

На правах рукописи

*СЕМЕНА Андрей Николаевич*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИИ  
АККРЕЦИОННЫХ КОЛОНОК  
НА ПОВЕРХНОСТИ  
МАГНИТНЫХ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ  
ПО СВОЙСТВАМ АПЕРИОДИЧЕСКОЙ  
ПЕРЕМЕННОСТИ ИХ ЯРКОСТИ**

Специальность: 01.03.02 — астрофизика и звёздная астрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук



Москва  
2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук  
*Ревнивцев Михаил Геннадьевич*  
ИКИ РАН

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН

*Бисикало Дмитрий Валерьевич*  
Институт астрономии Российской академии наук

доктор физико-математических наук

*Сулейманов Валерий Фиалович*  
Казанский (Приволжский) федеральный университет

**Ведущая организация:**

Государственный астрономический институт  
имени П. К. Штернберга Московского государственного  
университета имени М. В. Ломоносова

Защита диссертации состоится **26 декабря 2014 года в 11 часов**  
на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при ИКИ  
РАН по адресу: Москва, Профсоюзная ул., 84/32, ИКИ РАН,  
подъезд А-2, конференц-зал, 2-й этаж, секция А-3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН

Автореферат разослан 19 ноября 2014 года

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 002.113.02  
кандидат физико-математических наук



А. Ю. Ткаченко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Падение (аккреция) вещества на компактные объекты является одним из наиболее эффективных способов выделения энергии. При падении вещества на нейтронные звезды и чёрные дыры может выделяться энергия, составляющая десятки процентов от энергии покоя падающего вещества, при падении на белые карлики — энергия лишь в несколько раз меньше, чем выделяемая при термоядерном сгорании этого же вещества. Это означает, что аккреционный поток на ещё достаточно значительных расстояниях от компактного объекта сильно разогревается, достигает температур в десятки тысяч (а в некоторых случаях и миллионов) градусов и превращается в высокопроводящую плазму. Наличие магнитного поля компактного объекта может существенным образом повлиять на всю конфигурацию аккреционного течения. Высокопроводящая плазма аккреционного потока может быть остановлена магнитным полем компактного объекта и перенаправлена на его магнитные полюса. Считается, что в этом случае у магнитных полюсов компактного объекта образуется небольшая аккреционная колонка, в которой выделяется основная часть гравитационной энергии вещества. Эта аккреционная колонка фактически является ярким пятном, создающим вариации яркости потока на частотах вращения компактного объекта (эффект маяка).

Аккрецирующие магнитные компактные объекты были обнаружены в тесных двойных звёздных системах и с тех пор находятся под пристальным вниманием астрофизиков. Интерес к исследованию таких объектов связан с экстремальностью значений физических

параметров, при которых происходит взаимодействие вещества и магнитного поля. Так, например, аккрецирующие магнитные белые карлики имеют магнитные поля до десятков мегагауссов, а аккрецирующее вещество может иметь температуры до миллионов градусов, что близко к условиям в экспериментальных установках по управляемому термоядерному синтезу.

Несмотря на то, что само предсказание существования аккреционных колонок у магнитных аккрецирующих компактных объектов было сделано достаточно давно, их геометрия и структура до сих пор слабо изучены. Попытки определить геометрию аккреционных колонок по профилям импульса излучения этих систем не дают однозначных ответов. Определить геометрию аккреционной колонки, используя её затмение звездой-компаньоном в двойной системе, не представляется возможным. В случае нейтронных звёзд размер аккреционных колонок слишком мал по сравнению с размером звезды-компаньона. В случае аккрецирующих магнитных белых карликов попытки определить размер основания аккреционной колонки делаются, однако, метод затменной томографии позволяет определить не общую площадь пятна, а лишь его максимальный размер.

