

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический**  
**ИНСТИТУТ**



*имени*  
*П.Н. Лебедева*

Российской академии наук

**Ф И А Н**

119991, ГСП-1, Москва  
Ленинский проспект, 53 ФИАН  
Телефон: (499) 135 1429  
(499) 135 4264  
Телефакс: (499) 135 7880  
<http://www.lebedev.ru>  
[postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)

Дата

№

---

**УТВЕРЖДАЮ**

Зам. директора директора ФИАН  
д.ф.-м. н. Савинов С. Ю.

### **ОТЗЫВ**

ведущей организации

на диссертационную работу на соискание ученой степени «доктор физико-математических наук» по специальности «0.1.03.02 — астрофизика и звездная астрономия» **Елены Викторовны Сейфиной** на тему «Спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд в аккрецирующих рентгеновских двойных системах»

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

Диссертация состоит из Введения, 7 Глав, Заключение, Приложений, а также списка литературы.

**В первой Главе** изучаются характеристики рентгеновского излучения кандидата в черные дыры звездной массы GRS 1915+105, демонстрирующего переходы между низким (жестким) и высоким (мягким) состояниями. С помощью определенной спектральной модели находится фотонный индекс  $\Gamma$  и исследуется его зависимость от величины, характеризующей

нормировку спектральной модели, которая считается пропорциональной потоку массы в аккреционном диске. Обсуждается эффект насыщения фотонного индекса при больших значениях этой величины, который интерпретируется как проявление динамической комптонизации в сходящемся аккреционном потоке вблизи черной дыры. Также обсуждаются корреляции между значениями фотонного индекса и характерной частотой низкочастотных квазипериодических осцилляций (КПО).

**Во второй Главе** изучается энергетический спектр и спектр мощности амплитуды переменности источника 4U 1630-47, который также является кандидатом в черные дыры звездной массы. Оценивается его масса предложенным методом масштабирования спектральных и временных характеристик рентгеновского излучения в предположении о том, что различные аккрецирующие черные дыры обладают одной и той же формой зависимости спектрального индекса от величины нормировки спектра, которая считается пропорциональной потоку массы.

**В третьей Главе** изучаются внегалактические источники M101 ULX-1 и ESO 243-49 HLX-1, которые являются кандидатами в черные дыры промежуточной массы. С помощью предложенной методики масштабирования зависимости фотонного индекса от нормировки спектра и от характерной частоты КПО оценены их массы, которые оказались около  $(3-4) \cdot 10^4 M_{\odot}$  для M101 ULX-1 и около  $7 \cdot 10^4 M_{\odot}$  для ESO 243-49 HLX-1.

**Четвертая Глава** посвящена изучению характеристик рентгеновского излучения системы 4U 1728-34, содержащей аккрецирующую нейтронную звезду. Как и обсуждавшиеся в предыдущих Главах кандидаты в черные дыры, этот источник тоже демонстрирует переходы между спектральными состояниями с высокой и низкой светимостями. Однако, как показано в диссертации, в отличие от аккрецирующих черных дыр, фотонный индекс демонстрирует постоянное значение порядка 2 при переходах между этими состояниями.

**В пятой и шестой Главах** изучаются характеристики энергетических и мощностных спектров и поведение фотонного индекса для аккрецирующих нейтронных звезд, таких как GX 3+1, 4U 1820-30, GX 340+0 и Scorpius X-1. Спектры этих источников моделируются с помощью одной комптонизирующей компоненты для GX 3+1, 4U 1820-30 и двух комптонизирующих компонент, обладающих двумя электронными температурами и спектральными индексами для GX 340+0 и Scorpius X-1. Изучается поведение спектральных индексов при переходах между разными состояниями источников.

**Седьмая Глава** посвящена изучению аккрецирующих нейтронных звезд, в которых могут достигаться сверх-Эддингтоновские темпы аккреции, таких как 4U 1705-44 и источника 4U 1700-37, в котором может находиться либо нейтронная звезда, либо черная дыра. Спектральные индексы этих источников оказываются постоянными при электронных температурах комптонизирующих сред меньше или порядка десятков кэВ и понижаются при увеличении этой температуры до величин порядка сотни кэВ. Даются аргументы в пользу того, что источник 4U 1700-37 является аккрецирующей нейтронной звездой.

## Замечания к Диссертации:

### 1) Общие замечания.

В диссертации недостаточно критически используются результаты теоретических исследований. Именно, для своей интерпретации наблюдательных данных диссертант сравнивает их с теоретическими моделями, разработанными определенной группой авторов в основном до публикации статей, вошедших в диссертацию. Неоднократно в тексте статьи можно встретить утверждения о том, что те или иные предсказания этих теоретических моделей находят подтверждение в наблюдениях. В этой связи важно отметить, что эти модели представляются весьма слабо обоснованными, а некоторые утверждения в соответствующих статьях либо спорными, либо просто ошибочными. Например, в ряде этих статей (см., например, ApJ, 1998, 499, 315) азимутальная компонента уравнения Навье-Стокса, записанная для аккреционного диска и выражающая закон сохранения углового момента, используется для нахождения закона изменения с радиусом угловой скорости вещества диска?? Общеизвестно, что, так как "некеплеровость" вращения, как правило, связана с учетом сил давления в радиальном направлении, необходимо, по крайней мере учесть радиальную компоненту уравнения Навье-Стокса, например ApJ, 1988, 332, 646. Более того, как внутреннее граничное условие для используемого уравнения в случае черной дыры используется не обычное предположение о равенстве нулю компоненты тензора вязких натяжений на радиусе последней стабильной орбиты, а совершенно необоснованное утверждение о том, что на этом (или большем) радиусе равна нулю угловая скорость?? Отмечу, что и "параметр"  $\gamma$  (уравнение (4) статьи) отнюдь не обратно пропорционален альфа параметру Шакуры и Сюняева в случае "стандартных" околокеплеровских дисков, как утверждается в некоторых статьях этой группы авторов, например ApJ, 1999, 518, L95. Более того, вообще говоря, величина  $\gamma$  является функцией радиуса, а не постоянным параметром. В самом деле, интегрируя уравнение (2) статьи ApJ, 1998, 499, 315, находим

$$\gamma = -R^3 \frac{d\omega}{dR} / (\omega R^2 - C),$$

где константа  $C$  пропорциональна потоку углового момента по диску. Из этого выражения видно, что уже для околокеплеровского закона

$$\omega \propto R^{-3/2},$$

$\gamma$  является постоянной, равной  $3/2$  только для нереалистического вырожденного случая  $C=0$ . Более того, для "стандартного" тонкого диска вокруг черной дыры с обычным граничным условием равенства нулю соответствующей компоненты тензора вязких натяжений на последней устойчивой орбите, при приближении к этой орбите  $\gamma$  стремится к бесконечности! Разумеется  $\gamma$  не равно константе и в хоть сколько-нибудь реалистических моделях толстых дисков, где зависимость  $\omega$  от  $R$  носит достаточно сложный характер, определяемый численным решением соответствующей системы уравнений, см. например ApJ, 1988, 332, 646. Теория возмущений дисков, развитая этой же группой авторов так же не выдерживает

критики. Например, в ApJ, 1998, 499, 315 полностью пренебрегается гидродинамическими эффектами в уравнении (13), а влияние вращения на частоту возмущений учитывается в рамках теории возмущений по частоте вращения, справедливой для слабовращающихся объектов, см., например (A9)?? Корректная теория возмущений аккреционных дисков и других дифференциально вращающихся объектов была разработана в множестве работ, см., например PASJ, 1990, 42, 99 и ссылки на эту работу. В частности, в этой работе было показано, что даже без учета силы давления, вращательное расщепление мод, описывающих вертикальные колебания дисков, порядка частоты этих мод и теория возмущений по частоте вращения абсолютно неприменима, см. ф-лу (2.2) в цитируемой работе. Для правильной постановки задачи о квазипериодических возмущениях аккреционных дисков необходимо опираться на эти исследования! В работе той же группы авторов ApJ, 2007, 660, 556 рассматривается "диффузионная" теория возникновения спектра переменности аккреционных дисков с помощью анализа решений линеаризованного уравнения "диффузии" поверхностной плотности, в которое добавлен источник с заданными спектральными характеристиками. Во-первых, характер полученного спектра переменности определяется спектром источника, для которого отсутствует физическое обоснование. Во-вторых, даже в случае возмущений диска, не зависящих от азимутальной переменной, необходим учет сил давления, который полностью отсутствует в подходе авторов, см., например, MNRAS, 1995, 272, 618 и MNRAS, 2002, 332, 575. Более того, моды возмущений с нетривиальной зависимостью от азимутального угла вообще не могут быть описаны в терминах исследуемого уравнения.

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

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

## 2) Замечания по ходу текста

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

что и в последующих главах возникает тот же самый вопрос, так как до конца не ясно, как используемые нормировки связаны с наблюдаемыми величинами.

Глава 2. а) Для моделирования источника, обсуждаемого в этой Главе, используется другая спектральная модель, чем в Главе 1. Возникает вопрос, до какой степени параметры, интересующие автора, такие как фотонный индекс, зависят от выбора спектральной модели? Отметим, что этот вопрос носит общий характер, так как в последующих Главах опять используются разные спектральные модели. б) На стр. (68) читаем о переходе к ``субкеплеровскому движению вещества в переходном слое". Как мы отмечали выше, само понятие ``переходного слоя" для аккреционных дисков вокруг черных дыр не является общепринятым, оно является слабо обоснованными, см. общее замечание выше. в) в формуле (2.1) слева аргументом функции является  $x$  а справа, вероятно,  $N$ ?

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

Глава 4. а) Тоже замечание, что и замечание б) к Главе 1.

Глава 5. а) Тоже замечание, что и замечание б) к Главе 1.

Глава 6. а) Тоже замечание, что и замечание б) к Главе 1. б) Для моделирования источника GX 340+0 предполагается, что мягкие фотоны комптонизируются в переходном слое, имеющем некоторую электронную температуру. Для спектрального же моделирования этого источника используются две? электронные температуры, см. таблицу 6.3. Необходимо пояснить, почему возникают две температуры горячих электронов. в) Переходной слой предполагается геометрически толстым. В этом случае, протонные температуры могут быть порядка 100МэВ, см. например ApJ, 2004, 613, 506. Почему электронные температуры, как следует из таблицы 6.3, настолько меньше протонных? г) на странице 226 читаем ``релятивистских фотонов"? Что вызывает изменение с энергией и температурой сечения в (6.14)?

Глава 7. а) Тоже замечание, что замечание б) к Главе 6, см. например таблицу 7.3. б) На стр. 258 не ясна фраза ``В результате этого, сечение рассеяния значительно снижается...".

Несмотря на указанные замечания, проделана большая работа по изучению и описанию наблюдательных данных, а основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих международных журналах.

Диссертационная работа Елены Викторовны Сейфиной удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям. Ее содержание полностью соответствует специальности 01.03.02 <<Астрофизика, звездная астрономия>>. Текст Автореферата полностью отражает содержание Диссертации. Из этого следует, что ее автор Е. В. Сейфина вполне заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв на диссертационную работу Е. В. Сейфиной обсужден и одобрен на заседании семинара теоретического отдела АКЦ ФИАН 8 сентября 2016 г.

Отзыв составили:

руководитель  
Астрокосмического центра  
Физического Института  
им. П.Н. Лебедева  
Российской Академии Наук  
(АКЦ ФИАН),  
академик РАН  
Н. С. Кардашев

главный научный сотрудник  
Астрокосмического центра  
Физического Института  
им. П.Н. Лебедева  
Российской Академии Наук  
(АКЦ ФИАН),  
д. ф.-м. н.  
П. Б. Иванов