

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д501.001.86,
созданного на базе Московского государственного университета имени
М.В. Ломоносова, по диссертации на соискание учёной степени
доктора наук.

аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от **13 октября 2016 г. № 138** о присуждении **Сейфиной Елене Викторовне**, гражданке Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих рентгеновских двойных системах»

по специальности «01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия»

принята к защите 6 июня 2016 года, протокол № 137-1а, 137-1б диссертационным советом Д501.001.86, созданным на базе Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1 (приказы Минобрнауки РФ о полномочиях диссертационного совета от 11.04.2012 №105-нк и от 14.11.2013 № 677.нк).

Соискатель **Сейфина Елена Викторовна**, 1965 года рождения, окончила очную аспирантуру физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в **1991** году.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Моделирование рентгеновского излучения объекта SS 433» защитила в **1996** году в диссертационном совете, созданном на базе Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова;

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

Диссертация выполнена в Государственном астрономическом институте имени П.К. Штернберга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Научный консультант:

Титарчук Лев Григорьевич, гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической ядерной физики Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" (НИЯУ МИФИ).

Официальные оппоненты:

Нагирнер Дмитрий Исидорович, гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор кафедры астрофизики Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ);

Гребенев Сергей Андреевич, гражданин РФ, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Рентгеновской и гамма-астрономии отдела астрофизики Высоких Энергий Института Космических Исследований РАН (ИКИ РАН);

Долгов Александр Дмитриевич, гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор, директор Центра астрофизики и физики элементарных частиц Новосибирского государственного университета — дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук в своем положительном заключении, подписанном гражданами РФ, доктором физико-математических наук, академиком РАН, руководителем Астрокосмического центра Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук *Кардашевым Николаем Семеновичем*; доктором физико-математических наук, главным сотрудником Астрокосмического центра Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук *Ивановым Павлом Борисовичем*, указала, что работа полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор Сейфина Елена Викторовна, несомненно, заслуживает присвоения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звёздная астрономия. Заключение утвердил доктор физико-математических наук, заместитель директора Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук *Савинов Сергей Юрьевич*.

Соискатель имеет 41 опубликованную работу, в том числе **21** научную работу по теме диссертации общим объёмом около **180** печатных листов, из которых **11** опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, **2** - в сборниках трудов конференций и **8** тезисов докладов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Titarchuk L., **Seifina E.** "*Scaling of the photon index vs. mass accretion rate correlation and estimate of black hole mass in M101 ULX-1*" // **Astron. Astrophys.** 2016. V. 585, P. 94
2. **Seifina E.**, Titarchuk L., Shrader C., Shaposhnikov N. "*X-ray spectra of the high-mass X-ray binary 4U 1700-37 using BeppoSAX, Suzaku and RXTE observations*" // **Astrophys. J.** 2016. V. 821. P. 23
3. **Seifina E.**, Titarchuk L., Shrader C., Shaposhnikov N. "*BeppoSAX and RXTE spectral study of the low-mass X-ray binary 4U 1705-44: spectral hardening during the banana branch*" // **Astrophys. J.** 2015. V. 808. P. 142
4. Titarchuk L., **Seifina E.**, Shrader C. "*X-ray spectral and timing behavior of Scorpius X-1. Spectral hardening during the flaring branch*" // **Astrophys. J.** 2014. V. 789, P. 98

5. **Seifina E.**, Titarchuk L., Shaposhnikov N. "Black hole mass determination in X-ray binary 4U 1630-47 using scaling of spectral and variability characteristics" // **Astrophys. J.** **2014.** V. 789, P. 57
6. Titarchuk L., **Seifina E.**, Frontera, F. "Spectral state evolution of 4U 1820--30: the stability of the spectral index of Comptonization tail" // **Astrophys. J.** **2013.** V. 767. P. 160
7. **Seifina E.**, Titarchuk L., Frontera F. "Stability of the Photon Indices in Z-source GX 340+0 for Spectral State // **Astrophys. J.** **2013.** V. 766, P. 63 - 85
8. **Seifina E.**, Titarchuk L. "GX 3+1: The Stability of Spectral Index as a Function of Mass Accretion Rate" // **Astrophys. J.** 2012. V. 747. P. 99 - 114
9. **Seifina E.**, Titarchuk, L. "On the Constancy of the Photon Index of X-Ray Spectra of 4U 1728-34 through all Spectral States" // **Astrophys. J.** 2011. V. 738, P. 128 - 148
10. **Seifina E.**, Titarchuk L. "On the nature of the compact object in SS 433: observational evidence of X-ray index saturation" // **Astrophys. J.** 2010. V. 722. P. 586 - 604
11. Titarchuk L., **Seifina E.** "Discovery of photon index saturation in the Black Hole binary GRS 1915+105" // **Astrophys. J.** 2009. V. 706. P 1463 - 1483

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их большим опытом работы в астрофизике и звездной астрономии в направлениях, рассматриваемых в диссертации.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

а) Ведущей организации (г. Москва, Ленинский проспект, 53, АКЦ ФИАН, тел: (499) 135-1429):

Диссертация посвящена изучению спектральных характеристик источников переменного рентгеновского излучения, которые, как считается, содержат аккрецирующие черные дыры и нейтронные звезды. Основное внимание уделяется нахождению и интерпретации эмпирических зависимостей между фотонным индексом, характеризующим наклон энергетического спектра излучения, и различными другими характеристиками, такими как нормировка спектра и характерная частота низкочастотных квазипериодических осцилляций. Эти зависимости используются для установления наблюдательных тестов, различающих аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры и оценки их масс. Тема диссертации, несомненно, представляет значительный интерес для астрофизики высоких энергий.

