

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Медведев Алексей Сергеевич

**Исследование сверхкритического аккреционного диска
и звезды-донора в системе SS 433**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и в лаборатории физики звезд Специальной астрофизической обсерватории РАН

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
Фабрика Сергей Николаевич, профессор,
зав. лабораторией физики звезд
САО РАН

доктор физико-математических наук
Прохоров Михаил Евгеньевич,
ведущий научный сотрудник
отдела релятивистской астрофизики
ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Сазонов Сергей Юрьевич,
ведущий научный сотрудник
лаборатории теоретической астрофизики
ИКИ РАН

кандидат физико-математических наук
Антохина Элеонора Артуровна,
старший научный сотрудник
отдела звездной астрофизики
ГАИШ МГУ

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН

Защита диссертации состоится 17 июня 2010 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 501.001.86 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАИШ МГУ по адресу: 119991, Москва, Университетский проспект, д. 13

Автореферат диссертации разослан «17» мая 2010 года

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



С. О. Алексеев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Сверхкритическая аккреция газа на черные дыры — одно из самых интересных и загадочных явлений в астрофизике. Теория сверхкритической аккреции была разработана Шакурой и Сюняевым в 1973 году ^[1] и в настоящее время привлекает все большее внимание ученых. Данный феномен возникает в самых разнообразных системах: от тесных двойных звезд до активных ядер галактик. Теория сверхкритической аккреции также привлекается для объяснения природы нового класса внегалактических объектов — ультраярких рентгеновских источников (ULX). В силу этих причин изучение наблюдательных данных и объектов, демонстрирующих такой тип аккреции, является чрезвычайно важной задачей.

Настоящая работа посвящена исследованию тесной двойной системы SS 433, которая является объектом пристального изучения с момента её открытия и по сей день. Эта система уникальна тем, что в ней осуществляется постоянный сверхкритический режим аккреции вещества звезды-донора на релятивистский компаньон ^[2]. Практически все излучение SS 433 формируется в сверхкритической области аккреционного диска, а наблюдается в ветре из диска и релятивистских струях. Аккреционный диск является прецессирующим и периодически затмевается звездой-донором, что предоставляет исследователям уникальный шанс рассмотреть процесс сверхкритической аккреции “со всех сторон”. С появлением новых наблюдательных данных, полученных современными космическими рентгеновскими обсерваториями, таких как CHANDRA, XMM-Newton и Suzaku, а также на крупнейших наземных телескопах класса 8м, таких как Subaru и Gemini, интерес к SS 433 только растет.

Анализ рентгеновских данных тем более важен, так как излучение в этом диапазоне рождается в самых внутренних областях аккреционного диска, в которых происходит формирование ветра и релятивистских струй. Исследование

[1] *N. I. Shakura, R. A. Sunyaev.* Black holes in binary systems. Observational appearance. // *A & A.* — 1973. — Vol. 24. — Pp. 337–355.

[2] *S. Fabrika.* The jets and supercritical accretion disk in SS433 // *Astrophysics and Space Physics Reviews.* — 2004. — Vol. 12. — Pp. 1–152.

особенностей рентгеновских спектров, их формы и переменности, позволит пролить свет на до сих пор неясные механизмы ускорения и коллимации струй, а также проверить и уточнить теорию сверхкритической аккреции.

Актуальность изучения SS 433 также связана с открытием нового типа внегалактических рентгеновских источников — ULX (ультраяркие рентгеновские источники). Это точечные объекты с огромной рентгеновской светимостью вплоть до $\sim 10^{41}$ эрг/сек. Одной из возможных гипотез о природе этих объектов является предположение, что ULX являются звездными системами типа SS 433, но ориентированными струями в сторону наблюдателя (иными словами, плоскость диска примерно совпадает с картинной). Оценки рентгеновской светимости SS 433 в такой ориентации показывают, что его светимость была бы близка к $\sim 10^{40-41}$ эрг/сек. Имея такую светимость в направлении вдоль оси аккреционного диска, SS 433 наблюдался бы как точечный источник по своим свойствам очень похожий на ULX.

Современный уровень развития наземных оптических телескопов, спектральных приборов и методов анализа позволяет получать фотометрические и спектральные данные чрезвычайно высокого качества. Благодаря этому в оптических спектрах SS 433 удалось обнаружить линии поглощения, принадлежащие звезде-донору. Кривые лучевых скоростей донора, полученные из анализа движения линий поглощения, позволяют оценить массу компонентов в двойной системе. Это является очень важной и сложной задачей, окончательное решение которой не найдено до сих пор. По-прежнему нельзя с уверенностью сказать, является ли компактный объект черной дырой, или нейтронной звездой. Детальное изучение профилей линий звезды-донора с высоким спектральным разрешением позволит ответить на этот вопрос.

Таким образом, система SS 433 является ключевым объектом для поиска наблюдательных подтверждений и дальнейшего развития теории сверхкритической аккреции. Этим обусловлена актуальность темы диссертации.

Цель работы

Целью предпринимаемого в диссертации исследования является:

- изучить наблюдательные проявления релятивистских струй и сверхкрити-

ческого аккреционного диска в системе SS 433 с использованием современных рентгеновских данных;

- исследовать природу дополнительных компонентов непрерывного рентгеновского спектра SS 433, а также его особенностей, которые нельзя объяснить излучением струй;
- исследовать теоретическую возможность получения наблюдаемых компонентов отражения в сверхкритическом диске SS 433;
- изучить абсорбционные линии поглощения звезды-донора в оптических спектрах SS 433, полученных на телескопе Subaru;
- проверить предположение о прогреве звезды-донора сильным ультрафиолетовым излучением, сформированным в окружении релятивистского компаньона;
- изучить влияние эффектов прогрева на кривую лучевых скоростей звезды-донора, оценить массы компонентов с учетом такого влияния.

Научная новизна работы

Все основные результаты работы являются новыми и состоят в следующем:

1. Впервые построена модель рентгеновских струй SS 433 с учетом охлаждения не только из-за адиабатического расширения, но и за счет потерь энергии на излучение с использованием самых современных моделей излучения оптически прозрачной горячей плазмы.
2. С помощью этой модели найдены оценки параметров струй: размера и температуры видимого основания струи, значение которых хорошо согласуются с основными наблюдательными данными. Подтверждены оценки кинетической светимости, угла раствора струй и величины межзвездного поглощения света.
3. Впервые обнаружено, что континуальный спектр в диапазоне 4.0–12.0 кэВ в основном формируется в результате отражения света от частично ионизированной среды.

4. Впервые обнаружен мягкий компонент в рентгеновском спектре SS 433, который может интерпретироваться в рамках различных моделей. В частности, это может быть тепловой спектр с температурой $T \approx 0.1$ кэВ.
5. Впервые полностью описан спектр SS 433 во всем диапазоне XMM-Newton (0.8–12.0 кэВ) на основе физически оправданных моделей.
6. Найдена форма спектра излучения, падающего на внешние стенки канала сверхкритического аккреционного диска. Распределение энергии $\nu F(\nu)$ в спектре выходящего из внутренних частей канала излучения оказалось плоским в диапазоне 7–12 кэВ. В диапазоне 3–7 кэВ он имеет форму, характерную для сильного континуального фотопоглощения в частично ионизованной среде.
7. Впервые предположено, что рентгеновский спектр, падающий на внешние части канала в ветре, сформирован во внутренних невидимых наблюдателю частях канала. Возможно, в непосредственной близости к черной дыре.
8. Оценена светимость внутренних частей канала ($L \sim 10^{39}$ эрг/сек), угол под которым происходит отражение ($\beta \sim 0.06^\circ$) и физические условия, в которых находится газ на внешних частях канала;
9. Проведен анализ спектра поглощения, который формируется на поверхности звезды-донора в SS 433. Выделены линии поглощения, которые имеют эмиссионные компоненты (сильные линии, в основном ионы), и которые не имеют эмиссионных компонентов (слабые линии, в основном линии нейтральных элементов).
10. По поведению профилей выделенных линий в зависимости от орбитальной фазы обнаружен эффект прогрева поверхности звезды-донора ультрафиолетовым излучением аккреционного диска.
11. Изучена радиальная скорость линий поглощения звезды-донора, её переменность с орбитальной фазой. Найдена амплитуда кривой лучевых скоростей (60 км/сек) и скорость системы (гамма-скорость, 58.3 км/сек).

12. В рамках простой модели излучения поверхности звезды-донора SS 433 с учетом эффекта прогрева найдено, что истинная амплитуда движения донора составляет 40 ± 5 км/сек, в то время как наблюдаемая (60 км/сек) есть результат искажения профиля линий за счет эффекта прогрева.
13. С учетом известных в литературе данных по амплитуде кривой лучевых скоростей релятивистского объекта (или аккреционного диска SS 433) найдены массы компонентов системы. Масса звезды донора оказалась равной $10.4 M_{\odot}$, масса компактного объекта $2.5 M_{\odot}$ с возможными пределами от 1.9 до $4.0 M_{\odot}$. Масса релятивистского объекта оценена впервые с учетом эффектов прогрева, полученное значение позволяет говорить о том, что компактный объект является маломассивной черной дырой.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Новая модель релятивистских рентгеновских струй SS 433, построенная с учетом радиативного охлаждения на основе современных моделей излучения оптически прозрачной горячей плазмы. Модель корректно воспроизводит наблюдаемые потоки основных рентгеновских линий, формируемых в струях, на ее основе удалось обнаружить дополнительные компоненты в рентгеновском спектре SS 433.
2. Обнаружение дополнительных компонентов излучения в мягкой и жесткой частях рентгеновского спектра SS 433. Найдено, что наблюдаемое жесткое дополнительное излучение сформировано в результате отражения от частично ионизованной среды. Найдена форма спектра излучения, падающего на отражающую поверхность. Этот спектр несет на себе следы сильного поглощения при многократных отражениях внутри канала сверхкритического аккреционного диска. Дополнительные компоненты рентгеновского спектра доказывают, что наблюдаемое излучение рождается во внутренних невидимых наблюдателю частях канала сверхкритического аккреционного диска SS 433 и отражается во внешних частях канала.

3. Обнаружение эффекта прогрева звезды-донора по профилям линий поглощения в системе SS 433 на основе оптических спектров, полученных на 8-метровом телескопе Subaru. Найденный эффект прогрева позволяет найти корректные массы компонентов в системе SS 433.
4. Найдено, что истинная полуамплитуда лучевой скорости (40 км/сек) в орбитальном движении звезды-донора на 20 км/сек меньше наблюдаемой (60 км/сек). На основе учета прогрева поверхности донора определены корректные массы компонент в системе SS 433: масса звезды-донора равна $10.4_{-1.9}^{+2.3} M_{\odot}$, масса релятивистского компонента равна $2.5_{-0.6}^{+0.7} M_{\odot}$. Вывод, что релятивистская звезда в системе SS 433 является черной дырой низкой массы.

Теоретическая и практическая значимость

Результаты диссертации имеют как практическую, так и теоретическую ценность. Разработанная в **главе 1** модель струй, основанная на последних достижениях в области моделирования спектров горячей плазмы, позволит в дальнейшем не только детально изучать спектры SS 433 все более высокого качества, но и любых других объектов, имеющих струйную активность. Анализ методов диагностики плазмы по линиям рентгеновского спектра и примененный нами подход к оценке параметров струй позволяет добиться большей точности и сосредоточиться на изучении дополнительных компонентов спектра, которые не были объяснены и изучены ранее.

Открытое нами дополнительное изучение в спектре и используемая для его объяснения модель отражения от частично ионизованной среды дали возможность восстановить спектр излучения, формирующийся в самых внутренних частях аккреционного диска, находящихся в непосредственной близости к релятивистской звезде. Таким образом, результаты **главы 2** предоставляют возможность напрямую исследовать ту область аккреционного диска, в которой формируются и ускоряются струи.

Анализ уникальных высококачественных оптических данных, полученных на телескопе Subaru, показал, что в средних профилях линий поглощения звезды-

донора явно заметен эффект прогрева, предсказанный ранее. Построенная в **главе 3** простая феноменологическая модель позволила оценить влияние эффекта прогрева на кривую лучевых скоростей звезды-донора и сделать более точную оценку масс компонентов.

Публикации

Основные результаты работы представлены в статьях и материалах конференций:

- [1] *A. Medvedev, S. Fabrika*. Evidence of supercritical disc funnel radiation in X-ray spectra of SS 433 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2010. — Vol. 402. — Pp. 479–491.
- [2] *K. Kubota, Y. Ueda, S. Fabrika et al.* Subaru And Gemini Observations Of SS 433: New Constraint On The Mass Of The Compact Object // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — Vol. 709. — Pp. 1374–1386.
- [3] *A. Medvedev, S. Fabrika*. Evidences of the funnel radiation in X-ray spectra of SS433 // *Proceedings of the VII Microquasar Workshop: Microquasars and Beyond*. September 1 – 5, 2008. Foca, Izmir, Turkey, editor: *E. Kalemci*. — Proc. of Science, 2008. — P. 77.
- [4] *А. С. Медведев, С. Н. Фабрика*. Наблюдательные проявления канала сверхкритического аккреционного диска в SS 433 // *Кинематика и физика небесных тел*. — 2009. — Т. 25 (приложение), № 6. — С. 356–361.
- [5] *А. С. Медведев*. Исследование струй SS 433 по данным рентгеновской обсерватории XMM-Newton // *Труды Всероссийской Астрономической конференции «ВАК-2007»*. — Казань: Изд-во Казанского государственного университета, 2007. — Т. 19. — С. 206.

Личный вклад автора

В работах [1, 3, 4, 5] автором проведена обработка рентгеновских данных, полученных космической обсерваторией XMM-Newton, и создана модель рентгенов-

ских струй. Автор внес равный вклад в разработку метода диагностики плазмы по спектральным линиям высокоионизированного железа, а также в анализ спектральных данных и обсуждение результатов исследования. В работе [2] задача автора состояла в разработке и реализации модели прогрева звезды-донора в SS 433, а также в изучении влияния эффектов прогрева на кривую лучевых скоростей донора и оценке масс компонентов системы. Кроме того, автор внес равный вклад в обсуждение результатов всей работы [2].

Апробация работы

Результаты исследований обсуждались в лаборатории физики звезд Специальной астрофизической обсерватории РАН и на кафедре астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. Были сделаны доклады на семинарах Специальной астрофизической обсерватории РАН, кафедры астрономии университета Оулу (Финляндия), института астрономии РАН и института космических исследований РАН. Кроме того, результаты докладывались на следующих конференциях:

1. *“Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”* (HEA-2007), Москва, ИКИ РАН, 24–26 декабря 2007.
2. *“Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра”* (HEA-2009), Москва, ИКИ РАН, 21–24 декабря 2009.
3. Всероссийская астрономическая конференция *“Космические рубежи XXI века”* (ВАК-2007), Казань, КГУ, сентябрь 2007.
4. *“Microquasars and beyond”*, 7th microquasar workshop, 1–5 сентября, 2008, Фоча, Измир, Турция.
5. *“The X-ray Universe 2008”*, 27–30 мая 2008, Гранада, Испания.
6. *“150 лет спектральным исследованиям в астрофизике: от Кирхгофа до наших дней”* (Kirchhoff-150), 7-13 июня 2009 г, НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, Украина.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и списка литературы, содержащего 89 наименований. Общий объем составляет 115 страниц печатного текста. Работа включает 16 графиков и 3 таблицы.

Краткое содержание работы

Во **введении** показана актуальность проблемы, цель исследования и постановка задачи. Представлены основные результаты диссертации и положения, выносимые на защиту. Показаны их научная новизна и практическая ценность.

В **главе 1** изучаются спектры SS 433, полученные обсерваторией XMM-Newton, строится модель рентгеновских струй и проводится диагностика рентгеновской плазмы по линиям железа Fe XXV и Fe XXVI для того, чтобы оценить параметры струй.

В *разделе 1.1* формулируется задача исследования и приводится обзор литературы по предыдущим исследованиям рентгеновских спектров SS 433. В этом разделе ставится задача изучить спектры объекта, полученные обсерваторией XMM-Newton, на основе модели излучения струй и попытаться объяснить причину расхождений в непрерывном спектре между расчетным и наблюдаемым спектром SS 433.

Ранее считалось, что все рентгеновское излучение SS 433 формируется в струях, однако Бринкманн и др. [3] при изучении спектров XMM-Newton обнаружили, что модель струй хорошо воспроизводит излучение в линиях, но не может описать излучение в континууме. В разделе обсуждаются возможные причины такого расхождения. Например, оценка светимости SS 433 в рентгеновском диапазоне дает значение 10^{40} эрг/сек, в то время как наблюдаемое всего лишь 10^{36} эрг/сек. Высказывается предположение, что основная доля излучения может быть заперта внутри мощных ветровых структур, являющихся результатом сверхкритической аккреции. Существование таких структур следует из теории сверхкритической аккреции, построенной Шакурой и Сюняевым в 1973 году [1],

[3] *W. Brinkmann, T. Kotani, N. Kawai.* XMM-Newton observations of SS 433 I. EPIC spectral analysis // *A&A.* 2005. — Vol. 431. — Pp. 575–586.

и современных гидродинамических расчетов. Учитывая изначально высокую светимость, такое излучение может отражаться на внешних частях ветра или канала в ветре, и, таким образом, давать вклад в рентгеновский спектр SS 433.

В *разделе 1.2* освещаются этапы обработки рентгеновских данных, полученных обсерваторией XMM-Newton, которые имеются в публичном доступе. Также приводятся критерии отбора данных, соответствующих целям наших исследований. Например, для анализа были выбраны внезатменные спектры в близких орбитальных фазах.

В *разделе 1.3* строится модель рентгеновских струй на основе современных атомных баз данных и теоретических спектров горячей оптически прозрачной плазмы (APES/APED). В этой модели, кроме охлаждения за счет расширения, учтены потери энергии с использованием функции охлаждения плазмы, учитывающей излучение как в континууме, так и в линиях.

Обсуждаются возможные значения параметров на основе известных наблюдательных данных. Основными параметрами, которые определяют физическое состояние струй, являются плотность $n(r_0)$ и температура $\theta_0(r_0)$ видимого основания струи, где r_0 — это расстояние между видимым наблюдателю основанием струи и компактным объектом (радиус основания струи). Плотность зависит от темпа потери массы \dot{M}_j , а также угла раствора струи ϑ_j . Последние два параметра хорошо известны из независимых исследований SS 433 в разных диапазонах энергий. В частности, угол раствора был с высокой точностью измерен в оптических исследованиях, а рентгеновские наблюдения только подтверждают это значение.

Кроме того, в этом разделе указана принципиальная разница в подходе к исследованию рентгеновских спектров по сравнению с другими авторами. В нашем исследовании мы не пытаемся определить кинетическую светимость струй (или темп потери массы) из анализа спектров, как это делалось другими авторами, мы полагаем, что $L_{\text{kin}} = 10^{39}$ эрг/сек и $2\vartheta_j = 1.5^\circ$ являются известными. Такой подход позволяет избавиться от дополнительных степеней свободы при моделировании спектров и сосредоточить свое внимание на физической сути модели и дополнительных компонентах спектра SS 433.

В *разделе 1.4* проводится диагностика плазмы в струях SS 433 по линиям

приближающейся к наблюдателю струи Fe XXV и Fe XXVI. Такой метод был применен ранее, например, в работе Котани и др [4]. Отношение потоков линий железа и их абсолютные значения, главным образом, зависят от температуры и плотности на видимом наблюдателю радиусе основания струи. Таким образом, если мы знаем потоки в линиях Fe XXV и Fe XXVI, то можем надежно оценить параметры струи, не привлекая моделирование всего спектра SS 433.

Потоки в линиях высокоионизированного железа определяются с помощью простой модели континуума в виде степенного спектра, а сами линии представляются в виде функций Гаусса. Далее, с помощью разработанной нами модели воспроизводятся найденные таким способом значения потоков и делаются предварительные оценки параметров струй. Также проводится исследование устойчивости модели к вариациям фиксированных параметров, например темпа потери массы (или кинетической светимости). Итогом исследования становится вывод, что такие вариации мало влияют на результат моделирования.

Также показывается, что модель струй обладает следующим свойством: если изменить все параметры таким образом, что значение выражения $\dot{M}_j^2/\Omega_j r_0$, где $\Omega_j = 2\pi(1 - \cos \vartheta_j)$, останется неизменным, то и модель струй, и её спектр останутся практически неизменными.

В *разделе 1.5* на основе нашей модели струй и оценок параметров рассчитывается спектр струй во всем диапазоне XMM-Newton. Показывается и обосновывается необходимость учета двух дополнительных компонентов в спектре SS 433, которые не могут быть объяснены на основе одной модели струй. Показано, что существует дополнительный компонент не только с жесткой стороны спектра, но и в мягкой части диапазона XMM-Newton.

В **главе 2** изучаются дополнительные компоненты в наблюдаемом рентгеновском спектре SS 433, проводится анализ спектров во всем диапазоне XMM-Newton с использованием модели отражения, находятся параметры модели отражения и приводится интерпретация полученных результатов.

В *разделе 2.1* обсуждается природа дополнительных компонентов в спектре SS 433 и приводятся сильные аргументы в пользу модели отражения излуче-

[4] T. Kotani, N. Kawai, M. Matsuoka, W. Brinkmann. Iron-Line Diagnostics of the Jets of SS 433 // PASJ. 1996. — Vol. 46. — Pp. 619–629.

ния, сформированного во внутренних частях диска SS 433. Помимо теоретических предпосылок существования отраженного компонента в спектре, которые обсуждались в **главе 1**, имеются также наблюдательные факты, свидетельствующие в пользу данного предположения. В наблюдаемом спектре SS 433 присутствуют флуоресцентные и рекомбинационные линии квази-нейтрального железа, а также широкий абсорбционный компонент, расположенный в области ~ 8 кэВ. Эти детали не могут быть объяснены в рамках одной только модели струй. Они являются индикаторами отраженного от полуионизованной среды излучения.

В *разделе 2.2* проводится анализ рентгеновских спектров с использованием модели отражения от частично ионизованной среды Росса и др [5]. Поскольку форма отражаемого спектра неизвестна, спектр XMM-Newton делится на четыре диапазона 0.8–2, 2–4, 4–7 и 7–12 кэВ, в каждом из которых поиск оптимальных параметров модели отражения проводится независимо, но при единой модели струй. Дополнительное излучение в мягком диапазоне 0.8–2.0 кэВ представляется в виде чернотельного спектра.

Согласно результатам анализа, применение совместной модели отражения и струй дает хорошие результаты, в особенности это касается жесткой части спектра. Удаётся описать не только излучение в непрерывном спектре, но и такие особенности, как флуоресцентные и рекомбинационные линии высокоионизованного железа, а также широкую абсорбционную особенность на ~ 8 кэВ. Знание формы континуального излучения позволяет на данном этапе сделать точные (окончательные) оценки параметров струй.

Также отмечается, что в трех диапазонах, в которых присутствует компонент отражения, получились близкие значения параметра ионизации отражающей среды $\xi \approx 300$. Кроме того, приведены параметры падающего на отражающую среду излучения, в частности фотонный спектральный индекс Γ , который получился равным ≈ 1 в диапазоне 2–4 кэВ, $\Gamma = 1.6$ в диапазоне 4–7 кэВ и $\Gamma = 2$ в диапазоне 7–12 кэВ.

В *разделе 2.3* обсуждаются возможные интерпретации полученных резуль-

[5] R. R. Ross, A. C. Fabian, A. J. Young. X-ray reflection spectra from ionized slabs // *MNRAS*. 1999. — Vol. 306. — Pp. 461–466.

татов. Показатель степени отражаемого спектра на высоких энергиях $\Gamma = 2$ говорит о том, что спектральное распределение энергии $\nu F\nu$ является плоским. Такой тип спектра может формироваться в самых внутренних областях сверхкритического аккреционного диска. Отражение такого излучения от внешних частей канала может отвечать за жесткий дополнительный компонент в спектре SS 433.

Высказывается предположение, что мягкий дополнительный компонент может являться собственным излучением канала, также имеются и другие возможности, например, облакообразование в струе, возникающее при охлаждении плазмы до температур ниже ~ 100 эВ.

Глава 4 посвящена анализу оптических спектров SS 433, полученных на 8-метровом телескопе Subaru. В *пункте 4.1* приводится постановка задачи и обсуждение аргументов в пользу того, что в системе SS 433 должен существовать сильный прогрев звезды-донора ультрафиолетовым излучением. Например, светимость ультрафиолетового источника оценивается в 10^{40} эрг/сек, такое мощное излучение может прогреть атмосферу звезды до температуры ~ 20000 К, в то время как непрогретая сторона звезды, согласно исследованиями Черепашука и др. [6], имеет температуру ~ 9000 К. Как было показано Антохиной и др. [7], эффект прогрева может повлиять на форму профилей абсорбционных линий звезды-донора, что в свою очередь может привести к искажению истинной амплитуды кривой лучевых скоростей. Амплитуда кривой лучевых скоростей является важным параметром, поскольку позволяет оценить массы компонентов системы. Неправильная оценка амплитуды лучевых скоростей приведет к неправильной оценке массы компонентов.

В *разделе 4.2* обсуждаются наблюдательные данные, полученные на 8-метровом

[6] Cherepashchuk, A. M. and Sunyaev, R. A. and Fabrika, S. N. and Postnov, K. A. and Molkov, S. V. and Barsukova, E. A. and Antokhina, E. A. and Irmambetova, T. R. and Panchenko, I. E. and Seifina, E. V. and Shakura, N. I. and Timokhin, A. N. and Bikmaev, I. F. and Sakhibullin, N. A. and Aslan, Z. and Khamitov, I. and Pramsky, A. G. and Sholukhova, O. and Gnedin, Y. N. and Arkharov, A. A. and Larionov, V. M. INTEGRAL observations of SS433: Results of a coordinated campaign. // *A & A*. — 2005. — Vol. 437. — Pp. 561–573.

[7] E. A. Antokhina, A. M. Cherepashchuk, V. V. Shimanskii. Radial-Velocity Curves and Theoretical Spectral-Line Profiles of the Components of Low-Mass Close X-ray Binary Systems // *Astronomy Reports*. 2005. — Vol. 49. — Pp. 109–126

телескопе Subaru.

В *разделе 4.3* приводится процедура подготовки средних профилей линий, а также осуществляется классификация по двум группам: сильные линии, имеющие профили с заметными эмиссионными компонентами, и слабые линии, в которых эмиссионных компонентов нет. Также оказалось, что сильные линии принадлежат в основном ионам, а слабые линии – нейтральным атомам.

В *разделе 4.4* строится простая модель прогрева звезды, для того чтобы проанализировать средние профили. Вводятся три области на поверхности диска: область I – непрогретая сторона, которая дает чистый профиль поглощения, область II – прогретая сторона звезды, которая дает профиль излучения, и, наконец, область III, в которой линии не формируются из-за очень высокой температуры.

Также введена оболочка вокруг звезды, дающая в прогреваемых частях эмиссионный профиль линии. Эта оболочка была обнаружена Филипповой и др. [8] по поведению рентгеновских спектров в затмении. Согласно результатам этой работы, вокруг звезды присутствует плотный газ, который, по всей видимости, является мощным низкоскоростным звездным ветром. Размер оболочки может превышать размер звезды-донора на 10–20%. Излучение в прогретых частях оболочки может порождать эмиссионные компоненты сильных линий.

Расчетные профили, построенные на основе этой модели, в общих чертах хорошо описывают наблюдаемые профили как сильных, так и слабых линий. Показано, что изменение интенсивности эмиссионных компонентов сильных линий на протяжении четырех ночей наблюдений хорошо согласуется с предположением о формировании этих компонентов в оболочке вокруг звезды.

Слабые линии не формируются в оболочке, поскольку в их профилях практически отсутствуют эмиссионные компоненты, а небольшие искажения на краях обусловлены прогревом поверхности звезды и излучением газового потока. Прогрев звезды оказывает заметное влияние на эволюцию профиля, он увеличивает амплитуду смещения линии в процессе орбитального движения.

В *разделе 4.5* исследуется влияние эффектов прогрева на кривую лучевых

[8] E. Filippova, M. Revnivtsev, S. Fabrika et al. Diagnostics of SS433 with the RXTE // *A&A*. 2006. — Vol. 460. — Pp. 125–131

скоростей. Расчетные профили, полученные с помощью нашей простой модели прогрева, хорошо описывают не только форму и относительное изменение интенсивности компонентов, но и движение линий. Кривая лучевых скоростей сильных линий сильно искажена эмиссионными компонентами, поэтому её нельзя использовать для оценки масс компонентов. В случае слабых линий основное влияние оказывает эффект прогрева, который искажает кривую лучевых скоростей. Анализ показывает, что за счет прогрева увеличивается амплитуда лучевой скорости, примерно на ~ 20 км/сек. Наблюдаемая амплитуда донора, искаженная эффектами прогрева, равна 60 км/сек, а истинная 40 км/сек. Отсюда делается вывод, что учет влияния эффекта прогрева звезды-донора необходим при интерпретации кривой лучевых скоростей и оценки масс компонентов с системе SS 433.

В разделе 4.6 обсуждаются результаты исследования средних профилей. И приводятся оценки масс компонентов с учетом влияния эффекта прогрева. Без учета эффектов прогрева массы компонентов, звезды-донора и релятивистской звезды, соответственно равны: $M_O = 12.4 \pm 1.9 M_\odot$ и $M_X = 4.3 \pm 0.6 M_\odot$. Если же учесть влияние эффектов прогрева на кривую лучевых скоростей, то это приводит к меньшим значениям: $M_O = 10.4_{-1.9}^{+2.3} M_\odot$ и $M_X = 2.5_{-0.6}^{+0.7} M_\odot$. Таким образом, компактный объект в SS 433 оказывается маломассивной черной дырой.