С другой стороны, определение размеров аккреционных колонок очень важно как для дальнейшего понимания их структуры, физических процессов, определяющих их излучение и т.д., так и для понимания процесса проникновения замагниченной плазмы в магнитосферу компактных объектов. Считается, что аккрецирующий поток, останавливаемый магнитным полем компактного объекта, в дальнейшем тычет строго вдоль магнитных силовых линий и, следовательно, толщина аккреционного потока на границе магнитосферы должна быть связана с толщиной аккреционной колонки на поверхности компактного объекта. Таким образом, оказывается, что, измеряя размеры аккреционной колонки на поверхности компактного объекта, можно измерить параметры диффузионного проникновения замагниченной плазмы в магнитосферу, скорость дрейфа плазмы поперёк магнитного поля и т.д.

Ввиду большой удалённости от нас компактных объектов, недоступных для нашего изучения, их угловые размеры настолько малы, что в настоящее время нет никакой возможности определения геометрических размеров частей системы при помощи анализа прямых изображений. Нам остаётся для анализа только два типа информации: спектральная и временная. В настоящей диссертационной работе предложен метод использования характеристик аперииоди-

ческой переменности яркости магнитных аккрецирующих белых карликов для получения оценок на размеры аккреционных колонок на их поверхностях. Проведены теоретические гидродинамические расчёты аккреционного течения в колонках, а также, на основе анализа массива данных наблюдений рентгеновского и оптического диапазонов, получены ограничения на размер аккреционной колонки и глубину проникновения плазмы в магнитосферу белого карлика.

## **Цель работы**

Целью работы являлась разработка метода определения геометрии аккреционных колонок на поверхности аккрецирующих магнитных белых карликов и демонстрация его применения на некоторых реальных системах. Для демонстрации работоспособности метода были проведены численные расчёты гидродинамического течения у поверхности компактного объекта. Предложенный метод был апробирован на данных наблюдений ряда аккрецирующих магнитных белых карликов в рентгеновском (при помощи рентгеновских обсерваторий RXTE и XMM) и оптическом (при помощи быстрых ПЗС-фотометров, на российско-турецком 1,5-метровом телескопе РТТ-150 и телескопах Южноафриканской астрономической обсерватории SAAO 1,9 м, SALT 12 м) спектральных диапазонах. Получены важные ограничения на площадь сечения аккреционной колонки на поверхности белого карлика в двойной системе EX Нуа, а также ограничения на глубину проникновения горячей плазмы аккреционного диска в магнитосферу компактного объекта.

## **Научная новизна**

Все результаты, представленные к защите, являются новыми.

В работе показано, что временная переменности темпа аккреции вещества на поверхность белого карлика подавляется на высоких Фурье частотах при высвечивании энергии падающего вещества из-за конечного времени остывания вещества в аккреционной колонке. При помощи численного моделирования продемонстрировано, что по особенностям в спектрах мощности кривых блеска магнитных аккрецирующих белых карликов можно оценить время остывания и плотность вещества в аккреционных колонках у их поверхности.

Измерения временной переменности оптической яркости в двойной системе ЕХ Нуа позволили поставить сильное ограничение сверху на площадь сечения аккреционной колонки на поверхности белого карлика  $A \lesssim 2,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$  и высоту, на которой расположена ударная волна над поверхностью белого карлика:  $h < 2 \cdot 10^7 \text{ см}$ . Измеренная площадь сечения аккреционных колонок оказалась значительно меньше той, что обычно используется в литературе при построении моделей систем с магнитными аккреторами.

С использованием данных по длительности входа и выхода в рентгеновское затмение, позволивших оценить протяжённость аккреционной колонки на поверхности белого карлика ЕХ Hydrae, была получена оценка толщины аккреционной колонки («шторки»)  $< 10^6 \text{ см}$ . Эта оценка была транслирована в толщину замороженности вещества диска в магнитосферу белого карлика на границе магнитосферы  $\delta r/r_m \approx 3 \cdot 10^{-3}$ , где  $r_m$  — радиус магнитосферы.