Замечания к Диссертации:

1) Общие замечания.

В диссертации недостаточно критически используются результаты теоретических исследований. Именно, для своей интерпретации наблюдательных данных диссертант сравнивает их с теоретическими моделями, разработанными определенной группой авторов в основном до

публикации статей, вошедших в диссертацию. Неоднократно в тексте статьи можно встретить утверждения о том, что те или иные предсказания этих теоретических моделей находят подтверждение в наблюдениях. В этой связи важно отметить, что эти модели представляются весьма слабо обоснованными, а некоторые утверждения в соответствующих статьях либо спорными, либо просто ошибочными.

Например, в ряде этих статей (см., например, ApJ, 1998, 499, 315) азимутальная компонента уравнения Навье-Стокса, записанная для аккреционного диска и выражающая закон сохранения углового момента, используется для нахождения закона изменения с радиусом угловой скорости вещества диска?? Общеизвестно, что, так как “некеплеровость” вращения, как правило, связана с учетом сил давления в радиальном направлении, необходимо, по крайней мере, учесть радиальную компоненту уравнения Навье-Стокса, например ApJ, 1988, 332, 646. Более того, как внутреннее граничное условие для используемого уравнения в случае черной дыры используется не обычное предположение о равенстве нулю компоненты тензора вязких натяжений на радиусе последней стабильной орбиты, а совершенно необоснованное утверждение о том, что на этом (или большем) радиусе равна нулю угловая скорость?? Отмечу, что и “параметр” (уравнение (4) статьи) отнюдь не обратно пропорционален альфа параметру Шакуры и Сюняева в случае “стандартных” околокеплеровских дисков, как утверждается в некоторых статьях этой группы авторов, например ApJ, 1999, 518, L95. Более того, вообще говоря, величина является функцией радиуса, а не постоянным параметром. В самом деле, интегрируя уравнение (2) статьи ApJ, 1998, 499, 315, находим $\gamma = -R^3 \cdot (d\omega/dR) / (\omega \cdot R^2 - C)$, где константа C пропорциональна потоку углового момента по диску. Из этого выражения видно, что уже для околокеплеровского закона $\omega \sim R^{-3/2}$ является постоянной, равной 3/2 только для нереалистического вырожденного случая C=0. Более того, для “стандартного” тонкого диска вокруг черной дыры с обычным граничным условием равенства нулю соответствующей компоненты тензора вязких натяжений на последней устойчивой орбите, при приближении к этой орбите стремится к бесконечности! Разумеется, что не равно константе и в хоть сколько-нибудь реалистических моделях толстых дисков, где зависимость ω от R носит достаточно сложный характер, определяемый численным решением соответствующей системы уравнений, см. например ApJ, 1988, 332, 646.

Теория возмущений дисков, развитая этой же группой авторов также не выдерживает критики. Например, в ApJ, 1998, 499, 315 полностью пренебрегается гидродинамическими эффектами в уравнении (13), а влияние вращения на частоту возмущений учитывается в рамках теории возмущений по частоте вращения, справедливой для слабовращающихся объектов, см., например (A9)?? Корректная теория возмущений аккреционных дисков и других дифференциально вращающихся объектов была разработана во множестве работ, см., например PASJ, 1990, 42, 99 и ссылки на эту работу. В частности, в этой работе было показано, что даже без учета силы давления,

вращательное расщепление мод, описывающих вертикальные колебания дисков, является порядка частоты этих мод и теория возмущений по частоте вращения абсолютно неприменима, см. формулу (2.2) в цитируемой работе.

Для правильной постановки задачи о квазипериодических возмущениях аккреционных дисков необходимо опираться на эти исследования! В работе той же группы авторов *ApJ*, 2007, 660, 556 рассматривается “диффузионная” теория возникновения спектра переменности аккреционных дисков с помощью анализа решений линеаризованного уравнения “диффузии” поверхностной плотности, в которое добавлен источник с заданными спектральными характеристиками. Во-первых, характер полученного спектра переменности определяется спектром источника, для которого отсутствует физическое обоснование. Во-вторых, даже в случае возмущений диска, не зависящих от азимутальной переменной, необходим учет сил давления, который полностью отсутствует в подходе авторов, см., например, *MNRAS*, 1995, 272, 618 и *MNRAS*, 2002, 332, 575. Более того, моды возмущений с нетривиальной зависимостью от азимутального угла вообще не могут быть описаны в терминах исследуемого уравнения.

Существует и еще ряд замечаний к теоретическим исследованиям этой группы авторов.

