

на правах рукописи

Семена Андрей Николаевич

Определение геометрии аккреционных колонок на
поверхности магнитных белых карликов по свойствам
апериодической переменности их яркости

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, 2014

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Михаил Геннадьевич Ревнивцев (ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
член-корреспондент РАН

Бисикало Дмитрий Валерьевич
(Институт астрономии РАН)

доктор физико-математических наук

В.Ф.Сулейманов
(Казанский федеральный университет)

Ведущая организация:

Государственный Астрономический Институт им. П.К.Штернберга МГУ

Защита диссертации состоится 26 декабря 2014 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.113.02 при Институте космических исследований РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 19 ноября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 002.113.02

кандидат физико-математических наук

А.Ю.Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Падение (аккреция) вещества на компактные объекты является одним из наиболее эффективных способов выделения энергии. При падении вещества на нейтронные звезды и черные дыры может выделяться энергия, составляющая десятки процентов от энергии покоя падающего вещества, при падении на белые карлики - энергия лишь в несколько раз меньшая, чем выделяемая при термоядерном сгорании этого же вещества. Это означает, что аккреционный поток на еще 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 звездных 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 МГс, 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 ее затмение звездой-компаньоном в двойной системе, не представляется возможным. В случае нейтронных звезд 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 течет 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 поперек магнитного поля и т.д.

Ввиду большой удаленности от нас компактных объектов, доступных 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 остается для анализа только два типа информации: спектральная и временная. В настоящей диссертационной работе предложен метод использования характеристик аperiodической переменности яркости магнитных аккрецирующих белых карликов для получения оценок на размеры аккреционных колонок на их поверхностях. Проведены теоретические гидродинамические расчеты 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 расчеты 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 Телескопе 1.5м PTT150 и телескопах Южноафриканской астрономической обсерватории SAAO1.9м, SALT 12м) 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 EX Нуа позволили поставить сильное ограничение сверху на площадь сечения аккреционной колонки на поверхности белого карлика $A \lesssim 2.6 \times 10^{15} \text{ см}^2$ и высоту, на которой расположена ударная волна над поверхностью белого карлика: $h < 2 \times 10^7 \text{ см}$. 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 протяженность аккреционной колонки на поверхности белого карлика EX Нудгае, была получена оценка толщины аккреционной колонки ("шторки") $< 10^6 \text{ см}$. Эта оценка была транслирована в толщину вмороженности вещества диска в магнитосферу белого карлика на границе магнитосферы $\delta r/r_m \approx 3 \times 10^{-3}$, 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 звезд и белых карликов.

Измерения толщины вмороженности 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 ее 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 расчетов.

2. Метод оценки параметров плазмы в колонке применен к промежуточному полярю LS Peg при помощи оптических наблюдений с высоким временным разрешением на телескопе РТТ150. С помощью оптических наблюдений получены верхние пределы на квазипериодические осцилляции в диапазоне частот 0.02-3 Гц и верхний предел на время замыкания быстрых вариаций яркости белого карлика, т.е. на время остывания вещества в аккреционной колонке LS Peg $\tau \lesssim 10$ секунд. 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 секунд позволило получить нижний предел на удельный темп аккреции вещества $\dot{M}/A > 3$ г/сек/см² и верхний предел на площадь аккреционного канала $A \lesssim 1.3 \times 10^{15}$ см².
4. С помощью ограничений на площадь аккреционного канала и измерений протяженности 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 $\delta r/r < 3 \times 10^{-3}$.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на семинарах ИКИ РАН 2011-2014 г., семинаре в Института Астрономии РАН; международных конференциях Physics of Neutron Stars, С.-Петербург, 2014; COSPAR-40, Москва 2014; The Golden Age of Cataclysmic Variables, Палермо, Италия 2013; Зельдович-100; российских конференциях Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра, 2011, 2012, 2013; конференции молодых ученых в МФТИ, Москва, 2013; конференции "Наблюдаемые проявления эволюции звезд" в Специальная Астрофизическая Обсерватория, Нижний Архыз, 2012.

Объем диссертации

Диссертация состоит из пяти глав и списка цитируемой литературы. Объем диссертации 114 страниц, диссертация содержит 50 рисунков и 3 таблицы. Список литературы состоит из 230 публикаций.

Содержание работы

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

Остальной объем главы посвящен 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 путем 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.