## Научная и практическая ценность

Предложенный метод измерения характерного времени остывания вещества может быть использован для определения физических свойств вещества в аккреционных колонках магнитных аккреторов.

Полученные измерения размеров и формы аккреционного течения могут быть применены в моделях спектров и профилей импульсов магнитных аккреторов. Площадь аккреционного канала в значительной степени определяет форму спектра и параметры течения вещества у поверхности нейтронных звёзд и белых карликов.

Измерения толщины замороженности вещества аккреционного диска в магнитосферу белого карлика могут быть использованы для оценки скорости динамической магнитной диффузии в аккреционных дисках. Параметр магнитной диффузии широко используется в теории аккреционных дисков для описания механизма магнитной вязкости, передачи углового момента между звездой и диском, формированием истекающего ветра.

## Основные положения, выносимые на защиту

1. Предложен метод определения физических параметров вещества в аккреционной колонке (плотности) и её геометрических размеров у магнитных аккрецирующих белых карликов. Метод

основан на измерении времени остывания вещества в аккреционной колонке. Конечное время остывания вещества приводит к замыванию быстрых вариаций яркости аккрецирующего белого карлика. Работа метода продемонстрирована при помощи одномерных и двумерных гидродинамических расчётов.

2. Метод оценки параметров плазмы в колонке применён к промежуточному полярю LS Peg при помощи оптических наблюдений с высоким временным разрешением на телескопе РТТ-150. С помощью оптических наблюдений получены верхние пределы на квазипериодические осцилляции в диапазоне частот 0,02...3 Гц и верхний предел на время замывания быстрых вариаций яркости белого карлика, т.е. на время остывания вещества в аккреционной колонке LS Peg  $\tau \lesssim 10$  с. Верхний предел на время остывания определяет верхний предел на площадь аккреционной колонки.
3. На основе анализа переменности яркости аккрецирующего магнитного белого карлика в системе EX Hya по данным рентгеновских (орбитальные обсерватории RXTE, XMM Newton) и оптических телескопов (SAAO/SALT, SAAO/1.9m) получены оценки на время остывания плазмы в горячей зоне аккреционной колонки. Ограничение на время остывания  $< 0,3$  с позволило получить нижний предел на удельный темп аккреции вещества  $M/A > 3$  г/с/см<sup>2</sup> и верхний предел на площадь аккреционного канала  $A \lesssim 1,3 \cdot 10^{15}$  см<sup>2</sup>.
4. С помощью ограничений на площадь аккреционного канала и измерений протяжённости излучающей области, получены оценки на толщину аккреционной колонки/шторки  $l \lesssim 10^6$  см на поверхности магнитного белого карлика в двойной системе EX Hya. Измеренное значение толщины аккреционной колонки/шторки на поверхности белого карлика позволяет сделать оценку глубины вмораживания аккрецирующего вещества на границе магнитосферы белого карлика  $\delta r/r < 3 \cdot 10^{-3}$ .

## Апробация работы

Результаты работы докладывались на семинарах ИКИ РАН 2011–2014 гг., семинаре в Института астрономии Российской академии наук; международных конференциях Physics of Neutron Stars, Санкт-Петербург, 2014; 40<sup>th</sup> COSPAR, Москва, 2014; The Golden Age of Cataclysmic Variables, Палермо, Италия, 2013; «Космология

и релятивистская астрофизика» (Зельдович-100); российских конференциях «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», 2011, 2012, 2013; конференции молодых учёных в Московском физико-техническом институте (государственном университете) (МФТИ), Москва, 2013; конференции «Наблюдаемые проявления эволюции звёзд» в Специальной астрофизической обсерватории, Нижний Архыз, 2012.