Резюмируя, отмечу, что, так как теория, которую автор использует для сравнения с наблюдениями, является, по моему мнению, весьма слабо обоснованной, то результаты сравнения не могут быть рассмотрены как подтверждающие ее. С моей точки зрения, результаты автора должны трактоваться как чисто эмпирические зависимости, еще ожидающие своего корректного теоретического объяснения.

2) Замечания по ходу текста

Глава 1. а) Изменения фотонного индекса с частотой квазипериодических осцилляций для объекта GRS 1915+105 обсуждалось и другими авторами, см. например Рис. 2 статьи *A&A*, 2003, 397, 729. б) На стр. 37 утверждается, что используемая нормировка пропорциональна потоку массы. Однако, в формулу (1.2) входят внутренний радиус тонкого аккреционного диска, которые являются параметром спектральной модели. Кроме того, после формулы (1.1) читаем, что нормировка пропорциональна полной светимости, тогда как перед формулой (1.2) утверждается, что входящая в (1.1) светимость является “светимостью мягких фотонов”, которые в дальнейшем подвергаются комптонизации. В последнем случае эта величина не может быть определена напрямую из наблюдений. Таким образом, из текста не ясно, является ли нормировка величиной, которую можно получить из наблюдений. Отметим, что и в последующих главах возникает тот же самый вопрос, так как до конца не ясно, как используемые нормировки связаны с наблюдаемыми величинами.

Глава 2. а) Для моделирования источника, обсуждаемого в этой Главе, используется другая спектральная модель, чем в Главе 1. Возникает вопрос, до какой степени параметры, интересующие автора, такие как фотонный

индекс, зависят от выбора спектральной модели? Отметим, что этот вопрос носит общий характер, так как в последующих Главах опять используются разные спектральные модели. б) На стр. (68) читаем о переходе к “субкеплеровскому движению вещества в переходном слое”. Как мы отмечали выше, само понятие “переходного слоя” для аккреционных дисков вокруг черных дыр не является общепринятым, оно является слабо обоснованным, см. общее замечание выше. в) в формуле (2.1) слева аргументом функции является x , а справа, вероятно, N ?

Глава 3. а) Из Рис. 3.13 довольно сложно сделать вывод о “насыщении” фотонного индекса около значения, равного 3 при больших значениях используемой нормировки. б) В работе Nature, 2013, 503, 500 утверждается, что источник M101 ULX-1 содержит звезду Вольфа-Райе и что наличие этой звезды в системе свидетельствует о том, что аккректор является черной дырой звездной массы. в) Источник ESO 243-49 HLX-1 исследовался, например, в ApJ, 2011, 734, 111 в рамках другой спектральной модели. В чем преимущества подхода автора?

Глава 6. а) Для моделирования источника GX 340+0 предполагается, что мягкие фотоны подвергаются Комптонизации в переходном слое, имеющем некоторую электронную температуру. Для спектрального же моделирования этого источника используются две? электронные температуры, см. таблицу 6.3. Необходимо пояснить, почему возникают две температуры горячих электронов. б) Переходный слой предполагается геометрически толстым. В этом случае, протонные температуры могут быть порядка 100 Мэв, см. например ApJ, 2004, 613, 506. Почему электронные температуры, как следует из таблицы 6.3, настолько меньше протонных? в) на странице 226 читаем “релятивистских фотонов”? Что вызывает изменение с энергией и температурой сечения в (6.14)?

Глава 7. На стр. 258 не ясна фраза “В результате этого, сечение рассеяния значительно снижается...”.

Несмотря на указанные замечания, проделана большая работа по изучению и описанию наблюдательных данных, а основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих международных журналах. Диссертационная работа Елены Викторовны Сейфиной удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее содержание полностью соответствует специальности 01.03.02. Астрофизика, звездная астрономия. Текст Автореферата полностью отражает содержание Диссертации. Из этого следует, что ее автор Е.В. Сейфина вполне заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук.

Доктора физико-математических наук Нагирнера Д.И. (г. С.-Петербург, Старый Петергоф, Университетский проспект, д.28, СПбГУ, тел.: 812-428-42-63):

В сегодняшней астрофизике сложилась примечательная ситуация: с одной стороны — накоплен и продолжает пополняться огромный массив

наблюдательных данных (спектральных в различных диапазонах и фотометрических) о различных объектах, а с другой — построено множество моделей разнообразных объектов, в том числе и моделей, подкреплённых подробными расчётами спектров. Поэтому имеется возможность выбирать некоторый тип объектов и подгонять теорию к наблюдениям. К этому виду работ относится рассматриваемая диссертация.

Выбранная тема, несомненно, является актуальной для современной астрофизики, так как не существует однозначного и простого признака, разделяющего два типа объектов — нейтронные звезды и называемые чёрными дырами (или кандидатами в чёрные дыры), если неизвестна их масса. Впрочем, достаточно считать, что чёрные дыры (ЧД) — это объекты большой массы и малого размера, так как часто специфические свойства чёрных дыр теории гравитации Эйнштейна, отражающиеся в метрике пространства-времени в их ближней окрестности и во внутренних областях, во внимание не принимаются, как и в диссертации. Горизонт событий в ней только упоминается со ссылкой на чужие работы.

Основной результат диссертации — это разграничение ЧД и НЗ по поведению фотонного индекса Γ : у ЧД он возрастает с ростом темпа аккреции и стабилизируется на высоких темпах, а у НЗ величина Γ либо постоянна, либо даже убывает. Этот критерий не требует определения функции масс и допускает сравнительно лёгкое применение. В то же время предложенный метод подобия систем позволяет находить неизвестные массы компактных объектов.

Конечно, наряду с основным выводом в работе получены многочисленные частные сведения о рассматриваемых системах: характеристики их спектров и временного поведения, параметры моделей и, следовательно, их строения, а также их массы, когда они неизвестны, и углы наклона орбит к лучу зрения. Обсуждаются цветовые диаграммы и диаграммы жёсткости систем, отмечаются особенности их химического состава.

Диссертация не лишена недостатков. Встречаются опечатки (переставленные и ошибочные буквы, переставленные слова), несогласованная грамматика и др. Называемая скоростью аккреции величина обычно именуется в русскоязычной литературе темпом аккреции. Неудачно, на мой взгляд, обозначение m , так как это безразмерная величина — отношение темпа аккреции к эддингтоновскому, а не производная по времени. Автор не в ладах с союзом "как": перед "как" не ставится запятая в обороте "как так и", не нужна запятая и перед "как" в значении "в качестве", непонятны выражения типа "поведение ... как функция". Все страницы в Оглавлении указаны с уменьшением на три номера. Излишне употребляются английские термины: фитирование (подгонка), скалирование, сеты (ряды) наблюдений, конволюция (свертка), спектры перебинены, дип (deeper, понижение). Причина, по-видимому, заключается как в общей тенденции, так и в том, что все статьи диссертации опубликованы на английском языке. Но всё это недостатки оформления и стилистики.

Отметим производящие большое впечатление черты диссертации: привлечение огромного наблюдательного материала в различных диапазонах спектра, обработка которого в значительной мере выполнена автором с использованием имеющихся пакетов программ, приведение его в наглядную форму в многочисленных рисунках и таблицах, скрупулёзное обсуждение разнообразных проявлений и особенностей наблюдательных данных, обширный список литературы и количество статей в *Astrophysical Journal* (11), на которых основано содержание работы, причём в большинстве из них (7) соискатель является первым соавтором. И можно высказать уверенность, что результаты, выносимые на защиту, получат дополнительные подтверждения и войдут в теорию как твёрдо установленные факты.

В связи со сказанным, считаю, что работа удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям, а Е.В.Сейфина заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

Доктора физико-математических наук Гребенева С.А. (г. Москва, ул. Профсоюзная, д.84/32, ИКИ РАН, тел. 8-495-333-2222):

Диссертация Е.В.Сейфиной посвящена исследованию свойств рентгеновского излучения аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд со слабым магнитным полем в галактических двойных системах. Также исследовано поведение нескольких внегалактических ультраярких источников, в которых, как считается, может идти аккреция на черные дыры промежуточных масс ($10^3 - 10^5 M_{\odot}$). Выполнена объемная, трудоемкая работа, основанная на архивных данных орбитальных обсерваторий *RXTE*, *BeppoSAX*, *SWIFT*, *Chandra*, *Suzaku*. Исследовано множество разнообразных рентгеновских систем. Главной целью работы было выявление таких свойств этих систем, которые позволяли бы надежно отождествлять природу их компактного объекта, определять другие их важнейшие характеристики.

Похоже, что Е.В.Сейфиной это действительно удалось — в результате сравнительного анализа поведения источников разных типов были выявлены эмпирические закономерности, отличающиеся для систем с черными дырами и нейтронными звездами и позволяющие их отождествлять. В случае систем с черной дырой эти закономерности позволили Е.В.Сейфиной разработать метод оценки массы компактного объекта. Сравнение с массами черных дыр в некоторых системах, измеренными методом оптической доплеровской спектроскопии, показало очень хорошее согласие. Даже в случае ультраярких источников полученные оценки массы попали в ожидаемый диапазон значений $(2 - 7) \cdot 10^4 M_{\odot}$.

Диссертация четко структурирована, изложена ясным языком и связана единой целью. Она состоит из введения, семи глав, заключения, трех приложений и обширного списка литературы. Во введении определены цели

работы и обоснована ее актуальность. В первых двух главах представлены результаты исследования двух галактических двойных систем, содержащих аккрецирующую черную дыру звездной массы, GRS1915+105 и 4U1630-47, на основе наблюдений разработан метод определения массы компактного объекта в таких системах. В третьей главе этот метод применен к ультраярким источникам в близких галактиках, ULX-1/M101 и HLX-1/ESO243-49. В четвертой главе исследовано поведение рентгеновского барстера 4U1728-34 (в шаровом скоплении Terzan 2), показано, что фотонный индекс жесткого излучения источника не зависит от его интенсивности и спектрального состояния. В пятой главе указанная зависимость проверяется для двух других подобных систем (GX3+1, 4U1820-30), делается вывод о возможности использования данной зависимости для отделения двойных систем со слабозамагниченными нейтронными звездами от систем с черными дырами. В шестой и седьмой главах исследуются особенности поведения систем с высокими (вплоть до эддингтоновских) темпами аккреции вещества на нейтронные звезды (GX340+0, ScoX-1, 4U1700-37 и 4U1705-44), проводится сравнение с барстерами и другими источниками доэддингтоновской светимости. В заключении подведены итоги работы, сформулированы выводы и основные положения, выносимые на защиту. В приложениях описаны сокращения и термины, принятая классификация спектральных состояний аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд, параметризация нормировки в используемых спектральных моделях.

