

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Сейфиной Елены Викторовны

**"Спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих рентгеновских двойных системах",**

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

Диссертация Е.В. Сейфиной посвящена исследованию спектров рентгеновского излучения, возникающего при аккреции на нейтронные звезды и черные дыры, в частности, весьма важной задаче идентификации природы компактных объектов на основе анализа данных рентгеновских телескопов. Учитывая быстро растущий и все более точный массив данных о рентгеновских источниках, задачи их систематизации и разработки методов интерпретации становятся все более актуальными.

Для анализа наблюдаемых спектров автором использовалась хорошо обоснованная теоретически модель процессов излучения в аккрецирующих системах и обширный набор наблюдательных данных, полученных за последние двадцать лет основными рентгеновскими обсерваториями. Столь фундаментальный подход в рамках хорошо обоснованной физической модели позволил надежно систематизировать наблюдательные данные и получить важные результаты. Именно, было показано, что фотонный индекс  $\Gamma$ , являющийся основным спектральным параметром, по-разному ведет себя при изменении темпа аккреции 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 проверена 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, что является чрезвычайно важным результатом особенно в свете недавнего обнаружения гравитационных волн от сливающихся черных дыр.

**Сущность полученных результатов.** Диссертантом выполнено всестороннее исследование эволюции черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих двойных системах на рентгеновских данных, полученным с орбитальных космических станций *RXTE*, *Swift*, *Chandra*, *BeppoSAX* и *Suzaku*. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложения.

Во **Введении** обосновывается актуальность работы и формулируются основные цели исследований, проведенных в диссертации, аргументированно показана новизна основных результатов диссертации, их научная и практическая значимость. В первых трех главах приводятся результаты исследования рентгеновских источников с аккрецирующими черными дырами, последующие четыре главы посвящены изучению рентгеновских источников с аккрецирующими нейтронными звездами.

**Первая глава** посвящена изучению корреляций между спектральными и временными свойствами рентгеновского излучения, а также темпом аккреции в Галактической двойной системе с надежно установленной черной дырой GRS 1915+105 во время переходов между состояниями. На основе этого был обнаружен в наблюдениях теоретически предсказанный эффект насыщения спектрального индекса при высоких темпах аккреции вещества звезды-донора на черную дыру.

Во **второй главе** исследовано поведение энергетических спектров и спектров мощности, наблюдаемых от галактического рентгеновского источника с кандидатом в черные дыры 4U 1630–47 во время вспышечной активности по данным *RXTE* и *BeppoSAX*.



Обнаруженный эффект насыщения спектрального индекса позволил сделать важное заключение о наличии черной дыры в этом источнике и оценить массу центрального объекта методом масштабирования.

В *третьей главе* получены оценки масс центральных объектов в ультра-ярких источниках ULX-1 (галактики M101) и HLX-1 (галактики ESO 243-49) методом масштабирования спектральных характеристик рентгеновского излучения на основе спектральных наблюдений с борта орбитальных обсерваторий *Swift* и *Chandra*. Сделан вывод о наличии в них черных дыр промежуточной массы.

В *четвертой главе* проанализирована эволюция рентгеновских спектральных характеристик системы с нейтронной звездой 4U 1728–34. Обнаружена уникальная стабильность фотонного индекса на уровне  $\Gamma=2$  во время смены спектральных состояний, что резко отличается от поведения индекса  $\Gamma$  в источниках с черными дырами (когда индекс  $\Gamma$  показывает переменность при смене спектральных состояний и фазу насыщения в мягком состоянии). Предложена новая физическая модель для обоснования обнаруженного квази-постоянства спектрального индекса, согласно которой доминирующий вклад в формирование спектра обусловлен комптонизированной компонентой, формирующейся в переходном слое между аккреционным диском и поверхностью нейтронной звезды.

В *пятой главе* проведен анализ спектральных и временных характеристик, наблюдаемых в рентгеновском диапазоне от двойных систем с нейтронными звездами GX 3+1 и 4U 1820–30 в течение длительных переходов между фазами высокой и низкой светимости, в которых также обнаружено постоянство фотонного индекса на уровне  $\Gamma=2$  во время смены спектральных состояний. На основе этих результатов предлагается рассматривать обнаруженную стабильность индекса в качестве критерия наличия нейтронной звезды в таком источнике.

В *шестой главе* рассмотрены спектральные временные свойства нейтронных звезд на примере Z-источников GX 340+0 и Sco X-1 для исследования применимости найденного в предыдущих главах критерия наличия нейтронной звезды в случае аккреции в приближенно эддингтоновском режиме светимости. Для первого источника обнаружено уникальное постоянство фотонного индекса на критическом уровне  $\Gamma=2$ , независимо от спектральных состояний, а для второго обнаружено двухфазное поведение спектрального индекса, а именно: постоянство индекса на уровне  $\Gamma=2$  (для до-эддингтоновского режима аккреции) и фазу снижения индекса  $1.3 < \Gamma < 2$  для около-эддингтоновского режима аккреции. Показано, что найденная двухфазность является фундаментальным эффектом наличия нейтронной звезды в источнике, проявляющемся при достижении объектом эддингтоновской светимости, и предложена физическая модель для обоснования обнаруженного снижения фотонного индекса на примере Sco X-1.

В *седьмой главе* рассмотрены нейтронные звезды, достигающие сверх-эддингтоновской светимости во время рентгеновских вспышек: 4U 1705–44 и 4U 1700–37. Обнаружено двухфазное поведение фотонного индекса в этих объектах, подобное найденному ранее для источника Sco X-1. Решена проблема спорной природы компактного объекта в системе 4U 1700–37, в пользу нейтронной звезды, на основе детектирования двухфазного поведения индекса, характерного для нейтронных звезд. Тем самым, окончательно сформулирован полный набор фундаментальных спектральных признаков наличия нейтронных звезд и черных дыр в аккрецирующих двойных системах, пригодных для наблюдательной диагностики типа компактного объекта по рентгеновским данным.



Полученные результаты проливают дополнительный свет на физику аккреции на компактные звезды и являются весьма важным 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, расчет рентгеновских спектров и сравнение с наблюдательными данными, анализ полученных результатов и их интерпретация, а также подготовка и написание текста публикаций.

Высокую 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 первостепенное 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, очевидно, что отмеченные мелкие недостатки не снижают высокого качества исследования, они не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации, описанные выше. Результаты абсолютно 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 и является основополагающим. 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 компактных астрофизических объектов. Нужно особо отметить, что уровень представленного анализа рентгеновских данных соответствует самым высоким стандартам, принятым в астрофизике высоких

энергий. Анализируя эволюцию объекта, автор дает исчерпывающий анализ всех представленных астрономических наблюдений.

В заключение можно сказать, что эта работа представляет на данный момент одно из самых глубоких и оригинальных исследований по определению 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.

Директор Центра астрофизики и  
физики элементарных частиц,  
профессор, доктор физ.-мат. наук

Долгов А.Д.

Подпись А.Д.Долгова удостоверяю,  
ученый секретарь  
ученого совета НГУ



Тарабан Е.А.

Печать

07.09.2016 г.