## **Объём диссертации**

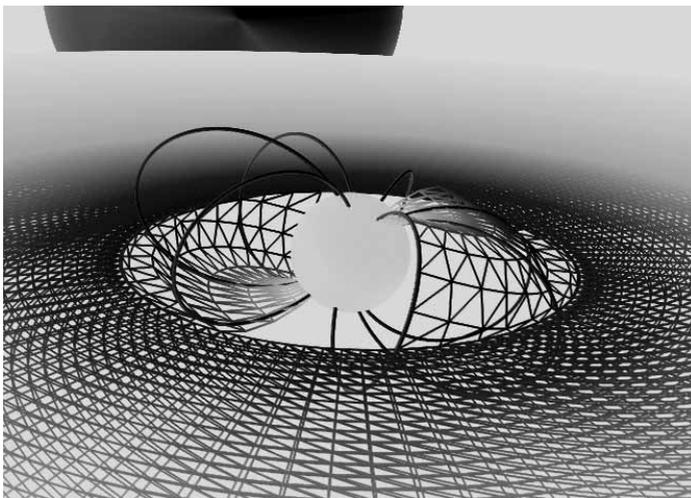
Диссертация состоит из пяти глав и списка цитируемой литературы. Объём диссертации 114 страниц, диссертация содержит 50 рисунков и 3 таблицы. Список литературы состоит из 231 публикации.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Первая глава* — Введение. В первой части первой главы описываются проблемы, на решение которых направлена диссертационная работа, обосновывается её актуальность и ставятся цели работы.

Остальной объём главы посвящён описанию тесных двойных систем, катаклизмических переменных и аккреционного течения в тесных двойных системах. Особое внимание уделено течению вещества, захваченного магнитным полем аккретора. Рассматриваются имеющиеся методы определения параметров магнитных аккрецирующих белых карликов по наблюдаемым энергетическим спектрам и временной переменности их кривых блеска. Продемонстрированы недостатки метода определения геометрических размеров аккреционного течения вблизи поверхности белых карликов путём затменной томографии. Описаны модели формирования временной переменности светимости яркости систем с аккрецией. Описан ряд методов, позволяющих по временной переменности измерять параметры аккреционного течения в тесных двойных системах. Демонстрируются основные особенности переменности кривых блеска магнитных аккрецирующих белых карликов, показан широкополосный спектр временной переменности, наблюдаемый в тесных двойных системах с аккрецией.

Изложена проблема формирования рентгеновской кривой блеска магнитных аккрецирующих белых карликов при остывании вещества в аккреционной колонке между поверхностью белого

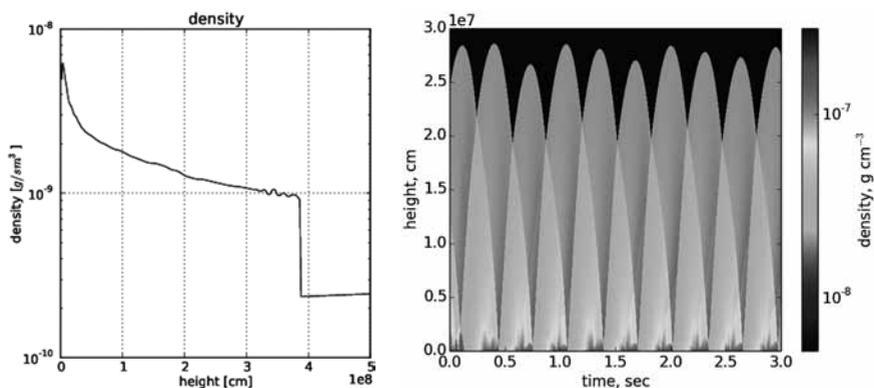


**Рис. 1.** Схематичное изображение тесной двойной системы с аккрецирующим белым карликом, обладающим не очень сильным ( $<1...10$  МГс) магнитным полем. Умеренное значение магнитного поля позволяет формироваться аккреционному диску вокруг белого карлика. Вещество аккреционного диска останавливается на границе магнитосферы (показана силовыми линиями магнитного поля) и канализируется на магнитные полюса белого карлика, формируя аккреционные колонки/«шторки». Разработка методов определения геометрии (толщина, высота) аккреционной колонки является основной темой данной диссертации

карлика и стоячей ударной волной. Исследуется возможность измерения свойств аккреционного течения у поверхности белых карликов по временной переменности их светимости (рис. 1). Качественно демонстрируется связь между временной переменностью рентгеновской светимости вещества в аккреционной колонке под ударной волной и темпом аккреции. Качественно продемонстрировано подавление переменности светимости на частотах выше обратного времени остывания вещества.