Диссертация основана на 11 работах, опубликованных в ведущих реферируемых астрофизических журналах, и 10 дополнительных работах, опубликованных в трудах конференций, в большинстве из них Е.В.Сейфина является первым автором. Результаты диссертации обсуждены на многих конференциях и семинарах. Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертации.

В целом диссертация Е.В.Сейфиной производит хорошее впечатление. Это объемная, достаточно тщательно выверенная работа. В то же время не могу не отметить некоторые ее недостатки. В частности:

1. излишне большое число упоминаний разнообразных теоретических моделей, в создании которых автор не принимал участия. Большинство из них далеко не так бесспорны, как полученные Е.В.Сейфиной экспериментальные результаты. При этом для анализа спектров излучения конкретных источников, даже одной природы, зачастую ею используются разные модели. Это могло бы сделать сравнение и обобщение результатов затруднительным, спасает только то, что, в конечном счете, все эти модели приводят к спектрам жесткого излучения одного вида — степенного с экспоненциальным завалом на высоких энергиях.

2. небрежность в изложении некоторых основных результатов. Например (самое главное), в тексте говорится о зависимости наклона спектра от темпа аккреции, а на соответствующих рисунках приведена зависимость от нормировки спектра. При дальнейших "раскопках" выясняется, что это не

нормировка, а светимость низкочастотных фотонов, участвующих в комптонизации. Поскольку в комптонизации участвуют фотоны, испущенные вблизи внутреннего края диска, их светимость $L=2\cdot 2\pi R_{in}\Delta R_{in}\sigma T_{in}^4$ зависит не только от темпа аккреции \dot{M} , но и от внутреннего радиуса диска R_{in} , который связан с его температурой T_{in} зависимостью $R_{in}=(3GM\dot{M}/8\pi\sigma T_{in}^4)^{1/3}$, а также от предполагаемой ширины ΔR_{in} области, фотоны из которой попадают в облако высокотемпературной плазмы. Даже в предельном предположении, что все фотоны внешнего диска попадают в высокотемпературное облако, $L = 4\pi\sigma T_{in}^4 R_{in}^2 \approx 3GM\dot{M}/2R_{in}$, т.е. светимость низкочастотных фотонов зависит наряду с \dot{M} от R_{in} . Приложение С, специально посвященное этому вопросу, скорее запутывает его, вместо того, чтобы прояснять. В частности, странно выглядит утверждение С.1 этого приложения, что светимость чернотельного излучения равна интегралу по энергии от потока фотонов, как будто от размеров излучающей области она не зависит.

3. механическое использование некоторых результатов аппроксимации спектров излучения. Например, серьезно обсуждается сложное поведение энергии высокочастотного завала в спектрах с большими фотонными индексами. Однако ясно, что в таких быстро спадающих спектрах выявить экспоненциальный завал на фоне крутого степенного закона очень сложно — на высоких энергиях экспериментальные точки имеют низкую значимость. Значения, которые выдает программа для энергии завала, — случайные или определяются начальными установками программы.

4. использование при аппроксимации спектров излучения нейтронных звезд (особенно при высоких темпах аккреции) второй модели комптонизации (CompTB) для описания мягкой компоненты спектра. Полученные параметры модели $\tau \geq 10$ и $kT_e \leq 5$ кэВ предполагают достаточно большую плотность плазмы, при которой крайне важными становятся тормозные процессы излучения и поглощения. Одна комптонизация, без учета этих процессов, не способна сформировать чернотельный спектр излучения, а приводит к виновскому спектру, сильно отличающемуся от него в мягкой области спектра. Согласно современным представлениям, данная компонента излучения формируется в слое растекания вещества по поверхности нейтронной звезды (Иногамов, Сюняев, 1999). В зависимости от темпа аккреции возможны случаи как сильно разреженной радиационно-доминированной плазмы в слое растекания, так и более плотной плазмы, в которой мог бы формироваться чернотельный спектр.

5. практически полное отсутствие ссылок на публикации российских авторов и в российских изданиях. При том, что некоторые из источников, исследуемых в диссертации, были открыты и впервые изучены именно российскими авторами по данным обсерватории ГРАНАТ. Большой вклад в исследование черных дыр и нейтронных звезд был внесен российскими авторами по данным обсерваторий МИР-КВАНТ и ИНТЕГРАЛ. Даже в тех редких случаях, когда Е.В.Сейфина упоминает российские журналы, она приводит ссылки на их английский перевод (Astronomy Letters, Astronomy

Reports). Мне также кажется возможным, что эволюция и насыщение фотонного индекса в системах с аккрецирующими черными дырами, экспериментально выявленные в работе, связаны не с присутствием сходящегося потока аккрецирующего вещества вблизи черной дыры, в котором происходит компрессионная (bulk motion) комптонизация, а как раз с изменением радиуса горячей внутренней зоны диска. Насыщение происходит в момент, когда внутренняя зона схлопывается. После этого жесткое излучение формируется в оптически тонкой короне над диском, толщина которой слабо зависит от темпа аккреции. Поэтому наблюдается крутой степенной спектр со стабильным фотонным индексом (см. например, Гребенев и др. Adv. Space Res., 1997, 19, n.1, 15-23).

Данные замечания, конечно, ни в коей мере не затрагивают справедливости основных выводов диссертации.

В целом же, суммируя, можно сказать, что представленная диссертация является большой цельной экспериментальной работой, в ходе которой найдены важные ранее неизвестные закономерности, которые были использованы Е.В.Сейфиной для отождествления природы компактного объекта рентгеновских двойных систем и определения его ключевого параметра — массы. Именно такой, связанной единой целью и предлагающей новый метод анализа, по моему мнению, и должна быть докторская диссертация.

Считаю, что данная диссертационная работа отвечает всем требованиям, предъявляемым ВАК к докторским диссертациям, а ее автор, Е.В.Сейфина, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности “01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия”.

Доктора физико-математических наук Долгова А.Д. (г. Новосибирск, ул. Пирогова, д.2, НГУ, тел. 8-383-363-4333):

Диссертация посвящена исследованию рентгеновских спектров аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр, в том числе проблематике идентификации природы компактных объектов с помощью анализа данных рентгеновских телескопов. Учитывая постоянно увеличивающийся поток данных, причем все более высокого качества, о рентгеновских источниках, задача их систематизации и разработка методов их интерпретации, весьма актуальна.

Для анализа наблюдаемых спектров автором использовалась теоретически продвинутая модель процессов излучения в аккрецирующих системах и обширный набор наблюдательных данных, полученных за почти двадцать последних лет основными рентгеновскими обсерваториями. Такой основательный подход позволил систематизировать наблюдения в рамках физически хорошо обоснованной картины. Именно, было показано, что основной спектральный параметр, фотонный индекс Γ , ведет себя при изменении темпа аккреции по-разному в случае аккреции на нейтронную звезду или черную дыру. Исходя из этого, автор предложила новый

оригинальный метод диагностики природы источника по рентгеновским наблюдениям смены спектральных состояний, которые происходят в результате изменения скорости аккреции. Предложенная методика была протестирована на большом наблюдательном материале. Более того, в рамках предложенной схемы удалось найти зависимость спектрального индекса от темпа аккреции на черную дыру, которая позволяет, с привлечением дополнительных данных о частотах квазипериодических осцилляций, определять массу аккрецирующей черной дыры исключительно по данным рентгеновских наблюдений.

Диссертантом выполнено всестороннее исследование эволюции черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих двойных системах по рентгеновским данным, полученным с орбитальных космических станций *RXTE*, *Swift*, *Chandra*, *BeppoSAX* и *Suzaku*.

Полученные результаты проливают дополнительный свет на физику аккреции на компактные звезды и являются серьезным вкладом в рентгеновскую астрономию. В диссертации поставлен и решен широкий круг задач, связанных с наблюдательной диагностикой природы компактного объекта по рентгеновским спектральным данным.

- Впервые обнаружены фундаментальные спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд в двойных системах, использующие рентгеновские наблюдательные корреляции спектрального индекса, как функцию темпа аккреции, во время фаз активности объекта, протестированные на большом наблюдательном материале.

- Впервые выполнена оценка массы центрального объекта M101 ULX–1 методом масштабирования спектральных характеристик рентгеновского излучения ULX–1 на основе наблюдений обсерваторий *Chandra* и *Swift*. Впервые сделан вывод о природе центрального объекта в пользу черной дыры на основе новых разработанных спектральных признаков черных дыр и обосновано наличие черной дыры промежуточной массы в ULX–1 путем наблюдательного обнаружения эффекта насыщения индекса в рентгеновском спектре источника.

- Впервые оценена масса черной дыры в системе 4U 1630–47 методом масштабирования спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения на основе *RXTE* и *BeppoSAX* наблюдений: $M_x = 9.5 \pm 1.1 M_{\odot}$.

- Впервые обнаружено постоянство спектральных индексов рентгеновских спектров ряда нейтронных звезд на уровне $\Gamma=2$: 4U 1728–34, GX 3+1, 4U 1820–30 и GX 340+0 при эволюции источников между состояниями низкой и высокой светимости на основе рентгеновских наблюдений обсерваторий *RXTE* и *BeppoSAX*.