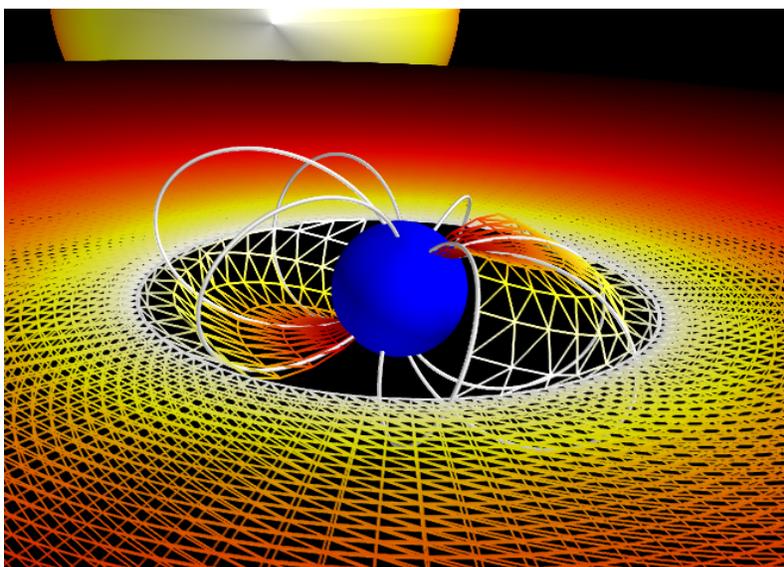


Рис. 1: Схематичное изображение тесной двойной системы с аккрецирующим белым карликом, обладающим не очень сильным ($< 1 - 10$ МГс) магнитным полем. Умеренное значение магнитного поля позволяет формироваться аккреционному диску вокруг белого карлика. Вещество аккреционного диска останавливается на границе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

Изложена проблема формирования рентгеновской кривой блеска магнит-

ных аккрецирующих белых карликов при остывании вещества в аккреционной колонке между поверхностью белого карлика и стоячей ударной волной. Исследуется возможность измерения свойств аккреционного течения у поверхности белых карликов по временной переменности их светимости. 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.

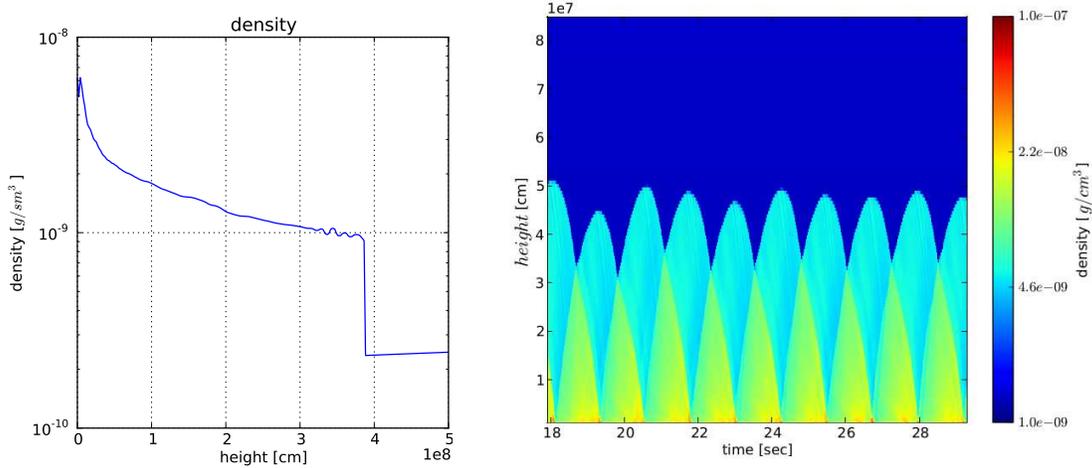


Рис. 2: Слева: профиль плотности плазмы в аккреционной колонке у поверхности аккрецирующего магнитного белого карлика в некоторый момент времени. Скачек плотности показывает положение ударной волны. Справа: динамическое изображение профиля плотности в аккреционной колонке. Цвет отражает значение плотности,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

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 определенным 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 расчете могут развиваться численные неустойчивости на масштабе одной ячейки. Описана реализация численного расчета, позволяющая избежать возникновения численных неустойчивостей на временах значительно больших времени остывания вещества под ударной волной. В данной реализации специальным образом выбирается временной шаг расчета и используются граничные условия со сливом энергии и массы на дне решетки.

Как и ожидалось, в компьютерных расчетах, учитывающих охлаждение только за счет 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 остывания вещества в колонке происходит подавление временной переменности светимости по сравнению с переменностью входящего темпа аккреции рис.3.

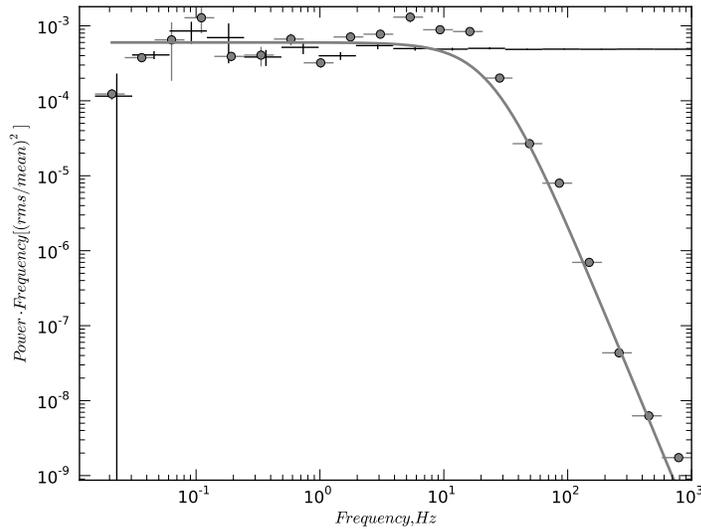


Рис. 3: Иллюстрация сглаживания переменности яркости аккреционной колонки за счет конечного времени остывания вещества в ней. Крестами показан спектр мощности переменности темпа поступления вещества в аккреционную колонку, серыми кружками - спектр мощности переменности яркости аккреционной колонки, полученной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

Численное моделирование нестационарного течения проводилось для простой геометрии аккреционной колонки с учетом модифицированной функции остывания. В реальных аккреционных колонках вещество течет 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.

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 χ^2 . Изложены методы модельных аппроксимаций спектров мощности переменности объектов с учетом правильных статистических распределений. В частности, описаны методы получения несмещенных оценок мощности переменности после усреднения по набору разных наблюдений, и оценки неопределенностей этих значений.

Четвертая глава посвящена исследованию свойств апериодической 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.

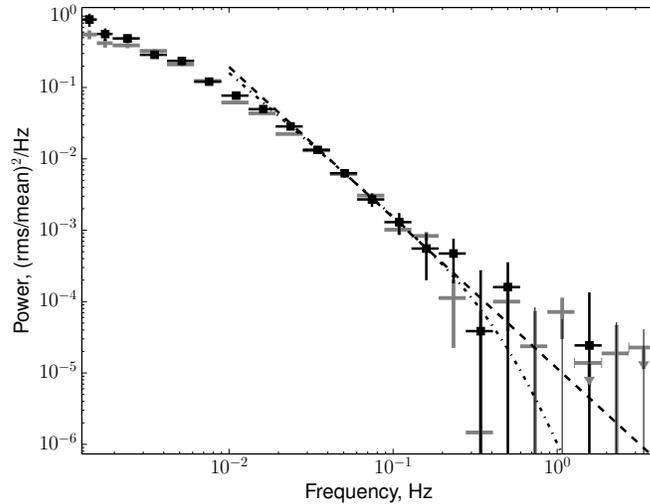


Рис. 4: Спектр мощности переменности яркости аккреционной колонки у поверхности белого карлика в двойной системе EX Нуа по данным орбитальных рентгеновских обсерваторий. Крестами показаны результаты, полученные по данным обсерватории RXTE, сплошными квадратами - по данным обсерватории XMM-Newton. Штриховая кривая показывает аппроксимацию высокочастотной части спектра мощности степенным законом, пунктирная - с изломом на частоте 0.6 Гц, минимальной частоте слома, при которой аналитическая модель еще совместима с результатами наблюдений.

Прибор PCA обсерватории RXTE является коллимированным спектрометром большой эффективной площади, поэтому кроме потока рентгеновских фотонов от астрофизических источников, поток событий, регистрируемых этим прибором, содержит определенную долю скорости счета заряженных частиц кэВных энергий. Вклад этой скорости счета тем больше, чем слабее поток

от астрофизического источника. Поток заряженных частиц, регистрируемый RXTE/РСА, 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 учета вклада этого сигнала была подробно исследована высокочастотная переменность фона заряженных частиц в приборе RXTE/РСА в наблюдениях "пустых" полей (с общим временем экспозиции около 4 Мсек) и слабого неперменного источника - скопления галактик.

Анализ около 74 ксек наблюдений EX Нуа обсерваторией XMM и около 89 ксек 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 $f_{\text{break}} \gtrsim 0.6$ Гц. Данное ограничение на частоту слома соответствует ограничению сверху на площадь сечения аккреционного канала $A \lesssim 1.5 \times 10^{16}$ см².

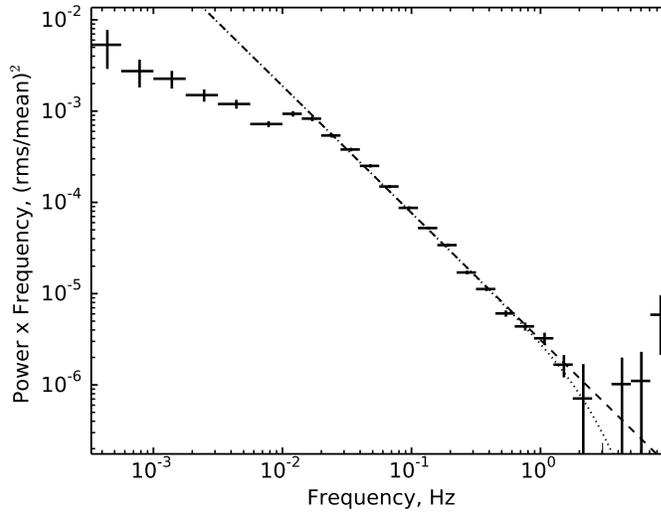


Рис. 5: Спектр мощности переменности оптической яркости EX Нуа, полученный при помощи наблюдений на телескопах Южноафриканской астрономической обсерватории: 1.9м телескопе, и на 12 метровом телескопе SALT. Штриховой кривой показана аппроксимация высокочастотной части спектра мощности степенным законом без излома, пунктирной кривой показана аппроксимация спектра мощности степенным законом с изломом на частоте 3.5 Гц, минимальной частоте излома, при которой аналитическая модель еще совместима с результатами наблюдений.

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 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.

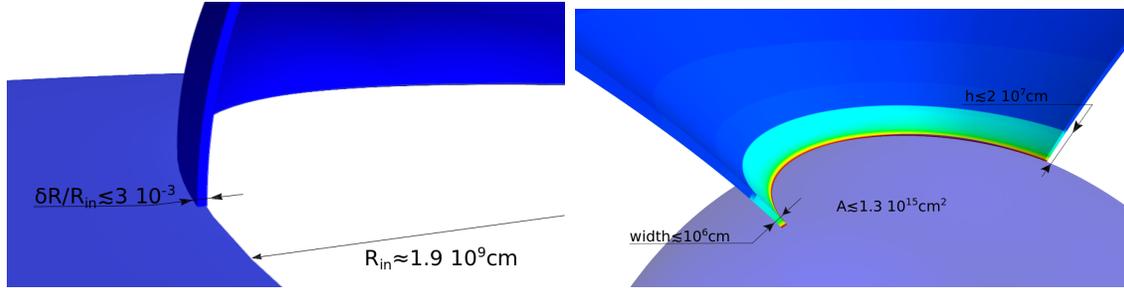


Рис. 6: Схематическое изображение аккреционного канала в системе EX Hya с указанием геометрических размеров, у края аккреционного диска (левая панель) и у поверхности белого карлика (правая панель). На правой панели колонка и белый карлик нарисованы не в масштабе - колонка должна быть в 10 раз уже и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

При помощи данных быстрых фотометрических наблюдений телескопа РТТ-150 удалось поставить ограничения на время остывания вещества в аккреционной колонке LS Peg порядка 10 секунд. При помощи наблюдений 12-м телескопом Южно Африканской Астрономической Обсерватории удалось поставить существенные ограничения на площадь сечения аккреционного канала в двойной системе EX Hydrae ($A \lesssim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^2$). Благодаря тому, что EX Hydrae один из наиболее хорошо изученных промежуточных поляр, для которого измерены наклонение, расстояние, массы компонент и темп аккреции, из полученных ограничений на площадь аккреционного канала удалось поставить ограничения на глубину вмороженности плазмы в магнитосферу белого карлика $\delta r/r < 3 \times 10^{-3}$ (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. "Определение площади аккреционных колонок промежуточного поляр EX Hya по свойствам аперриодической переменности его яркости"
Семена А.Н., Ревнивцев М.Г., Бакли Д.А., Котзе М.М. Хабибуллин И.И. и др. , 2014, MNRAS, 442, 1123

2. "Апериодическая переменность яркости EX Нуа в рентгеновском диапазоне и площадь основания аккреционной колонки на поверхности белого карлика"
Семена А.Н. и Ревнивцев М.Г. , 2014, Письма в Астрономический Журнал, 40, 529
3. "Ограничения на параметры аккреционной колонки промежуточного пояса LS Pegasi по спектру мощности оптической кривой блеска"
Семена А.Н. Ревнивцев М.Г. Хамитов И.М. Буренин Р.А. Ак Т. Экер З. Павлинский М.Н. 2013 Письма в Астрономический Журнал, 39, 227
4. "Оценка параметров плазмы в аккреционной колонке у поверхности аккрецирующих белых карликов по свойствам переменности их яркости"
Семена А.Н. и Ревнивцев М.Г. 2012, Письма в Астрономический Журнал, 38, 321

055/02/2

Ротап rint ИКИ РАН
Москва, 117810, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати . .14

Заказ

Формат 70×108/32

Тираж 100

0,6 уч.-изд.л.