

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени П.К. ШТЕРНБЕРГА

На правах рукописи

Сейфина Елена Викторовна

УДК 524.387

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ ЧЕРНЫХ ДЫР
И НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД В АККРЕЦИРУЮЩИХ
РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Специальность 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в отделе астрофизики и звёздной астрономии Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор

Титарчук Лев Григорьевич
(Университет Феррары, Италия;
НАСА, США; Национальный исследовательский
ядерный университет “МИФИ”, Россия)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Нагирнер Дмитрий Исидорович
(Санкт-Петербургский
государственный университет)

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Рентгеновской и гамма-астрономии отдела Астрофизики Высоких Энергий

Гребенев Сергей Андреевич
(Институт космических исследований РАН)

доктор физико-математических наук, профессор, директор Центра астрофизики и физики элементарных частиц

Долгов Александр Дмитриевич
(Новосибирский
государственный университет)

Ведущая организация:

Астрокосмический центр ФИАН

Защита состоится 13 октября 2016 г. в 14 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.86 при МГУ имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Университетский проспект, 13, ГАИШ МГУ.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, д. 27, Фундаментальная библиотека) и на сайте <http://sai.msu.ru/dissovet/2016.html>.

Автореферат разослан “ 30 ” июня 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

С.О. Алексеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разнообразие физических условий в астрофизических объектах порождает массу теорий, которые остро нуждаются в наблюдательной проверке. Прогресс последних десятилетий в области астрофизики высоких энергий тесно связан с запуском и успешной работой многочисленных космических миссий. Важной целью их исследований является изучение экстремальных условий в астрофизической плазме. В этой связи, черные дыры (ЧД) и нейтронные звезды (НЗ), аккрецирующие газ в рентгеновских двойных системах, предлагают уникальную возможность взглянуть на свойства материи, находящейся в наиболее экстремальных условиях, нигде более не встречающихся, которые могут быть использованы для непосредственной проверки теоретических моделей.

В диссертации сделана попытка расширить наши представления о наблюдательных проявлениях свойств рентгеновских источников с возможностью усовершенствования устоявшихся критериев, позволяющих выяснить природу компактного объекта в двойной системе (черная дыра или нейтронная звезда). Сложность заключается в том, что уже известные признаки относятся либо исключительно к спокойному состоянию таких двойных систем, либо чрезвычайно сложны в наблюдательной регистрации и далеко не всегда однозначны в идентификации ЧД/НЗ.

Благодаря многочисленным космическим миссиям (*ГПАНАТ*, *BeppoSAX*, *Chandra*, *RXTE*, *INTEGRAL*, *XMM-Newton*, *Swift*, *Suzaku*, *NuSTAR*, *Fermi* и др.) к настоящему времени накоплен огромный наблюдательный материал по рентгеновским двойным системам (РДС). При этом длительность мониторинговых наблюдений позволяет надежную диагностику активных состояний, в которых объекты показывают переходы (рис. 1) между различными спектральными состояниями [1, 2], сопровождающиеся аккрецией на компактные объекты на стадии обмена масс в двойных системах [3]. Поведение объектов в активных состояниях представляет огромный интерес как с точки зрения понимания природы компактных объектов, так и для тестирования теории эволюции двойных систем в целом. Именно в активных состояниях контрастно проявляются критические свойства источников, на основе которых в настоящей диссертации предполагается усовершенствование диагностики природы компактных объектов по рентгеновскому спектру. К настоящему моменту известны несколько наблюдательных критериев, позволяющих диагностировать природу компактного источника – отличить чер-

ную дыру от нейтронной звезды. Идентификация ЧД обычно выполняется на основе динамических оценок их массы с использованием функции масс, полученной по кривой лучевых скоростей компонентов двойной системы. Этот способ основан на предположении о том, что если масса компактного объекта M_x окажется больше примерно трех масс Солнца, то в качестве компактного объекта в такой двойной системе с большой вероятностью находится черная дыра. В противном случае ($M_x < 3 M_\odot$), этот компактный объект идентифицируют как нейтронную звезду (см., например, обзор Черепашука [4]).

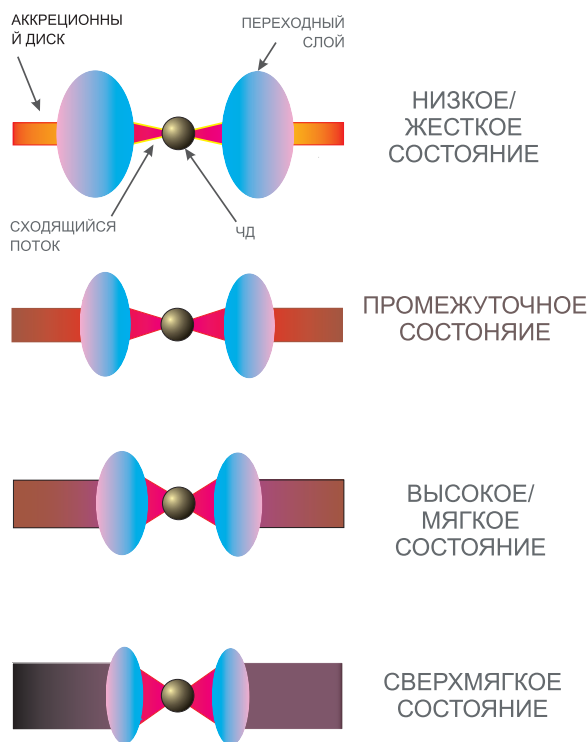


Рис. 1: Предполагаемый сценарий переходов между спектральными состояниями в рентгеновских двойных системах (РДС) с черными дырами (по Ремилларду и МакКлинтоку [6]). Указаны элементы модели: аккреционный диск, переходный слой, сходящийся поток на черную дыру (ЧД); и схематично отмечено изменение вклада излучения аккреционного диска и переходного слоя при переходе РДС в направлении к мягким состояниям.

К настоящему моменту данный способ является общепризнанным и сопряжен с изучением преимущественно оптического диапазона спектра. Однако очень часто оптическое излучение в РДС является недоступным для детектирования из-за удаленности объекта или в силу особенностей его внутренней структуры. В этом случае применение диагностики природы компактного объекта по рентгеновскому спектру является особо актуальным. В этом

направлении был предпринят ряд удачных попыток подобного диагностирования на основе анализа спектров мощности. Так, долгое время косвенным признаком наличия ЧД считалась иррегулярная переменность рентгеновского излучения (например, найденная в Суг X-1) с характерными временами $\Delta t \simeq R_g/c \simeq 0,0001 - 0,001$ секунды (где $R_g = 2GM/c^2$, где G – гравитационная постоянная, c – скорость света, M – масса тела), до тех пор, пока подобная переменность не была обнаружена в НЗ со слабым магнитным полем (например, в НЗ Cir X-1). Недавно Сюняевым и Ревнивцевым [5] было показано, что переменность потока излучения аккрецирующих нейтронных звезд (например, для аккрецирующей нейтронной звезды в шаровом скоплении Терзан 2) продолжается до гораздо больших фурье-частот, т.е. до гораздо меньших временных масштабов, чем для черных дыр (например, черной дыры Суг X-1). Более того, наличие т.н. когерентных квазипериодических осцилляций (КПО), а также килогерцовых КПО в спектре мощности системы являются частными признаками наличия НЗ в такой системе. Однако килогерцовые КПО в спектрах мощности весьма сложны в наблюдательном детектировании и имеют далеко неоднозначную интерпретацию.

В свою очередь, смена спектральных состояний (рис. 1) и, соответственно, эволюция формы спектра, наблюдаемая в активных фазах (см., например, левую панель на рис. 2) также рассматривалась как признак наличия в ней ЧД. Однако, как было показано выше, нейтронные звезды также показывают подобную смену состояний (например, правая панель на рис. 2). Были сделаны успешные попытки диагностики природы компактного объекта и по анализу самих фотонных спектров. Например, при описании спектров систем с ЧД и НЗ в состоянии низкой светимости в рамках модели тепловой Комptonизации имеет место существенное различие между типами компактных источников: для НЗ электронная температура зоны переходного слоя обычно ниже 25 кэВ, в то время как для ЧД она обычно выше 50 кэВ (см. статью Чуразова и др. [6]). В самом деле, более низкая электронная температура в случае НЗ является следствием дополнительного охлаждения за счет поверхности НЗ, которая отражает рентгеновские фотоны и, в конечном итоге, определяет температуру электронов плазмы переходного слоя (подробности см. в работе Титарчука и др. [7], публикации Сюняева и Титарчука [8], а также в статье Клужняка [9]). Кроме того, наличие в спектре сильной линии слабоионизированного железа Fe I – Fe XII на энергиях 6.4 кэВ с асимметричным профилем и соответствующим скачком поглощения в пороге также рассмат-

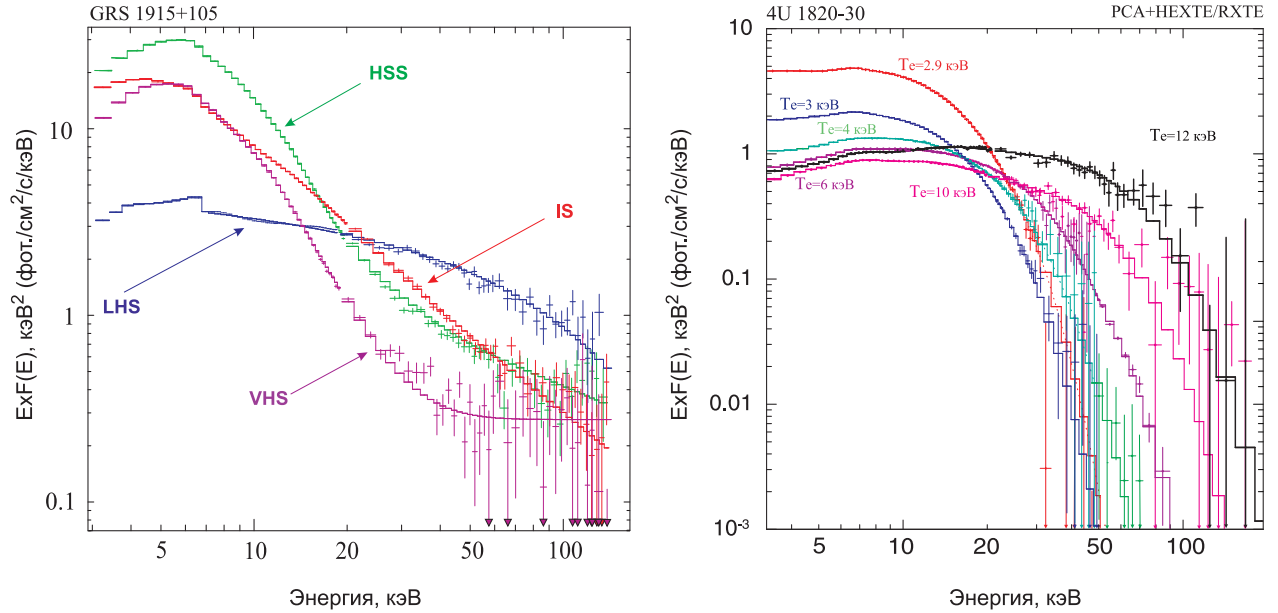


Рис. 2: Характерные спектральные диаграммы в единицах EF_E , наблюдаемые во время переходов между высоким и низким спектральными состояниями в черной дыре GRS 1915+105 (слева) и нейтронной звезде 4U 1820–30 (справа) по данным рентгеновской орбитальной обсерватории RXTE. (Слева:) синей линией указано низкое/жесткое состояние (LHS); красной линией – промежуточное состояние (IS); зеленой линией – высокое/мягкое состояние (HSS) и малиновой линией – сверхвысокое состояние (VSS) для GRS 1915+105. (Справа:) показаны шесть типичных спектров при эволюции нейтронной звезды 4U 1820–30 от низкого (*island*) к высокому (*banana*) состоянию, которые относятся к разным электронным температурам переходного слоя [$kT_e = 2.9$ кэВ (красный), 3 кэВ (синий), 4 кэВ (зеленый), 6 кэВ (фиолетовый), 10 кэВ (малиновый) и 12 кэВ (черный) спектры] на примере нейтронной звезды *atoll*-типа 4U 1820–30.