*Вторая глава* посвящена описанию численного моделирования гидродинамического течения в аккреционном канале белого карлика. Продемонстрировано, что спектр мощности переменности кривой светимости вещества, остывающего в аккреционном канале, отличается от спектра мощности переменности поступающего туда темпа аккреции. Описан метод численного моделирования. Описан

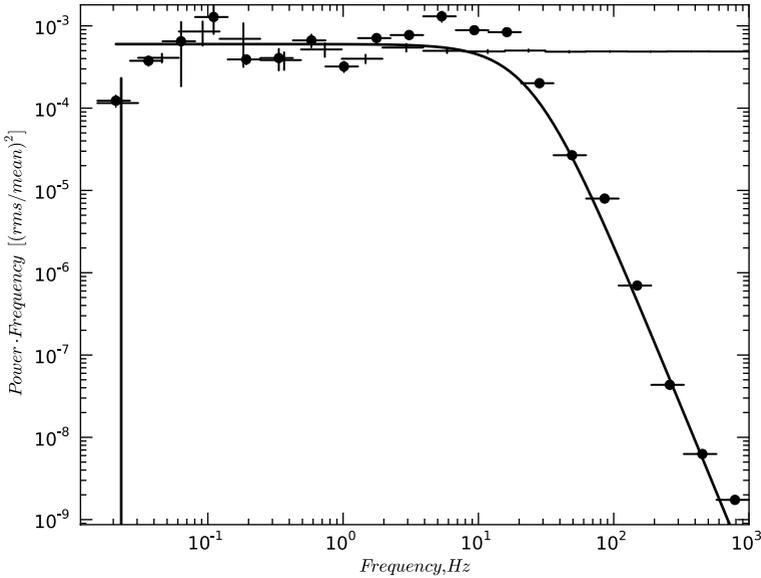
метод создания темпа аккреции с определённым спектром мощности при моделировании течения в аккреционном канале. Описаны основные проблемы численного моделирования течения в аккреционной колонке: в связи с ростом плотности вещества к дну колонки и ростом эффективности оптически тонких потерь с плотностью в расчёте могут развиваться численные неустойчивости на масштабе одной ячейки. Описана реализация численного расчёта, позволяющая избежать возникновения численных неустойчивостей на временах значительно больших времени остывания вещества под ударной волной (рис. 2). В данной реализации специальным образом выбирается временной шаг расчёта и используются граничные условия со сливом энергии и массы на дне решётки. Как и ожидалось, в компьютерных расчётах, учитывающих охлаждение только за счёт тормозного излучения плазмы, возникала тепловая неустойчивость, приводящая к осцилляциям аккреционной колонки. Для подавления этой тепловой неустойчивости использовалась модифицированная функция остывания вещества с аддитивной компонентой, имитирующей потери энергии на циклотронное излучение. Было продемонстрировано, что на частотах выше обратного времени



**Рис. 2.** Слева: профиль плотности плазмы в аккреционной колонке у поверхности аккрецирующего магнитного белого карлика в некоторый момент времени. Скачок плотности показывает положение ударной волны. Справа: динамическое изображение профиля плотности в аккреционной колонке. Цвет отражает значение плотности, по оси  $X$  отложено время, по оси  $Y$  — высота над поверхностью белого карлика. Хорошо видны осцилляции положения ударной волны из-за глобальной тепловой неустойчивости

остывания вещества в колонке происходит подавление временной переменности светимости по сравнению с переменностью входящего темпа аккреции (рис. 3).

Численное моделирование нестационарного течения проводилось для простой геометрии аккреционной колонки с учётом модифицированной функции остывания. В реальных аккреционных колонках вещество тычет в сужающемся аккреционном канале. Для получения параметров аккреционного течения из времени остывания была построена численная модель стационарного течения вещества в канале, сформированном дипольным полем компактного объекта. В стационарном решении не учитывались циклотронные потери, а остывание рассчитывалось, исходя из табличных значений функции остывания для оптически тонкой плазмы SPEX; учитывалась гравитация белого карлика и кривизна аккреционного канала.



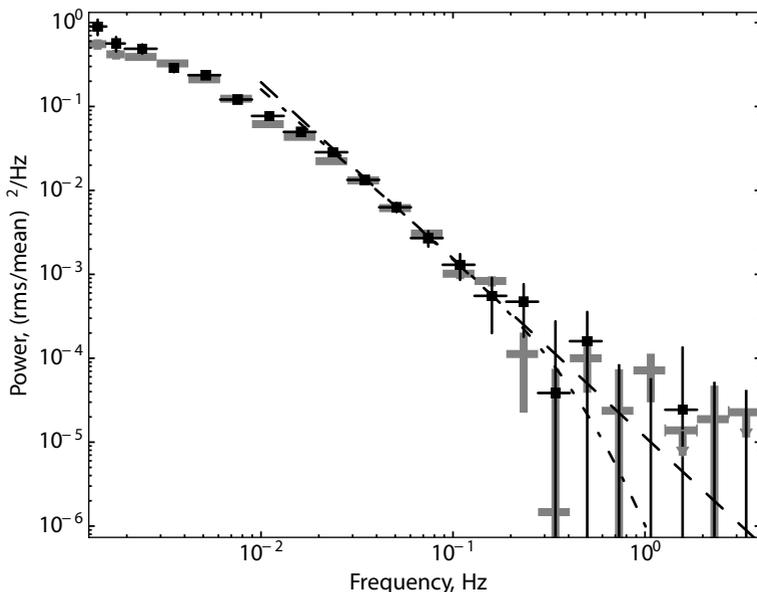
**Рис. 3.** Иллюстрация сглаживания переменности яркости аккреционной колонки за счёт конечного времени остывания вещества в ней. Крестами показан спектр мощности переменности темпа поступления вещества в аккреционную колонку, серыми кружками — спектр мощности переменности яркости аккреционной колонки, полученной в нашем гидродинамическом расчёте. Сплошная кривая — аналитическая аппроксимация этих точек

В *третьей главе* описаны методы получения спектров мощности реальных магнитных аккрецирующих белых карликов и их модельной аппроксимации. Значения мощности переменности, получаемые из индивидуальных сегментов оригинальной кривой блеска, являются случайными величинами с экспоненциальным распределением, и поэтому, строго говоря, их модельные аппроксимации не могут проводиться обычным методом минимизации  $\chi^2$ . Изложены методы модельных аппроксимаций спектров мощности переменности объектов с учётом правильных статистических распределений. В частности, описаны методы получения несмещённых оценок мощности переменности после усреднения по набору разных наблюдений, и оценки неопределённостей этих значений.

*Четвертая глава* посвящена исследованию свойств аперриодической переменности рентгеновского потока одного из самых ярких магнитных аккрецирующих белых карликов EX Hydrae при помощи орбитальных рентгеновских обсерваторий с самыми большими на настоящее время собирающими площадями XMM Newton и RXTE (рис. 4).

Прибор PCA обсерватории RXTE является коллимированным спектрометром большой эффективной площади, поэтому кроме потока рентгеновских фотонов от астрофизических источников, поток событий, регистрируемых этим прибором, содержит определённую долю скорости счета заряженных частиц килоэлектрон-вольтных энергий. Вклад этой скорости счета тем больше, чем слабее поток от астрофизического источника. Поток заряженных частиц, регистрируемый RXTE/PCA, нестационарный и обладает переменностью в широком диапазоне фурье-частот, поэтому при исследовании переменности яркости слабых рентгеновских источников необходимо учитывать возможность модуляции наблюдаемой скорости счета заряженными частицами. Для корректного учёта вклада этого сигнала была подробно исследована высокочастотная переменность фона заряженных частиц в приборе RXTE/PCA в наблюдениях «пустых» полей (с общим временем экспозиции около 4 Мс) и слабого непременного источника — скопления галактик.

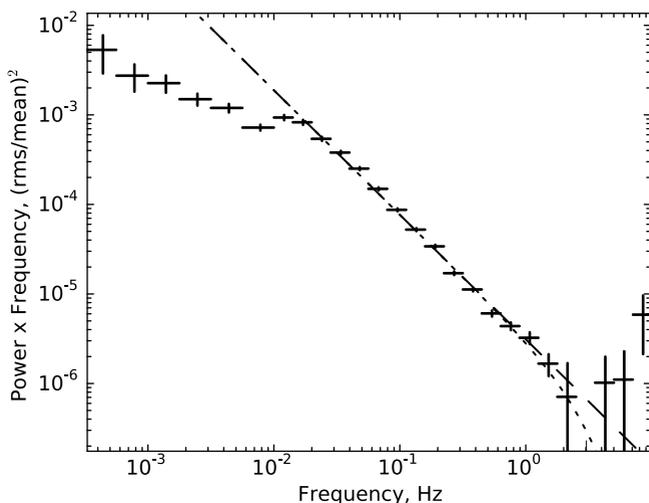
Анализ около 74 кс-наблюдений EX Hydrae обсерваторией XMM и около 89 кс-наблюдений обсерваторией RXTE позволил получить статистически значимый спектр мощности переменности яркости источника до частот около 0,2...0,3 Гц. Это позволило поставить нижний предел на частоту подавления аперриодической переменности темпа аккреции в кривой блеска  $f_{break} \lesssim 0,6$  Гц. Данное ограни-



**Рис. 4.** Спектр мощности переменности яркости аккреционной колонки у поверхности белого карлика в двойной системе EX Нуа по данным орбитальных рентгеновских обсерваторий. Крестами показаны результаты, полученные по данным обсерватории RXTE, сплошными квадратами — по данным обсерватории XMM-Newton. Штриховая кривая показывает аппроксимацию высокочастотной части спектра мощности степенным законом, пунктирная — с изломом на частоте 0,6 Гц, минимальной частоте слома, при которой аналитическая модель ещё совместима с результатами наблюдений

чение на частоту слома соответствует ограничению сверху на площадь сечения аккреционного канала  $A \lesssim 1,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^2$  (рис. 5).

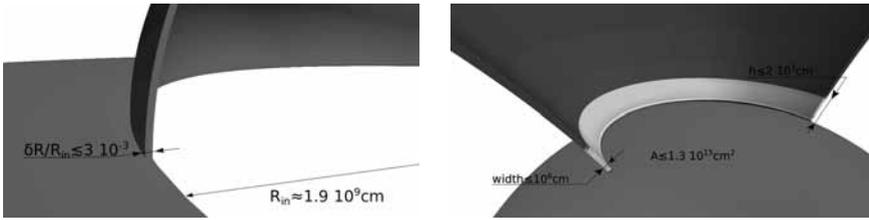
В *пятой главе* приводятся результаты измерений площади аккреционных колонок на поверхности белых карликов в системах LS Peg и EX Нуа по данным оптических наблюдений наземными телескопами. Приведены аргументы в пользу того, что свойства переменности яркости горячей зоны аккреционной колонки белого карлика могут наблюдаться не только в рентгеновском, но и в оптическом диапазоне. Это связано с тем, что значительная доля оптического потока системы с аккрецирующим магнитным белым карликом формируется в результате переработки рентгеновской



**Рис. 5.** Спектр мощности переменности оптической яркости EX Hya, полученный при помощи наблюдений на телескопах Южноафриканской астрономической обсерватории: 1,9-м телескопе и на 12-м телескопе SALT. Штриховой кривой показана аппроксимация высокочастотной части спектра мощности степенным законом без излома, пунктирной кривой показана аппроксимация спектра мощности степенным законом с изломом на частоте 3,5 Гц, минимальной частоте излома, при которой аналитическая модель ещё совместима с результатами наблюдений

светимости центрального объекта в атмосфере белого карлика и аккреционного диска. Для случая двойных систем EX Hya и LS Peg это продемонстрировано при помощи реальных наблюдений в этих спектральных диапазонах. Рассмотрены основные факторы, приводящие к модификации свойств переменности рентгеновской кривой блеска при переработке (рис. 6).

При помощи данных быстрых фотометрических наблюдений телескопа РГТ-150 удалось поставить ограничения на время остывания вещества в аккреционной колонке LS Peg порядка 10 с. При помощи наблюдений 12-м телескопом Южноафриканской астрономической обсерватории удалось поставить существенные ограничения на площадь сечения аккреционного канала в двойной системе EX Hydrae ( $A \lesssim 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$ ). Благодаря тому, что EX Hydrae один из наиболее хорошо изученных промежуточных поляров, для которого измерены наклонение, расстояние, массы компонент и темп аккреции, из полученных ограничений на площадь аккреционного



**Рис. 6.** Схематическое изображение аккреционного канала в системе EX Нуа с указанием геометрических размеров, у края аккреционного диска (левая панель) и у поверхности белого карлика (правая панель). На правой панели колонка и белый карлик нарисованы не в масштабе — колонка должна быть в 10 раз уже и в 5 раз ниже

канала удалось поставить ограничения на глубину вмороженности плазмы в магнитосферу белого карлика  $\delta r/r < 3 \cdot 10^{-3}$  (см. рис. 6). Показано, что при таком значении толщины вмороженности плазмы на границе магнитосферы аккрецирующей нейтронной звезды, обладающей магнитосферой такого же размера, доля поверхности нейтронной звезды под аккреционной колонкой должна быть менее  $f < 10^{-6}$ .

### Список публикаций по теме диссертации

1. *Semena A.N., Revnivtsev M.G., Buckley D.A.H., Kotze M.M., Khabibullin I.I., Breytenbach H., Gulbis A.A.S., Coppejans R., Potter S.B.* On the area of accretion curtains from fast aperiodic time variability of the intermediate polar EX Нуа // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*. 2014. V. 442. P. 1123–1132. doi:10.1093/mnras/stu897. (Семена А.Н., Ревнивцев М.Г., Бакли Д.А., Котзе М.М. Хабибуллин И.И. и др. Определение площади аккреционных колонок промежуточного полюра EX Нуа по свойствам аperiодической переменности его яркости.)
2. *Семена А.Н., Ревнивцев М.Г.* Аperiодическая переменность яркости EX Нуа в рентгеновском диапазоне и площадь основания аккреционной колонки на поверхности белого карлика // *Письма в Астрономич. журн.* 2014. Т. 40. С. 529.
3. *Семена А.Н., Ревнивцев М.Г., Хамитов И.М., Буренин Р.А., Ак Т., Эжер З., Павлинский М.Н.* Ограничения на параметры

аккреционной колонки промежуточного поляра LS Pegasi по спектру мощности оптической кривой блеска // Письма в *Астрономич. журн.* 2013. Т. 39. С. 227.

4. *Семена А. Н., Ревнищев М. Г.* Оценка параметров плазмы в аккреционной колонке у поверхности аккрецирующих белых карликов по свойствам переменности их яркости // Письма в *Астрономич. журн.* 2012. Т. 38. С. 321.

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН  
Москва, 117997, Профсоюзная ул., 84/32

Подписано к печати 10.11.2014 г.

Заказ 3339

Формат 70×108/32

Тираж 100

0,98 уч.-изд. л.