

Отзыв официального оппонента о диссертации Е.В.Сейфиной
"Спектральные признаки чёрных дыр и нейтронных звезд в
аккрецирующих рентгеновских двойных системах",
представленной на соискание учёной степени доктора
физико-математических наук
по специальности 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

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 является несомненно 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.

Так как основные достижения работы заключаются в выводах, сделанных в ходе ее выполнения, изложим ее содержание.

В первой главе всесторонне исследуется эволюция спектра и свечения двойной системы — микроквара GRS 1915+105 с ЧД с массой, определённой обычным способом с помощью функции масс: $(12 \pm 4)M_{\odot}$. Путём подгонки различных теоретических спектров, а именно, комбинации чернотельного и степенного, в частности, полученного в результате тепловой или динамической (при движении вещества) комптонизации, выбрана лучшая модель свечения системы в её жёстком, мягком и промежуточном состояниях, а также во время рентгеновских вспышек. В модель добавляется также линия с гауссовым профилем и с определяемыми по критерию значимости χ^2 положением, шириной и интенсивностью. Обсуждаются детали свечения и вклады возможных его компонент, подробно прослежен переход от жёсткого состояния к мягкому и изменение при этом спектрального α (или фотонного $\Gamma = \alpha + 1$) показателя. Отдельно рассмотрено поведение системы во время вспышек. Не обнаружена корреляция между рентгеновским и радио излучением, что свидетельствует о том, что пространственно их источники не совпадают. Найдены связи между характеристиками различных состояний, называемые в работе корреляциями. Однако, эти корреляции только качественные, количественно они не выражены, тем не менее, они позволили сделать качественные же выводы о совпадении или несовпадении источников излучения. Подчёркивается важность засвидетельствованной зависимости между эквивалентной шириной линии Fe около 6.5 кэВ и потоком радио излучения на 15 ГГц, а также между фотонным индексом Γ , темпом аккреции и квазипериодическими осцилляциями (КПО).

По выводам, следующим из всего этого, выбрана модель строения двойной системы: чёрная дыра с аккреционным диском и сходящимся на ЧД потоком газа. В качестве отличительного наблюдательного свидетельства присутствия именно ЧД принимается факт насыщения Γ с ростом частоты КПО и темпа аккреции.

Во второй главе аналогичной процедурой с привлечением наблюдательного материала нескольких спутниковых миссий определяется модель и её параметры для системы 4U 1630-47, масса которой неизвестна. По наличию насыщения Γ утверждается, что компактным объектом системы является ЧД. Её масса находится методом, названным методом скалирования (или масштабирования, я бы назвал его методом подобия). Согласно этому методу подбираются опорные системы с известными массами ЧД, удовлетворяющие нескольким условиям. Главное из них — они должны быть самоподобны (по-английски *selfsimilar*, в гидродинамике принят термин *автомодельность*) и подобны исследуемой системе. Путём сравнения нескольких параметров систем определяется искомая масса ЧД. У системы 4U 1630-47 эта масса оказалась $(9.5 \pm 1.1)M_{\odot}$. Обсуждается поведение и многих других характеристик системы в разные периоды её свечения, которое сравнивается с поведением аналогичных характеристик других систем: спектральной жёсткости (отношения потоков в полосах $10 \div 50$ кэВ/ $3 \div 10$ кэВ), энергии завала в спектре, спектра мощности временной зависимости и др.

В третьей главе подход распространяется на две системы в двух галактиках, получивших названия ультра- и гипер-ярких систем. Теми же методами определены нижние пределы масс источников в этих системах $> (3 \div 4) \cdot 10^4 M_{\odot}$ и $> 7 \cdot 10^4 M_{\odot}$, что соответствует ЧД промежуточных масс.

В остальных четырёх главах так же подробно рассматриваются различные аспекты поведения систем с нейтронными звездами: в четвёртой и пятой главах три так называемые *atoll*-системы (4U 1728-34, GX 3+1, 4U1820-30), в шестой две *Z*-системы (GX 340+0, Sco X-1), а в седьмой смешанная система 4U1705-44. В результате показано, что фотонный индекс спектра этих систем сохраняет своё значение около 2 и это может служить определяющим признаком именно НЗ.

Во второй части седьмой главы разработанный критерий применен к системе 4U 1700-37, в которой в отличие от всех предыдущих некомпактная звезда имеет класс О или В и немалую массу. Для этой системы принята несколько иная модель, чем для рассмотренных до этого, с двумя фотонными индексами Γ_1 и Γ_2 для двух компонент спектра. При этом оказалось, что индекс Γ_1 примерно равен 2, а другой меньше, что позволило компактный объект системы причислить к НЗ.

Наконец, в третьей части седьмой главы произведён сравнительный анализ всех рассмотренных в работе систем.

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 \dot{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 (deer, 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* (10), на которых основано содержание работы, причём в большинстве из них (7) соискатель является первым соавтором. И можно высказать уверенность, что результаты, выносимые на защиту, получают 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.

Доктор физико-математических наук
профессор кафедры астрофизики СПбГУ
10 сентября 2016 года

Д.И.Нагирнер

Д.И.Нагирнер

Адрес: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф,
Университетский проспект 28,
Научно-исследовательский Астрономический институт
Санкт-Петербургского государственного университета
Телефон 812-428-42-63
e-mail: dinagirner@gmail.com

Подпись Д.И.Нагирнера удостоверяю

Сейфина Е.В. *Т. Пономин*