ривалось, как признак наличия ЧД, до тех пор, пока подобные спектральные особенности не были обнаружены в рентгеновских спектрах НЗ (подробный анализ возможных причин асимметрии профиля линии см. в статье Титарчука и др. [10] и цитируемой в ней литературе). Оказалось, что асимметрия профиля линии железа вызвана скорее ветровым эффектом [10], чем релятивистским эффектом Доплеровского смещения и, конечно, не может служить надежным признаком наличия ЧД. В свою очередь, наличие т.н. “жесткого хвоста” (т.е. излучения с энергиями больше 100 кэВ) в спектре излучения также рассматривалось как признак наличия ЧД в системе, пока такие “жесткие хвосты” не были обнаружены в НЗ (например, в системе с транзитной НЗ Sco X–1 изученной д’Аи и др. [24]). Также было замечено, что в состоянии низкой светимости с жестким спектром (LHS) рентгеновская светимость для систем с ЧД обычно ниже, чем для систем с НЗ. Но, опять же, это не

всегда имеет место, как, например, для системы с ЧД GS 354–64. Наконец, вспышки I рода (термоядерные взрывы накопленного вещества, приводящие к коротким, длящимся $\sim 1 - 10$ секунд, и мощным вспышкам рентгеновского излучения) являются признаком наличия аккрецирующей НЗ. С другой стороны, отсутствие этого феномена (т.н. барстерной переменности), конечно, не является признаком присутствия в системе чёрной дыры. Следует отметить, что эти признаки также не всегда работают из-за “неудобного” расположения объекта (например, большой наклонности орбиты или удаленности системы) и далеко не всегда однозначны в идентификации ЧД/НЗ.

В этой связи, еще в 1998 г. были сделаны теоретические предсказания Титарчуком и Занниасом [12] о возможности диагностики ЧД по эффекту насыщения фотонного индекса Γ (меры наклона степенной составляющей спектра) при высоких темпах аккреции. Однако на практике этот эффект нашел свое применение лишь в 2003 г., когда Вигнарка и др. [13] обнаружили насыщение индекса Γ , но не как функцию темпа аккреции, а как функцию частоты КПО в рентгеновских спектрах кандидата в черные дыры GRS 1915+105. Известно, что существует корреляция между частотами КПО и темпом аккреции \dot{M} [14]. Впоследствии, Титарчуком и Фиорито [14], и несколько позже Шапошниковым и Титарчуком [15], были предприняты попытки дальнейшего изучения закономерностей поведения рентгеновских спектральных параметров, в частности, фотонного индекса Γ , как функции низкочастотных (1 – 10 Гц) квазипериодических осцилляций, в двойных системах с кандидатами в черные дыры во время спектральных переходов, т.е. когда источник эволюционирует из т.н. низкого в высокое спектральное состояние. Высокое и низкое спектральные состояния характеризуются соответственно интервалами высокой светимости объекта с мягким спектром и низкой рентгеновской светимости с жестким спектром, и связаны с изменением темпа перетекания вещества на стадии обмена [1]. Как уже говорилось, в высоких состояниях черных дыр эти корреляции иногда показывают насыщение фотонного индекса Γ при высоких значениях низкочастотных КПО. Однако КПО-особенности не всегда наблюдаются в спектрах мощности объекта, особенно на пике вспышки, что, опять же, сужает возможности диагностирования. Поэтому одной из основных задач, которая представляет большой интерес, является развитие способа диагностики природы компактных источников, входящих в состав аккрецирующих рентгеновских двойных систем, который является более универсальным и надежным на практике. В частности, особый интерес пред-

ставляет поведение фотонного индекса Γ , как функции темпа аккреции, в применении как к кандидатам в черные дыры, так и к нейтронным звездам.

В задаче измерения темпа аккреции \dot{m} из наблюдений наиболее удобной является Комptonизационная модель (например, т.н. ВМС¹, “*Bulk Motion Comptonization*”), которая описывает выходящий спектр как конволюцию входного “затравочного” спектра, аппроксимируемого моделью *Bbody*, параметрами которой являются нормировка N_{bmc} и цветовая температура kT , с Комptonизационной функцией Грина. Поэтому, как и для обычной модели *Bbody* пакета программ XSPEC, нормировка N_{bmc} представляет собой отношение светимости источника к квадрату расстояния:

$$N_{bmc} = L_{39}/d_{10}^2, \quad (1)$$

где L_{39} – светимость источника в единицах 10^{39} эрг/с и d_{10} – расстояние до источника в единицах 10 кпс. Важно отметить, что параметр нормировки N_{bmc} определяется как мягкий рентгеновский поток диска (являющийся источником мягких фотонов в процессе Комptonизации, см. например, рис. 3 для геометрии облучения мягкими фотонами Комptonизированной области), пропорциональный как массе черной дыры m , так и темпу аккреции \dot{m}

$$N_{bmc} \propto m, \dot{m}, \quad (2)$$

что и позволяет наиболее точно оценивать такой важный параметр, как темп аккреции \dot{m} . В самом деле, поток диска L может быть представлена как

$$L = \frac{GM_{bh}\dot{M}}{R_*} = \eta(r_*)\dot{m}_d L_{Ed}, \quad (3)$$

где $R_* = r_* R_S$ представляет собой эффективный радиус, на котором имеет место основное энерговыделение в диске, $R_S = 2GM/c^2$ – радиус Шварцшильда, $\eta = 1/(2r_*)$ – эффективность выделения гравитационной энергии, $\dot{m}_d = \dot{M}_d/\dot{M}_{crit}$ – безразмерная скорость аккреции массы в единицах критической скорости аккреции вещества $\dot{M}_{crit} = L_{Ed}/c^2$ и L_{Ed} – Эддингтоновская светимость.

С другой стороны,

$$L_{Ed} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T}, \quad (4)$$

¹<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/software/lheasoft/xanadu/xspec/models/bmc.html>

то есть, $L_{Ed} \propto M$ и, таким образом, используя уравнения (3) – (4), мы получим, что

$$L \propto \eta(r_*) \dot{m}_d M. \quad (5)$$

В высоком/мягком состоянии, когда внутренний радиус диска R_* достигает своей наименьшей величины $R_* \geq 3R_S$, эффективность выделения гравитационной энергии $\eta(r_*)$ достигает своей наибольшей величины, и, таким образом, светимость диска может далее возрасти только при дальнейшем возрастании скорости аккреции вещества (см. уравнение 5). При условии, что нормировка ВМС, N_{bmc} , пропорциональна величине \dot{m}_d в высоком/мягком состоянии, наблюдательный эффект в отношении насыщения индекса как функция N_{bmc} преобразуется в насыщение индекса с величиной \dot{m}_d .

Другой, не менее важной, задачей является применение принципов диагностики галактических черных дыр к внегалактическим черным дырам, в том числе, к черным дырам т.н. “промежуточных масс”. Эти задачи могут быть крайне интересны при решении вопроса о природе ультраярких источников, которые являются загадкой астрофизики последних десятилетий. Ультраяркими называют рентгеновские источники в двойных системах (в которых происходит перетекание вещества с обычной звезды на компактный объект, предположительно – черную дыру), светимость которых оказывается примерно в 250 000 раз больше солнечной. Такая светимость является слишком высокой и граничит с предельной светимостью для черных дыр звездной массы, 10 солнечных. В стандартных сценариях это типичная верхняя граница масс черных дыр, образующихся из звезд. Есть два варианта объяснения высокой светимости. Во-первых, эти источники могут быть черными дырами звездной массы ($< 100 M_\odot$), излучающими в Эддингтоновском или сверх-Эддингтоновском режимах [24, 25]. Во-вторых, было предложено, что могут существовать “черные дыры промежуточных масс”. Их массы могут составлять десятки, сотни и даже тысячи масс Солнца. При этом излучение осуществляется в суб-Эддингтоновском режиме. Отметим, что точное происхождение этих источников до сих пор остается неясным и является предметом многих научных споров.

В свете вышеизложенных проблем, метод определения масс черных дыр для ультраярких рентгеновских источников важен вдвойне. Во-первых, это позволит проверить правильность моделей таких источников и определить их эволюционный статус. В частности, являются ли источники рентгенов-

ского излучения черными дырами звездной или промежуточной массы, или даже нейтронными звездами (например, как пульсар, недавно открытый в M82 ULX-4 [20]). Во-вторых, необходимо согласовать массу центрального источника и низкую температуру “затравочных” фотонов диска ≤ 1 кэВ, характерную для большинства ультраярких источников. В действительности, в модели дисковой аккреции Шакуры и Сюняева [3, 22] эффективную температуру аккрецирующего вещества T_{eff} обычно оценивают в зависимости от массы черной дыры M_{BH} в соотношении $T_{eff} \propto M_{BH}^{-1/4}$, согласно которому T_{eff} должна быть выше наблюдаемой даже с учетом колор-фактора [21]. Поэтому необходимо привлечение альтернативных методов оценки массы центральных источников в таких объектах. Зачастую массы центрального источника оказываются малы согласно динамическим оценкам [23], и прекрасно объясняют низкую температуру фотонов диска, но они не в состоянии объяснить высокую болометрическую светимость таких объектов, наблюдаемых с колоссальных расстояний (например, $L_{bol} \sim 10^{40} - 10^{41}$ эрг/с для M101 ULX-1 при $D \geq 7$ Мпс).

Было замечено, что наблюдаемая переменность и спектральные свойства ЧД изменяются строго определенным образом на протяжении всех переходов между спектральными состояниями. Кроме того, эти корреляции наблюдаются во многих источниках, содержащих ЧД, совершенно разных светимостей. Универсальность этих корреляций позволяет предположить, что основные физические процессы являются подобными в каждом из этих источников и их наблюдаемые проявления определяются общим набором основных физических параметров. Это позволяет определение масс ЧД методом скалирования на базе соответствующего сравнения спектральных и временных характеристик исследуемого объекта с характеристиками объектов с известными массами. Принципы скалирования основаны на обратной зависимости массы ЧД и частоты квазипериодических осцилляций в спектре мощности, обоснованные теоретически [7, 14] и обнаруженные на большом наблюдательном материале [13]

$$\frac{\nu_r}{\nu_t} = \frac{M_t}{M_r}. \quad (6)$$

Подстрочные индексы “ r ” и “ t ” обозначают опорный и искомый источники, соответственно. Тогда масса ЧД искомого источника определяется элементарным соотношением $M_{BH} = M_r \times \frac{\nu_r}{\nu_t}$. Если во время спектральных переходов в системе не наблюдаются квазипериодические осцилляции в спектре

мощности, или они отсутствуют на стадии пика вспышки, где ожидается насыщения спектрального индекса, то операция скалирования предусматривает сравнение эволюции светимостей (диска) источников. А именно, в основе применяемой техники лежит предположение о том, что различные опорные источники показывают одинаковую форму корреляций $\Gamma - N_{r/t}$ и единственное различие между ними в терминах нормировки в Комптонизационной модели обусловлено разными величинами отношения массы ЧД к квадрату расстояния до источника, а именно M_{BH}/d^2 . С учетом того, что нормировка $N_{r/t}$ представляет собой отношение светимости (диска) источника к квадрату расстояния (1),

$$\frac{L_r d_t^2}{L_t d_r^2} f_G = \frac{N_r}{N_t}, \quad (7)$$

где L – светимость диска, d – расстояние до источника и f_G – геометрический фактор $[(\cos \theta)_r / (\cos \theta)_t]$. Геометрический фактор учитывает факт отличия процесса аккреции в случае дисковой геометрии. Разумеется, что для сферической аккреции геометрический фактор равен единице. Таким образом, для оценки массы ЧД в искомом источнике, нужно выполнить смещение соответствующей корреляции искомого источника вдоль оси нормировки N ($\propto \dot{M}$) до ее совмещения с корреляционной кривой одного из опорных источников (см. рис. 6). Эта процедура скалирования обеспечивает искомую массу ЧД искомого источника M_t

$$M_t = M_r \frac{N_t}{N_r} \left(\frac{d_t}{d_r} \right)^2 f_G. \quad (8)$$

С учетом этих принципов скалирования, в диссертации сделана попытка разрешить давно назревшие противоречия в проблеме оценки массы центрального объекта в ультраярких источниках.

Наблюдательный материал диссертационной работы был получен с помощью рентгеновских телескопов RXTE, *BeppoSAX*, SWIFT, Чандра и *Suzaku*, накопленный за время работы миссий в 1996 – 2015 гг. Все результаты, выносимые на защиту, получены лично диссертантом. Вся обработка данных производилась автором. Спектральное моделирование и интерпретация результатов, а также частичная разработка Комптонизационной модели *CompTB*, расчет рентгеновских спектров и сравнение с наблюдательными данными принадлежат автору.

Цель работы

Основная цель работы заключалась в анализе данных наблюдений галактических и внегалактических источников рентгеновского излучения, принадлежащих разным классам (кандидаты в черные дыры звездных и “промежуточных” масс, микроквазары, нейтронные звезды, входящие в состав массивных и маломассивных РДС, в том числе, *atoll*- и *Z*-источники) детекторами обсерваторий *RXTE*, *BeppoSAX*, *SWIFT*, Чандра и *Suzaku*, а также интерпретация результатов этого анализа на основе моделей первых принципов с возможностью систематизации основных спектральных характеристик.

Другой целью работы была разработка и применение метода наблюдательной диагностики природы компактных объектов на основе сравнительного анализа поведения спектральных характеристик черных дыр и нейтронных звезд во время смены спектральных состояний. Протестировать полученные признаки на базе как можно большего количества рентгеновских источников (как галактических, так и внегалактических) с учетом разнообразия систем по составу компаньонов, предусматривая широкий диапазон масс компактных объектов и разнообразие сценариев переходов между состояниями, также являлось целью исследования.

Кроме того, целью работы было внедрение метода определения масс черных дыр путем масштабирования (скалирования) найденных спектральных и временных характеристик для аккрецирующих черных дыр как звездных, так и “промежуточных” масс.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми. Новизна работы также связана с использованием обширного сета наблюдений, как по длительности временных рядов наблюдений, так и по количеству использованных инструментов с разными принципами детектирования (*BeppoSAX*, *RXTE*, *Suzaku*, *SWIFT* и Чандра) и качеству данных. Были использованы все имеющиеся на сегодняшний день доступные наблюдательные данные (как архивные, так и активно работающих в настоящий момент орбитальных обсерваторий) по изученным объектам.

Впервые предложены спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих РДС, использующие рентгеновские наблюдательные корреляции спектрального индекса, как функцию темпа аккреции, во вре-

мя фаз активности объекта, протестированные на большом наблюдательном материале, включая как Галактические, так и внегалактические источники.

Впервые выполнена оценка массы центрального объекта M101 ULX-1 методом масштабирования (скалирования) спектральных характеристик рентгеновского излучения ULX-1 на основе наблюдений обсерваторий *Chandra* и *Swift*, при этом впервые сделан вывод о природе центрального объекта (в пользу ЧД) на основе спектральных признаков ЧД и обосновано наличие “черной дыры промежуточной массы” в ULX-1 с помощью наблюдательного эффекта насыщения индекса в рентгеновском спектре источника.

Впервые выполнена оценка массы черной дыры в двойной системе 4U 1630–47 методом масштабирования (скалирования) спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения на основе *RXTE* и *VerroSAX* наблюдений: $M_x = 9.5 \pm 1.1 M_\odot$.

Впервые обнаружена фаза насыщения спектрального индекса, как функция скорости аккреции \dot{M} , в РДС с черной дырой GRS 1915+105, на основе анализа рентгеновских наблюдений с борта орбитальной обсерватории *RXTE*.

Впервые обнаружено постоянство спектральных индексов рентгеновских спектров ряда нейтронных звезд на уровне $\alpha = 1$ ($\Gamma = \alpha + 1 = 2$, в модели переходного слоя с учетом тепловой Комptonизации): 4U 1728–34, GX 3+1, 4U 1820–30 и GX 340+0 при эволюции источников между состояниями низкой и высокой светимости на основе анализа рентгеновских наблюдений обсерваторий *RXTE* и *VerroSAX*.

Впервые предложена физическая модель для обоснования обнаруженного квазипостоянства спектрального индекса, согласно которой доминирующий вклад в формирование спектра обусловлен Комptonизированной компонентой, формирующейся в переходном слое между аккреционным диском и поверхностью нейтронной звезды. Как правило, квазистабильность фотонного индекса на уровне $\Gamma = 2$ имеет место в случае, если собственное энерговыделение в переходном слое превосходит поток излучения аккреционного диска, перехватываемый в области переходного слоя.

Впервые обнаружено двухфазное поведение фотонного индекса жесткой компоненты рентгеновского спектра ряда нейтронных звезд: Sco X-1, 4U 1705–44 и 4U 1700–37 при смене спектральных состояний объектов, при этом впервые детектирована уникальная фаза повышенной жесткости спектров в сверх-Эддингтоновском режиме аккреции вещества звезды-донора на основе ана-

лиза рентгеновских наблюдений обсерваторий *RXTE* и *BeppoSAX*.

Впервые разработана физическая модель для обоснования обнаруженного усиления жесткости рентгеновских спектров НЗ на пике вспышки, согласно которой высвобождение гравитационной энергии происходит лишь во внешних частях переходного слоя, причем эти области разогреваются настолько, что это приводит к уменьшению сечения электронного рассеяния и увеличению уровня критической светимости. В итоге эффективность тепловой Комптонизации возрастает, приводя к снижению спектрального индекса в режиме сверх-Эддингтоновской светимости. Это может рассматриваться, как дополнительный спектральный признак наличия нейтронной звезды в таких системах.

Научная и практическая ценность

В работе обнаружены фундаментальные спектральные признаки отличия черных дыр от нейтронных звезд в аккрецирующих РДС, которые обеспечивают наиболее универсальный и простой в применении способ наблюдательной диагностики природы компактного объекта по рентгеновским спектрам. Обнаруженные признаки уже применяются различными группами для диагностики природы компактных объектов как в Галактических, так и во внегалактических источниках.

Предложенные методики используют различие поведения объектов (ЧД / НЗ), наиболее проявляемое в активных состояниях, которые представляют огромный интерес с точки зрения понимания природы компактных объектов и для тестирования теории эволюции Галактических двойных систем и ультраярких рентгеновских источников, в целом.

Развит новый метод оценки массы черных дыр (M_x) на основе масштабирования (скалирования) спектральных и временных характеристик этих источников. Создана база “образцовых” корреляционных треков Γ , как функции темпа аккреции \dot{M} , для объектов с известными параметрами (массой M_x , расстоянием D и углом наклона орбиты двойной системы i), которые позволяют на их основе масштабирование (скалирование) масс ЧД, в широком диапазоне корреляций, имеющих разные уровни насыщения индекса. В настоящее время обнаруженные зависимости спектрального индекса от темпа аккреции для ряда черных дыр, полученные в данной работе, многими исследователями используются как эталонные.

Научное значение имеет также оценка масс ЧД в ультраярких источниках, что позволит уточнить их эволюционный статус. Методическое значение имеет впервые примененный для ультраярких источников способ оценки масс ЧД путем масштабирования (скалирования) корреляций спектрального индекса, как функции темпа аккреции. Решен вопрос о природе компактного источника в ультраярком источнике ULX-1 в галактике M101 в пользу черной дыры “промежуточной массы”, представлявший загадку для исследователей в течении более чем 15 лет. Оказалось, что масса черной дыры M101 ULX-1 составляет порядка 10 000 солнечных масс, что, с одной стороны, существенно больше, чем оптические оценки, но, с другой стороны, согласуется со слишком мягким рентгеновским спектром источника. Тем самым разрешена загадка источника ULX-1 в галактике M101, что способствует решению актуальной прикладной задачи определения масс кандидатов в черные дыры.

Открытие насыщения фотонного индекса рентгеновского спектра в системе 4U 1630–47 впервые позволило оценить массу ЧД путем масштабирования (скалирования) рентгеновских спектральных характеристик. Оценка массы в двойной системе 4U 1630–47 традиционными (динамическими) методами до сих пор невозможна из-за отсутствия оптического излучения объекта в силу его удаленности. Внедрение новой методики диагностирования ЧД по рентгеновскому излучению способствует решению актуальной задачи обнаружения и изучения наблюдательных проявлений черных дыр, в особенности, когда классические методы не применимы.

Решен вопрос о природе компактного источника в массивной двойной системе 4U 1700–37, в которой динамические оценки массы не позволяли идентифицировать компактный объект (указывали как на НЗ, так и на ЧД малой массы), в качестве компактного объекта, при этом отсутствие пульсаций излучения и циклотронной линии поглощения в рентгеновском спектре свидетельствовали в пользу наличия черной дыры в системе. Наличие т.н. “жесткого хвоста” в спектре 4U 1700–37 вносило дополнительную неопределенность. Только на основании применения предложенной в данной работе диагностики с использованием спектрального признака НЗ (о стабильности индекса на уровне $\Gamma \sim 2$ в нейтронных звездах), был сделан вывод в пользу наличия нейтронной звезды в 4U 1700–37.

Систематизация и изучение спектральных признаков черных дыр и нейтронных звезд в рентгеновском диапазоне спектра является одним из ключевых факторов как для понимания процессов формирования рентгеновского

излучения, так и для выяснения свойств самих компактных объектов.

Полученные в работе результаты могут найти применение во всех астрономических учреждениях, где изучаются РДС с аккрецирующими компактными объектами, в частности, в ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, ФТИ РАН (г. Санкт-Петербург), АКЦ ФИАН, КГУ, САО РАН, ГАО РАН (в Пулковом), и зарубежных институтах и обсерваториях.

Апробация работы

Работы, положенные в основу данной диссертации, докладывались на российских и международных научных конференциях “Механизмы излучения астрофизических объектов: классика сегодня” (Санкт-Петербург, Россия, 2015), “Космология и релятивистская астрофизика (Zeldovich – 100)” (ИКИ РАН, Москва, Россия, 2014), на 38-ой и 39-ой ассамблеях Международного Комитета по космическим исследованиям COSPAR (Бремен, Германия, 2010; Майсур, Индия, 2012), на 66-ом международном семинаре имени Фуджихара “Вселенная в гамма-рентгеновских лучах” (Хаконэ, Япония, 2013), “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (ИКИ РАН, Москва, Россия, 2003, 2006, 2012, 2013), “Рентгеновская астрофизика до 511 кэВ” (Феррара, Италия, 2011), на семинаре отдела “Астрофизики частиц и космологии” физического факультета Парижского университета (Париж, Франция, 2010), “Черные дыры в двойных системах: наблюдения и теория” (Феррара, Италия, 2009), “Рентгеновская Вселенная – 2008” (Гранада, Испания, 2008), 6th INTEGRAL Workshop “The Obscured Universe” (Москва, Россия, 2006), семинаре Центра ядерных исследований (Сакле, Франция, 2009), семинаре Центра Научных Данных спутника INTEGRAL (Версуа, Швейцария, 2004), а также на астрофизических семинарах в Институте Космических Исследований РАН, Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, из них 11 статей в рецензируемых журналах, 2 статьи в сборниках трудов конференций и 8 тезисов докладов.

Объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и приложения. Объем диссертации 303 страницы, диссертация содержит 109 рисунков и 55 таблиц. Список литературы содержит 488 ссылок.

Содержание работы

Во введении описываются проблемы, на решение которых направлена диссертационная работа, обосновывается ее актуальность и определены цели работы. В первых трех главах приведены 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, временными свойствами рентгеновского излучения и темпом аккреции в Галактической двойной системе с кандидатом в черные дыры GRS 1915+105 во время переходов между состояниями. В разделе 1.1 приведен анализ предыдущих исследований объекта, попыток систематизации его наблюдательных проявлений в рентгеновском диапазоне, и сформулированы нерешенные актуальные проблемы, которые предстоит решить в этой главе. В разделе 1.2 приведено описание наблюдательных данных, полученных с борта орбитальной обсерватории *Rossi X-ray Timing Explorer* (далее – RXTE), координированные с радионаблюдениями телескопа *Ryle Radio Telescope*. Показано, что широкополосный (3 – 150 кэВ, PCA+HEXTE/RXTE) энергетический спектр GRS 1915+105 во время всех спектральных состояний может быть адекватно представлен двумя компонентами в модели “*Bulk Motion Comptonization*” (ВМС): жесткой компонентой с фотонным индексом 1.7 – 3.0 с завалом на высоких энергиях и мягкой компонентой с фотонным индексом 2.7 – 4.2 с характерной температурой ~ 1 кэВ, а также компонентой красномещенной асимметричной линии железа (*Laor*). В разделе 1.3 приведен подробный анализ всех переходов между спектральными состояниями GRS 1915+105 (рис. 2, левая панель). В разделе 1.4 дано обсуждение и интерпретация результатов анализа этих наблюдений. В частности, в разделе 1.4.1 детально рассмотрено влияние эффекта тепловой и динамической Комptonизации излучения во внутренних частях аккреционного потока на эволюцию спектрального индекса Γ во время переходов между состояниями. Обнаружен эффект насыщения фотонного индекса Γ , как функция темпа аккреции \dot{M} , предсказанный еще в 1998 году Титарчуком и Занниасом [12]. Также показано, что эффект насыщения индекса Γ является прямым следствием наличия в источнике области сходящегося потока и, по существу, рассматривается как наблюдательное доказательство наличия черной дыры в источнике. Далее, в разделе 1.4.2 обсуждается модель, предложенная Титарчуком и Фиорито в

2004 году [14], в которой было обосновано поведение спектрального индекса как функции скорости аккреции вещества \dot{M} , обнаруженное в рентгеновских наблюдениях GRS 1915+105 по результатам этой главы. Кроме того, установлена наблюдательная корреляция индекса с величиной ν_L низкочастотных КПО наряду с насыщением индекса как функции темпа аккреции для мягкого и жесткого Комптонизированных компонентов рентгеновского спектра GRS 1915+105. Тем самым, подтверждена корреляция индекса как функция КПО, также предсказанная Титарчуком и Занниасом [12], которые аргументировали, что переходный слой (или Комптоновское облако), образованный между Кеплеровским диском и центральным объектом (НЗ или ЧД) сжимается и становится холоднее, когда скорость аккреции вещества диска возрастает. В результате сжатия переходного слоя частота ν_L низкочастотных квазипериодических осцилляций, которая прямо пропорциональна скорости потока плазмы и обратно пропорциональна размеру переходного слоя, возрастает с ростом \dot{M} . С другой стороны, с ростом \dot{M} монотонно возрастает индекс Γ (при охлаждении переходного слоя [14]) и выходит на постоянный высокий уровень Γ_{sat} (насыщается) при больших значениях \dot{M} , что указывает на доминирование динамической Комптонизации в зоне сходящегося потока. Этот эффект, как показано на примере GRS 1915+105, легко обнаруживается при анализе наблюдений и доказывает наличие ЧД в источнике. В последующих двух главах проявление этого эффекта найдено как в галактических и во внегалактических источниках со спорным типом компактного объекта и использовано для их идентификации, как источников с черными дырами.

Во **второй** главе подробно изучено поведение энергетических спектров и спектров мощности, наблюдаемых от галактического рентгеновского источника 4U 1630–47 во время вспышечной активности (1996 – 2004) по данным *RXTE* и *VerroSAX* (рис. 4). Исследования сфокусированы на детальном изучении наблюдательной зависимости фотонного индекса от частот КПО, на основе которых была выполнена оценка массы кандидата в черные дыры 4U 1630–47 методом масштабирования (скалирования) спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения (рис. 5). В основе применяемой техники лежит предположение о том, что различные опорные источники показывают одинаковую форму корреляций $\Gamma - \dot{M}$ и единственное различие между ними заключается в отношении массы ЧД к квадрату расстояния, а именно M_{BH}/d^2 . Показано, что изменение формы рентгеновского спектра при переходах между состояниями этого источника хорошо воспроизводятся

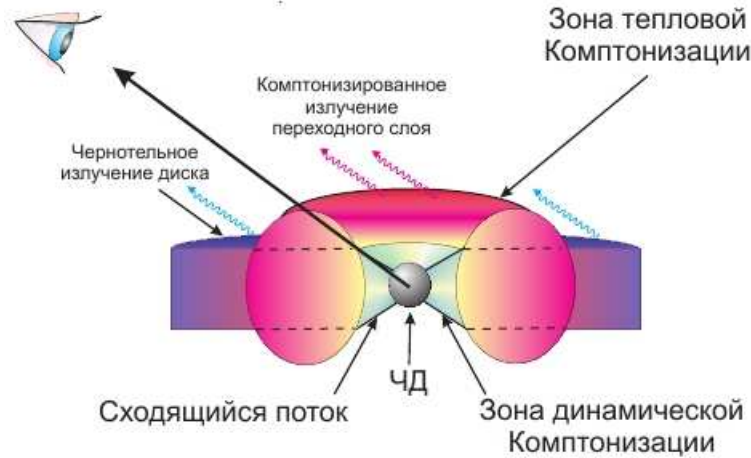


Рис. 3: Схематическое представление зон тепловой и динамической Комptonизации, используемое для спектрального анализа в модели с переходным слоем для источников, содержащих ЧД. Комptonизационная составляющая спектра формируется во внутренних областях переходного слоя, где фотоны чернотельного излучения диска Комptonизируются путем тепловой и динамической Комptonизации при взаимодействии с электронами втекающего вещества (красные стрелки). Чернотельная составляющая спектра формируется в аккреционном диске и часть ее фотонов видна для земного наблюдателя, не подвергаясь процессу Комptonизации (синие стрелки).

в рамках модели переходного слоя с учетом тепловой и динамической Комptonизации (разд. 2.3.3). Обнаружено характерное для ЧД поведение параметров модельного спектра 4U 1630–47, в частности, возрастание спектрального индекса α с ростом \dot{M} и фаза насыщения индекса при высоких значениях \dot{M} , на основе чего установлена принадлежность компактного объекта в 4U 1630–47 к классу черных дыр. Примечательно, что в разных вспышках этот объект показывает разные уровни насыщения (нижние панели на рис. 5): $\Gamma_{sat} \sim 1.9$ (на участке спада вспышки 2003 г.), $\Gamma_{sat} \sim 2.4$ (2000 – 2001 гг.) и $\Gamma_{sat} \sim 3$ (1996 – 1999 гг.).

В разд. 2.5.2 обсуждается немонотонность поведения пороговой энергии E_{cutoff} в зависимости от индекса Γ (верхняя панель на рис. 6). При этом корреляции демонстрируют три разных трека, которые соответствуют разным уровням насыщения индекса Γ (рис. 6). Ключевым моментом является детектирование насыщения индекса Γ , как функции квазипериодических осцилляций, которое позволило в разд. 2.5.3 выполнить оценку массы компактного объекта в 4U 1630–47 методом масштабирования (скалирования) ($M_x = 9.5 \pm 1.1 M_{\odot}$). Факт насыщения индекса Γ , в сочетании с величиной массы центрального объекта, указывает на наличие ЧД в источнике. Най-

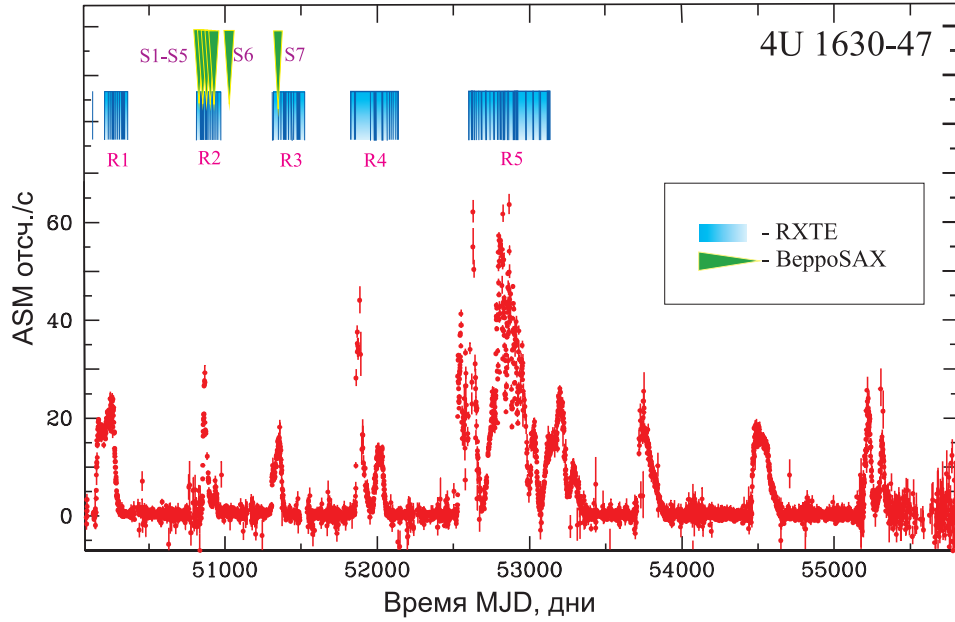


Рис. 4: Эволюция скорости счета ASM во время наблюдений 1996 – 2011 гг. объекта 4U 1630–47. *Синими* вертикальными полосками (на *верхней части панели*) представлено распределение по времени данных *RXTE*, использованных для спектрального анализа, при этом *голубыми* прямоугольниками указаны сетки данных *RXTE* и *зелеными* треугольниками показаны данные *BeppoSAX*.

денная немонотонность пороговой энергии E_{cutoff} в зависимости от индекса Γ может служить дополнительным признаком наличия ЧД в системе.

В **третьей главе** выполнены оценки массы центральных объектов в ультрарярых источниках ULX-1 (галактики M101) и HLX-1 (галактики ESO 243–49) методом масштабирования (скалирования) спектральных характеристик рентгеновского излучения на основе наблюдений с бортов орбитальных обсерваторий *Swift* и *Chandra* (рис. 7), сделан вывод о наличии в них “черных дыр промежуточной массы”. При этом оценка массы объектов стала возможной благодаря открытию эффекта насыщения спектральных индексов, как функции темпа аккреции, во время переходов объектов между состояниями, в рамках модели переходного слоя с учетом тепловой и динамической Комптонизации. Кроме того, обнаружение эффекта насыщения фотонного индекса Γ во время фаз активности подтверждает наличие сходящегося на ЧД потока, тем самым наличие ЧД в источниках. На основе найденных зависимостей индекса Γ от темпа аккреции \dot{M} выполнена оценка масс ЧД: в источнике M101 ULX-1 M_x составляет $(3.2 - 4.3) \times 10^4 M_\odot$ с учетом разброса в опре-

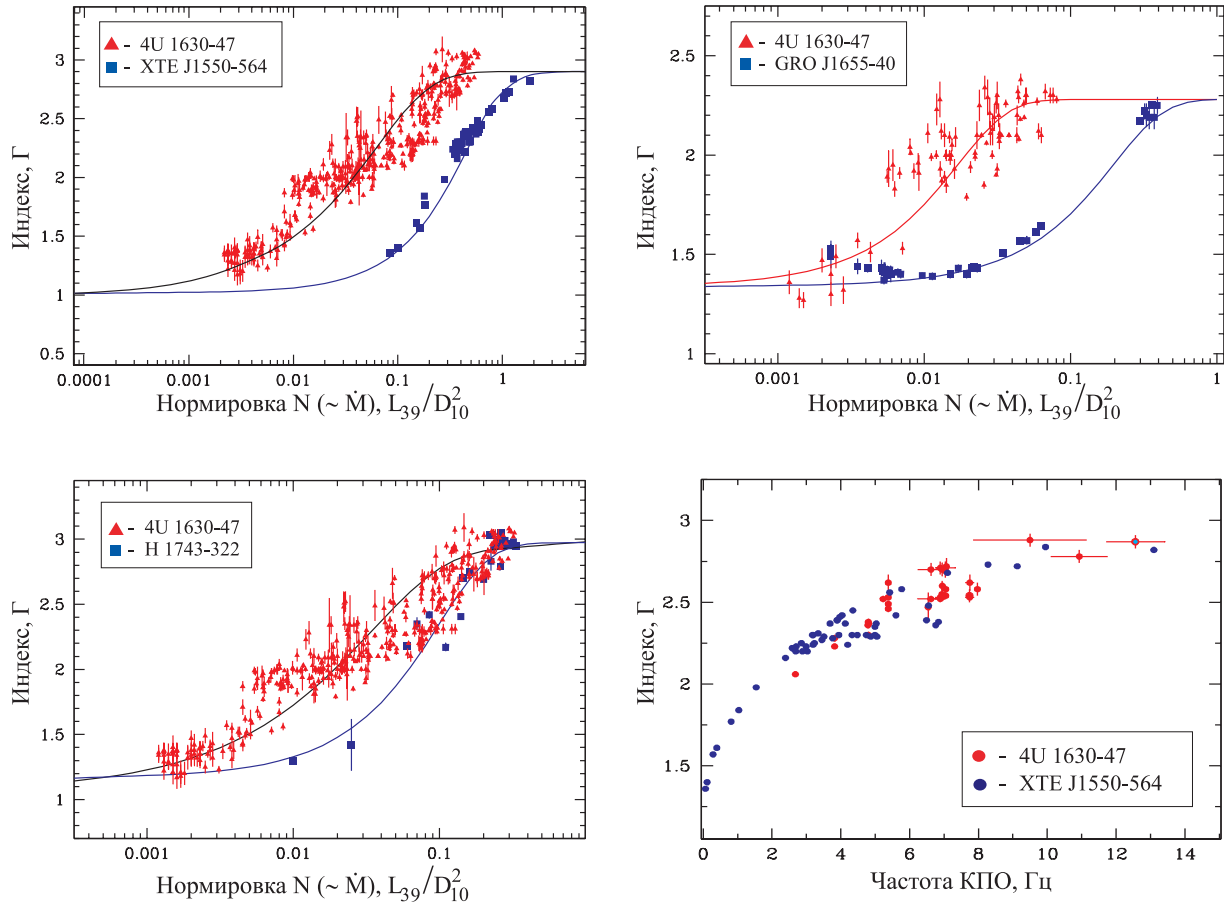


Рис. 5: Масштабирование (скалирование) фотонного индекса Γ , как функции темпа аккреции \dot{M} и частоты КПО, для 4U 1630-47 (красные точки) и опорных объектов XTE J1550-564, GRO J1655-40 и H 1743-322 (синие точки).

делении расстояния до галактики M101 (от 6.4 ± 0.5 Мпс до 7.4 ± 0.6 Мпс); в источнике ESO 243-49 HLX-1 M_x составляет $\sim 7 \times 10^4 M_\odot$ в предположении расстояния до галактики ESO 243-49 около 95 Мпс. Для этих оценок массы впервые был применен универсальный метод масштабирования (скалирования) [15] на основе сравнения с корреляциями галактических источников, содержащих черные дыры XTE J1550-564, H 1743-322 и 4U 1630-472. Также была детектирована низкая температура “затравочных” фотонов диска, всего 40 – 100 эВ, что согласуется с большими массами ЧД в M101 ULX-1 и ESO 243-49 HLX-1. В частности, для источника M101 ULX-1 разрешена проблема высокой болометрической светимости при условии наблюдаемого мягкого рентгеновского спектра и сделано предположение, что центральным объектом в M101 ULX-1 является ЧД промежуточной массы порядка $10^4 M_\odot$.

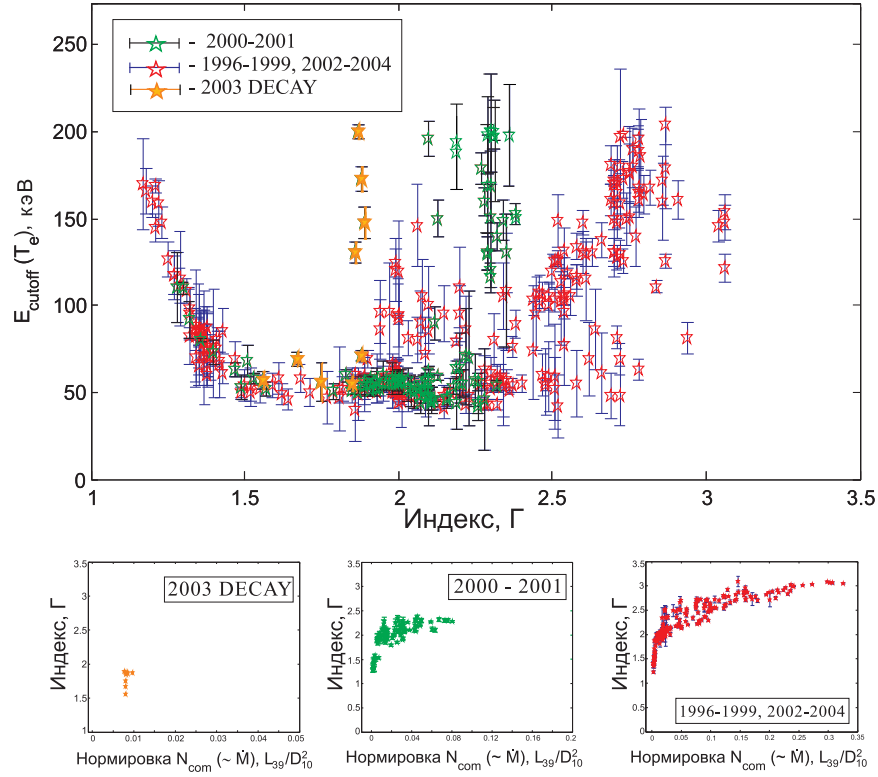


Рис. 6: Сверху: пороговая энергия E_{cutoff} как функция фотонного индекса по наблюдениям 4U 1630-47 со спутника RXTE. Спектральные параметры для вспышек 1996 – 1999 и 2002 – 2004/2000 – 2001/2003 гг.[финальная фаза вспышки] отмечены красными/зелеными/желтыми точками для указания соответствующих уровней насыщения $\Gamma \sim 3.0/2.3/1.9$, соответственно. Снизу: корреляции индекса Γ как функция нормировки *Comptb* компоненты для всех указанных наблюдений: финальная фаза 2003 (слева), 2000 – 2001 (по центру) и 1996 – 1999 и 2002 – 2004 (справа). Корреляции демонстрируют три разных трека, которые соответствуют разным уровням насыщения индекса. Уровень насыщения индекса вероятно коррелирует с пороговой энергией E_{cutoff} (см. верхнюю панель).

По результатам первых четырех глав получено наблюдательное подтверждение теоретически предсказанных корреляций спектрального индекса, как функции скорости аккреции \dot{M} , завершающихся насыщением индекса при больших значениях темпа аккреции \dot{M} в черных дырах, предложенных еще в 1998 году Титарчуком и Занниасом [12]. В следующих главах мы попытались глубже изучить, как ведет себя этот тип корреляции индекса в источниках с НЗ, используя рентгеновские наблюдения нейтронных звезд разных подклассов, входящих в состав массивных, так и маломассивных РДС, и сравнить, по возможности, с зависимостью индекса от скорости аккреции, обнаруженной в ЧД.

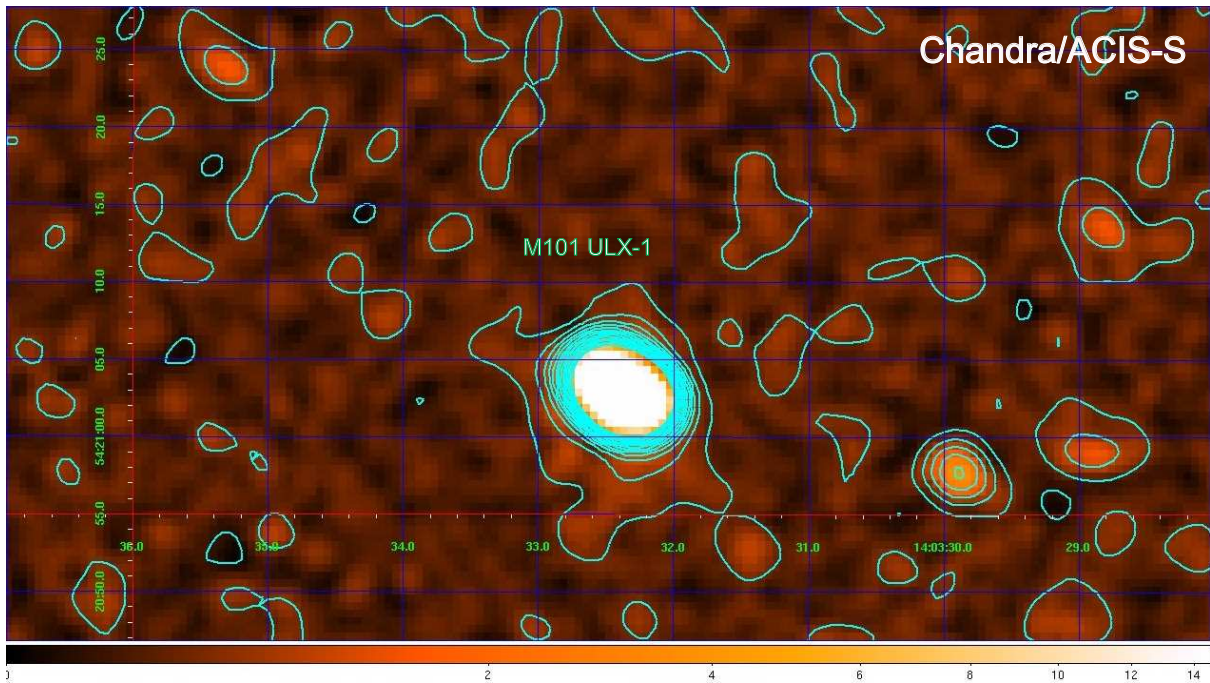


Рис. 7: Сглаженное изображение участка неба, полученное с помощью детектора ACIS-S (0.2 – 8 кэВ) с борта космической обсерватории *Chandra*. Уровневые изолинии демонстрируют минимальное влияние других точечных источников и диффузного излучения в пределах кольцевого участка с радиусом 9" вокруг M101 ULX-1.

В **четвертой** главе проведен анализ эволюции рентгеновских спектральных характеристик системы 4U 1728–34, для которой точно известно, что она содержит НЗ. При обработке наблюдений орбитальных обсерваторий *ВерроSAX* и *RXTE* с помощью пакетов программ SAXDAS и LHEASOFT/FTOOLS 5.3, обнаружено, что широкополосный рентгеновский спектр 4U 1728–34 во время всех спектральных состояний хорошо аппроксимируется композицией тепловой, Комptonизированной и Гауссовой компонент. В этой главе (разд. 5.4) предложено описание переходов между спектральными состояниями низкой и высокой светимости в терминах электронной температуры Комptonовского облака (от 15 до 2.5 кэВ, на примере объекта 4U 1728–34). Анализ спектров, выполненный в рамках данного подхода, показал, что фотонный индекс Γ степенной составляющей спектра является достаточно стабильным ($\Gamma = 1.99 \pm 0.02$) при изменении электронной температуры kT_e от 15 до 2.5 кэВ во время этих спектральных состояний. Предложена физическая модель для обоснования обнаруженного квазипостоянства спектрального индекса, согласно которой доминирующий вклад в формирование спектра обусловлен Комptonизированной компонентой, формирующейся в переходном слое меж-

ду аккреционным диском и поверхностью нейтронной звезды. В частности, квазистабильность фотонного индекса имеет место в случае, если собственное энерговыделение в переходном слое превосходит поток излучения аккреционного диска, перехватываемого в области переходного слоя. Показано, что характерная стабильность фотонного индекса на критическом уровне $\Gamma = 2$ определяется внутренними свойствами нейтронных звезд и является фундаментальным признаком, отличающим их от черных дыр, для которых индекс монотонно возрастает при переходе от низкого к высокому спектральному состоянию и насыщается при высоких значениях скорости аккреции вещества (см. правый столбец на рис. 8).

В последующих главах, также посвященных исследованию нейтронных звезд, характерные признаки НЗ, полученные на основе спектрально-временного анализа нейтронной звезды 4U 1728–34, применены к другим системам с НЗ (т.н. *atoll* и *Z*-источникам), с одной стороны, для диагностики природы компактного объекта в спорных случаях (ЧД или НЗ?) и, с другой стороны, для проверки надежности найденных признаков НЗ в РДС с надежно идентифицированными нейтронными звездами.

Таким образом, в **пятой** главе представлен 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, промодулированными короткопериодическими переходами между т.н. “*lower banana*” (LB) и “*upper banana*” (UB) состояниями в терминах цветовой диаграммы. Были проанализированы все имеющиеся на сегодняшний день наблюдения со спутников *RXTE* и *VerroSAX*. Обнаружено, что широкополосный рентгеновский спектр этих НЗ во время переходов может быть аппроксимирован аддитивной моделью, состоящей из чернотельного, Комptonизированного и Гауссова компонента. Обнаружено монотонное возрастание электронной температуры плазмы переходного слоя от 2.3 кэВ до 4.5 кэВ для GX 3+1 и от 2.9 кэВ до 21 кэВ для 4U 1820–30 при переходах объектов из состояния “UB” в состояние “LB”. Во время UB-LB переходов детектирована значительная эволюция шумовых компонент спектра мощности объектов, которая была использована для дополнительной идентификации спектральных состояний этих источников. Анализ энергетических спектров, выполненный в рамках вышеуказанной модели, показал, что фотонный индекс Γ степенной составляющей спектра также, как и в НЗ 4U 1728–34, является достаточно

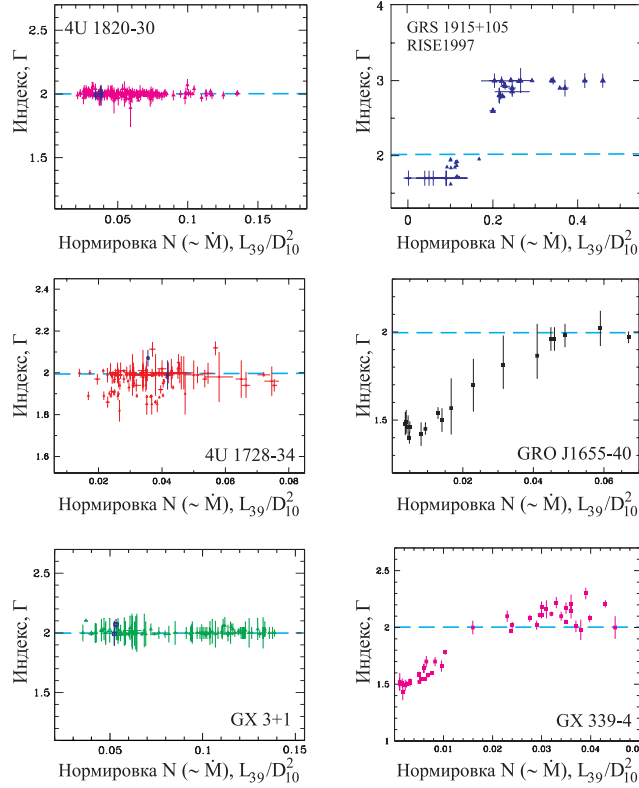


Рис. 8: Примеры поведения фотонного индекса Γ как функция скорости аккреции массы для РДС с черными дырами (правая колонка, GRS 1915+105 [16], GRO J1655-40 [15] и GX 339-4 [15]) в сопоставлении с РДС с нейтронными звездами - “*atoll*” источниками (левая колонка, 4U 1820-30 [18], 4U 1728-34 [17] и GX 3+1 [11]). Можно видеть заметное изменение индекса Γ , завершающееся характерной фазой насыщения в виде плато для черных дыр, в то время как для нейтронных звезд индекс лишь слегка варьируется около значения $\Gamma = 2$. Для наглядности, уровень $\Gamma = 2$ указан голубой пунктирной линией на всех диаграммах.

стабильным ($\Gamma = 2.00 \pm 0.02$) при изменении темпа аккреции в четыре раза. При этом рентгеновские спектры объектов демонстрируют доминирование Комptonизированной компоненты. Поэтому для обоснования обнаруженного квазипостоянства спектрального индекса и специфической формы спектров в нейтронных звездах GX 3+1 и 4U 1820-30 привлечена модель переходного слоя для случая доминирования Комptonизационной компоненты спектра, предложенная в четвертой главе данной диссертации. Показано, что эта модель удовлетворительно объясняет стабильное поведение фотонного индекса на критическом уровне $\Gamma = 2$ для исследованных *atoll*-источников, что указывает на универсальность найденного наблюдательного признака НЗ, а также является фундаментальным признаком, отличающим их от черных дыр.

В **шестой** главе продолжено тестирование найденного признака НЗ для

других двойных систем с нейтронными звездами, достигающих около- Эддингтоновского режима светимости на примере Z-источников. В самом деле, известно, что Z-источники в ходе их спектральной эволюции, как правило, показывают широкий диапазон светимостей, достигая критических значений $(0.5 - 1)L_{Ed}$. Таким образом, в этой главе представлен анализ спектральных и временных свойств, наблюдаемых в рентгене от Z-источников GX 340+0 и Scorpius X-1 при переходах между спектральными состояниями во время вспышек, отслеживаемых вдоль Z-трека на цветовой диаграмме. При этом обнаружено, что при переходе источника из так называемые состояния “Horizontal branch” (HB) в состояние “Flaring branch” (FB) электронная температура переходного слоя монотонно снижается от 21 кэВ до 3 кэВ в до-Эддингтоновском режиме. Были проанализированы все имеющиеся на сегодняшний день наблюдения Sco X-1 с борта спутника RXTE и GX 340+0 со спутников RXTE и *BeppoSAX* с использованием пакетов программ SAXDAS и LHEASOFT/FTOOLS 5.3. Показано, что широкополосный рентгеновский спектр GX 340+0 во время этих переходов может быть аппроксимирован аддитивной моделью, состоящей из низкотемпературного чернотельного компонента, двух Комptonизационных компонентов и Гауссова компонента. Причем оба Комptonизационных компонента обусловлены наличием переходного слоя, который обеспечивает рассеяние как “исходных/затравочных” фотонов с температурой $T_{s1} \lesssim 1$ кэВ, идущих от аккреционного диска [первая Комptonизационная составляющая *Comptb1*], так и “затравочных” фотонов с температурой $T_{s2} \lesssim 1.5$ кэВ, идущих от поверхности нейтронной звезды [вторая Комptonизационная составляющая *Comptb2*]. Детальный анализ спектров на основе этой модели показал, что фотонные индексы Γ_{com1} и Γ_{com2} соответствующих Комptonизационных компонентов оказываются постоянными на уровне 2 при изменении электронной температуры $kT_e^{(1)}$ переходного слоя от 3 кэВ до 21 кэВ. Обнаруженное квазипостоянство индексов на критическом уровне $\Gamma = 2$ было интерпретировано в рамках модели, в которой спектр определяется тепловыми Комptonизационными компонентами, формируемыми в переходном слое и его внутренних частях. Кроме того, установленный эффект стабильности спектрального индекса для Z-источника GX 340+0 подобен ранее обнаруженному эффекту стабильности фотонного индекса для ряда маломассивных двойных систем с нейтронными звездами и, в частности, для *atoll* источников 4U 1728-34, GX 3+1 и 4U 1820-30. Такое поведение, характерное как для Z-, так и для *atoll* источников во время фаз активно-

сти, принципиально отличается от поведения черных дыр, для которых спектральный индекс монотонно возрастает во время спектральных переходов от низкого к высокому состоянию и затем насыщается при высоких значениях скорости аккреции.

В свою очередь, показано, что спектры Sco X-1 во время всех состояний, как и для Z-источника GX 340+0, могут быть аппроксимированы аддитивной моделью, состоящей из двух Комptonизационных компонент и эмиссионной линии железа, но уже без добавления низкотемпературной чернотельной компоненты. Обе компоненты обусловлены наличием переходного слоя, который обеспечивает рассеяние как “*затравочных*” фотонов с температурой $T_{s1} < 0.7$ кэВ, идущих от аккреционного диска [первая, *жесткая*, Комptonизационная составляющая *Comptb1*], так и “*затравочных*” фотонов с температурой $T_{s2} < 1.8$ кэВ, идущих от поверхности нейтронной звезды [вторая, *мягкая*, составляющая, *Comptb2*] на горячих электронах переходного слоя. По результатам детального анализа спектров в этой модели подтверждено постоянство индексов $\Gamma_{1/2}$ на уровне 2 для докритического режима и обнаружено значительное снижение индекса Γ_{com2} *жесткой* компоненты в пределах $1.3 < \Gamma_{com1} < 2$ в околокритическом (или даже сверхкритическом) режиме аккреции. Такое двухфазное поведение индексов никогда не обнаруживается в ЧД, поэтому может рассматриваться как дополнительный признак наличия НЗ в системе. При этом показано, что при нахождении источников на пике вспышки температура T_{s2} монотонно снижается от 1.8 до 0.7 кэВ при одновременном росте электронной температуры плазмы переходного слоя $T_e^{(2)}$, выше 80 кэВ. Мы интерпретировали обнаруженное квазипостоянство индексов $\Gamma_{1/2} \simeq 2$ для до-Эддингтоновского режима (сопоставимого с интервалом низких температур плазмы переходного слоя $T_e^{(2)} < 50$ кэВ) с помощью модели, в которой спектр определяется доминированием Комptonизационных компонентов. Кроме того, установленный факт стабильности спектральных индексов для Z-источника Sco X-1 подобен ранее обнаруженному эффекту стабильности фотонного индекса для других нейтронных звезд (*atoll* источников 4U 1728-34, GX 3+1 и 4U 1820-30, а также для Z-источника GX 340+0), светимости которых много меньше критической для всех спектральных состояний. Мы также интерпретировали фазу снижения индекса при достижении объектом критического режима аккреции (ассоциируемого с наблюдаемыми высокими электронными температурами $T_e^{(2)} > 50$ кэВ) в рамках модели, согласно которой спектр определен высоким давлением излучения, идущего

от поверхности НЗ. В результате последнего, внутренние части переходного слоя эффективно охлаждаются, в то время как его внешние части остаются разогретыми без должного теплоотвода. В результате этого, сечение рассеяния значительно снижается во внешних областях переходного слоя, что приводит к росту значения критической светимости. Таким образом, показано, что локальная светимость объектов не превосходит критический уровень. В этом случае усиливается роль тепловой Комptonизации, что и приводит к снижению спектрального индекса.

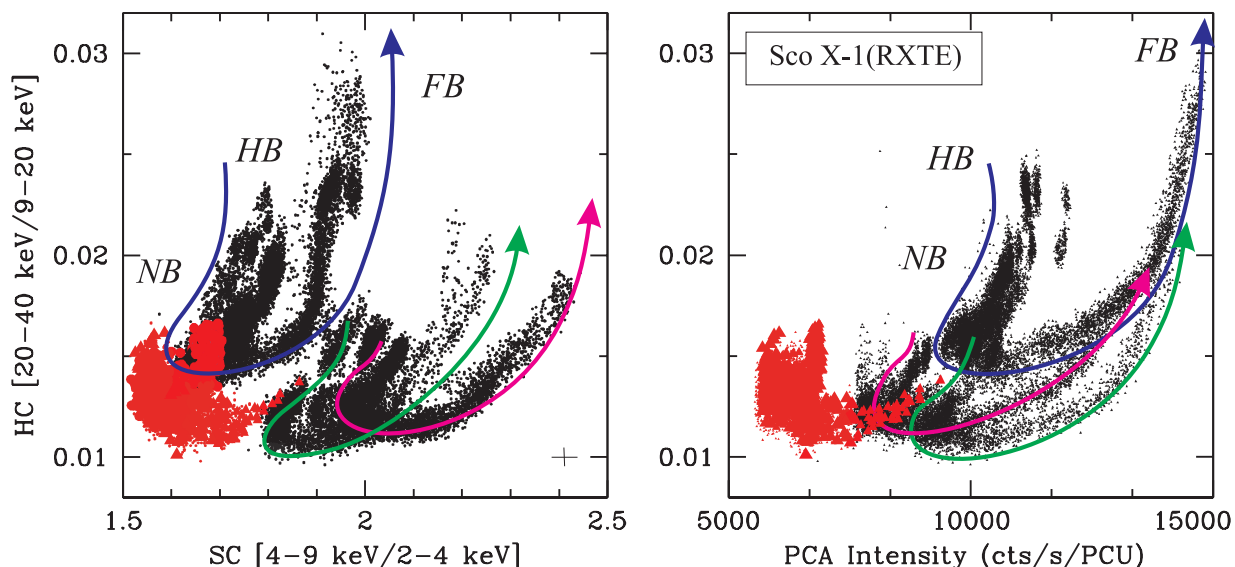


Рис. 9: Цветовые диаграммы (слева) и диаграммы жесткости излучения (справа) по наблюдениям Sco X-1 (1996 – 2002). Черными точками отмечены сетки значительной флариговой активности, в то время как красными точками показаны сетки умеренной активности источника. Для сетов со значительной флариговой активностью отмечены три типичных трека переходов объекта в направлении HB→NB→FB соответствующими стрелками. Для синего трека также указаны состояния: the Faring branch (FB), Normal branch (NB) и Horizontal branch (HB). Здесь хорошо видны смещения треков во время усиления флариговой активности объекта Sco X-1.

По результатам первых шести глав установлены и в достаточной мере протестированы спектральные признаки ЧД и НЗ. Однако все рассмотренные НЗ (кроме Sco X-1), как правило, не достигают критических светимостей. Для проверки того, как работают найденные признаки в этом предельном режиме аккреции, в **седьмой** главе проанализированы нейтронные звезды, достигающие сверх-Эддингтоновской светимости во время своих рентгеновских вспышек. Среди них НЗ разных подклассов, входящие в состав как маломассивных, так и массивных РДС: 4U 1705-44 (надежно установленный “*atoll*”-источник, но показывающий некоторые свойства Z-источников) и воз-

можная нейтронная звезда 4U 1700–37 (входящая в состав массивной РДС и имеющая спорную идентификацию природы компактного объекта, НЗ или ЧД). Показано, что спектры этих объектов (4U 1705–44 и 4U 1700–37) во время всех состояний опять же, как и для Z-источников GX 340+0 и Sco X–1, могут быть аппроксимированы аддитивной моделью, состоящей из двух Комptonизационных компонентов и эмиссионной линии железа. Оба компонента обусловлены наличием переходного слоя, который обеспечивает рассеяние как “затравочных” фотонов с температурой $T_{s1} < 0.7$ кэВ, идущих от аккреционного диска [первая, жесткая, Комptonизационная составляющая *Comptb1*], так и “затравочных” фотонов с температурой $T_{s2} < 1.8$ кэВ, идущих от поверхности нейтронной звезды [вторая, мягкая, составляющая, *Comptb2*] на горячих электронах переходного слоя. Для этих объектов при моделировании спектров также добавлялась компонента *Bbody* для описания их низкоэнергичной части спектра. По результатам детального анализа спектров в этой модели обнаружено поведение, в точности подобное поведению Sco X–1, т.е. вновь подтверждено постоянство индексов $\Gamma_{1/2}$ на уровне 2 для докритического режима и обнаружено значительное снижение индекса Γ_{com2} жесткой компоненты в пределах $1.3 < \Gamma_{com1} < 2$ в околокритическом (или даже сверхкритическом) режиме аккреции. Таким образом, такое двухфазное поведение индексов, в силу его повторяемости для ряда НЗ в Эддингтоновском режиме аккреции, может рассматриваться как дополнительный признак наличия НЗ в системе. При этом показано, что при нахождении источников на пике вспышки температура T_{s2} опять же монотонно снижается от 1.8 до 0.7 кэВ с одновременным нарастанием электронной температуры плазмы переходного слоя $T_e^{(2)}$, выше 80 кэВ. Мы уже интерпретировали обнаруженное квазипостоянство индексов $\Gamma_{1/2} \simeq 2$ для до-Эддингтоновского режима (сопоставимого с интервалом низких температур плазмы переходного слоя $T_e^{(2)} < 80$ кэВ) с помощью модели, в которой спектр определяется доминированием Комptonизационных компонент. В целом, установленный факт стабильности спектральных индексов для Z-источника Sco X–1, *atoll*-источника 4U 1705–44 и источника 4U 1700–37 подобен ранее обнаруженному эффекту стабильности фотонного индекса для других нейтронных звезд (*atoll*-источников 4U 1728–34, GX 3+1 и 4U 1820–30, а также для Z-источника GX 340+0), светимости которых много меньше критической для всех спектральных состояний. Мы также интерпретировали фазу снижения индекса при достижении объектом критического режима аккреции (ассоциируемого с наблюдаемыми высокими

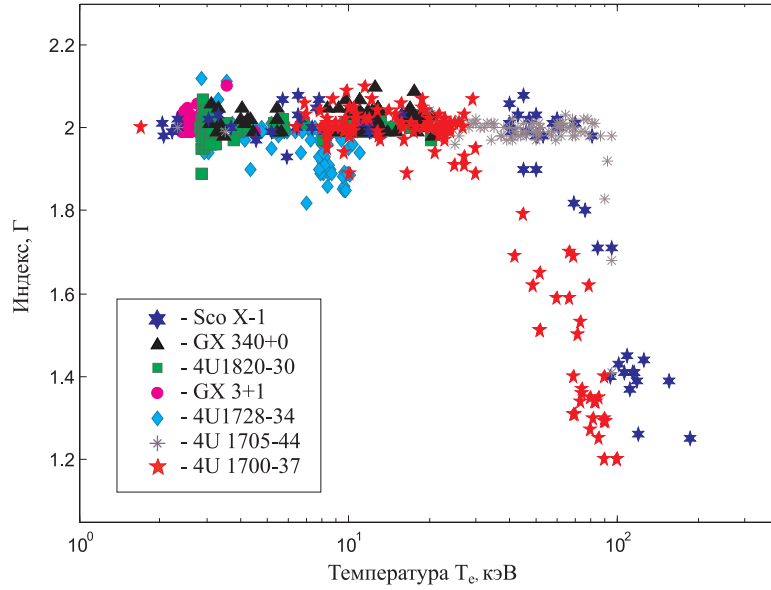


Рис. 10: Зависимость фотонного индекса Γ от электронной температуры kT_e для Z-источника Sco X–1 (синие звездочки), GX 340+0 (черные треугольники), и atoll источники 4U 1705–44 (серые точки), 4U 1728–34 (голубые ромбы), GX 3+1 (малиновые кружки), и 4U 1820–30 (зеленые квадраты) и НЗ 4U 1700–37 (красные звездочки).

электронными температурами $T_e^{(2)} > 80$ кэВ) в рамках модели, согласно которой спектр определен высоким давлением излучения, идущего от поверхности НЗ.

Наконец, примером практического применения нового способа диагностирования является идентификация природы компактного объекта в пользу НЗ в 4U 1700–37 (рис. 10, разд. 7.2.6). Дело в том, что динамические оценки массы компактного объекта в 4U 1700–37 указывали либо на нейтронную звезду большой массы, либо на черную дыру малой массы. При отсутствии характерных пульсаций рентгеновского излучения и каких-либо надежных признаков наличия циклотронной линии поглощения в спектре объекта, большинство фактов указывало на черную дыру, в качестве компактного объекта. И только на основе характерного поведения фотонного индекса в докритическом и около-Эддингтоновском режимах было установлена принадлежность компактного объекта в 4U 1700–37 к классу нейтронных звезд.

В заключении кратко сформулированы выносимые на защиту положения диссертационной работы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Обнаружены фундаментальные спектральные признаки аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр. Показано, что для ЧД фотонный индекс Γ монотонно возрастает с ростом скорости аккреции \dot{M} при переходе от низкого к высокому спектральному состоянию, и насыщается при высоких значениях \dot{M} , в то время как для НЗ фотонный индекс Γ демонстрирует стабильность на уровне $\Gamma = 2$ независимо от спектрального состояния в режиме суб-Эддингтоновской светимости и снижается до уровня $\Gamma = 1.3$ при достижении системой критического режима аккреции.

2. Внедрен новый метод определения массы ЧД путем масштабирования (скалирования) спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения как Галактических, так и внегалактических ЧД во время переходов между спектральными состояниями. Этот метод дал принципиально новую возможность определения массы аккрецирующих ЧД с использованием исключительно рентгеновских наблюдений.

3. На основе новых критериев диагностики идентифицирована природа ряда аккрецирующих рентгеновских источников в двойных системах со спорным типом компактного объекта.

4. Получены ограничения на массу черных дыр в ряде ультраярких источников методом масштабирования (скалирования) их спектральных рентгеновских характеристик во время переходов между спектральными состояниями, указывающие на наличие черных дыр “промежуточной массы” в таких источниках.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях:

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.**, V. 585, P. 94 (2016)
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.**, V. 821, P. 23 (2016)
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.**, V. 808, P. 142 (2015)
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.**,

- V. 789, P. 98 (2014)
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.**, V. 789, P. 57 (2014)
 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.**, V. 767, P. 160 (2013)
 7. Seifina, E., Titarchuk, L., Frontera, F., *Stability of the Photon Indices in Z-source GX 340+0 for Spectral State*, **Astrophys. J.**, V. 766, P. 63 – 85 (2013)
 8. Seifina, E., Titarchuk, L., *GX 3+1: The Stability of Spectral Index as a Function of Mass Accretion Rate*, **Astrophys. J.**, V. 747, P. 99 – 114 (2012)
 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.**, V. 738, P. 128 – 148 (2011)
 10. Seifina, E., Titarchuk, L., *On the nature of the compact object in SS 433: observational evidence of X-ray index saturation*, **Astrophys. J.**, V. 722, P. 586 – 604 (2010)
 11. Titarchuk, L., Seifina, E., *Discovery of photon index saturation in the Black Hole binary GRS 1915+105*, **Astrophys. J.**, V. 706, P. 1463 – 1483 (2009)

Материалы конференций:

- Titarchuk L., Shaposhnikov N., Seifina E. *Discovery of photon index saturation in the black hole binaries // The Sun, the stars, the Universe and general relativity, International conference in honor of Ya.B. Zeldovich's 95th anniversary. AIP Conference Proceedings, 1205, 168 (2010)*
- Seifina E. *INTEGRAL Observations of X-Ray Transient GS 1843+009 During 2003 – 2005 Activity Events // Proceedings of international conference "The 6th INTEGRAL Workshop - The Obscured Universe, 2 – 8 July 2006, Space Research Institute (IKI), Moscow, Russian Federation (ESA SP-622, September 2007), Eds. S. Grebenev, R. Sunyaev, C. Winkler, p. 499 (2007)*
- Seifina E., Titarchuk L. *Spectral properties of the neutron star X-ray binary 4U 1705-44 based on BeppoSAX and RXTE data. Quasi-constancy of the spectral index as a function of accretion rate*, в сборнике международной конференции "Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today 21 – 25 сентября 2015 г., СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, с. 113. Online version at: [http:// www.astro.spbu.Sobolev100](http://www.astro.spbu.Sobolev100) (2015)

- Titarchuk L., Shaposhnikov N., Seifina E. *X-ray spectral index correlation vs. mass accretion rate in neutron star and black hole X-ray binaries in their different spectral states. Theory vs. observations*// в сб. международной конференции "Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today 21 – 25 сентября 2015 г., СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, с. 133. Online version at: <http://www.astro.spbu.Sobolev100> (2015)
- Seifina, E., Titarchuk L. *Comparative analysis of spectral parameters of BH versus NS sources*, Proc. 66th Fujihara Seminar: X-raying the Gamma-Ray Universe – CTA-X-ray LINK Meeting, 4 – 6 ноября, 2013, Хаконэ, Япония, Ed. К. Иока, Theory Center, Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization, Oho, Tsukuba, Japan, p. 71 – 75 (2013)
- Seifina, E., Titarchuk, L., Frontera, F. *The unique stability of the photon indices in "dipping" Z-source GX 340+0 throughout spectral states*, 40th COSPAR Scientific Assembly. Held 2-10 August 2014, in Moscow, Russia, E1.1-40-14, p. 2956 (2014)
- Seifina, E., Titarchuk, L. *The stability of spectral index as a function of mass accretion rate in the Neutron Star source GX 3+1*, 39th COSPAR Scientific Assembly. Held 14 – 22 July 2012, in Mysore, India. D2.4-7-12, p. 1745 (2012)
- Seifina, E.; Titarchuk, L., *The spectral signatures of BH versus NS sources*, "The Second Ferrara Workshop on "X-ray Astrophysics up to 511 keV held in Ferrara (Italy), September 14 – 16, 2011, article #47. Online version at: <http://www.fe.infn.it/astrofe2011> (2011)
- Titarchuk, L., Seifina, E., Shaposhnikov, N., Chekmtam, A. *On X-ray spectral and timing properties of black hole vs neutron star sources - theory and observations*, "The Second Ferrara Workshop on "X-ray Astrophysics up to 511 keV held in Ferrara (Italy), September 14 - 16, 2011, article #51. Online version at: <http://www.fe.infn.it/astrofe2011> (2011)
- Seifina, E., Titarchuk, L. *Iron lines and precession variability of the unique microquasar GRS 1915+105*, "The X-ray Universe 2008" Symposium held in Granada, Spain, 27 – 30 May, 2008. Online version at: http://xmm.esac.esa.int/-external/xmm_science/workshops/2008symposium, p. 59 (2008)

Список литературы

- [1] Remillard, R. A., McClintock, J. E., 2006, ARA&A, 44, 49

- [2] van Straaten, S., van der Klis, M., Kuulkers, E. & Mendez, M., 2001, ApJ, 551, 970
- [3] Shakura, N. I., Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
- [4] Черепашук А.М., 1996, УФН, 166, 809
- [5] Sunyaev, R., Revnivtsev, M., 2000, Astron. Astroph., 358, 617
- [6] Churazov, E., Gilfanov, M., Sunyaev, R., et al., 1997, Adv. Space Res. 19, 55
- [7] Titarchuk, L., Lapidus, I.I., Muslimov, A., 1998, ApJ, 499, 315
- [8] Sunyaev, R. A., Titarchuk, L. G., 1980, A&A, 86, 121
- [9] Kluzniak, W., 1993, A&AS, 97, 265
- [10] Titarchuk, L., Shaposhnikov, N., Laurent, P., 2009, ApJ, 700, 1831
- [11] Seifina, E., Titarchuk, L., 2012, ApJ, 747, 99
- [12] Titarchuk, L., Zannias, T., 1998, ApJ, 493, 863
- [13] Vignarca, F., Migliari, S., Belloni, 2003, A&A, 397, 729
- [14] Titarchuk, L.G., Fiorito, R., 2004, ApJ, 612, 988
- [15] Shaposhnikov, N., Titarchuk, L., 2009, ApJ, 699, 453
- [16] Titarchuk, L., Seifina, E., 2009, ApJ, 706, 1463
- [17] Seifina, E., Titarchuk, L., 2011, ApJ, 738, 128
- [18] Titarchuk, L., Seifina, E., Frontera, F., 2013, ApJ, 767, 160
- [19] Laurent, P. & Titarchuk, L., 1999, ApJ, 511, 289
- [20] Bachetti, M., Harrison, F. A., Walton, D. J. et al., 2014, Nature, 514, 202
- [21] Borozdin, K., Revnivtsev, M., Trudolyubov, S., Shrader, C., & Titarchuk, L. 1999, ApJ, 517, 367
- [22] Novikov, I. D., Thorne, K. S., 1973, blho.conf, 343
- [23] Liu, J. et al. 2013, Nature, 503, 500
- [24] Titarchuk, L., Mastichiadis, A., & Kylafis, N. D., 1997, ApJ, 487, 834
- [25] Mukai, K., Still, M., Corbet, R., Kuntz, K. & Barnard, R., 2005, ApJ, 634, 1085