

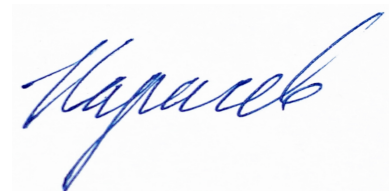
На правах рукописи

Карасев Дмитрий Иванович

**Исследование
быстрых рентгеновских транзиентов по данным
космических обсерваторий**

01.03.02. Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

A handwritten signature in blue ink, reading 'Карасев' (Karashev), is displayed on a light gray rectangular background.

Москва, 2010

Работа выполнена в Институте космических исследований РАН

Научный руководитель:

кандидат физ.-мат. наук,

Лутовинов Александр Анатольевич
(ИКИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук,

Бикмаев Ильфан Фяритович
(КазГУ)

кандидат физ.-мат. наук,

Юнгельсон Лев Рафаилович
(ИНАСАН)

Ведущая организация:

Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 27 декабря 2010 г. в 11 часов на заседании Диссертационного совета Д 002.113.02 в конференц-зале Института космических исследований РАН по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 27 ноября 2010 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.02



к.ф.-м.н.

А.Ю.Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Многими рентгеновскими космическими обсерваториями с широким полем зрения, преимущественно мониторами всего неба, время от времени регистрируются мощные всплески рентгеновской активности: пиковый поток может достигать и даже существенно превышать рентгеновский поток Крабовидной туманности ($1\text{Краб} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне энергий 2-10 кэВ). В то же время длительность подобных вспышек, как правило, не превышает суток. Это последнее обстоятельство отличает их от классических рентгеновских транзиентных источников, продолжительность всплеска активности которых составляет недели и месяцы, и позволяет выделить такие объекты в отдельный класс "быстрых рентгеновских транзиентов". Вопрос о природе источников столь коротких, но интенсивных всплесков является предметом дебатов как среди экспериментаторов, так и теоретиков, однако становится очевидным, что указать один общий механизм их появления не представляется возможным. Долгое время положение усугубляло отсутствие статистически значимой выборки таких событий. В частности, прибором WATCH космической обсерватории ГРАНАТ было зарегистрировано всего семь быстрых рентгеновских транзиентов, тогда как теория предсказывает до нескольких сотен всплесков в год (Кастро Тирадо и др., 1999; Арефьев и др., 2003).

Первоначально природу быстрых рентгеновских транзиентов пытались объяснять внегалактическими источниками и рентгеновским послесвечением гамма-всплесков. Подтверждением таких выводов выступало то, что многие похожие события, зарегистрированные спутником ВерроSAX, удавалось отождествить с гамма-всплесками. Однако появление больших обзоров, выполненных космическими обсерваториями ASCA, RXTE и ИНТЕГРАЛ с широкими полями зрения и высокой чувствительностью, позволило обнаружить много новых коротких транзиентных событий, особенно в галактической плоскости. В результате в последнее время общепринятым стало мнение, что быстрые рентгеновские транзиенты в большинстве своем представляют массивные рентгеновские двойные системы. Механизм проявления вспышечной активности в этом случае связывают с различными особенностями аккреции вещества с массивной звезды-компаньона на компактный объект, в большинстве случаев нейтронную звезду (см., например, Гребенев и Сюняев, 2007; Романо и Сидоли, 2008). Тем не менее быстрые транзиенты с черными дырами также существуют. Так, например, хорошо известный объект этого класса V4641Sgr

представляет собой двойную систему с черной дырой в качестве компактного объекта. Известны также случаи регистрации ряда кратковременных всплесков от источника Суг Х-1, по длительности и интенсивности вполне подходящих под критерии вспышек, наблюдающихся от быстрых транзиентов (Голенецкий и др., 2003).

Стоит отметить, что возможность наблюдения этих явлений в двойных системах с компактным объектом - достаточно неожиданна и интересна, поскольку характерное время всплеска значительно меньше скорости распространения возмущения в стандартном аккреционном диске - составляет более 1,5 дней (Гребенев и Сюняев, 2007). Но если компактный объект, входящий в двойную систему, может иметь любую природу, то неперенная массивность оптической звезды-компаньона прежде под сомнение не ставилась.

Достаточно большое число сложностей в теоретическом моделировании таких объектов связано, в том числе, с недостаточной точностью наблюдений и интерпретацией получаемых результатов. Среди возникающих проблем можно выделить несколько основных:

- 1) недостаточное угловое разрешение и чувствительность приборов с широким полем зрения (ASM/RXTE, IBIS/INTEGRAL) не позволяют локализовать источник с достаточной точностью во время вспышки;
- 2) из-за неопределенностей межзвездного поглощения и расстояния до объекта невозможно определить классы оптических компаньонов объектов;
- 3) поскольку подавляющее большинство быстрых транзиентов лежит в галактической плоскости, возникают определенные трудности при исследовании их с помощью спектрометров типа PCA/RXTE, не имеющих пространственного разрешения; основная проблема здесь связана с корректным учетом вклада фонового излучения Галактики в полный спектр источника.

Все это затрудняет однозначное установление природы быстрых рентгеновских транзиентов.

Настоящая диссертация направлена на изучение природы таких объектов и разработку методов, позволяющих справиться с указанными выше трудностями.

Цель работы

Целью представленной работы является всестороннее исследование свойств и установление природы быстрых рентгеновских транзиентов по данным космических обсерваторий, а также наземных наблюдательных комплексов. Также одной из основных задач диссертации было исследование межзвездного поглощения в направлении на центр Галактики и разработка методов, позволяющих корректно учесть влияние этого поглощения на результаты наблюдений как в оптическом, так и в рентгеновском диапазонах.

Научная новизна

Все результаты, представленные к защите, являются новыми. Разработан метод корректного учета фонового излучения Галактики при исследовании источников с помощью спектрометра *PCA/RXTE*. На примере объекта *XTEJ1901+014* впервые показано существование маломассивных быстрых рентгеновских транзиентов.

Открыты пульсации рентгеновского потока быстрого рентгеновского транзиента *AXJ1749.1-2733*. Впервые исследована природа оптических компаньонов рентгеновских пульсаров *AXJ1749.1-2733* и *AXJ1749.2-2725*, которые, вероятнее всего, расположены в дальних частях спиральных рукавов Галактики.

Впервые, по данным наблюдений телескопа *PTT-150*, получена карта поглощения широкой области неба ($30' \times 30'$) в окрестностях галактического центра с угловым разрешением до $1'$ и средней точностью 0,2 звездной величины.

Разработан метод определения расстояния и поглощения до массивных двойных систем Галактики.

Научная и практическая ценность работы

В диссертации предложен метод, позволяющий корректно учесть вклад фонового рентгеновского излучения хребта Галактики в спектр исследуемого объекта, регистрируемый спектрометром *PCA/RXTE*, что дает возможность существенно уменьшить искажения формы и нормировки этого спектра. Это особенно важно при изучении слабых источников (поток < 10 мКраб), расположенных близко ($b < |5^\circ|$) к плоскости Галактики.

В диссертации установлена маломассивная природа одного из объектов класса быстрых рентгеновских транзиентов; таким образом, поднят вопрос о существовании дополнительных механизмов, отвечающих за мощную вспышечную активность в двойных системах.

В диссертации подробным образом изучены особенности межзвездной среды в одной из областей вблизи галактического центра (Chandra Bulge Field, CBF), определен закон и построена карта поглощения для исследуемого поля в фильтрах SDSS. Отметим, что CBF - это именно та область неба, исследования которой с помощью обсерватории Chandra позволили однозначно установить природу фонового излучения Галактики и которая является удобной для дальнейшего изучения звездного населения диска, балджа Галактики и остатков вспышек сверхновых. Полученная карта будет использована при дальнейшем изучении данного поля.

В диссертации разработана методика определения расстояния и поглощения до массивных двойных систем, причем для проведения весьма корректных оценок достаточно наблюдений в двух фотометрических фильтрах (наличие измерений в нескольких фильтрах повышает точность оценок). С ее помощью были исследованы два рентгеновских пульсара, расположенных в направлении галактического центра. В результате было показано, что расстояние до них существенно превышает расстояние до центра Галактики и, вероятнее всего, они локализованы в одном из дальних спиральных рукавов.

Последний результат открывает возможность исследования распределения массивных рентгеновских двойных систем в Галактике с использованием лишь фотометрических наблюдений. И, поскольку массивные двойные являются одним из индикаторов звездообразования в Галактике, можно проследить спиральную структуру Галактики, в особенности ее дальних рукавов, плохо доступных для изучения другими способами.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах и конференциях молодых ученых, проводимых в ИКИ РАН, международных научных конференциях INTEGRAL Workshop (2006, 2008, 2009), Всероссийских конференциях «Астрофизика высоких энергий: сегодня и завтра» (Москва, 2007, 2008, 2009), XIV международной конференции молодых ученых (Киев, Украина, 2006).

Полный список трудов диссертанта включает 6 работ в реферируемых журналах и 2 — в трудах конференций, из них все — по теме диссертации.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех частей по 4 главы каждая, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации — 102 страницы, в том числе 39 рисунков и 9 таблиц. Список литературы содержит 90 ссылок.

Содержание работы

Во **Введении** дается описание проблем, затронутых в настоящей диссертации, ставятся цели и обосновывается актуальность работы; приводятся технические характеристики используемых в исследовании инструментов, а именно приборов космических обсерваторий *ИНТЕГРАЛ*, *RXTE*, *ROSAT*, *XMM-Newton*, а также оптических и инфракрасных телескопов *PTT-150*, *БТА(САО)*, *SOFI/NTT*; рассмотрены некоторые особенности используемых в исследовании каталогов общего доступа.

Первая часть диссертации посвящена исследованию одного из представителей класса быстрых рентгеновских транзиентов - *XTEJ1901+014*.

В *первой главе* дается вводная информация об исследуемом объекте, а также экспозиции и времени наблюдений.

Во *второй главе* рассмотрены вопросы, связанные с обработкой данных космических обсерваторий, полученных при наблюдении источника *XTEJ1901+014*. Отмечен ряд важных особенностей, которыми сопровождается изучение этого объекта с помощью обсерватории *RXTE* и, в частности, спектрометра *РСА*. Предложен метод, позволяющий наиболее корректно обработать полученные с его помощью данные.

Известно, что спектрометр *РСА/RXTE* не имеет позиционной чувствительности, а просто собирает поток излучения со всего поля зрения ($\sim 1^\circ$). При наличии в этом поле нескольких точечных источников или некоторой фоновой засветки он регистрирует суммарный поток, в котором выделить вклад каждого из компонентов достаточно трудно. Таким образом, форма и нормировка спектров исследуемых объектов, в особенности слабых, могут быть существенно искажены.

Транзиент *XTEJ1901+014* находится в галактической плоскости ($l = 35,4^\circ$, $b = -1,6^\circ$), где фоновое рентгеновское излучение Галактики имеет достаточно высокую интенсивность (Ревнивцев и др., 2009). Для того чтобы корректно оценить форму и нормировку его спектра, а затем определить вклад в суммарный спектр, восстановленный спектрометром *РСА/RXTE*, предлагается использовать данные, полученные в результате точечных наведений на близкие транзиентные рентгеновские

пульсары в момент, когда они находятся в “выключенном” состоянии. Таким образом, удастся получить длительную экспозицию наблюдения «пустой» области неба и в результате - значимый спектр диффузного излучения, который затем необходимо вычесть из суммарного с правильной нормировкой. Для оценки нормировки используются данные, полученные во время перенаведения спутника на исследуемый источник, а также сканирующих наблюдений галактической плоскости в окрестностях источника (рис.1, левая панель). Определить, что вспомогательный пульсар находится в “выключенном” состоянии, можно просто по отсутствию пульсаций наблюдаемого потока с известной частотой. При исследовании транзиента *XTEJ1901+014* для таких целей было использовано наблюдение пульсара *GS 1843-02* (Кояма и др., 1990).

В третьей главе приведены результаты спектрального и временного исследований источника *XTEJ1901+014* по данным космических рентгеновских обсерваторий *ИНТЕГРАЛ*, *RXTE*, *ROSAT* и *XMM-Newton*. Важно отметить, что, хотя наблюдения источника этими инструментами проводились в разное время (так, даты наблюдений обсерваторий *ROSAT* и *XMM-Newton* разделяют более 16 лет), спектры, полученные в разных диапазонах энергий, “сшиваются” без введения каких-либо значительных поправок на нормировку, т.е. можно говорить о постоянстве как формы спектра источника, так и потока от него на протяжении довольно длительного промежутка времени. Комбинированный спектр этого объекта хорошо описывается моделью степенного закона с наклоном $\Gamma \sim 2$, дополненной поправкой на межзвездное поглощение, величина которой, выраженная в числе атомов водорода на 1 см^2 , составляет $N_H = (2,6 \pm 0,5) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (рис.1, правая панель). Отметим, что полученная модельная оценка поглощения превышает величину, указываемую в известных атласах $N_{H, \text{АТЛАС}} = (0,8 \pm 0,1) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Однако следует помнить о том, что пространственное разрешение подобных атласов составляет $\sim 0,6^\circ$, и они не позволяют учесть возможные локальные вариации поглощения, которые, особенно в галактической плоскости, могут быть весьма существенны на масштабах нескольких угловых минут (см. часть 2 диссертации).

Говоря об исследовании временных характеристик источника *XTEJ1901+014*, прежде всего, следует отметить, что событий, подобных тем, благодаря которым он был классифицирован как быстрый рентгеновский транзиент (вспышка в апреле 2002 года), при дальнейшем исследовании зарегистрировано не было. Судя по всему,

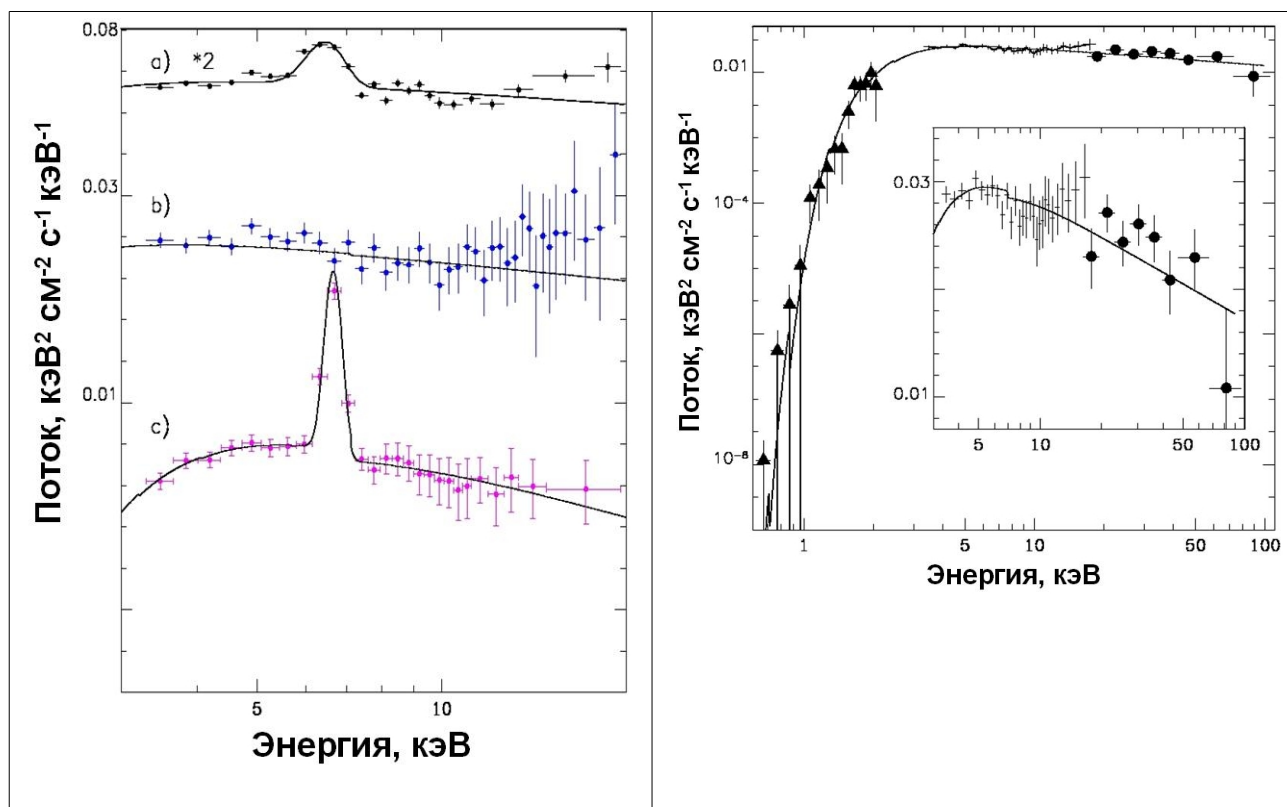


Рис. 1. Левая панель: а) энергетический спектр, построенный по данным спектрометра PCA/RXTE, для области неба радиусом 1° , содержащей источник XTEJ1901+014 (для наглядности интенсивность удвоена); б) истинный энергетический спектр источника XTEJ1901+014; в) энергетический спектр диффузного излучения Галактики. Линиями показаны модели, наилучшим образом описывающие приведенные спектры. Правая панель: широкополосный энергетический спектр (0.6-100 кэВ) источника XTEJ1901+014 по данным приборов PSPC-C/ROSAT (треугольники), PCA/RXTE (крестики) и ISGRI/ИНТЕГРАЛ (кружки).

объект регистрировался в спокойном состоянии с потоком ~ 3 мКраб. Данные спектрометра *PCA/RXTE* и обсерватории *XMM-Newton* указывают лишь на существование некоторой аperiodической переменности — ряда всплесков, в которых поток источника превышал среднее значение в $\sim 1,5$ — 2 раза. Форма спектра при этом оставалась неизменной. Каких-либо пульсаций рентгеновского потока источника ни одной обсерваторией выявлено не было.

В четвертой главе на основании данных наблюдений телескопами *PTT-150* и *БТА (CAO)*, а также оценок поглощения до источника по данным каталогов *USNO-B1* и *2MASS* делается вывод о том, что исследуемый объект с большой вероятностью является маломассивной двойной системой.

Из сказанного выше ясно, что более точному определению типа системы мешает неопределенность величины межзвездного поглощения в направлении на источник. Поэтому нами были сделаны некоторые оценки поглощения с использованием звезд, лежащих в окружности радиусом $4'$ вокруг *XTE J1901+014*. Поскольку цвета звезд зависят только от величины поглощения, то по данным каталогов *2MASS* и *USNO-B1*, варьированием поглощения, были определены типы соседних звезд, опираясь на цветовые таблицы из работы Бонни и др. (2006). Затем, с использованием цветовой диаграммы *Ks-(J-Ks)* из работы Хирас и др., (2008) расстояние подбиралось таким образом, чтобы полученному значению *J-Ks* соответствовала величина *Ks*, характерная для звезды данного типа. В результате удалось получить приблизительные оценки поглощения в направлении на источник и показать, что до расстояния 5 кпк его величина не превышает $N_H = (0,8 \pm 0,2) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$.

По данным наблюдений обсерватории *XMM-Newton* источник *XTEJ1901+014* удалось локализовать с точностью $\approx 2''$. Данные известных оптических и инфракрасных каталогов, а также дополнительные наблюдения телескопами *PTT-150* и *БТА (CAO)* позволили определить лишь верхние пределы на величины источника в фильтрах *Ks*, *r'* и *I*. Однако даже этого оказалось вполне достаточно, чтобы сделать некоторые важные оценки. В результате удалось показать, что наиболее вероятно нерелятивистским компаньоном в этой системе является маломассивная звезда, что не характерно для быстрых рентгеновских транзиентов (рис.2).

Вторая часть диссертации посвящена исследованию распределения и закона поглощения для наименее поглощенной области в окрестностях галактического центра. Эта область неба наблюдалась обсерваторией *Chandra* с рекордной экспозицией ~ 1 млн с, поэтому получила название *Chandra Bulge Field (CBF)*. Необходимо

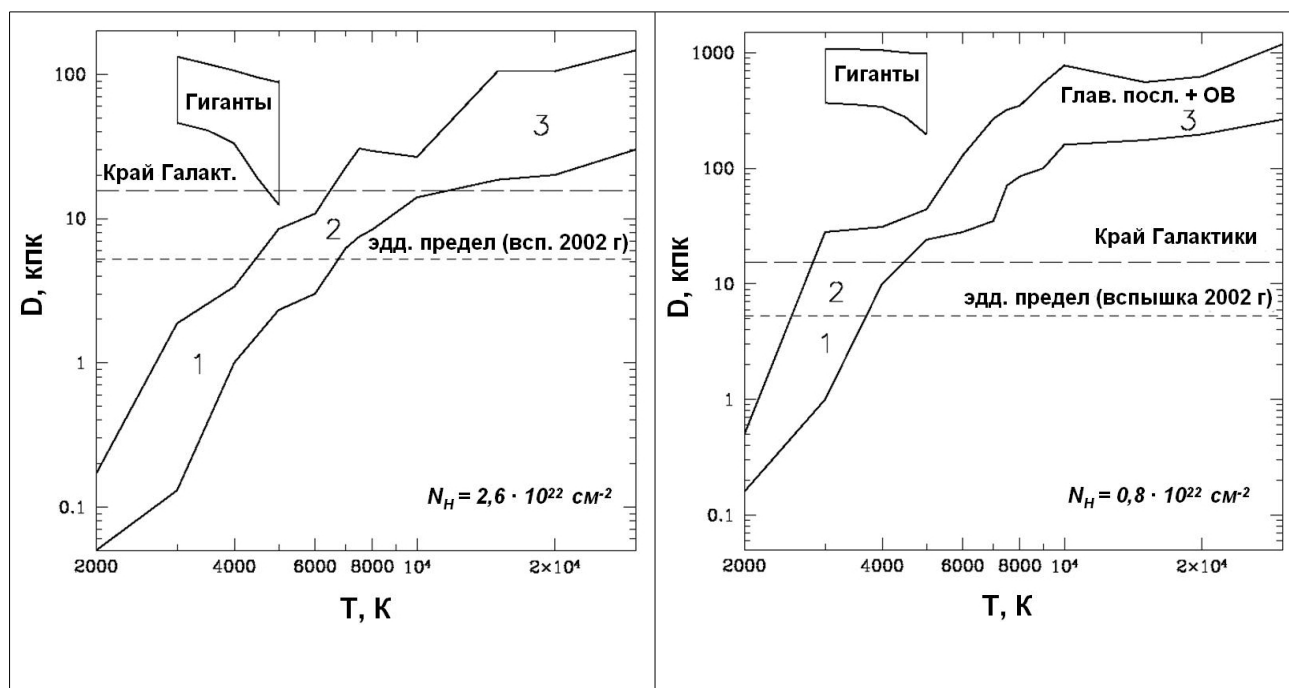


Рис. 2 Зависимость расстояния до звезд от их температур (типов) для разных величин поглощения. Звезды главной последовательности и ОВ-гиганты представлены широкой полосой; также отмечена область гигантов. Длинная пунктирная линия показывает расстояние до края Галактики в направлении на источник; короткими пунктирами отмечено расстояние, где источник достиг бы эддингтоновского предела светимости для нейтронной звезды во время вспышки 2002 года. Цифры отмечают следующие области: 1 - звезда этого типа может быть оптическим компаньоном источника *XTE J1901+014*, при этом светимость во время вспышки 2002 года ниже эддингтоновского предела; 2 - эти звезды могут быть компаньонами, однако светимость во время вспышки 2002 года превышает эддингтоновский предел ; 3 - эти звезды не могут быть компаньонами источника, поскольку в этом случае он был бы расположен за пределами Галактики. *Левая панель:* оценки приведены в предположении величины межзвездного поглощения равной $N_H = 2,6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (из моделирования спектра). *Правая панель:* оценки приведены в предположении величины межзвездного поглощения равной $N_H = 0,8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (из атласа + описанных выше оценок).

отметить, что корректное определение величины и закона поглощения критически важно при исследовании природы как быстрых транзиентов, так и галактических рентгеновских двойных в целом.

В первой главе описаны особенности исследуемой области неба, методы и пакеты программного обеспечения, позволяющие провести точный анализ фотометрических данных, полученных с помощью телескопа PTT-150.

Во второй главе подробно описана методика построения карты поглощения.

Значение поглощения определялось по положению гигантов красного сгущения балджа Галактики на диаграмме цвет–видимая величина. Напомним, что это сгущение представляет собой группу красных гигантов (G и ранних K-спектральных классов), имеющих примерно одинаковую светимость и цвет, а также их свойства слабо зависят от металличности. В ряде работ (см., например, Пачинский и Станек, 1998) отмечается, что большинство таких объектов расположено примерно на одном расстоянии, равном расстоянию до центра Галактики, поэтому с их помощью можно проводить оценку совокупного поглощения до него.

Карта поглощения исследуемого поля строилась следующим образом: в разных областях поля строились диаграммы цвет–видимая величина $r'(r' - i')$, для которых определялось положение центроида гигантов красного сгущения в соответствующих координатах. Затем полученные величины яркости r'_{RCG} и цвета $(r' - i')_{RCG}$ центроида сравнивались с абсолютной величиной r'_0 и цветом $(r' - i')_0$ центроида гигантов красного сгущения, которые были получены из калибровочной диаграммы цвет–абсолютная величина $M_r - (r' - i')_0$. И, наконец, величина поглощения A при известном расстоянии до балджа (D) определась как

$$A_r = r'_{RCG} - r'_0 + 5 - 5 \lg(D).$$

В третьей главе рассматриваются свойства гигантов красного сгущения в диапазонах r' и i' фотометрической системы SDSS.

Понятно, что прежде чем делать оценки поглощения, необходимо получить калибровочные (абсолютные) значения величин r'_0 и цвета $(r' - i')_0$ центроида гигантов красного сгущения. Для фильтров стандартных фотометрических систем (например, системы Джонса; см. Бессель, 2005) это легко сделать, используя данные обсерватории *Hipparcos*. Но, поскольку фотометрическая система SDSS (Бессель, 2005), в которой производились наблюдения телескопом PTT-150, отличается от стандартной, сделать это напрямую не представляется возможным.

Для решения этой задачи мы воспользовались возможностями синтетической фотометрии с помощью программного пакета *SYNPHOT/IRAF*. Предварительным отождествлением звезд из каталогов *Hipparcos* (ван Лиувена, Фантино, 2005) и *2MASS* была получена выборка из ~10000 звезд с известными расстояниями и фотометрией в шести фильтрах *B, V, I, J, H, Ks*. Далее, на основании спектрального атласа Брузуала–Перссона–Ганна–Страйкера (Стрейкер и др., 1979; Ганн, Страйкер, 1983) и пакета *SYNPHOT* выбиралась спектральная модель, дающая наилучшую аппроксимацию фотометрических данных в этих шести фильтрах, и таким образом определялись классы звезд выборки. Далее для них синтезировались величины в требуемых фильтрах r' и i' , строилась диаграмма цвет-абсолютная величина, из которой определялись абсолютные значения центроида гигантов красного сгущения.

В четвертой главе приведены результаты исследования закона поглощения в CBF, построена карта поглощения.

Поскольку в ряде работ (Поповский, 2000; Удальский, 2003; Ревнивцев и др., 2010; Карасев и др., 2010) отмечалось существенное отклонение закона поглощения от стандартного (Карделли и др. 1989) в направлении на центр Галактики, то, прежде чем построить карту поглощения, необходимо было провести уточнение этого закона в пределах исследуемого поля. В результате было установлено, что в CBF закон поглощения также отличен от стандартного, а именно, если в стандартном случае $A_{r'}/(A_{r'} - A_{i'}) = 4,3$, то в этом поле - $A_{r'}/(A_{r'} - A_{i'}) = 2,53 \pm 0,04$. Необходимо отметить, что в пределах исследуемой области закон поглощения с точностью до ошибки измерений можно считать всюду одинаковым.

В результате была построена карта поглощения, покрывающая полностью область размером $30' \times 30'$ поля CBF с лучшим на сегодняшний день разрешением $1'$. Разброс значений поглощения по полю при этом составил $A_{r'} = 3,0-5,5$ (рис. 3).

Третья часть диссертации посвящена исследованию двух транзиентных рентгеновских пульсаров *AXJ1749.1-2733* и *AXJ1749.2-2725*, расположенных в направлении на центр Галактики.

В первой главе приведена информация об исследуемых объектах, а также времени и экспозиции наблюдений.

Во второй главе описываются наблюдаемые особенности системы *AXJ1749.1-2733* в мягком и стандартном рентгеновских диапазонах энергий (0,6-10 кэВ).

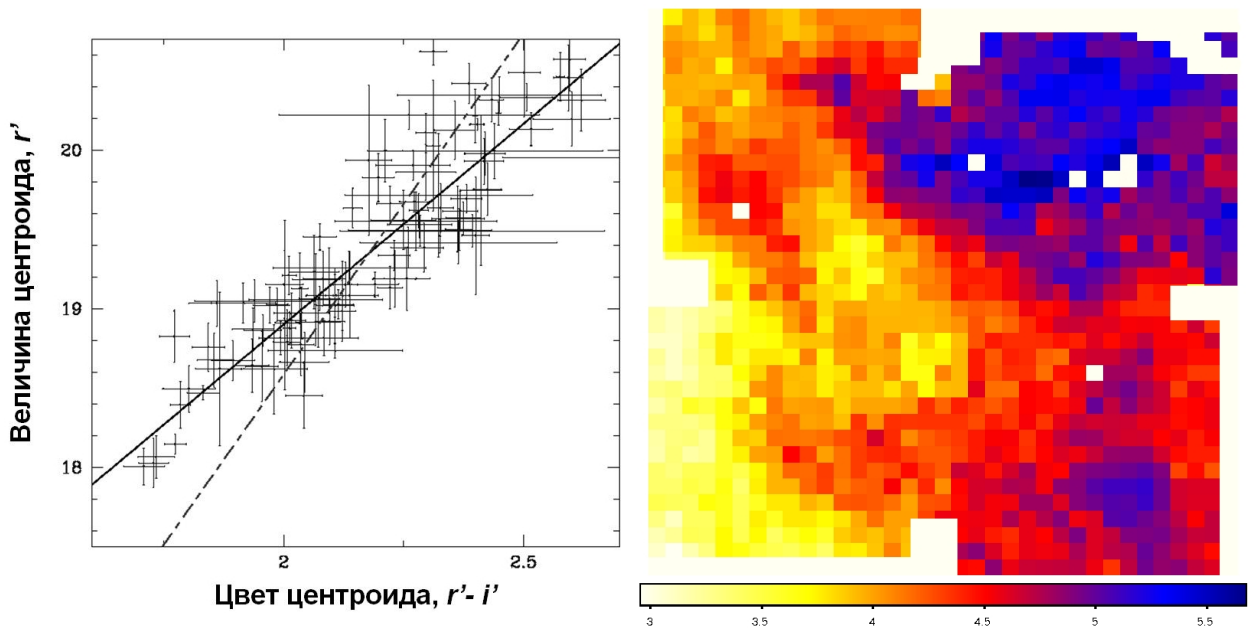


Рис.3. *Левая панель:* зависимость видимой величины в полосе r'_{RCG} от наблюдаемого цвета гигантов красного сгущения $(r' - i')_{\text{RCG}}$, отражающая закон поглощения в SBF. Сплошная диния — наилучшая аппроксимация наблюдательных данных. Для сравнения штрихпунктирной линией показан наклон регрессии в предположении стандартного закона поглощения. *Правая панель:* карта поглощения, построенная для поля SBF (оттенками серого показано распределение значения величины поглощения по полю) с разрешением $1'$. Центру поля соответствуют галактические координаты $l = 0,085^\circ$; $b = -1,404^\circ$.

По данным космических обсерваторий *XMM-Newton* и *ИНТЕГРАЛ* впервые было показано существование переменности рентгеновского потока от источника *AXJ1749.1-2733*. Период пульсаций составил ~ 132 с. Важно при этом отметить, что объект наблюдался обсерваториями не только в разное время, но и в разных состояниях: *XMM-Newton* (март, 2007) - в спокойном состоянии (поток не превышал нескольких милликраб) и *ИНТЕГРАЛ*ом (сент., 2003) - во время одной из вспышек (поток в диапазоне 17-50 кэВ ~ 40 мКраб).

Профиль импульса объекта *AXJ1749.1-2733* - двухпиковый, поэтому было проведено дополнительное исследование реального периода системы (~ 66 с либо ~ 132 с). Доля пульсирующего излучения источника относительно неизменна в энергетическом диапазоне 3-40 кэВ и составляет ~ 25 -30%, тогда как в жестком рентгеновском диапазоне (>40 кэВ) увеличивается до $\sim 50\%$, что является типичным для рентгеновских пульсаров (Цыганков и др., 2007).

Отметим также, что период пульсаций *AXJ1749.1-2733* значимо не изменился за $\sim 4,5$ года, разделяющих наблюдения обсерваторий *ИНТЕГРАЛ* и *XMM-Newton*.

Исследуя рентгеновский спектр источника по данным обсерватории *XMM-Newton*, удалось выявить значительное поглощение $N_H = (21,1 \pm 2,5) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, что существенно выше межзвездного в направлении на источник и, скорее всего, связано с внутренним поглощением в двойной системе, что характерно для массивных рентгеновских двойных систем. Таким образом, было выдвинуто предположение, что быстрый рентгеновский транзиент *AXJ1749.1-2733* — массивная двойная система с нейтронной звездой.

В третьей главе представлены результаты исследования транзиентного рентгеновского пульсара *AXJ1749.2-2725*, который попадал в поле зрения обсерватории *XMM-Newton* во время наблюдения источника *AXJ1749.1-2733*.

Рентгеновский спектр источника *AXJ1749.2-2725*, полученный по данным *XMM-Newton*, хорошо описывается степенным законом с наклоном $\Gamma = 1,41 \pm 0,75$ и также, подобно *AXJ1749.1-2733*, сильно поглощен в мягкой части спектра - $N_H = (14,1 \pm 6,13) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Поэтому вполне оправдано предположение о массивности *AXJ1749.2-2725*.

Временной анализ данных обсерватории *XMM-Newton* позволил измерить период рентгеновских пульсаций источника $P = 216,86 \pm 0,14$ с. Сравнение проведенных измерений с результатами обсерватории *ASCA* (Тории и др., 1998; Сакано и др., 2002) показывает, что вращение нейтронной звезды значимо ускорилось за 12 лет, а средний темп уско-

рения составил: $\dot{P}/P = -1,3 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ (где $\dot{P}$ — приращение периода). Используя уравнение для максимально возможного ускорения вращения

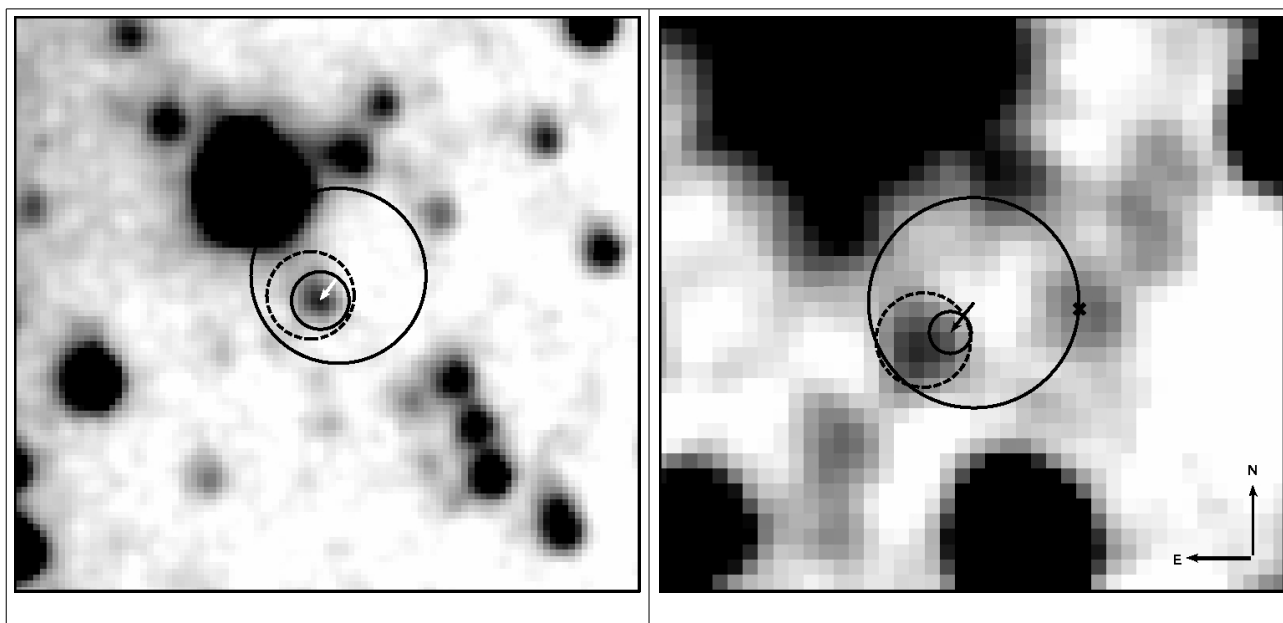


Рис. 4. Изображения неба, полученные телескопом SOFI/NTT в фильтре Ks и содержащие пульсары AX J1749.2–2725 (слева) и AX J1749.1–2733 (справа). Большой сплошной кружок иллюстрирует величину стандартной ошибки позиционирования XMM-Newton/MOS2 (статистическая + систематическая). Малый сплошной кружок, сдвинутый в соответствии с коррекцией систематического сдвига (показан стрелочками), - величина только статистической ошибки XMM–Newton; пунктирный кружок — абсолютная точность позиционирования источников обсерваторией *Chandra*. Крестиком отмечена звезда-компаньон AX J1749.1–2733, ранее предложенная Хирасом и др., 2008.

за счет переноса момента при аккреции (Липунов и др., 1981), можно приблизительно оценить рентгеновскую светимость (L_x) источника - $L_{X,2-10 \text{ кэВ}} = 7 \cdot 10^{34} \text{ эрг с}^{-1}$. и получить оценку расстояния до источника ~ 16 кпк, что существенно дальше центра Галактики.

Четвертая глава посвящена установлению природы исследуемых источников. Было проведено оптическое отождествление, определены классы оптических компаньонов, сделаны оценки расстояния и поглощения до объектов.

Благодаря тому, что источники одновременно попадали в поле зрения обсерватории XMM-Newton, удалось, используя данные наблюдений телескопа SOFI/NTT, корректно оценить систематическую ошибку наблюдений XMM-Newton, связанную с конечной точностью позиционирования звездных датчиков, и оптически отождествить источники. Отметим, что последующие наблюдения обсерваторией Chandra подтвердили полученный результат (рис. 4). Далее с использованием результатов фотометрических измерений в ближнем инфракрасном диапазоне (фильтры H и Ks) были определены спектральные классы звезд-компаньонов и расстояния до исследуемых объектов. Кратко суть методики состоит в следующем:

- 1) прежде всего, определяем величину поглощения до галактического центра, изучая положение гигантов красного сгущения на диаграмме цвет-видимая величина, которая строится для звезд в окрестностях исследуемого объекта (как это описано в части 2 диссертации);
- 2) исследуем и устанавливаем закон поглощения в направлении на источники; зная абсолютные величины центроида красных гигантов и величину коррекции на расстояние, определяем величину коррекции на поглощение; затем, сравнивая эти две поправки, определяем закон поглощения;
- 3) варьируя расстояние, класс объекта и поглощение до него, подбираем наиболее вероятные классы звезд с расстояниями и поглощениями до них (звезд), которые хорошо описывают наблюдательные данные.

Применяя этот метод, нам удалось существенно ограничить классы возможных компаньонов рентгеновских пульсаров AXJ1749.2-2725 и AXJ1749.1-2733, а также провести оценки расстояния и поглощения в направлении на эти источники. Наиболее вероятным компаньоном

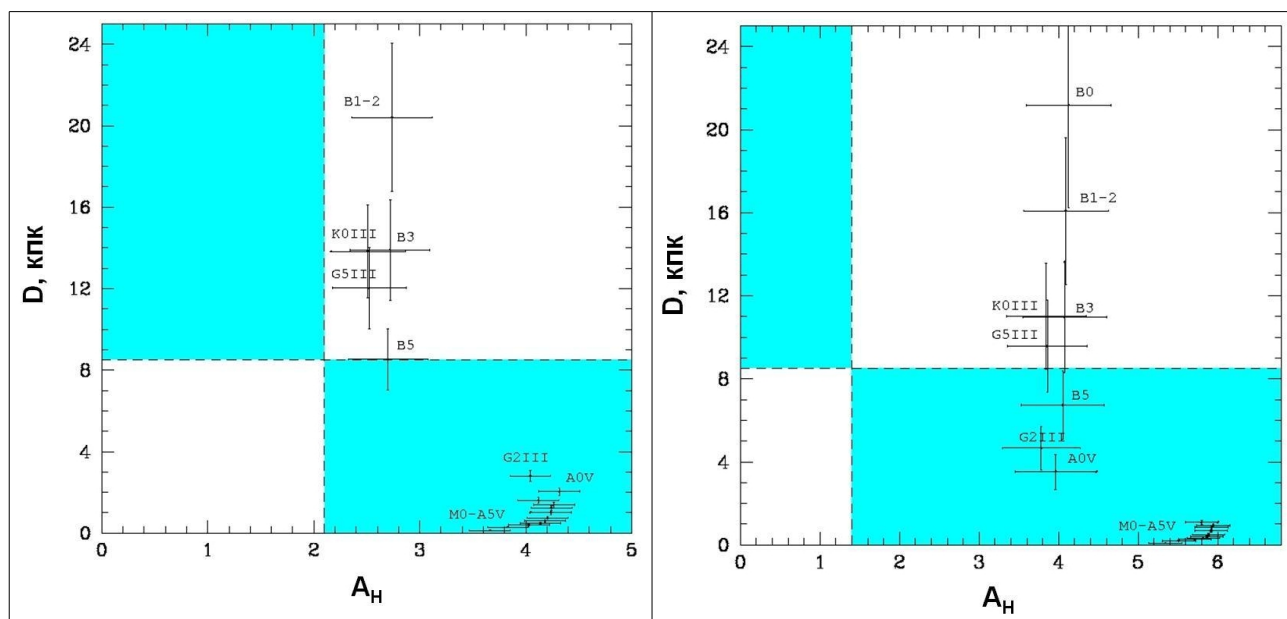


Рис. 5. Диаграмма поглощение (A_H)- расстояние до объекта, показывающая, где были бы расположены звезды различных спектральных классов, будь они компаньонами рентгеновских пульсаров AXJ1749.2–2725 (слева) и AXJ1749.1–2733 (справа). Горизонтальная пунктирная линия показывает расстояние до центра Галактики, вертикальная пунктирная линия - величину поглощения в направлении на него. Потенциально возможные классы оптических компаньонов лежат в белых областях диаграммы.

пульсара AX J1749.2–2725 является звезда класса В3, расположенная на расстоянии $D = 14 \pm 2,5$ кпк, что хорошо согласуется с результатами оценок по рентгеновским данным (см. выше).

Для источника AX J1749.1–2733 наиболее вероятным компаньоном является либо звезда класса В3 на расстоянии $D = 11 \pm 3$ кпк, либо В1–2 на расстоянии $D = 16,0 \pm 3,5$ кпк (рис. 5).

Таким образом, было показано, что рентгеновские пульсары AXJ1749.2–2725 и AXJ1749.1–2733 входят в состав массивных рентгеновских двойных систем и находятся в дальней (позади галактического центра) части Галактики, вероятно, в одном из спиральных рукавов.

В **Заключении** перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Предложен метод корректного учета вклада рентгеновского галактического фонового излучения при исследовании с помощью спектрометра PCA/RXTE источников, расположенных близко к плоскости Галактики.
2. Впервые показано существование среди класса быстрых рентгеновских транзиентов маломассивных двойных систем, а именно удалось установить, что источник XTEJ1901+014 является маломассивной двойной системой.
3. Получена карта поглощения и определен закон поглощения в направлении на балдж Галактики в области сверхглубокого обзора обсерватории Chandra. Показано, что закон поглощения существенно отличается от стандартного.
4. Предложена модификация метода оценки межзвездного поглощения на основе исследования узла красных гигантов, с помощью которой возможно определение класса оптического компаньона массивной рентгеновской двойной системы, и расстояния до нее для объектов, расположенных в направлении на центр Галактики.
5. Установлена природа рентгеновских источников AXJ1749.1-2733 и AXJ1749.2-2725. Показано, что оба они являются транзиентными рентгеновскими пульсарами в массивных двойных системах, расположенных позади галактического центра.

Список публикаций по теме диссертации

1. **Карасев Д.И.**, Лутовинов А.А., Гребенев С.А. Исследование быстрого рентгеновского транзиента XTE J1901+014 на основании данных INTEGRAL, RXTE, и ROSAT. // Письма в Астрономический журнал. 2007. Т. 33. №3. С. 186.
2. **Карасев Д.И.**, Лутовинов А.А., Буренин Р.А. XTE J1901+014 - первый маломассивный быстрый рентгеновский транзиент? // Письма в Астрономический журнал. 2008. Т.34. №11. С.834.
3. **Karasev D. I.**, Tsygankov, S. S., Lutovinov, A. A. Discovery of X-ray pulsations from the HMXB source AXJ1749.1-2733 // MNRAS: Letters. 2008. V. 386. №1. P.10.
4. **Karasev D. I.**, Lutovinov A. A., Burenin R. A. AXJ1749.1-2733 and AXJ1749.2-2725 - the close pair of X-ray pulsars behind the Galactic Center: an optical identification // MNRAS: Letters. 2010. V.409, P.69
5. **Карасев Д.И.**, Ревнивцев М.Г., Лутовинов А. А., Буренин Р. А.
Исследование звездного населения и межзвездного поглощения в направлении на область сверхглубокого обзора Chandra по данным РТТ-150 // Письма в Астрономический журнал. 2010. Т. 36. № 11. С. 832.
6. Revnivtsev M., van den Berg M., Burenin R., Grindlay J., **Karasev D.**, Forman, W. Interstellar extinction and the distribution of stellar populations in the direction of the ultra-deep Chandra Galactic field // Astronomy and Astrophysics. 2010. Т. 515. id.A49 .
7. **Karasev D. I.**, Lutovinov A. A., Grebenev S. A. INTEGRAL and RXTE Observations of the Fast X-Ray Transient XTE1901+014 // The Obscured Universe. Proceedings of the VI INTEGRAL Workshop. July 2-8, 2006. Moscow. ESA Communication Production Office ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. 2007. C.271.
8. **Karasev D. I.**, Tsygankov S. S., Lutovinov A. A., Burenin R. A. The study of the nature of sources AX J1749.1-2733 and AX J1749.2-2725 // Proceedings of the VIII INTEGRAL Workshop. 13-17 October 2009, Otranto (Lecce) Italy. Published online at <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=96>, p.103

Литература

- Арефьев и др.** (Arefiev V., Priedhorsky W., Borozdin K.) // *Astrophysical Journal*. 2003. V. 586. I. 2. P. 1238.
- Бессель.** (Bessell M.) // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. 2005. V. 43. P. 293.
- Бонни и др.** (Bonneau D., Clausse J.-M., Delfosse X.) // *Astronomy & Astrophysics*. 2006. V. 456. P. 789
- ван Лиувена и Фантино** (van Leeuwen F., Fantino E.) // *Astronomy & Astrophysics*. 2005. V. 439. P. 791.
- Ганн, Страйкер** (Gunn J., Stryker L.) // *Astrophysical Journal*. 1983. V. 52. P. 121.
- Голенецкий и др.** (Golenetskii S., Aptekar R., Frederiks D.) // *Astrophysical Journal*. 2003. V. 596. P. 1113.
- Гребенев и Сюняев** (Grebenев S., Sunyaev R.) // *Astronomy Letters*. 2007. V. 33. P. 149.
- Карасев и др.** (Karasev D., Lutovinov A., Burenin R.) // *MNRAS: Letters*. 2010. V. 409. P. 69.
- Карделли и др.** (Cardelli J., Clayton G., Mathis J.) // *Astrophysical Journal*. 1989. V. 345. P. 245.
- Кастро Тирадо и др.** (Castro-Tirado A., Brandt S.) // *Astronomy & Astrophysics*. 1999. V. 337. P. 379.
- Кояма и др.** (Koyama K., Kunieda H., Takeuchi Y.) // *Astronomical Society of Japan, Publications* (ISSN 0004-6264). 1990. V.42. P.59.
- