

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. М.В. Ломоносова
Государственный Астрономический Институт
им. П.К. Штернберга

На правах рукописи

Сулейманов Валерий Фиалович

**Моделирование излучения
компактных рентгеновских источников**

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва - 2008

Работа выполнена в Казанском государственном университете.

Научный консультант:

доктор физ.-мат. наук

Николай Иванович ШАКУРА
(ГАИШ МГУ)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук
профессор

Юрий Николаевич ГНЕДИН
(ГАО РАН, Пулково)

доктор физ.-мат. наук
профессор

Константин Александрович ПОСТНОВ
(физический факультет МГУ)

доктор физ.-мат. наук
профессор

Сергей Николаевич ФАБРИКА
(САО РАН)

Ведущая организация:

Институт Астрономии РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится 15 мая 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.86 при Государственном Астрономическом институте им. Штернберга по адресу: 119991 Москва, пр. Университетский 13, ГАИШ МГУ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ.

Автореферат разослан " " 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 501.001.86
кандидат физ.-мат. наук

С.О. АЛЕКСЕЕВ

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Прошло уже около 40 лет как было осознано, что падение вещества на компактный релятивистский объект (нейтронную звезду или черную дыру) приводит к выделению большого количества энергии. Запущенный в 1970 г. спутник *Uhuru* с рентгеновским детектором на борту открыл несколько сотен рентгеновских источников, часть из которых оказалась двойными, т.е. содержали кроме источника рентгеновского излучения еще и нормальную звезду. Так было окончательно установлено, что в процессе эволюции тесных двойных систем существуют фазы, во время которых более массивная звезда уже превратилась в компактный релятивистский объект, а вторая, менее массивная звезда, начала интенсивно терять массу либо в виде ветра, либо переполнив свою полость Роша. Часть теряемой массы перетекает (аккрецирует) на компактный объект.

Из-за орбитального движения аккрецируемое вещество обладает значительным угловым моментом и формирует вокруг компактного объекта геометрически тонкий аккреционный диск, вещество в котором вращается со скоростью, близкой к кеплеровской, и по туго закрученной спирали дрейфует к центру благодаря турбулентной вязкости. Теория таких аккреционных дисков была построена в работах Шакуры (1972) и Шакуры и Сюняева (1973, 1976). Поправки к теории за счет эффектов общей теории относительности впервые были рассмотрены в работе Новикова и Торна (1973).

Примерно в это же время "открылись глаза" на давно известный класс переменных звезд - катаклизмические, или взрывные переменные звезды. Было осознано, что это те же тесные двойные системы с перетеканием вещества, только компактным объектом является белый карлик. Поэтому максимум излучения катаклизмических переменных высокой светимости с оптически толстыми аккреционными дисками приходится на ультрафиолетовый диапазон спектра.

В настоящее время качественно и количественно (в смысле общей энергетике) процессы, происходящие при аккреции вещества в тесных двойных системах достаточно хорошо поняты. Наступил следующий этап исследований этих объектов, в течение которого научному

сообществу предстоит научиться детально моделировать спектры излучения тесных двойных систем и определять по наблюдаемым спектрам их фундаментальные параметры, подобно тому, как это делается для обычных звезд. Развитие техники рентгеновских наблюдений позволяет надеяться на получение в недалеком будущем рентгеновских спектров с хорошим разрешением и отношением сигнал/шум. Уже сейчас рентгеновский телескоп, установленный на орбитальной обсерватории *Chandra* способен получать спектры с разрешением $\Delta E/E \sim 1000$.

Вполне естественно, что для моделирования спектров излучения аккреционных потоков, по крайней мере, оптически толстых, необходимо использовать методы, применяемые при расчетах моделей атмосфер и спектров излучения обычных звезд (см. например Михалас 1982), модифицировав их применительно к рассматриваемым объектам.

Кратко рассмотрим процессы, приводящие к выделению энергии при аккреции вещества на компактный объект. Прежде всего, необходимо отметить, что существует два принципиально различных физических процесса, приводящих к выделению энергии в тесных двойных системах с аккрецией.

1) *Излучение при выделении гравитационной потенциальной энергии выпадающего вещества.* В простейшем случае радиального падения гравитационная потенциальная энергия падающего вещества переходит в кинетическую, так что вещество перед падением на поверхность компактного объекта разгоняется вплоть до второй космической скорости. После удара о поверхность практически вся его кинетическая энергия переходит в тепло (внутреннюю энергию) и излучается.

В реальных двойных системах радиальное падение вещества осуществляется лишь при наличии сильного магнитного поля у компактного объекта, которое разрушает диск на радиусе Альвена (где сравнивается магнитное давление и динамическое давление вещества в диске). После этого радиуса вещество движется по магнитным силовым линиям и практически радиально выпадает на поверхность вблизи магнитных полюсов. Вблизи поверхности после фронта ударной волны формируется аккреционная колонка, в которой нагретое вещество, охлаждаясь, оседает на поверхность компактного объекта в дозвуковом

режиме. Температура в этой колонке близка к вириальной лишь в случае магнитных белых карликов (поляры и промежуточные поляры), так как плазма в этом случае остается оптически тонкой.

В случае слабого магнитного поля компактного объекта аккреционный диск простирается вплоть до его поверхности, и энергия в диске выделяется и высвечивается постепенно, на всех радиусах аккреционного диска. Максимум энерговыделения находится вблизи внутренней границы диска. Эффективность энерговыделения в диске ε довольно высока, $\varepsilon \sim 0.1$ для аккреционных дисков вокруг нейтронных звезд и черных дыр, и $\varepsilon \sim 10^{-4}$ для аккреционных дисков вокруг белых карликов.

При аккреции на нейтронную звезду или белый карлик со слабым магнитным полем аккреционный диск простирается вплоть до поверхности компактного объекта, его вещество движется вблизи поверхности с кеплеровской скоростью и должно потерять избыточную кинетическую энергию, прежде чем выпасть на компактный объект. Эта кинетическая энергия переходит в тепло и излучается благодаря трению вещества диска о компактный объект. При этом выделяется практически столько же энергии (эта величина зависит также от скорости вращения компактного объекта), как и в аккреционном диске. Такой переходный слой между аккреционным диском и компактной звездой носит название пограничного слоя. Такие пограничные слои, по всей видимости, дают значительный вклад в рентгеновское излучение маломассивных рентгеновских источников высокой светимости и в мягкое рентгеновское излучение некоторых катаклизмических переменных в высоком (ярком) состоянии (например, SS Лебедя).

Следовательно, гравитационная потенциальная энергия аккрецируемого вещества может выделяться в трех различных структурах - аккреционном диске, пограничном слое и аккреционной колонке.

2) *Термоядерное горение вещества на поверхности компактного объекта.*

В результате аккреции на поверхности компактного объекта скапливается вещество, образуя оболочку, богатую водородом. По мере накопления вещества в оболочке возникают условия (поверхностная плотность оболочки должна быть $\sim 10^8 - 10^9$ г/см²) для его

термоядерного горения, что может привести к термоядерному взрыву скопившегося вещества. При достаточно высоком темпе аккреции такое горение может быть квазистационарным, как в слоевом источнике проэволюционировавших звезд.

Сравним эффективность энерговыделения при аккреции и при термоядерном горении, равную $\varepsilon \sim 0.007$ при горении водорода, и $\varepsilon \sim 0.001 - 0.002$ при горении гелия. Оказывается, что эффективность энерговыделения при дисковой аккреции на нейтронную звезду почти на 2 порядка выше, чем при термоядерном горении выпавшего вещества. В то же время, эффективность аккреции на белый карлик в 10-30 раз меньше, чем при термоядерном горении. Отсюда следует вывод, что при высоком темпе аккреции, достаточном для стационарного термоядерного горения ($\dot{M} > 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ для белых карликов) энерговыделение за счет термоядерных реакций будет пренебрежимо мало для нейтронных звезд, и будет определять энергетику тесной двойной системы в случае белых карликов. Такие тесные двойные системы с белыми карликами, на поверхности которых происходит квазистационарное термоядерное горение водорода, возможно, наблюдаются как сверхмягкие рентгеновские источники.

При меньших темпах аккреции горение будет взрывным, квазипериодически повторяющимся по мере накопления критической массы. Такие термоядерные взрывы фиксируются в тесных двойных системах с нейтронными звездами и относительно низким темпом аккреции ($\dot{M} \sim 10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$) как рентгеновские вспышки длительностью около 10 секунд, при которых рентгеновский поток возрастает примерно в 10 раз. Такие источники носят название вспыхивающих рентгеновских источников или барстеров. Термоядерные взрывы на поверхности белых карликов хорошо известны как вспышки новых и повторных новых звезд. При этом их яркость увеличивается в тысячи раз.

Интересно отметить, что вспышки в системах с компактными объектами могут возникать и вследствие изменения темпа аккреции на него из-за ионизационной неустойчивости внешних областей аккреционного диска, где водород ионизован лишь частично. При этом наблюдается прямо противоположная картина (по сравнению с термоядерными вспышками) для систем с нейтронными

звездами или черными дырами, и с белыми карликами. Вспышки в катаклизмических переменных не очень значительны (яркость увеличивается в несколько десятков раз) и такие системы носят название карликовых новых звезд, в то время как для рентгеновских двойных светимость в подобной вспышке увеличивается в тысячи раз, и такие явления носят название рентгеновских новых звезд (мягкие рентгеновские транзиенты).

Теоретическое моделирование спектров излучения и кривых блеска качественно описанных выше объектов должно помочь в решении ряда важных задач. Прежде всего, это подтверждение правильности наших представлений о происходящих процессах. Тогда из сравнения рассчитанных и наблюдаемых спектров оказывается возможным определить параметры компактных объектов.

Наиболее актуальной в настоящее время представляется проблема определения масс и радиусов нейтронных звезд. Плотность вещества в их центральных областях превышает ядерную. Свойства вещества при таких условиях, выражаемые через связь между давлением и плотностью (уравнение состояния) невозможно установить экспериментально. В настоящее время существует целый спектр теоретических уравнений состояния вещества в недрах нейтронных звезд, от самых простых до экзотических, рассматривающих возможное образование в таких условиях тяжелых частиц - гиперонов. Не исключен переход вещества в кварковое состояние, когда кварки перестают быть связанными в адронах и становятся свободными (странные или кварковые звезды). Каждое из таких теоретических уравнений состояния предсказывает свою зависимость масса-радиус для нейтронных звезд. Поэтому одновременное определение массы и радиуса какой-либо нейтронной звезды позволит если и не определить точно, то хотя бы ограничить выбор между возможными уравнениями состояния. Все нейтронные звезды - радиопульсары в двойных системах, для которых возможно точное измерение масс, имеют массы, достаточно близкие к $1.4 M_{\odot}$. Это дает основание надеяться, что большинство нейтронных звезд имеют массы, близкие к этой. Поэтому даже ограничение отношения M/R для нейтронных звезд дает значимую информацию об их радиусах. Одним из возможных способов получить отношение M/R является изучение спектров пограничных

слоев в модели слоя растекания на поверхности нейтронной звезды. Результаты такого исследования представлены в диссертации.

Внутреннее строение белых карликов хорошо известно, но определение их параметров имеет большое значение для понимания конечных стадий эволюции звезд. Все белые карлики образовались, в конечном счете, из звезд главной последовательности. Поэтому важно знать распределение белых карликов по массам для того, чтобы понять, чем отличаются белые карлики в тесных двойных системах от одиночных белых карликов, и чем отличаются белые карлики с сильным магнитным полем от белых карликов без магнитного поля. В конечном итоге это позволит сделать выводы об их происхождении и уточнить теорию звездной эволюции.

Для сверхмягких рентгеновских источников определение масс и радиусов горячих белых карликов важно вдвойне. Во-первых, это позволит проверить правильность модели таких источников и определить их эволюционный статус. В частности, важен вопрос о том, являются ли белые карлики в сверхмягких источниках молодыми и горячими (с высокой внутренней температурой) объектами, или термоядерное горение происходит на поверхности остывших белых карликов. Во-вторых, сверхмягкие рентгеновские источники являются кандидатами в предшественники сверхновых типа SN Ia. Поэтому важно знать распределение по массам белых карликов в этих источниках для оценки того, какая их часть может накопить достаточное количество массы, чтобы превысить предел Чандрасекара.

Инструменты рентгеновских обсерваторий, работающих в мягком диапазоне спектра 40 – 100 Å, в частности *Chandra*, калибруются в том числе и по излучению одиночных горячих водородных белых карликов. В последние годы появились указания на то, что спектр таких белых карликов может быть искажен под влиянием эффекта Комптона при рассеянии на свободных электронах. Поэтому важно путем точных расчетов проверить это предположение, чтобы подтвердить или подвергнуть сомнению точность калибровки инструментов рентгеновских обсерваторий в мягком рентгеновском диапазоне.

Хотя определение параметров черных дыр также важно, при моделировании излучения аккреционных дисков на первый

план выходит проверка правильности и уточнение наших представлений о физике дисковой аккреции. Здесь можно выделить два аспекта. Стандартная теория дисковой аккреции является параметрической, тензор вязких напряжений в веществе диска считается пропорциональным давлению в диске (полному или газовому, в зависимости от вариантов), $W_{r\varphi} = \alpha P$. Поэтому определение из наблюдений параметра α крайне необходимо, поскольку позволит проверить теории, выводящие вязкость в диске "из первых принципов", в частности механизм магнито-ротационной неустойчивости (Балбус и Хоули 1991). Кроме того, наблюдениями установлено, что толщина внешних частей аккреционных дисков в ряде систем в несколько раз больше, чем это следует из стандартной теории. Поэтому необходимо найти дополнительные доказательства этому факту и попытаться исследовать возможные причины такого утолщения дисков.

Цель работы

Основной целью работы была разработка методов моделирования спектров излучения оптически толстых аккреционных течений на компактные релятивистские объекты на основе методов и программных комплексов, применяемых при моделировании атмосфер звезд. С помощью разработанных методов вычислялись теоретические спектры излучения аккреционных потоков на компактные объекты и сравнивались с наблюдаемыми спектрами этих объектов. Это позволило определить ряд основных параметров компактных объектов, таких как масса, размеры, и т.д. Использование разработанных методов позволило исследовать новые физические процессы и явления, происходящие в аккреционных течениях (в частности, эффективное утолщение внешних частей аккреционных дисков за счет внешнего облучения).

Научная новизна работы.

1. Определены эффективные температуры 10 сверхмягких рентгеновских источников по бланкетированным моделям атмосфер горячих белых карликов.

2. Определены массы и радиусы 7 горячих белых карликов в сверхмягких рентгеновских источниках с использованием диаграммы "температура - светимость".
3. Определены параметры атмосфер (T_{eff} и $\log g$) трех сверхмягких источников, открытых обсерваторией *Chandra* в галактике M81.
4. Разработан метод расчета спектров слоев растекания на поверхности нейтронных звезд с учетом эффектов ОТО и рассчитана сетка спектров слоев растекания для различных масс и радиусов нейтронных звезд.
5. Определена полоса допустимых значений масс и радиусов нейтронных звезд из сравнения теоретических спектров слоев растекания и наблюдаемых рентгеновских спектров пограничных слоев в маломассивных двойных рентгеновских источниках высокой светимости.
6. Показано, что локальные модели атмосфер оптически толстых аккреционных α -дисков мало отличаются от атмосфер звезд с такими же T_{eff} и $\log g$ на поверхности.
7. Показано, что рентгеновские спектры эффективно оптически тонких внутренних областей аккреционных дисков высокой светимости вокруг сверхмассивных черных дыр способны описать наблюдаемые рентгеновские спектры активных ядер галактик и квазаров.
8. Разработан метод расчетов абсорбционных спектров самооблучаемых аккреционных дисков в рентгеновских новых звездах. Показано, что абсорбционные компоненты бальмеровских линий водорода должны наблюдаться при низкой относительной светимости диска.
9. Разработан метод расчета оптических и рентгеновских кривых блеска рентгеновских новых звезд на основе теории нестационарной дисковой аккреции Липуновой и Шакуры (2000, 2002) с учетом самооблучения и эффектов ОТО.
10. Из сравнения наблюдаемых кривых блеска рентгеновских новых Единорога 1975 г. и Мухи 1991 г. с теоретическими получены

оценки значения параметра Керра a для черных дыр ($\sim 0.3 - 0.8$ и ≤ 0.2 соответственно) и величины параметра α для аккреционных дисков ($0.6 - 0.9$ и $0.4 - 0.5$) в этих системах.

11. Показано, что многократное переизлучение мягкого рентгеновского излучения между оптически толстыми облаками над аккреционным диском в сверхмягких рентгеновских источниках способно в несколько раз увеличить эффективность его переработки в оптическое излучение.
12. Определены массы 14 белых карликов в промежуточных полярах с использованием спектров в жестком рентгеновском диапазоне, полученных обсерваториями *RXTE*/HEXTE и *INTEGRAL*.

Достоверность полученных результатов.

Разработанные программные комплексы для моделирования атмосфер горячих звезд тестировались путем сравнения с результатами расчетов других авторов, в частности, с моделями Куруца и для белых карликов - с моделями Т. Рауха (Университет г. Тюбингена, Германия).

Методика расчетов моделей атмосфер с учетом эффекта Комптона тестировалась путем сравнения с результатами расчетов атмосфер вспыхивающих нейтронных звезд - барстеров, выполненных Ю. Мадеем (Коперниковский центр, Варшава, Польша). Влияние эффекта Комптона на спектры водородных белых карликов рассчитывалось независимо с помощью программных комплексов автора и Мадея.

Результаты аппроксимации спектров сверхмягких источников сравнивались с результатами других авторов. Полученные массы белых карликов для промежуточных поляров сравнивались с массами, полученными другими авторами тем же методом, но только по относительно мягкой части рентгеновского спектра (3-20 кэВ).

Метод расчета кривых блеска рентгеновских новых тестировался на методе расчетов без учета эффектов ОТО и самооблучения, разработанной Липуновой и Шакурой (2002).

Во всех случаях, когда это было возможно, результаты расчетов сравнивались с доступными аналитическими моделями.

Научная, практическая и методическая ценность работы

В диссертации рассчитаны спектры излучения слоев растекания на поверхности нейтронных звезд и получено ограничение на отношение M/R для нейтронных звезд из сравнения теоретических спектров с наблюдаемыми рентгеновскими спектрами пограничных слоев в маломассивных рентгеновских двойных высокой светимости. Полученное ограничение позволяет сделать вывод, что уравнение состояния вещества в недрах нейтронных звезд является жестким, а это свидетельствует против существования странных (кварковых) звезд. Этот вывод имеет большое научное значение для физики сверхплотного состояния материи.

Получены оценки масс белых карликов в ряде тесных двойных систем (промежуточные поляры и сверхмягкие рентгеновские источники). Эти данные позволяют в дальнейшем уточнить теорию поздних стадий эволюции звезд и уже используются рядом исследователей. Научное значение имеет также оценка размеров белых карликов в сверхмягких рентгеновских источниках, что позволит уточнить их эволюционный статус. Методическое значение имеет впервые примененный для сверхмягких источников метод оценки масс белых карликов по их положению на диаграмме "температура – светимость". Предложенная формула для связи максимально возможной температуры белого карлика в сверхмягком рентгеновском источнике с его массой имеет практическое значение, т.к. позволяет получить ограничение снизу на массу белого карлика только из значения эффективной температуры. Последняя величина определяется относительно легко.

Из анализа спектров систем с аккреционными дисками подтверждено, что внешние части аккреционных дисков являются эффективно толще и эффективнее перерабатывают мягкое рентгеновское излучение в оптическое, чем это следует из стандартной теории. В качестве возможного объяснения предложена модель облаков над диском, погруженных в горячую межоблачную среду.

В работе показано, что эффектом Комптона можно пренебречь при расчетах спектров излучения водородных белых карликов. Этот вывод имеет важное практическое значение, т.к. по спектрам таких белых карликов проводится абсолютная калибровка инструментов

рентгеновских обсерваторий в мягком рентгеновском диапазоне спектра.

Созданы комплексы компьютерных программ для расчета моделей атмосфер горячих компактных звезд и аккреционных дисков, которые могут быть использованы при анализе спектров излучения таких объектов. Часть из них используется в настоящее время в КГУ, ГАИШ МГУ и САО РАН.

Полученные в работе результаты могут найти применение во всех астрономических учреждениях, где изучаются аккрецирующие компактные объекты, в частности, в КГУ, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, АКЦ ФИАН, ФТИ РАН (г. Санкт-Петербург), САО РАН, ГАО РАН, в Одесском университете, и других зарубежных институтах и обсерваториях.

Результаты, полученные при подготовке диссертации, частично использованы для создания и модернизации лекционных курсов и практических занятий, проводимых диссертантом на кафедре астрономии КГУ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод расчета спектров слоев растекания на поверхности нейтронных звезд и ограничения на размеры нейтронных звезд ($R = 15 \pm 1.5$ км при $M = 1.4M_{\odot}$ и солнечном химсоставе аккрецируемого вещества), полученные из сравнения теоретических спектров слоев растекания с наблюдаемыми спектрами пограничных слоев в маломассивных рентгеновских двойных высокой светимости.
2. Расчет моделей аккреционных α -дисков и спектров их излучения методами моделей звездных атмосфер с учетом реальной непрозрачности. Показано, что локальные (на данном радиусе) спектры оптически толстых аккреционных дисков практически не отличаются от спектров звезд с такими же T_{eff} и $\log g$ на поверхности, если внешнее облучение на данном радиусе диска незначительно.
3. Метод расчета кривых блеска рентгеновских новых звезд с учетом эффектов ОТО и самооблучения диска на основе теории

нестационарных аккреционных дисков. Применение метода к описанию рентгеновских и оптических кривых блеска Новой Единорога 1975 г. и Новой Мухи 1991 г. и оценка параметра α в их аккреционных дисках (0.6 - 0.9 и 0.4 - 0.5 соответственно). Показано, что черная дыра в системе Новой Единорога обладает значительным угловым моментом ($a \approx 0.3 - 0.8$).

4. Предложен новый механизм переработки мягкого рентгеновского излучения в оптическое за счет многократного рассеяния между оптически толстыми облаками газа над аккреционным диском. Этот механизм способен объяснить высокую оптическую светимость сверхмягких рентгеновских источников.
5. Определены массы и размеры горячих белых карликов в семи сверхмягких рентгеновских источниках, полученные из анализа рентгеновских наблюдений (обсерватория ROSAT). Определены массы белых карликов в 14 промежуточных полярах из сравнения жестких рентгеновских спектров, наблюдаемых обсерваториями RXTE и ИНТЕГРАЛ, с рассчитанными теоретическими спектрами аккреционных колонок.
6. Показано, что учет некогерентности электронного рассеяния не влияет на выходящие спектры излучения водородных (DA) белых карликов в мягком рентгеновском диапазоне. Рассчитанные спектры моделей атмосфер DA белых карликов могут использоваться для калибровки инструментов рентгеновских обсерваторий.

Апробация работы

Полученные в диссертации результаты представлялись на международных научных конференциях "Современные проблемы звездной эволюции" (Москва, 1998), "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра" (Москва, 2001, 2003, 2005), "Вселенная ИНТЕГРАЛа" (Мюнхен, Германия, 2004), "Жизнь нейтронных звезд" (Санкт-Петербург, 2005), "Изолированные нейтронные звезды" (Лондон, 2006), Собрании Европейского астрономического общества JENAM-2000 (Москва, 2000), Всероссийских астрономических

конференциях (Санкт-Петербург, 2001; Москва 2004), международных рабочих семинарах "Нейтронные звезды и пульсары" (Бад-Хоннеф, Германия, 2006), "Лебедь X-2+/-1" (Киттила, Финляндия, 2005), и "Проблемы современной Астрофизики" (Оулу, Финляндия, 2006); на совещаниях рабочей группы "Звездные атмосферы" при Астросовете РАН (САО РАН, 1992; Киев, 1994), на совещании "Спектроскопические методы в современной астрофизике" (Москва, 2006), на ежегодных Итоговых конференциях КГУ (1990 - 2005), на семинарах Института астрофизики Общества Макса Планка (Гархинг, Германия, 1997), Института астрономии и астрофизики Мюнхенского университета (1997), центра космических полетов им. Маршалла НАСА (Хантсвилл, США, 1999, 2000), университета Оулу (Финляндия, 2003, 2004), кафедры астрономии КГУ (1990 - 2004).

Личный вклад автора

Во всех публикациях, выполненных в соавторстве, диссертанту принадлежат теоретические расчеты использованных моделей, участие в интерпретации результатов и написании текста. В тех публикациях, где диссертант является первым автором, ему также принадлежит постановка задачи и написание основного текста работы.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, и списка цитированной литературы. Объем диссертации 385 страниц, в том числе 129 рисунков и 25 таблиц. В списке литературы содержится 379 наименований. В начале каждой главы описана методика расчетов, применявшихся для получения результатов данной главы, или отличия от методик, описанных ранее.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлены результаты анализа архивных наблюдений 11 известных сверхмягких рентгеновских источников, выполненных спутником ROSAT и нескольких новых кандидатов в сверхмягкие источники, открытые обсерваторией *Chandra*.

Для известных источников, используя данные обсерватории ROSAT, получены параметры атмосфер T_{eff} и $\log g$ путем

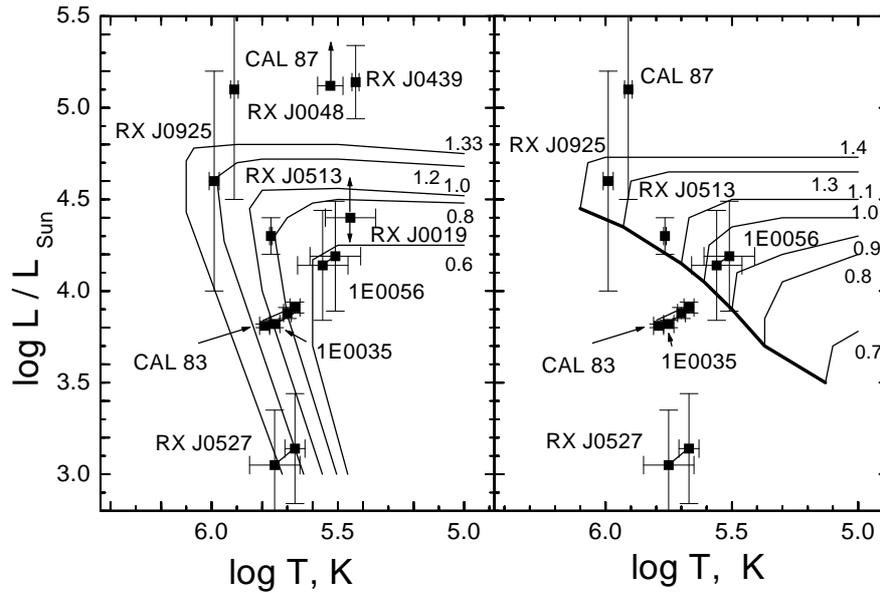


Рис. 1: Положение исследованных сверхмягких рентгеновских источников на диаграмме температура-светимость. Показаны теоретические кривые для белых карликов разных масс в двух случаях: а) - для новых звезд на фазе уменьшения блеска, и б) - для остывающих оголившихся ядер звезд.

аппроксимации их спектров рассчитанными теоретическими спектрами бланкетированных ЛТР моделей атмосфер горячих белых карликов. Значения полученных параметров согласуются с опубликованными ранее. Исследовано соответствие полученных параметров модели термоядерного горения водорода на поверхности белых карликов (ван ден Хойвел и др. 1992). Показано, что значения T_{eff} и $\log g$, полученные для 3 наиболее горячих источников, согласуются с полосой стабильного горения в данной модели. Параметры остальных источников согласуются с этой полосой при наименьших возможных значениях $\log g$ (7.5-8.0).

Для 10 источников получены оценки размеров и светимостей. Размеры и светимости 7 сверхмягких источников хорошо согласуются с моделью термоядерного горения на поверхности белого карлика, что позволяет сделать оценку масс этих источников по их размерам и положению на диаграмме Г-Р (см. Рис. 1).

Рассмотрена зависимость T_{eff} от массы белого карлика в сверхмягких источниках и предложена формула для оценки его массы в классическом двойном сверхмягком источнике по его температуре.

По наблюдениям с космической рентгеновской обсерватории *Chandra* обнаружено 9 кандидатов в сверхмягкие рентгеновские источники в галактике M81. Спектры трех самых ярких из них аппроксимированы спектрами черного тела и спектрам моделей атмосфер горячих белых карликов. Показано, что ярчайший из обнаруженных источников не может быть белым карликом с термоядерным горением вещества на поверхности, и, скорее всего, принадлежит к популяции ультраярких рентгеновских источников. Спектры двух остальных источников хорошо аппроксимируются спектрами моделей атмосфер горячих белых карликов. Для этих источников получены значения параметров атмосфер. Сделан вывод, что наблюдаемые спектры и светимости этих источников не противоречат модели белого карлика с термоядерным горением на поверхности. Аргументируется, что светимость источников близка к эддингтоновской и получены оценки масс белых карликов в них.

Во **второй главе** представлены результаты расчетов горячих моделей атмосфер одиночных нейтронных звезд различного химического состава и водородных белых карликов с учетом эффекта Комптона. Было исследовано влияние комптоновского рассеяния на спектры выходящего излучения этих моделей и получены следующие результаты.

Спектры водородных и гелиевых моделей атмосфер нейтронных звезд с $T_{\text{eff}} \geq 1 \cdot 10^6$ К изменяются за счет эффекта Комптона на высоких энергиях ($E > 5$ кэВ), и спектры наиболее горячих из них с $T_{\text{eff}} \geq 3 \cdot 10^6$ К могут быть описаны дилутированными спектрами черного тела с факторами ужесточения $\sim 1.6 - 1.9$ (см. Рис. 2). В то же время распределение энергии в их спектрах вблизи максимума энерговыделения (на энергиях 1-3 кэВ) изменяется незначительно, так же как и цветовая температура, определяемая по общему спектру.

Влияние эффекта Комптона более значительно на водородные модели атмосфер и на модели с меньшим значением $\log g$. Спектры моделей атмосфер нейтронных звезд с солнечным химическим составом изменяются при учете эффекта Комптона незначительно.

Различия в спектрах моделей атмосфер водородных белых карликов, рассчитанных с учетом и без учета комптоновского рассеяния, малы в наблюдаемой рентгеновской области спектра, и ими можно пренебречь

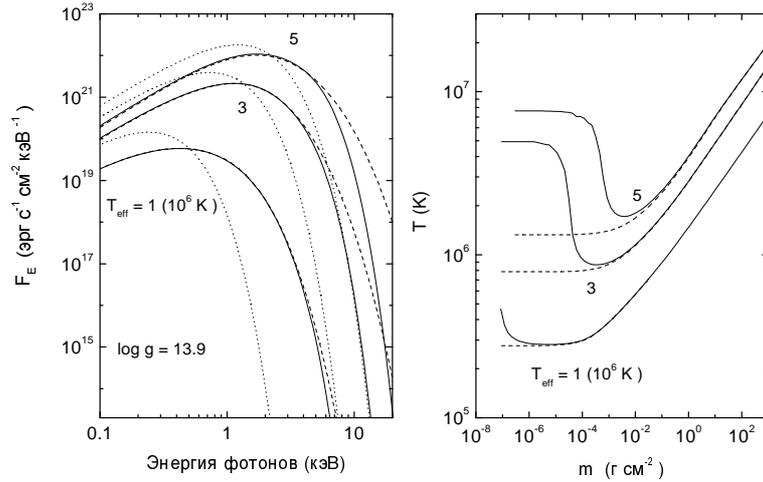


Рис. 2: Выходящие спектры излучения водородных моделей атмосфер нейтронных звезд с $\log g=13.9$ (левая панель) и температурные структуры соответствующих моделей (правая панель). Сплошные кривые - с учетом эффекта Комптона, штриховые кривые - без учета эффекта Комптона, пунктирные кривые на левой панели - спектры абсолютно черного тела.

при калибровке инструментов рентгеновских обсерваторий.

Третья глава посвящена моделированию спектров пограничных слоев между нейтронной звездой и аккреционным диском в модели слоя растекания Иногамова и Сюняева (1999).

Из гидродинамических уравнений выведены уравнения, описывающие усредненную по толщине модель слоя растекания на поверхности сферической невращающейся нейтронной звезды. Полученные уравнения практически идентичны уравнениям, используемым в модели Иногамова и Сюняева (1999). Уравнения выведены в псевдо-ньютоневском потенциале, который учитывает основные поправки ОТО, и с учетом произвольного химического состава аккрецируемой плазмы.

Изучена структура слоя растекания по толщине в рамках различных предположений о вертикальном распределении интегрального потока излучения и скорости слоя. Модели слоя растекания по толщине построены методами, применяемыми при моделировании атмосфер звезд, а перенос излучения рассматривался с учетом эффекта Комптона при рассеянии излучения на электронах. Показано, что локальные (на

данной широте) спектры излучения слоя растекания слабо зависят от деталей строения слоя растекания по толщине, если он является оптически толстым, с поверхностной плотностью $\Sigma_S > 100 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$. Такую (и бóльшую) поверхностную плотность имеют слои растекания высокой светимости с $L > 0.1L_{\text{Edd}}$. Эти локальные спектры очень близки к спектрам моделей атмосфер вспыхивающих нейтронных звезд с такими же значениями эффективной температуры, эффективного ускорения силы тяжести и химического состава, и могут быть описаны дилютированными спектрами абсолютно черного тела.

Интегральные спектры слоев растекания рассчитывались с учетом релятивистских эффектов, таких как гравитационное красное смещение и искривление лучей света, релятивистский эффект Доплера и абберация. Интегральные спектры довольно слабо зависят от угла наклона слоя растекания к лучу зрения и от его светимости. Значение эффективной температуры слоя растет с широтой, а фактор ужесточения f_c с широтой уменьшается. Поэтому цветовая температура меняется с широтой незначительно и интегральный спектр слоя может быть описан спектром дилютированного черного тела с единой цветовой температурой.

Теоретические интегральные спектры слоев растекания сравнивались с наблюдаемыми спектрами пограничных слоев в маломассивных рентгеновских двойных. Наблюдаемые цветовые температуры спектров пограничных слоев, равные $2.4 \pm 0.1 \text{ кэВ}$ (Гильфанов и др. 2003, Ревнивцев и Гильфанов 2006) могут быть воспроизведены, если вещество в недрах нейтронных звезд подчиняется жесткому уравнению состояния (Рис. 3). Были получены ограничения на радиус нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных - 13-16 км в предположении, что их массы равны $1.4 M_{\odot}$, а содержание гелия в аккрецируемом веществе является солнечным. Мягкое уравнение состояния оказывается совместимым с наблюдениями, если предположить, что турбулентное трение слоя растекания о поверхность нейтронной звезды является слабым ($\alpha_b \sim 10^{-5}$).

В **четвертой главе** рассматриваются модели и спектры излучения стандартных аккреционных α -дисков. Описан метод моделирования таких α -дисков. Произведено сравнение полученных с его помощью результатов с результатами моделирования методом Кецариса и

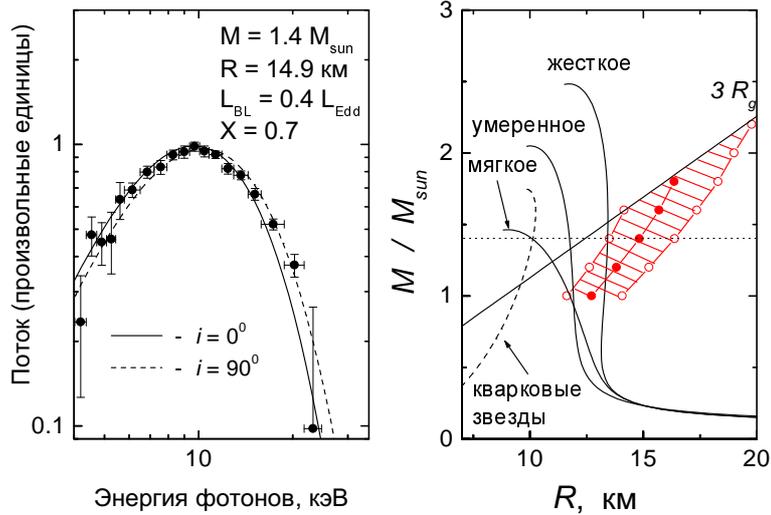


Рис. 3: Сравнение теоретических спектров излучения слоев растекания и наблюдаемого спектра пограничного слоя источника GX 340+0 (левая панель) и допустимой полосы значений на плоскости $M - R$ для нейтронных звезд в предположении о солнечном химическом составе аккрецируемого вещества (правая панель). Показаны характерные теоретические кривые $M - R$ для моделей нейтронных звезд с различными уравнениями состояния.

Шакуры (1998). Результаты хорошо согласуются между собой. Показано, что полутолщина аккреционных дисков, получаемая из точного моделирования по z координате примерно в 2 раза превышает полутолщину диска, получаемую из усредненных моделей.

Представлен метод моделирования локальных (на данном радиусе) атмосфер дисков и спектров их излучения без учета внешнего облучения. Показано, что атмосфера кольца оптически толстого геометрически тонкого α -диска и спектр его излучения мало отличаются от атмосферы и спектра звезды с такими же T_{eff} и $\log g$ на поверхности. Поэтому допустимо рассматривать локальные спектры аккреционных дисков (на тех его радиусах, где можно пренебречь внешним облучением) как спектры звездных атмосфер с соответствующими параметрами. Разработан метод моделирования спектров аккреционных дисков на основе интегрирования локальных спектров, рассчитываемых по моделям звездных атмосфер. Метод применен для интерпретации ультрафиолетового спектра бывшей Новой V603 Орла. Подтвержден обнаруженный Вейдом (1988) избыток мягкого ультрафиолетового и оптического излучения. Рассмотрены

возможная интерпретация избыточного излучения как отраженного от вторичной компоненты и внешних областей аккреционного диска. Предпочтительным является переизлучение внешними частями диска жесткого потока от внутренних областей аккреционного диска и пограничного слоя, но для этого необходимо предполагать, что диск на внешних радиусах примерно в 2 раза толще, чем это следует из теории дисковой аккреции.

Кроме того, в данной главе были рассчитаны теоретические рентгеновские спектры внутренних эффективно оптически тонких частей аккреционных дисков высокой относительной светимости вокруг сверхмассивных черных дыр, и была сделана попытка описать с их помощью наблюдаемые рентгеновские спектры активных ядер галактик. Представлены результаты определения фундаментальных параметров черных дыр и аккреционных дисков в 28 активных ядрах галактик и квазаров путем аппроксимации их рентгеновских спектров рассчитанными теоретическими спектрами.

Значения масс черных дыр M_x , определенные таким образом, оказались в среднем ниже, чем определенные по времени задержки переменности в линиях относительно переменности в континууме M_{rev} , и отношение M_{rev}/M_x тем больше, чем меньше относительная светимость ядра $L/L_{Edd}(M_{rev})$. Однако для активных ядер галактик со светимостью, близкой к эддингтоновской, такие различия минимальны, и представленная здесь модель применима для этих активных ядер. Рентгеновское излучение активных ядер галактик низкой относительной светимости должно объясняться другими причинами.

Показано, что согласно данной модели, черные дыры в квазарах и активных ядрах со светимостью, близкой к эддингтоновской, обладают угловым моментом, близким к экстремальному.

В **пятой главе** была рассмотрена возможность обнаружения оптических линий поглощения в спектрах рентгеновских новых звезд во время вспышки. Оптическое излучение рентгеновских новых во время вспышки во многом обусловлено переизлучением рентгеновского потока внешними частями диска. Поэтому для всех моделей дисков на каждом радиусе было необходимо рассчитать величину падающего внешнего потока $F_{\text{ит}}$ и его отношение к собственному потоку излучения, генерируемому на данном радиусе диска F_0 .

Были использованы два подхода для моделирования абсорбционных линий в таких самооблучаемых дисках. В рамках первого метода интегральный спектр диска суммировался из локальных спектров его колец, причем предполагалось, что если для данного кольца величина $F_{\text{irr}}/F_0 < 1$, его спектр считался таким же, как спектр звезды с теми же значениями T_{eff} и $\log g$ на поверхности, а в противном случае брался спектр абсолютно черного тела.

С помощью такой методики были рассчитаны оптические синтетические спектры аккреционных дисков различной светимости (0.5, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005 и 0.001 от светимости Эддингтона) вокруг черных дыр Шварцшильда с массой 1.44, 3, 5, и 10 M_{\odot} . Кроме того, были вычислены эквивалентные ширины W_{λ} 32 наиболее сильных линий поглощения для этих же моделей дисков.

Исследовалось влияние на полученные результаты изменения внешнего граничного радиуса диска, параметра α и граничного значения отношения падающего потока к собственному F_{irr}/F_0 , при котором происходит разделение локального спектра на чернотельный или звездный.

Рассмотрена зависимость отношения $F_{\text{irr}}/F_0(R)$ от параметров дисковой аккреции и физических условий в диске. Показано, что величина $f\eta$, использовавшаяся Ко и Кэллманом (1991) и характеризующая внешнее облучение диска, остается постоянной вдоль радиуса диска с точностью до фактора 2.

В рамках принятой методики показано, что возможно обнаружение абсорбционных крыльев бальмеровских линий водорода и, возможно, абсорбционных крыльев линии К CaII при светимости диска $\sim 0.1-0.05$ от светимости Эддингтона на фазе уменьшения блеска. Показано, что величина эквивалентной ширины абсорбционной компоненты тем больше, чем больше масса центрального объекта и чем ближе параметр α к 1, и ее значение и его изменение с уменьшением блеска рентгеновской новой может позволить получить ограничения на величину массы черной дыры и параметра α .

С помощью этой же методики выполнены расчеты эквивалентной ширины резонансного дублета LiI $\lambda 6708 \text{ \AA}$. Показано, что линия LiI имеет вполне обнаружимые значения эквивалентной ширины, когда светимость диска падает ниже $0.01 L_{\text{Edd}}$, и если содержание лития в 100

и более раз превышает солнечное. В особенно благоприятных случаях, когда внешний радиус диска превышает 10^{11} см и он расположен почти в картинной плоскости, эквивалентная ширина этой линии может превышать 100 mÅ.

В рамках второго подхода спектр каждого кольца рассчитывался как спектр облучаемой модели атмосферы звезды в соответствии с рассчитанным потоком облучения от центральных областей диска. Облучаемые модели атмосфер звезд рассчитывались по методике Сахибуллина и Шиманского (1996). С помощью этой методики были проведены расчеты профилей бальмеровских линий водорода и непрерывных оптических спектров самооблучаемых стационарных аккреционных α - дисков вокруг шварцшильдовских черных дыр звездной массы. Предполагается, что последовательность моделей таких дисков может описать поведение рентгеновских новых звезд на разных фазах развития вспышки.

Были рассчитаны непрерывные спектры, профили и эквивалентные ширины абсорбционных и эмиссионных компонент первых пяти членов бальмеровской серии водорода для более чем 100 моделей аккреционных дисков с различными параметрами. В частности, исследовалось влияние на характеристики спектра массы черной дыры, размеров диска, значения параметра α , угла наклона диска к лучу зрения, и параметров рентгеновского спектра (форма и энергия обрезания со стороны низких энергий).

Показано, что наклон пашеновского континуума $F_\lambda \sim \lambda^{-3}$ практически не зависит ни от каких параметров, в том числе и от светимости диска. Показано также, что эквивалентная ширина эмиссионных компонент линий зависит от величины перехватываемого рентгеновского потока и угла наклона диска к лучу зрения. В частности, увеличение толщины диска (уменьшение массы черной дыры и параметра α) ведет к увеличению W_λ эмиссионных компонент и уменьшению W_λ абсорбционных. Уменьшение угла наклона диска к лучу зрения также усиливает эмиссионные компоненты вследствие увеличения оптической толщины хромосфероподобного слоя вдоль луча зрения. Выяснено, что критическое влияние на эмиссионные линии оказывает правильный учет относительной доли мягкого рентгеновского излучения с $E \leq 1$ кэВ, так как именно оно нагревает

верхние слои атмосферы диска, в то время как общая форма рентгеновского спектра практически не влияет на форму профилей линий.

Проведено сравнение теоретически рассчитанных спектров с наблюдаемыми спектрами рентгеновской новой V518 Per (GRO J0422+32). Показано, что наблюдаемый спектр является более плоским ($F_\lambda \sim \lambda^{-2}$), чем теоретический ($F_\lambda \sim \lambda^{-3}$), что, вероятно, свидетельствует о присутствии дополнительного источника излучения. Профили бальмеровских линий водорода могут быть описаны спектром модели диска с параметрами, характерными для этой Новой. Правда, прямого самооблучения диска с параметром $\alpha \sim 0.5$, характерным для дисков рентгеновских новых, для этого недостаточно. Приходится предполагать более сильное облучение диска, что может объясняться наличием вещества над плоскостью диска, рассеивающего рентгеновское излучение от центральных областей.

Анализ наличия/отсутствия абсорбционных компонент линий водорода в спектрах 8 рентгеновских новых во время вспышки привел к выводу, что абсорбционные компоненты присутствуют в спектрах рентгеновских новых с низкой относительной L/L_{Edd} светимостью, в полном соответствии с представленными здесь расчетами.

Шестая глава посвящена моделированию рентгеновских и оптических кривых блеска рентгеновских новых звезд на основе теории нестационарной дисковой аккреции Липуновой и Шакуры (2000, 2002).

Результаты проведенных расчетов показали, что теория нестационарной дисковой аккреции способна описать одновременно как рентгеновские, так и оптические кривые блеска двух наиболее ярких рентгеновских новых, Новой Единорога 1975 г. (A 0620–00) и Новой Мухи 1991 г. (GRS 1124–68) в течение первых 2-х месяцев после вспышки (Рис. 4). Для этого необходимо учесть реальную непрозрачность вещества диска, эффекты общей теории относительности и самооблучение диска.

В рамках предложенной методики расчета кривых блеска рентгеновских новых только из сравнения наблюдаемых и теоретических кривых блеска не удастся получить модели с четко ограниченными значениям всех интересующих нас параметров: массы

и углового момента черной дыры (параметра Керра a), параметра α , расстояния до системы и параметра переработки жесткого излучения η .

Тем не менее, приняв ограничения на массу черной дыры в Новой Единорога 1975 г. и на расстояния до нее известные из наблюдений ($11 \pm 2M_{\odot}$ и 1.1 кпк, Гелино и др. 2001a), можно получить значения остальных параметров. При значении параметра ужесточения спектра $f_c = 1.7$ получены следующие результаты: $a \approx 0.3 - 0.8$ и $\alpha = 0.6 - 0.9$. При этом необходимо, чтобы параметр переработки был достаточно велик $\eta \approx 0.5$, а толщина диска в 1.5–2 раза превышала теоретическую.

Для рентгеновской Новой Мухи 1991 г. полученные здесь результаты не согласуются с наблюдательными ограничениями на массу черной дыры и расстояние до системы ($7 \pm 0.6 M_{\odot}$ и 5.1 кпк), полученными Гелино и др. (2001b). Для моделей, представленных здесь и удовлетворяющих наблюдательным данным получаются почти в два раза меньшие значения расстояния (3.0 - 3.5 кпк) при массе черной дыры $8 - 9M_{\odot}$. Не исключено, что в работе Гелино и др. (2001b) расстояние до системы завышено, так как существуют независимые оценки массы черной дыры и расстояния до системы ($7.5 \pm 3.5M_{\odot}$ и 3.4 ± 0.6 кпк), полученные Шахбазом и др. (1997), которые лучше согласуются со значениями, полученными здесь. Если принять, что масса черной дыры $7 - 9M_{\odot}$, то получается расстояние до системы 3.0 -3.5 кпк, параметр Керра $a \leq 0.2$, параметр $\alpha = 0.4 - 0.5$. При этом параметр переработки $\eta \leq 0.5$, а толщина диска может быть увеличена в 1.5 - 2 раза, если коэффициент переработки мал $\eta < 0.3$.

Представлено подробное обсуждение причин, по которым диски на внешних радиусах могут иметь повышенную толщину. Наиболее вероятным представляется наличие дополнительного вещества над диском, например, в виде короны, порождаемой нагревом внешним жестким излучением внутренних областей диска. В этом случае повышенная толщина диска в A 0620-00 по сравнению с диском в GRS 1124-68 может объясняться более сильным внешним облучением. Если эта корона неоднородна, т.е. разбита на относительно холодные облака и горячую межоблачную среду, то многократное рассеяние излучения между облаками может объяснить достаточно большое значение коэффициента переработки (см. результаты, изложенные в

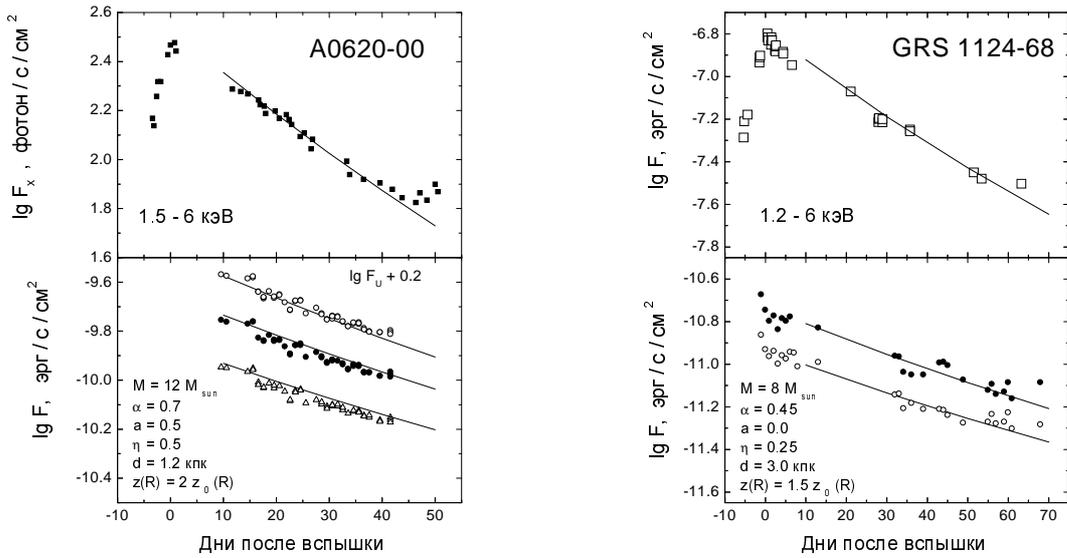


Рис. 4: Сравнение рассчитанных и наблюдаемых кривых блеска A 0620-00 (левая панель) и GRS 1124-68 (правая панель) для моделей, параметры которой близки к наблюдаемым. На левой панели поток в U полосе смещен вверх по вертикали на 0.2 как для наблюдаемых точек, так и для теоретической кривой.

следующей главе). Дело в том, что оценки величины переработки при облучении дисков рентгеновских новых их рентгеновскими спектрами, сделанные на основе расчетов облучаемых моделей атмосфер ($\eta \sim 0.1 - 0.2$) значительно ниже, чем требуется в представленных здесь моделях A 0620-00.

Интересным результатом является требуемое из модели наличие значительного углового момента черной дыры в системе A 0620-00.

В **седьмой главе** представлены результаты моделирования облучаемых атмосфер звезд, выполненные для оценки эффективности переработки мягкого рентгеновского излучения в оптическое при облучении аккреционных дисков в сверхмягких рентгеновских источниках. Были получены следующие результаты.

Построена простая аналитическая двухцветная модель, описывающая температурное распределение в облучаемом аккреционном диске с учетом электронного рассеяния. Показано, что атмосферы оптически толстых аккреционных дисков в сверхмягких источниках могут быть с хорошей точностью аппроксимированы атмосферами звезд с теми же значениями эффективной температуры

и ускорения свободного падения на поверхности.

Было рассчитано несколько облучаемых моделей атмосфер с небольшим относительным значением внешнего потока $R_x = F_{\text{irr}}/F_0 \sim 0.01 - 1$, который соответствует облучению стандартного аккреционного диска в сверхмягких источниках. Показано, что эффективность переработки мягкого рентгеновского излучения в оптическое в этом случае мала. Исследована зависимость температурной структуры атмосферы и спектра выходящего излучения от жесткости внешнего рентгеновского излучения и химического состава атмосферы. Показано, что в случае облучения рентгеновским потоком с мягким спектром температура внешнего горячего хромосфероподобного слоя выше, а поверхностная плотность ниже, чем в случае облучения рентгеновским потоком с жестким спектром. Уменьшение содержания тяжелых химических элементов в атмосфере также приводит к росту температуры хромосфероподобного слоя без заметного изменения его поверхностной плотности. Показано, что аналитическое выражение для рентгеновского альbedo A_x дает значения, близкие к полученным из численных расчетов, если в это выражение подставлять коэффициенты истинной непрозрачности k_ν^x и электронного рассеяния σ , взятые из модели атмосферы на глубине $\tau_\nu^x = 1$. Продемонстрировано, что сила, вызываемая давлением излучения в спектральных линиях, превышает силу тяжести во внешних слоях моделей атмосфер, облучаемых рентгеновским потоком. Это должно приводить к появлению ветра с поверхности облучаемых звезд и аккреционных дисков.

Для изучения процессов переизлучения во внешних утолщенных слоях дисков сверхмягких источников, подвергаемых сильному облучению, была рассчитана модель атмосферы звезды с $R_x = 20$. Показано, что даже в случае такого сильного облучения коэффициент переработки мягкого рентгеновского излучения в оптическое не превышает нескольких процентов, так как мягкое рентгеновское излучение не может проникнуть глубоко в атмосферу, где формируется оптическое излучение атмосферы. Наличие комптоновской короны над атмосферой не изменяет этого вывода. В то же время, эффективность переработки жесткого ($kT_x = 5$ кэВ) рентгеновского излучения в оптическое оказалась значительной $\eta \approx 0.5$. Предложены простые выражения для оценки эффективности переработки рентгеновского

излучения в оптическое в зависимости от его спектра и для величины рентгеновского альбеда. Все полученные оценки являются справедливыми лишь для относительно горячих моделей атмосфер с $T_{\text{eff}} \geq 8000 - 9000$ К так как при более низких температурах ионизация водорода уменьшается и необходимо учитывать конвективный перенос энергии.

Сделан вывод, что при облучении атмосферы аккреционного диска потоком мягкого рентгеновского излучения эффективность его переработки в оптическое излучение низка и недостаточна для объяснения наблюдаемого оптического и ультрафиолетового излучения сверхмягких источников.

Для преодоления этого противоречия было выдвинуто предположение, что внешняя утолщенная часть аккреционных дисков в сверхмягких рентгеновских источниках состоит из множества относительно небольших газовых облаков (Рис. 5). Эти относительно холодные облака ($T_c \sim 20000$ К) должны быть погружены в горячую ($T_{\text{ic}} \approx 5 \cdot 10^5$ К) межоблачную среду. Данный слой облаков облучается мягким рентгеновским и жестким ультрафиолетовым излучением центрального горячего ($T_{\text{eff}} \approx 5 \cdot 10^5$ К) белого карлика. Показано, что многократное поглощение и переизлучение внешнего потока облаками слоя может значительно увеличить эффективность переработки мягкого рентгеновского излучения в оптическое по сравнению с эффективностью при однократном поглощении и переизлучении на одном облаке.

В рамках простой двухцветной аналитической модели получено решение уравнения переноса излучения в плоско-параллельном слое облаков, облучаемого с одной стороны мягким рентгеновским излучением. Переизлучение облаком падающего на него внешнего потока рассматривается как рассеяние излучения на облаке. При единичном рассеянии небольшая часть мягкого рентгеновского и жесткого ультрафиолетового потока A ($A \approx 0.01 - 0.1$) переизлучается в мягком ультрафиолетовом / оптическом диапазонах спектра, а оставшаяся часть $(1 - A)$ переизлучается снова в жестком ультрафиолетовом диапазоне. Внешний поток в оптическом и мягком ультрафиолетовом диапазоне спектра переизлучается в нем же. Внешнее излучение, попадая в слой облаков, испытывает

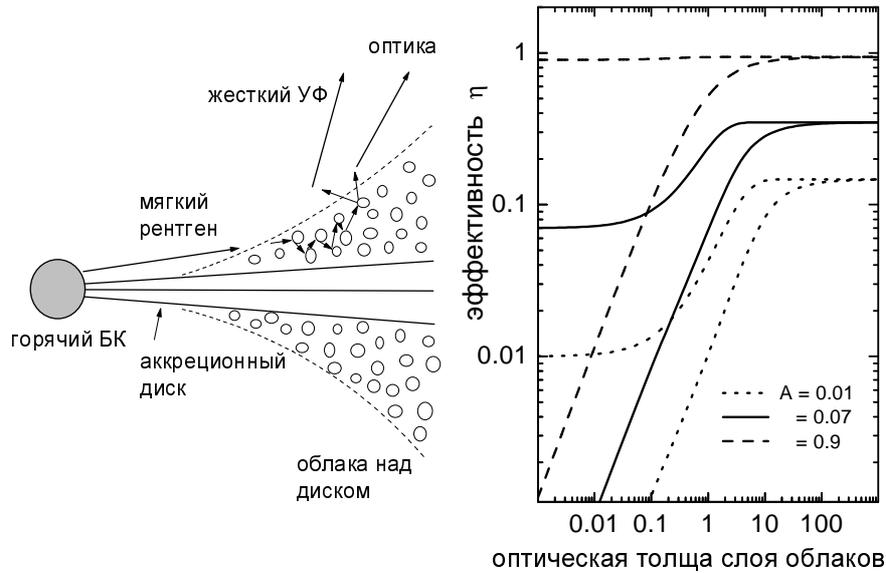


Рис. 5: Картина слоя облаков над диском в сверхмягких рентгеновских источниках (левая панель) и зависимость эффективности переработки рентгена в оптику от оптической толщи слоя облаков и от эффективности переработки при одном рассеянии на облаке A (правая панель).

несколько рассеяний между облаками, прежде чем выйдет из него. При каждом рассеянии небольшая часть жесткого излучения переизлучается в оптическом диапазоне, а благодаря тому, что таких рассеяний много, доля оптического потока в отраженном излучении может стать значительной. С помощью такого механизма итоговый коэффициент переработки мягкого рентгеновского излучения в оптическое может сильно возрасти и достичь величины 0.3-0.5. Этого значения коэффициента переработки достаточно, чтобы объяснить наблюдаемый поток ультрафиолетового и оптического излучения сверхмягких источников переработкой мягкого рентгеновского излучения центрального горячего белого карлика внешними утолщенными частями аккреционного диска, т.е. слоем облаков.

В **восьмой главе** представлены результаты определения масс белых карликов в 14 промежуточных полярах, полученные из аппроксимации их широкополосных (3-100 кэВ) спектров, зарегистрированных спектрометрами PCA и HEXTE обсерватории *RXTE*, теоретическими спектрами моделей аккреционных колонок (Рис. 6). Для двух из них представлены также результаты определения масс белых карликов по

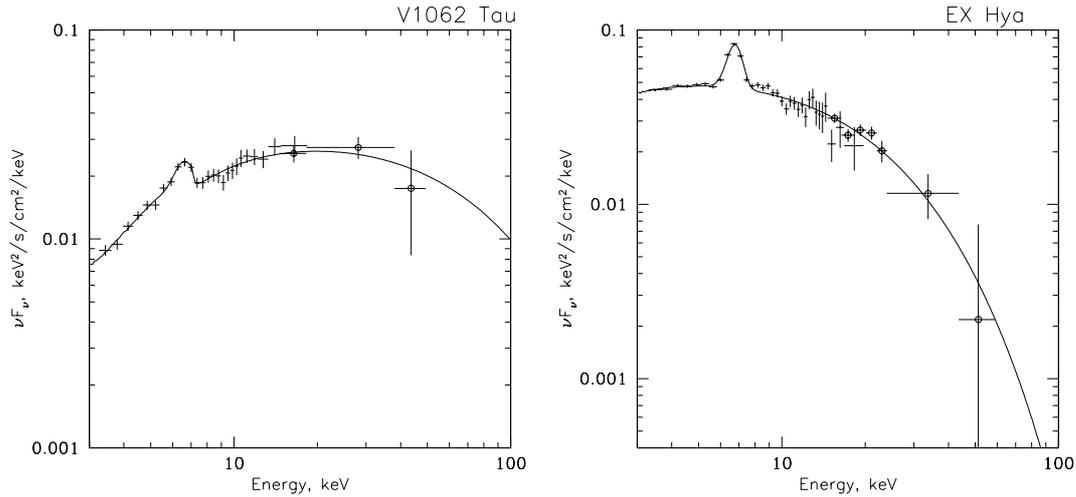


Рис. 6: Сравнение наблюдаемых и теоретических спектров промежуточных полярнов с различной массой белых карликов: V1062 Тау ($1 M_{\odot}$, левая панель), EX Hya ($0.5 M_{\odot}$, правая панель).

широкополосным спектрам, полученным обсерваторией *ИНТЕГРАЛ*. Результаты определения масс по спектрам с двух обсерваторий находятся в хорошем согласии друг с другом.

Циклотронное охлаждение при расчете моделей колонок не учитывалось, поэтому в данное исследование не включены полярны, для которых такой механизм охлаждения должен быть важен. Полученные оценки дают более низкие значения масс белых карликов, чем оценки, полученные другими авторами по мягкой части рентгеновских спектров этих промежуточных полярнов (*GIN-GA/LAC* (Кроппер и др. 1999), и *RXTE/PCA* Рамсай (2000)). Показано, что существует относительно хорошее согласие между массами белых карликов, полученных в данном исследовании и массами, полученными оптическими методами. Также надо отметить, что абсолютно необходимо использовать жесткую часть спектров магнитных катаклизмических переменных звезд для получения надежных оценок масс белых карликов в них.

Список публикаций по теме диссертации

1. Сулейманов В. Ф., Липунова Г.В. и Шакура Н.И. *Толщина аккреционных α -дисков: теория и наблюдения*, Астрон. Журн. **84**, 612-626 (2007)
2. Ревнивцев М.Г., Лутовинов А.А., Сулейманов В.Ф., Мольков С.В., и Сюняев Р.А. *Широкополосный рентгеновский спектр промежуточного полярра V2400 Ori*, Письма в Астрон. Журн. **30**, 848-854 (2004)
3. Ибрагимов А.А., Сулейманов В.Ф., Вихлинин А.А., и Сахибуллин Н.А. *Сверхмягкие рентгеновские источники. Параметры атмосфер*, Астрон. Журн. **80**, 212-222 (2003)
4. Сулейманов В.Ф. и Ибрагимов А.А. *Сверхмягкие рентгеновские источники. Фундаментальные параметры*, Астрон. Журн. **80**, 223-231 (2003)
5. Сулейманов В.Ф., Гош К., Остин Р., и Рамсай Б. *Рентгеновское излучение аккреционных дисков в активных ядрах галактик*, Письма в Астрон. Журн. **28**, 829-839 (2002)
6. Сахибуллин Н.А., Сулейманов В.Ф., Шиманский В.В., и Сулейманова С.Л. *Формирование балмеровских линий в спектрах рентгеновских новых звезд* Письма в Астрон. Журн. **24**, 26-38 (1998)
7. Сулейманов В.Ф. *Могут ли наблюдаться оптические линии поглощения в спектрах рентгеновских новых звезд?*, Письма в Астрон. Журн. **22**, 107-123 (1996)
8. Сулейманов В.Ф. и Шакура Н.И. *Эффекты отражения в катаклизмических переменных звездах. V603 Aql.*, Письма в Астрон. Журн. **20**, 28-31 (1994)
9. Сулейманов В.Ф. *Возможности программного комплекса STARDISK*, Изв. АОЭ, **N58**, 11-26 (1994)

10. Сулейманов В.Ф. *Моделирование аккреционных дисков и спектров катаклизмических переменных звезд. I. V603 Aql*, Письма в Астрон. Журн. **18**, 255-265 (1992)
11. Сулейманов В.Ф. *О возможной природе источника рентгеновского излучения в квазарах*, Письма в Астрон. Журн. **17**, 575-582 (1991)
12. Suleimanov V., Werner K. *Importance of Compton scattering for radiation spectra of isolated neutron stars with weak magnetic field*, Astron. Astrophys. **466**, 661-666 (2007)
13. Suleimanov V., Madej J., Dracke J.J., Rauch T., Werner K. *On the relevance of Compton scattering for the soft X-ray spectra of hot DA white dwarfs*, Astron. Astrophys. **455**, 679-684 (2006)
14. Suleimanov V., Poutanen J. *Spectra of the spreading layers on the neutron star surface and constraints on the neutron star equation of state*, MNRAS **369**, 2036-2048 (2006)
15. Suleimanov V., Revnivtsev M, Ritter H. *RXTE broadband X-ray spectra of intermediate polars and white dwarf mass estimates*, Astron. Astrophys. **435**, 191-199 (2005)
16. Falanga M., Bonnet-Bidaud J.M., Suleimanov V. *INTEGRAL broadband X-ray spectrum of the intermediate polar V709 Cassiopeiae*, Astron. Astrophys. **444**, 561-564 (2005)
17. Revnivtsev M., Lutovinov A., Suleimanov V., Sunyaev R., Zheleznyakov V. *Broadband X-ray spectrum of intermediate polar V1223 Sgr*, Astron. Astrophys. **426**, 253-257 (2004)
18. Suleimanov V., Shakura N., Lipunova G. *Light curve modeling for time-dependent accretion disks in X-ray novae with General Relativity effects taken into account* in: 5-th INTEGRAL Workshop Proceedings on "The INTEGRAL Universe", pp.403-407 (2004)
19. Lipunova G., Suleimanov V. *Radial Dependences of Physical Parameters in alpha-disks as a Consequence of Two Vertical Structure Solutions*, Baltic Astronomy **13**, 167-170 (2004)

20. Suleimanov V., Meyer F., Meyer-Hofmeister E. *High efficiency of soft X-ray radiation reprocessing in supersoft X-ray sources due to multiple scattering*, Astron. Astrophys. **401**, 1009-1015 (2003)
21. Swartz D., Ghosh K., Suleimanov V., Tennant A., Kinwan Wu *CHANDRA discovery of luminous supersoft X-ray sources in M81*, Astrophys. J. **574**, 382-397 (2002)
22. Suleimanov V., Meyer-Hofmeister E., Meyer F. *Reprocessing of soft X-ray radiation in supersoft X-ray sources*, Astron. Astrophys. **350**, 63-72 (1999)
23. Suleimanov V., R. Rebolo R. *The Li I line in spectra of X-ray Novae accretion discs*, Astron. Astrophys. **330**, 999-1004 (1998)

Список цитированной литературы

- Балбус и Хоули* (Balbus S.A., Hawley J.F.) Astrophys. J. **376**, 214 (1991)
- ван ден Хойвел и др.* (van den Heuvel E.P.J., Bhattacharya D., Nomoto K., Rappaport S.) Astron. Astrophys., **262**, 97 (1992)
- Вейд* (Wade R.A.) Astrophys. J., **335**, 394 (1988)
- Гелино и др.* (Gelino D., Harrison, T., Orosz J.), Astron. J., **122**, 2668 (2001a)
- Гелино и др.* (Gelino D., Harrison T., McNamara B.) Astron. J., **122**, 971 (2001b)
- Гильфанов, Ревнивцев и Мольков* (Gilfanov M., Revnivtsev M., Molkov S.) Astron. Astrophys., **410**, 217 (2003)
- Иногамов Н.А. и Сюняев Р.А.* Письма в Астрон. Журн., **25**, 323 (1999)
- Кецарис и Шакура* (Ketsaris N.A., Shakura N.I.) Astron. Astrophys. Trans. **15**, 193 (1998)
- Ко и Каллман* (Ko Y.-K., Kallman T.R.) Astrophys. J. **374**, 721 (1991)
- Кроппер и др.* (Cropper M., Wu K., Ramsay G., Kocabiyyik, A.) MNRAS, **306**, 684 (1999)
- Липунова и Шакура* (Lipunova G.V., Shakura N.I.) Astron. Astrophys., **356**, 363 (2000)

- Липунова Г.В. и Шакура Н.И.* Астрон. Журн., **79**, 407 (2002)
- Михалас Д.* Звездные атмосферы, М., Мир (1982)
- Новиков и Торн* (Novikov I.D., Thorne K.S.) In "Black Holes", C. De Witt & B. De Witt (Eds.), Gordon and Breach, New York, p. 343 (1973)
- Рамсай* (Ramsay G.) MNRAS, **314**, 403 (2000)
- Ревнивцев и Гильфанов* (Revnivtsev M., Gilfanov M.) Astron. Astrophys., **453**, 253 (2006)
- Сахибуллин Н.А. и Шиманский В.В.* Астрон. Журн., **73**, 73 (1996)
- Шакура Н.И.* Астрон. Журн. **49**, 921 (1972)
- Шакура и Сюняев* (Shakura N.I., Sunyaev R.A.) Astron. Astrophys., **24**, 337 (1973)
- Шакура и Сюняев* (Shakura N.I., Sunyaev R.A.) MNRAS, **175**, 613 (1976).
- Шахбаз и др.* (Shahbaz T., Naylor T., Charles P.A.) MNRAS, **285**, 607 (1997)