- Впервые предложена физическая модель для обоснования обнаруженного квазипостоянства спектрального индекса, согласно которой доминирующий вклад в формирование спектра обусловлен Комптонизированной компонентой, формирующейся в переходном слое между аккреционным диском и поверхностью нейтронной звезды.

- Впервые обнаружено двухфазное поведение фотонного индекса жесткой компоненты рентгеновского спектра ряда нейтронных звезд: Sco X-1, 4U 1705-44 и 4U 1700-47 при смене спектральных состояний объектов. Впервые обнаружена уникальная фаза повышенной жесткости спектров в сверх-Эддингтоновском режиме аккреции вещества звезды-донора на основе анализа рентгеновских наблюдений обсерваторий *RXTE* и *BeppoSAX*.

- Впервые разработана физическая модель для обоснования обнаруженного усиления жесткости рентгеновских спектров нейтронных звезд на пике вспышки, согласно которой высвобождение гравитационной энергии происходит лишь во внешних частях переходного слоя, причем разогрев этих областей приводит к уменьшению электронного сечения и увеличению уровня критической светимости. В итоге эффективность тепловой Комптонизации возрастает, приводя к снижению спектрального индекса в режиме сверх-Эддингтоновской светимости.

Личный вклад диссертанта состоит в обработке наблюдательных данных, полученных рентгеновскими телескопами обсерваторий *RXTE*, *Swift*, *Chandra*, *BeppoSAX* и *Suzaku*, частичной разработке модели *CompTB* для пакета программ XSPEC, расчете рентгеновских спектров и сравнении с наблюдательными данными, анализе полученных результатов и их интерпретация, а также подготовке и написании текста публикаций.

Ценность представляет работа диссертанта по разработке метода оценки масс черных дыр на основе масштабирования спектральных и временных характеристик ультраярких источников. Благодаря эрудиции диссертанта и глубокому пониманию поставленной задачи достигнут значительный прогресс в вопросе выяснения природы этих источников. Метод, предложенный диссертантом для оценки центральных объектов ультраярких источников, имеет большое значение для уточнения эволюционного статуса этих объектов и поэтому востребован астрономическим сообществом.

Научная и практическая значимость результатов определяется тем, что все основные результаты, полученные диссертантом, активно используются специалистами в научных исследованиях, как в нашей стране, так и за рубежом. Особенно это относится к актуальной проблеме диагностики природы центральных объектов, как в галактических, так и во внегалактических источниках с использованием обнаруженных фундаментальных спектральных признаков черных дыр и нейтронных звезд, которые уже применяются различными группами исследователей для дополнительной оценки масс активных галактических ядер.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, а также их достоверность. Все результаты диссертации обоснованы. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается использованием самых современных методов обработки наблюдательных данных. Новизна и достоверность полученных результатов не вызывает сомнений и подтверждена публикациями в ведущих российских и зарубежных журналах, в том числе: *Astrophysical Journal* и *Astronomy &*

Astrophysics. Результаты диссертации были представлены соискателем в виде докладов на многочисленных российских и зарубежных конференциях. Материал диссертации полностью отражен в публикациях в открытой печати. Работа соответствует заявленной специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Имеются несколько незначительных замечаний:

1) В таблицах 5.4 - 5.5 (стр.143 - 144), 5.9 5.10 (стр.162 - 163) приведены не все параметры применяемой спектральной модели, хотя даются ссылки на полные версии таблиц, представленные в опубликованных работах в свободном доступе. Понятно, что отчасти эти сокращения вызваны ограниченностью формата диссертации, однако это не очень удобно при ее прочтении.

2) В качестве общего замечания, в целом, относительно мало внимания уделено теории по сравнению с анализом наблюдательного материала.

3) Панели на рисунках иногда именуется кириллицей, иногда латиницей.

Впрочем, отмеченные недостатки не снижают высокого качества исследования, они не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации, описанные выше. Результаты довольно оригинальны, обладают научной новизной и практически значимы, демонстрируют ценность диссертации как капитального труда, посвященного развитию весьма важного направления астрофизики - поиску/исследованию фундаментальных спектральных признаков аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр. Диссертация написана хорошим языком, легко читается, прекрасно оформлена. Оценивая диссертацию в целом, можно заключить, что она является законченным научным исследованием и содержит решение крупной астрономической проблемы.

Полнота представленных результатов. Основные результаты диссертации отражены в 21 научной статье, из которых 11 работ опубликованы в реферируемых журналах, входящих в список ВАК. Результаты диссертации неоднократно докладывались на российских и международных астрономических конференциях. В работах, написанных в соавторстве, личный вклад соискателя четко обозначен. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Заключение. Все вышеизложенное позволяет заключить, что диссертация Е.В. Сейфиной "Спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих рентгеновских двойных системах" является законченным научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне, содержащим решение крупной астрономической проблемы. В работе приводится огромный объем данных, подтверждающих предлагаемые критерии идентификации. Нужно особо отметить, что уровень представленного анализа рентгеновских данных соответствует самым высоким стандартам, принятым в астрофизике высоких энергий. Анализируя определенный эпизод эволюции объекта, автор дает наиболее исчерпывающую картину представленную всеми имеющимися наблюдениями.

В заключении можно сказать, что эта работа представляет на данный момент одно из самых глубоких и оригинальных исследований на предмет определения природы аккрецирующих компактных объектов. Диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным Положением ВАК о порядке присуждения степени доктора наук, а ее автор Сейфина Елена Викторовна, несомненно, заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- **разработана** новая методика идентификации природы компактного объекта по спектру рентгеновского излучения в аккрецирующих рентгеновских двойных системах при смене их спектральных состояний;
- **предложены** фундаментальные спектральные признаки аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр, позволяющие диагностику типа компактного объекта с использованием исключительно рентгеновских данных;
- **разработан** новый метод определения массы черных дыр путем масштабирования спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения как Галактических, так и внегалактических черных дыр во время переходов между спектральными состояниями;
- **доказана** перспективность использования новой методики диагностирования черных дыр по их рентгеновскому излучению при решении актуальной задачи обнаружения и изучения свойств черных дыр, в особенности, когда классические методы не применимы.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- обнаруженные соискателем фундаментальные спектральные признаки отличия черных дыр от нейтронных звезд в аккрецирующих рентгеновских двойных системах обеспечивают наиболее универсальный и простой в применении способ наблюдательной диагностики природы компактного объекта по рентгеновским спектрам;
- найденные наблюдательные закономерности позволяют существенно расширить наши представления о переменности излучения в рентгеновских двойных системах на стадии обмена масс;
- предложена физическая модель для обоснования поведения спектрального индекса при смене спектральных состояний в аккрецирующих рентгеновских двойных системах с нейтронными звездами и объясняющая особенности его наблюдаемого поведения для этих систем, как в до-Эддингтоновском, так и в около-Эддингтоновском режимах аккреции;
- универсальность разработанной методики идентификации типа компактного объекта на основе анализа наблюдаемой переменности его рентгеновского спектра при смене спектральных состояний позволяет

применять ее как к Галактическим рентгеновским двойным системам, так и к внегалактическим объектам, в том числе к системам с черными дырами "промежуточной массы";

- внедренный соискателем метод масштабирования дал принципиально новую возможность определения массы аккрецирующих черных дыр с использованием исключительно рентгеновских наблюдений;
- выполненная соискателем оценка масс черных дыр в ультраярких источниках эффективно позволяет уточнить их эволюционный статус.

Применительно к проблематике диссертации эффективно использован обширный наблюдательный материал, качество которого находится на высоком мировом уровне, а также использованы методы обработки наблюдений с применением современных методов моделирования рентгеновских спектров с учетом значительного вклада Комptonизации излучения плазмы аккреционного диска в окрестности компактных источников.

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

- разработана и внедрена новая универсальная методика идентификации типа компактного объекта, которая активно используется специалистами в научных исследованиях, как в нашей стране, так и за рубежом;
- разработан и внедрен метод масштабирования, позволивший выполнить оценку массы в ряде ультраярких источников и сделать вывод о наличии в них черных дыр "промежуточной массы" с использованием исключительно рентгеновских наблюдений; предложенный метод уже применяется различными группами исследователей для дополнительной оценки масс активных галактических ядер;
- создана база "образцовых" корреляционных треков Γ в зависимости от темпа аккреции \dot{M} для ряда черных дыр с известными параметрами (массой, расстоянием и углом наклона орбиты двойной системы), позволяющие, на их основе, выполнение процедуры масштабирования и оценки масс исследуемых черных дыр, которые в настоящее время уже активно используются многими исследователями как эталонные и поэтому востребованы астрономическим сообществом.

Достоверность результатов исследования обусловлена:

- применением современных методик сбора и использованием современных статистических и математических методов обработки наблюдательных данных;
- воспроизводимостью обнаруженных наблюдательных эффектов и закономерностей при наблюдениях с разных космических обсерваторий, протестированных на огромном наблюдательном материале;
- хорошим согласием полученных в работе оценок масс центральных объектов в ультраярких источниках, полученных автором благодаря новым

рентгеновским данным, с результатами, представленными в независимых источниках по данной тематике.

Личный вклад соискателя состоит в:

обработке и интерпретации наблюдательных данных, полученных рентгеновскими телескопами обсерваторий *RXTE*, *Swift*, *Чандра*, *BeppoSAX* и *Suzaku*; частичной разработке модели *ComPTB* для пакета программ анализа рентгеновских спектров *XSPEC*; расчете рентгеновских спектров и сравнении с наблюдательными данными, равноправном участии в постановке задачи, а также подготовке и написании текста публикаций по выполненной работе.

На заседании **13 октября 2016 г.** Диссертационный совет принял решение присудить *Сейфиной Е.В.* ученую степень доктора физ.-мат. наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **18** человек, из них **12** докторов наук по специальности **01.03.02**, участвовавших в заседании, из **24** человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - **18**, против - **нет**, недействительных бюллетеней - **нет**.

Председатель

Диссертационного совета

А.М.Черепашук

Ученый секретарь

Диссертационного совета

С.О.Алексеев

« 13 » октября 2016 года