еще пару спектров. По данным космического телескопа

имени Хаббла была построена гистограмма абсолютных звездных величин ULX. Далее я тоже пропускаю, поскольку это было рассказано.

Диссертация состоит из введения, четырех глав.. Здесь я тоже, с вашего позволения, пропущу. Что очень важно, показано, что все спектры ULX, а всего всего 8 во всем мире снято было с учетом архивных данных с телескопов VLT и Кекк, обладают одним и тем же, уникальным типом спектра, подобным объекту SS433 и звездам LBV в их горячем состоянии. Линия He II — это редчайший тип спектров: примерно на сто тысяч звезд можно найти один такого типа объект. Из этого следует, что это они принадлежат одному типу объектов. Формально, если 8 объектов обладают одним и тем же типом спектров, то вероятность того, что эти объекты могут быть разными, менее одного процента. Кроме этого, было рассказано и поэтому я не буду это зачитывать, когда мы построили диаграмму абсолютных величин, выяснилось, что пик на абсолютной звездной величине -6 оказался самым ярким. Когда мы исследовали хаббловские данные, а это звезды 23-й величины, то получается, что никакой наблюдательной селекции там не должно быть, потому, что на HST видны и более слабые звезды, а пик все равно остается. Была идея, что самые яркие в рентгеновском и оптическом диапазонах объекты — это объекты со сверхкритическими дисками, а там, где темп аккреции уменьшается, но тем не менее, он еще сверхкритический, уже проявляется звезда-донор типа F-G сверхгигантов.

В целом, отзыв о диссертационной работе Винокурова весьма положительный. Невозможно за четыре года работы внести решающий вклад в понимание объектов достаточно "модных", которыми сейчас активно занимаются десятки ведущих астрофизиков мира, и на которые выделяется огромное количество времени на самых престижных телескопах мира. Тем не менее, ряд выводов диссертации несомненно вносят заметный вклад в понимание природы этих черных дыр как сверхкритических дисков. В 2014-м году был открыт ультраяркий рентгеновский пульсар в галактике M82. Мы надеемся получить спектр этого объекта через полгода. И тут 23-его сентября, всего месяц назад, был открыт ультраяркий рентгеновский пульсар с периодом 0.4 секунды в том самом объекте, для которого был снят спектр на телескопе VLT, и в этом спектре есть линия He II. Получается, что у нас вышло какое-то расхождение, что если ULX — сверхкритические аккреционные диски с черными дырами, то этот рентгеновский пульсар уже однозначно не является черной дырой. Через три дня был открыт еще один ультраяркий рентгеновский пульсар. Все статьи, конечно же, публикуются в Nature. Я бы хотел отметить, что несмотря на такую «гипермодную» тему, очень «горячую» тему, тем

не менее мы выдерживаем конкуренцию. Выяснилось, что открытый пульсар, где видна линия He II, тем не менее, представляет собой сверхкритический аккреционный диск и не является черной дырой промежуточной массы. В этом плане (в диссертацию это, конечно же, не вошло, так как текст был сдан более двух месяцев назад) это подтверждает то, что эти объекты являются сверхкритическими аккреционными дисками, но один из них не черная дыра, о чем будет сказано в отзыве Постнова Константина Александровича.

Важно отметить, что Винокуров очень хорошо освоил современные методы обработки данных, например, он свободно владеет обработкой фотометрии с HST, даже в деталях. Совместно с Кириллом Атапиным они промоделировали рентгеновские спектры ULX моделью сверхкритических дисков с учетом комптонизации и инсталлировали эту модель в среду XSPEC. Александр Винокуров принимает активное участие в наблюдениях на телескопе БТА, он является ответственным за наблюдения. Винокуров имеет хорошую математическую и физическую подготовку (физфак МГУ), он берется за решение как наблюдательных, так и теоретических задач. Я должен также отметить активность и самостоятельность работы Александра Винокурова, с ним оказалось очень приятно работать.

В работах, описанных в диссертации, получены новые и интересные результаты. Считаю, что диссертация А. С. Винокурова соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико–математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, а диссертант заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико–математических наук.

**Председатель:** Спасибо, присаживайтесь. Переходим к заключению организации, где выполнялась работа. Ольга Николаевна.

**Секретарь:** Заключение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук. Диссертация «Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и сверхкритической дисковой аккреции», представляемая на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия, выполнена в лаборатории физики звезд САО РАН.

В период подготовки диссертации соискатель, Винокуров Александр Сергеевич, работал в должности стажера-исследователя и учился в очной аспирантуре Федерального



государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН). В 2012 году А.С. Винокуров окончил Московский Государственный Университет имени М. В. Ломоносова по специальности астрономия. Научный руководитель – доктор физ.-мат. наук, профессор Фабрика Сергей Николаевич.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение.. Если можно, я его буду зачитывать и перейду сразу к научной новизне и ценности.

**Председатель:** Да, пожалуйста.

**Секретарь:** Научной новизной, кроме указанных выше результатов, также является проведение спектроскопии пяти ультраярких рентгеновских источников в период с 2011 по 2016 годы на телескопах БТА и Subaru. По результатам спектроскопии впервые показано, что ширина линии He II в ультраярких рентгеновских источниках как правило меньше ширины линии H  $\alpha$ , что свидетельствует в пользу формирования этих линий в плотных ветрах сверхкритических аккреционных дисков. Помимо объектов NGC5474 X-1 и M66 X-1 отождествлен в оптическом диапазоне ультраяркий рентгеновский источник NGC4559 X-10. В результате анализа отношения рентгеновской к оптической светимости ультраярких рентгеновских источников обнаружено, что отождествленные автором ультраяркие рентгеновские источники NGC5474 X-1 и M66 X-1 имеют наибольшее среди хорошо изученных объектов отношение рентгеновской к оптической светимости около 7000-8000.

Научная ценность состоит в том, что в работе приводится уникальный для данного класса объектов спектральный материал. Полученные ширины и эквивалентные ширины линий могут быть использованы для проверки различных гипотез относительно природы ультраярких рентгеновских источников. Обнаруженные три новых оптических двойника расширяют список отождествленных в оптическом диапазоне ULX. Автором предложен новый метод определения принадлежности любого рентгеновского источника к ULX по высокому отношению рентгеновской к оптической светимостей. Разработанная спектральная модель сверхкритических аккреционных дисков позволяет объяснить наблюдаемые распределения энергии ULX от рентгеновского до оптического диапазона. Дальнейшее развитие модели сверхкритических аккреционных дисков потенциально ведет к возможности определения масс черных дыр и темпов аккреции в ULX, а планируемое ее включение в пакет XSPEC откроет к ней доступ широкой научной общественности.

Все результаты, выносимые на защиту, аргументированы и подробно изложены в 5 статьях диссертанта, 3 из которых опубликованных в рецензируемых журналах из списка ВАК. Представленные результаты и выводы обсуждались на семинарах CAO, в университете Киото, в университете города Потсдам, на российских и международных конференциях.

Автор принимал активное участие в подготовке к наблюдениям и наблюдениях на телескопах БТА и Subaru. Автором были выполнены обработка всех спектральных данных; астрометрические измерения по данным Chandra и HST; фотометрия изображений, полученных на космическом телескопе Хаббла. Совместно с соавторами была разработана модель сверхкритических аккреционных дисков. Во всех работах автор внес равноценный вклад в обсуждение и интерпретацию результатов наряду с соавторами.

Семинар пришел к заключению, что представляемая диссертация является самостоятельной, законченной научно-исследовательской работой. Работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия, а диссертант заслуживает присвоения ему звания кандидата физ.-мат. наук.

Заключение принято на заседании общего астрофизического семинара 18 февраля 2016 года.

**Председатель:** Спасибо. У нас поступили отзывы на автореферат?

**Секретарь:** Нет, отзывов на автореферат не поступило.

**Председатель:** Не поступало. Тогда переходим к отзыву ведущей организации. Придется вам зачитать.

**Секретарь:** Отзыв ведущей организации. Первое, актуальность темы диссертации. Выяснение природы ультраярких рентгеновских источников, наблюдаемых в близких галактиках, является предметом активных исследований начиная с 2000 года. В последнее время получен ряд наблюдательных фактов, указывающих на то, что большинство таких объектов являются тесными двойными системами, в которых происходит сверхкритическая аккреция вещества с массивной звезды-донора на черную дыру звездной массы. Однако по-прежнему нельзя исключить возможность, что в части объектов этого класса роль аккретора играет черная дыра промежуточной массы (больше

100 масс Солнца).

Для большинства известных ультраярких рентгеновских источников существуют только данные наблюдений в рентгеновском диапазоне, и лишь в последнее время для нескольких объектов появились отождествления в оптическом диапазоне. Основная трудность связана с тем, что ULX находятся на расстояниях в несколько Мпк, и их оптические “двойники” являются очень слабыми звездами, блеск которых трудно различить на фоне излучения соседних звезд. Еще сложнее получить спектры оптических двойников. При этом очевидно, что только комплексный подход, основанный на использовании как рентгеновских, так и оптических данных, может позволить существенно продвинуться в понимании природы ультраярких рентгеновских источников и построить детальную теорию сверхкритической аккреции на черные дыры. Именно такой комплексный подход реализован в представленной диссертационной работе.

Таким образом, тема диссертационной работы несомненно актуальна.

Достоверность и научная новизна основных результатов. Достоверность представленных в диссертации результатов обеспечена использованием современных и апробированных средств обработки и анализа наблюдательных данных, а также методов моделирования физических процессов. В работе получен ряд новых значимых результатов.

Научная и практическая значимость основных результатов и выводов. Ценность представленной работы состоит в первую очередь в том, что для ряда ультраярких рентгеновских источников впервые получены, проанализированы и систематизированы уникальные данные оптических наблюдений с помощью телескопов БТА, Subaru, HST, VLT, что позволило выявить уникальные характерные особенности объектов и объяснить их в рамках сценария сверхкритической аккреции на черную дыру звездной массы. Обнаруженные в ходе работы новые оптические двойники ULX позволили существенно расширить наблюдательную базу для дальнейших исследований ULX. Несомненный интерес для работающих в данной области исследователей будет представлять разработанная и планируемая для включения в ПО XSPEC модель, позволяющая рассчитывать спектральное распределение энергии.

Оценка диссертационной работы в целом. Представленная диссертационная работа выполнена на высоком профессиональном уровне и соответствует стандартам современной астрофизики. Сильными являются как экспериментальная, так и теоретическая части работы.

Имеется ряд замечаний к диссертации:

В главе 4.2.3 сравниваются величины поглощения на луче зрения, полученные по оптическим и рентгеновским данным, и делается вывод, что рентгеновское поглощение систематически превышает оптическое, и что это вероятно свидетельствует о присутствии дополнительного газа внутри центрального канала диска. Этот вывод, однако, вызывает некоторые сомнения, так как сравнение представленных в таблицах 1.1 и 4.3 данных по оптическому и рентгеновскому поглощению указывают на то, что величина поглощения в оптике (на пыли) возможно скоррелирована с величиной поглощения в рентгене (на холодном газе). Это может означать, что поглощение в обоих диапазонах все таки возникает в межзвездной среде, а некоторое расхождение связано с систематическими погрешностями в измерении величин  $A_V$  и  $N_H$  по соотношению потоков в оптических линиях (причем в спектрах туманностей, а не самих источников) и форме рентгеновского спектра соответственно. Было бы полезно изучить этот вопрос более детально, так как от этого зависит определение отношения рентгеновской к оптической светимости.

В главах 4.2 и 4.3 представлены результаты аппроксимации спектральных распределений энергии (от оптики до рентгена) ряда ULX. В таблицах 4.2 и 4.3. приведены значения параметров, которые позволяют достаточно хорошо описать данные наблюдений. К сожалению, практически не обсуждается насколько сильно эти параметры модели (а их много) скоррелированы друг с другом. Было бы полезно хотя бы грубо оценить неопределенность измерения параметров, пусть даже сама модель, по-видимому, сильно упрощает реальную картину сверхкритической аккреции.

Третье, в подписи к рис. 1.3 следовало бы указать название телескопа (БТА), на котором были сделаны представленные наблюдения.

Четвертое, в подписи к рис. 2.3 допущена оговорка, что у четырех объектов ширина линии He II больше, чем ширина линии H  $\alpha$  (должно быть наоборот).

Сделанные замечания не влияют на высокую оценку данной диссертационной работы. Диссертация Винокурова представляет законченное научное исследование. Автор внес основной или равный вклад во все результаты и положения, вынесенные на защиту. Он принимал участие в планировании и проведении наблюдений, а также обработке. Вместе с соавторами разработал модель сверхкритических аккреционных дисков и применил ее для описания данных наблюдений.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих реферируемых

астрофизических журналах и неоднократно докладывались на конференциях и семинарах, в том числе несколько раз в нашем институте. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений.

Полученные в диссертации результаты могут использоваться в профильных учреждениях: ИКИ РАН, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ГАО РАН, ФИАН, МИФИ, ГАИШ МГУ, в других отечественных и зарубежных астрофизических центрах.

Диссертация Винокурова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия. Автореферат соответствует ее содержанию. А.С. Винокуров несомненно заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв одобрен на семинаре отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН 13 сентября 2016 г.

**Председатель:** Спасибо. Пожалуйста, вам слово, Александр Сергеевич.

**Винокуров А. С.:** Спасибо большое. По поводу замечаний. Первое замечание, касающееся соотношения оптической и рентгеновской величин поглощения. Оптическая величина поглощения определялась по отношению линий бальмеровской серии окружающих ультраяркие рентгеновские источники туманностей, рентгеновская же величина поглощения определяется при фитировании физической моделью рентгеновских спектров этих объектов. Во всяком случае для тех ультраярких рентгеновских источников, которые исследовали мы, корреляции между этими величинами не обнаружено. Точки достаточно хаотично разбросаны по графику соотношения рентгеновской и оптической величины межзвездного поглощения. Тем не менее, спасибо за высказанное замечание, несомненно этот вопрос требует дальнейшего исследования не только в нашей группе, но и другими авторами, поскольку на данный вопрос пока нет ответа.

Что касается второго замечания по поводу скорелированности различных параметров в нашей модели. Отмечу, что самые важные параметры модели – это масса черной дыры и темп акреции определяются достаточно надежно, особенно это касается массы черной

дыры поскольку от нее зависит общая светимость этих объектов в рентгеновском и оптическом диапазоне, то есть она выступает как нормировочный фактор. С темпом аккреции все несколько сложнее, там действительно есть небольшая корреляция с величиной поглощения в рентгеновском диапазоне. Поскольку темп аккреции определяется по спектру в мягком рентгеновском диапазоне, где влияние поглощения наиболее значимо. По остальным замечаниям абсолютно согласен.

**Председатель:** Спасибо. Переходим к отзывам официальных оппонентов. Первым у нас Константин Александрович Постнов, но поскольку его здесь нет, то придется Ольге Николаевне его зачитать.

**Секретарь:** Диссертационная работа Винокурова посвящена наблюдению в оптическом диапазоне и всестороннему изучению одного из интереснейших классов астрофизических объектов – ультраярких рентгеновских источников. К этому классу относят внегалактические объекты – рентгеновские источники со светимостью в десятки и сотни раз превышающей эддингтоновский предел для стационарно излучающих объектов солнечной массы. Несмотря на многолетние исследования в рентгеновском и оптическом диапазонах, природа этих объектов до конца не выяснена. Основные модели источников, рассматриваемые до последнего времени, сводились или к аккреции вещества с высоким темпом на компактные объекты большой массы, или к специфическим проявлениям сверхкритической дисковой аккреции на ЧД стандартных звездных масс (порядка 5-20 масс Солнца). ЧДПМ пока надежно не открыты, хотя есть теоретические предпосылки для их существования, поэтому изучение ультраярких рентгеновских источников является фундаментальной и актуальной проблемой современной астрофизики. В последнее время среди этого класса источников были обнаружены аккрецирующие рентгеновские пульсары, что указывает на возможную неоднородность этих источников и обостряет проблему их надежной идентификации с разными классами компактных релятивистских звезд. В представленной диссертации проведены систематические фотометрические и спектральные исследования оптических двойников ряда ультраярких рентгеновских источников с целью выявления отличительных характеристик проявления сверхкритического аккреционного диска вокруг компактных объектов звездной массы. Оптические двойники этих источников крайне слабы, поэтому для выполнения поставленных задач диссертант использует как собственный наблюдательный материал, полученный на крупнейших телескопах мира, так и архивные данные.

С вашего позволения, я не буду структуру диссертации зачитывать и перейду сразу к

замечаниям.

К диссертационной работе Винокурова А.С. следует сделать несколько замечаний.

Первое. Основное замечание: в пункте 1 положений, выносимых на защиту (страница 16), утверждается, что все исследованные в диссертации источники по оптическим спектральным свойствам представляют однородный класс объектов, однако вывод о природе компактного объекта как сверхаккрецирующей черной дыры звездной массы из этого не может быть однозначным, что доказывается недавним открытием сверхкритического рентгеновского пульсара в источнике NGC 7793 P13, который входит в список объектов, исследованных в диссертационной работе.

Второе. В Главе 4 при обсуждении модели SCADc важным параметром является температура электронов, на которых происходит комптонизация излучения. Эта температура, вообще говоря, может быть очень высокой внутри канала сверхкритического аккреционного диска, как следует из наблюдений жесткого рентгеновского излучения в источнике SS433. В Таблице 4.3 на странице 139 значение этой температуры не приведено и в тексте не обсуждается.

Третье. В списке литературы отсутствуют названия статей, что крайне желательно при чтении диссертационных работ.

Четвертое. В тексте диссертации встречаются опечатки.

Эти замечания, однако, скорее отражают крайнюю актуальность работы и быстрое накопление данных по исследуемым в диссертации объектам, не снижают в целом высокую научную и практическую ценность диссертационной работы Винокурова и могут быть учтены в дальнейшей работе.

Общее заключение. В диссертационной работе Винокурова получены новые важные результаты в области астрофизики и звездной астрономии – проведены уникальные глубокие оптические наблюдения ряда ультраярких рентгеновских источников с целью выяснения их природы. Впервые проведено отождествление трех ультраярких рентгеновских источников. Предложен новый метод выделения ультраярких рентгеновских источников из фоновых объектов по высокому значению отношения рентгеновской светимости к оптической. Разработана феноменологическая многопараметрическая модель излучения от стандартного сверхкритического аккреционного диска, объясняющая оптические и рентгеновские спектры ультраярких рентгеновских источников. Эти результаты работы позволяют существенно продвинуться в понимании природы ультраярких рентгеновских источников как компактных объектов в тесных двойных системах на сверхкритической стадии аккреции.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением хорошо проверенных высокоточных методов обработки фотометрического и спектроскопического материала, полученных на крупнейших телескопах мира, а также с высокой степенью апробации и международным признанием результатов в публикациях в высокорейтинговых журналах.

Результаты диссертации могут быть использованы при интерпретации данных оптических и рентгеновских наблюдений ультраярких рентгеновских источников, а также при моделировании спектров сверхкритических аккреционных дисков, во многих отечественных и зарубежных научных центрах. Диссертационная работа Винокурова полностью отвечает всем требованиям Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., а сам автор, Винокуров Александр Сергеевич, безусловно заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Постнов Константин Александрович.

**Председатель:** Спасибо. Пожалуйста, Александр Сергеевич.

**Винокуров А. С.:** Спасибо большое. В первом замечании сказано, что открыт в NGC7793 ультраяркий рентгеновский пульсар. Это открытие было сделано уже после сдачи текста диссертационной работы, действительно, это важное уточнение и дополнение к этой работе. На этот вопрос уже ответил Сергей Николаевич Фабрика, когда зачитывал свой отзыв, тем не менее еще раз оглашу. Несмотря на то, что в этом объекте открыта нейтронная звезда, тем не менее авторы подтверждают, что она находится в режиме сверхкритической аккреции. То есть, в целом это на выводы диссертации не сильно влияет. По второму замечанию, Ольга Николаевна, можете напомнить?

**Секретарь:** При обсуждении модели SCADc важным параметром является температура электронов, на которых происходит комптонизация излучения. Эта температура, вообще говоря, может быть очень высокой внутри канала сверхкритического аккреционного диска, как следует из наблюдений жесткого рентгеновского излучения в SS433.



**Винокуров А. С.:** Спасибо большое, это несколько пересекается с вопросом Виталия Петровича Горанского, по поводу сравнения температур горячих электронов в ультраярких рентгеновских источниках и в SS433. В SS433 действительно наблюдаются более высокие температуры электронов, тем не менее, как я уже говорил, условия наблюдения этого объекта, да и физические характеристики могут сильно отличаться от того, что мы видим в ультраярких рентгеновских источниках. По поводу остальных замечаний, конечно, я согласен.

**Председатель:** Спасибо. Следующий оппонент Владислав Владимирович Шиманский. Казанский (Приволжский) Федеральный Университет.

**Шиманский В. В.:** Если можно, часть отзыва я опущу с описанием работы, а когда буду зачитывать замечания, сделаю некоторые комментарии. Отзыв официального оппонента на диссертацию Винокурова Александра Сергеевича “Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и сверхкритической аккреции”. Изучение источников жесткого.. Давайте, я своими словами хочу сказать потому что мне так легче. Во-первых, я считаю, что данная работа имеет очень высокую степень актуальности, потому что в настоящий момент уже понятно что, рентгеновские источники – это одни из самых ярких объектов во Вселенной, то есть это объекты, которые показывают состояние плазмы в сверхкритических аккреционных условиях, поэтому изучение этих источников существенно продвинуть как фундаментальные физические теории, так и наше понимание общей структуры эволюции Вселенной и построить более точные модели космологического развития Вселенной. Поэтому, непосредственно исследование ярких источников рентгеновского излучения – это одна из самых актуальных задач современности, являющаяся «локомотивом» современной астрофизики. Понятно, что несмотря на прогресс рентгеновских наблюдений, к сожалению, точность и информативность современных рентгеновских наблюдений все-таки на данный момент оказываются ниже оптических наблюдений, просто потому что оптические наблюдения более развиты и нам более удобны. И в этих условиях оказывается наиболее продуктивной работа, которая будет сочетать в себе исследования таких объектов, сделанные как в рентгеновском диапазоне спектра, так и в оптическом диапазоне спектра. Такие исследования будут взаимно дополнять друг друга и приносить нам максимум информации. Именно по этому пути пошел диссертант в своей диссертационной работе и результаты диссертационной работы показывают, что этот путь действительно является плодотворным, и эти результаты показывают, что актуальность выбранного им

направления действительно имеется и эта актуальность и научная значимость очень высокие. Если можно, я не буду описывать саму диссертационную работу, я теперь перейду сначала к замечаниям, потом к аттестационной части. К работе у меня имеется три основных замечания. Первое замечание касается сравнение спектров, исследованных ULX-источников и спектров LBV звезд и SS433. Диссертант непосредственно при сравнении спектров делает совершенно правильный вывод о том, что эти ULX-источники имеют одинаковые спектральные характеристики, то есть спектры их похожи и они образуют некую единую группу. При этом эти спектры имеют общее сходство со спектрами LBV звезд и SS433. Я считаю, что такая формулировка правильная, потому что эта формулировка говорит о том, что все излучение формируется в оптически тонкой среде, то есть в звездном ветре — я с этим могу согласиться. Однако, в результатах главы 2 и в результатах диссертации, не выносимых на защиту — в результатах, выносимых на защиту, правильная формулировка, а в результатах в конце диссертации и в заключении существует более жесткая формулировка о том, что спектры ULX-источников имеют сильное сходство со спектрами LBV звезд и спектром SS433. Я считаю, что это не так. Во-первых, по наблюдаемым спектрам видно, что это не так, у нас и отношение интенсивностей линий разная для разных элементов, и полуширины разные, кроме того в спектре SS433 присутствуют линии тяжелых элементов, которые мы не наблюдаем у ULX-источников. С физической точки зрения это говорит о том, что хотя спектр формируется в ветре, но механизмы их формирования могут быть существенно отличными. В первом случае, допустим, для LBV звезд это, скорее всего, играет роль термодинамические процессы, то есть сама температура ветра влияет на излучение, а вот для ULX-источников большие поля ионизирующего рентгеновского и ультрафиолетового излучения, очевидно, должны формировать эффекты флюоресценции. Таким образом, механизм формирования, я считаю, что здесь отличный, и SS433 не совсем совпадает с ULX-источниками.

Второе замечание касается некоторых формулировок. Сейчас я его зачитаю.

На странице 65 отмечено, что для определения ошибок параметров линий при их измерении строился синтетический спектр, содержащий моделируемую линию. Однако, остается непонятным из каких предположений и с помощью каких инструментов этот спектр был получен. У оппонента сложилось впечатление, что понятие "синтетический спектр" обозначает в данном случае единичный континуум с добавлением гауссиан на длинах волн линий. Очевидно, что такое понятие не имеет никакого отношения к истинному синтетическому спектру. Я понимаю, что каждый диссертант хочет покрасивее оформить свою работу, но в данном случае, мне кажется не нужно доходить

до такого.

Наконец, третье замечание. Остается не доказанным вывод на странице 85 и в заключении главы 2 на странице 88: "Наблюдаемая температура ветра SS433 составляет 50 кК в фазе прецессии, когда диск максимально открыт для наблюдателя. Таким образом, температуры ветров ULX должны находиться в диапазоне 70-200 кК." Оно опирается на утверждение на странице 68: "Итак, наблюдаемое соотношение эквивалентных ширинок линий объясняется более высокими температурами ветров ULX, чем в SS433, температура фотосферы ветра в котором достигает значений 50000 К или более". Я считаю, что это утверждение о температурах ветра в ULX-источниках о температурах ветра от 70 до 200 кК не может быть построено на сравнении интенсивностей линий. Дело в том, что, во-первых, условия наблюдения ветра в SS433 и в ULX-источниках разные, и об этом говорит сам диссертант в своей диссертации; во-вторых, мы не можем по отношению интенсивностей линий говорить о температуре. Дело в том, что в данном случае ветер формируется в далеких от термализации условиях. Мы сделали небольшой расчет: при зоне формирования ветра  $10^{12}$  см, планковском коэффициенте  $10^3$ , характерном для температуры 50 кК, получается плотность примерно  $10^9$  частиц/см<sup>3</sup>. Для того, чтобы у нас была термализация и чтобы линии характеризовали температуру, должно быть  $10^{16}$ . Очевидно, что у нас есть 7 порядков разницы, таким образом ни о какой термализации излучения речи быть не может, тем более, что у нас есть большое ионизирующее излучение (рентгеновское и ультрафиолетовое), которое на этот ветер падает.

Вот это мои замечания. Еще я сделаю одну добавку: у первого оппонента прозвучала фраза насчет ULX-источника NGC7793 P13. Дело в том, что в диссертации диссертантом отмечено на странице 81, что этот источник имеет некоторое отличие от всех остальных источников излучения и его природа должна окончательно уточнена. Более того, на странице 107 он указывает о том, что однозначно к ULX источникам должны относиться объекты у которых рентгеновской и оптической светимости не меньше 100. Почему-то отношение для этого объекта не посчитано, не знаю по каким причинам, но по тем данным, которые есть в диссертации, я прикинул, что это отношение для данного источника равняется примерно 50. Таким образом, даже по тому критерию, который сам диссертант предложил в своей диссертации, в принципе, он совершенно прав, что этот источник поставлен под сомнение и сказал, что он должен проверяться в дальнейших исследованиях.

И заканчивая, скажу, что автореферат полностью соответствует структуре и основным выводам диссертации. Перечисленные недостатки не имеют принципиального значения и

не изменяют общую положительную оценку диссертации.

Оппонент считает, что диссертация "Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и сверхкритической дисковой аккреции" является глубоким, всесторонним и законченным научным исследованием, связующим достижения рентгеновской и оптической астрономии, имеет заметное значение для дальнейшего изучения физики рентгеновских источников, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Винокурова А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия.

**Председатель:** Спасибо, присаживайтесь. Пожалуйста, ответ на замечания.

**Винокуров А. С.:** Спасибо большое. Действительно, можно согласиться со всеми замечаниями. Единственное, что я хочу отметить по поводу температуры ветров в ультраярких рентгеновских источниках. В июне этого года мы ездили в Германию для совместного расчета спектров ультраярких рентгеновских источников с профессором Вольф-Райнером Хаманном с помощью его кода, который позволяет рассчитывать спектры ветров Вольфа-Райе звезд и прочих сходных объектов с ветрами. В процессе этих расчетов мы полностью согласовали модельные спектры с тем, что наблюдается в ультраярких рентгеновских источниках, и получили что все-таки температуры ветров этих источников достаточно высокие (минимум 30 000 К) в ряде случаев существенно выше.

**Председатель:** Спасибо. Переходим, коллеги, к общей дискуссии по докладу. Пожалуйста, кто желает выступить первым? Дискуссия по докладу. Вижу Бескин хочет выступить, пожалуйста.

**Бескин Г. М.:** Работа производит очень сильное впечатление, прежде всего тем, что диссертанту удалось соединить очень разные стороны астрофизической науки. Он вел очень большие циклы наблюдений. Он прекрасно овладел данными, которые получены в жестком диапазоне. Он сумел так или иначе сопоставить и построить общие представления об этих объектах. Он ввел в обиход целый набор очень слабых объектов этого типа на основании исследований, которые будут развиваться в этом направлении. Он получил интересные результаты и то, что последнее время как раз выяснилось, что пара объектов не являются черными дырами, а являются нейтронными звездами, с моей

точки зрения, лишь придает глубокий смысл этого рода занятий. Это говорит о том, что это направление необходимо развивать, что оно далеко от того, что еще как-то закрепиться, здесь нас ждет еще много нового и интересного, прежде всего по той причине, что эти объекты — они как раз относятся к категории тех самых возможных «полигонов» для поиска, обнаружения и исследования черных дыр, сопоставления их свойств и свойств нейтронных звезд. И вот такого рода исследование Александр начал проводить, и они как раз очень много нового могут принести в этой науке. Диссертация несомненно заслуживает высокой оценки и диссертант должен получить искомую степень. Спасибо.

**Председатель:** Еще вступления, пожалуйста, коллеги. Есть желающие выступить по докладу? Нет желающих. Тогда слово предоставляется соискателю для заключительного замечания или благодарности.

**Винокуров А. С.:** Спасибо большое. Хотел бы поблагодарить своего научного руководителя Фабрику Сергея Николаевича за предоставленную тему научного исследования. Я к нему приехал из ГАИШ еще на первом курсе на летнюю практику, с тех пор ездил каждый год, занимался темой ультраярких рентгеновских источников, безусловно, очень интересной и актуальной темой, которая сейчас имеет очень высокие шансы на дальнейшее развитие. Кроме того, хотел бы поблагодарить сотрудников лаборатории Физики звезд за обсуждение темы диссертации и обсуждения в целом в ходе выполнения работы, за помощь при написании работ. Азамату Влееву за то, что научил наблюдать на телескопе БТА, благодаря чему я сейчас могу самостоятельно проводить наблюдения и являюсь ответственным наблюдателем. Также Азамату Валееву и Сергею Карпову благодарность за проверку текста диссертации на предмет грамматических ошибок. Своим друзьям и родным за постоянную поддержку в течение всего периода работы над диссертацией. Большое спасибо!

**Председатель:** Спасибо. Так, коллеги, нам нужно сейчас выбрать комиссию для подсчета голосов. Я предлагаю: Афанасьев, Панчук и Богод. Нет возражений, коллеги? Кто за, прошу проголосовать. Кто против? Принимается. Прошу комиссию приступить к работе.

*(проводится процедура тайного голосования)*

**Председатель:** Все в зале? Все на месте. Слово председателю счетной комиссии.

**Богод В.М.:** Протокол № 101 заседания счетной комиссии, избранной диссертационным советом Д 002.203.011 от 20 октября 2016 года. Состав избранной комиссии: Богод, Афанасьев, Панчук. Комиссия избрана для подсчета голосов при тайном голосовании по диссертации Винокурова Александра Сергеевича на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 19 человек, на срок действия номенклатуры специальности действия научных работников, утвержденной приказом Минобрнауки России от 2.11.2012 № 174/нк.

Присутствовало на заседании 14 человек совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации 13. Роздано бюллетеней — 14, осталось нерозданными бюллетеней — 5, оказалось в урне бюллетеней — 14. Результаты голосования по вопросу о присуждении ученой степени кандидата физ.-мат. наук Винокурову Александру Сергеевичу: «за» — 13, «против» — 0, недействительных — 1. Председатель счетной комиссии Богод, члены комиссии Афанасьев, Панчук.

**Председатель:** Кто за то, чтобы утвердить результаты комиссии, прошу проголосовать. Против? Воздержались? Нет. Принимается единогласно.

**Председатель:** Нам остается поработать над заключением по диссертации.

*(Члены совета обсуждают проект заключения)*

Заключение принимается единогласно в следующей редакции:

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИСЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.203.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ  
СПЕЦИАЛЬНОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

**решение диссертационного совета от 20 октября 2016 г. №101**

О присуждении Винокурову Александру Сергеевичу, Российская Федерация, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Наблюдательные проявления ультраярких рентгеновских источников и сверхкритической дисковой аккреции» по специальности 01.03.02 – “Астрофизика и звездная астрономия” принята к защите 15 августа 2016 г., протокол № 97, диссертационным советом Д002.203.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной Астрофизической Обсерватории Российской академии наук, Российская академия наук, 369167, КЧР, Зеленчукский район, п. Нижний Архыз.

Соискатель Винокуров Александр Сергеевич, 1989 года рождения, в 2012 году окончил Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, с 16.03.2012 г. по 15.03.2016 г. проходил обучение в очной аспирантуре САО РАН, на данный момент работает в должности стажера-исследователя в лаборатории физики звезд в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, зав. лабораторией физики звезд САО РАН Фабрика Сергей Николаевич.

Официальные оппоненты:

1. Постнов Константин Александрович, доктор физико-математических наук, Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, профессор кафедры астрофизики и звёздной астрономии;

2. Шиманский Владислав Владимирович, кандидат физико-математических наук, Казанский (Приволжский) федеральный университет, доцент кафедры астрономии и космической геодезии;

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном заключении, подготовленном доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником С. Ю. Сазоновым, подписанном М. Н. Павлинским, доктором физико-математических наук, зав. отделом астрофизики высоких энергий, заверенном академиком РАН, директором ИКИ, Л. М. Зеленым, указала, что диссертация является законченным научным исследованием, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – “Астрофизика и звездная астрономия”, а ее автор А. С. Винокуров заслуживает присуждения ему искомой степени.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ по теме диссертации (общим объемом 45 страниц), из которых 3 напечатаны в рецензируемых журналах, включенных в перечень ВАК. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Vinokurov A., Fabrika S., Atapin K.; "Ultra-luminous X-ray sources as supercritical accretion disks: Spectral energy distributions"; *Astrophysical Bulletin*, Volume 68, Issue 2, pp. 139–153, 2013
2. Fabrika S., Ueda Y., Vinokurov A., Sholukhova O., Shidatsu M.; "Supercritical accretion disks in ultraluminous X-ray sources and SS 433"; *Nature Physics*, Volume 11, pp. 551–553, 2015
3. Avdan S., Vinokurov A., Fabrika S., Atapin K., Avdan H., Akyuz A., Sholukhova O., Aksaker N., Valeev A.; "Optical counterparts of two ULXs in NGC 5474 and NGC 3627 (M66)"; *MNRAS*, Volume 455, pp. L91–L95, 2016

На автореферат отзывы не поступили.



Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается темой исследования, высокой компетентностью в вопросах, рассматриваемых в диссертационной работе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- выполнены наблюдения оптических двойников ультраярких рентгеновских источников на телескопах Subaru (Holmberg II X-1, HolmbergX-1, NGC 4559 X-7, NGC 5204 X-1) и БТА (NGC 4395 ULX-1); проведен детальный анализ спектров оптических двойников восьми ультраярких рентгеновских источников, представляющих собой полную выборку объектов, для которых когда-либо была проведена глубокая спектроскопия в оптическом диапазоне;
- показано, что все ультраяркие рентгеновские источники, для которых имеются спектральные данные в оптическом диапазоне, обладают одним и тем же типом спектра, подобным спектрам звезд LBV в горячем состоянии или звезд WNLh, а также спектру сверхкритического аккреционного диска SS 433;
- обнаружено, что ширина эмиссионной линии He II  $\lambda 4686$  в ультраярких рентгеновских источниках, как правило, меньше ширины линии H $\alpha$ , что свидетельствует в пользу формирования этих линий в плотных ветрах сверхкритических аккреционных дисков;
- показано, что оптическое и ультрафиолетовое излучение ULX формируется в мощном ветре, истекающем с поверхности сверхкритического аккреционного диска вокруг черной дыры звездной массы;
- отождествлены в оптическом диапазоне три ультраярких рентгеновских источника, которые являются одними из самых слабых в оптическом диапазоне ультраярких рентгеновских источников; по типу спектров они представляют собой холодные сверхгиганты спектрального класса F-G.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- разработана модель сверхкритического аккреционного диска в рамках приближения Шакуры-Сюняева, способная объяснить спектральное распределение энергии ультраярких рентгеновских источников в оптическом, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах

- предсказано, что оптическая светимость ультраярких рентгеновских источников как сверхкритических аккреционных дисков зависит от темпа аккреции: при снижении темпа аккреции оптическая светимость уменьшается, температура ветра возрастает, что согласуется с измерениями температур и светимостей для выборки ULX, полученными в данной работе;
- обнаружено, что ультраяркие рентгеновские источники характеризуются очень высоким отношением рентгеновской к оптической светимости (больше 100).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- получено большое количество наблюдательных данных выборки ультраярких рентгеновских источников, анализ которых позволит получить важнейшие результаты, необходимые для понимания физики процессов, протекающих в подобных системах;
- получены оценки масс черных дыр и начальных темпов аккреции в рамках модели сверхкритических аккреционных дисков для пяти ультраярких рентгеновских источников;
- создана методика поиска объектов типа ULX по данным глубоких рентгеновских и оптических обзоров среди фоновых активных ядер галактик по отношению рентгеновского и оптического потоков.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

- данные наблюдений получены на телескопах БТА и Subaru, кроме того, использовались архивные данные, полученные на телескопах VLT, HST и обсерватории Chandra;
- измерения и обработка проводились с помощью стандартных методов и программных средств;
- для анализа наблюдательных данных использовались известные методы Гаусс-анализа, а также методы моделирования физических процессов;
- результаты диссертации апробированы на международных и российских конференциях.

Личный вклад соискателя состоит в его активном участии в постановке и решении задач диссертационной работы, что включает подготовку и получение большей части

наблюдательных данных, обработку наблюдательного материала, разработку модели сверхкритических аккреционных дисков, анализ и интерпретацию данных, написание текстов статей, работу с литературными данными, апробацию результатов исследования в устных и стендовых докладах на научных конференциях.

На заседании 20 октября 2016 г. диссертационный совет принял решение присудить Винокурову Александру Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования, диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов наук по специальности 01.03.02, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 13, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Председатель

диссертационного совета



 Балегга Ю.Ю.

Ученый секретарь

диссертационного совета

 Шолухова О.Н.

20 октября 2016 г.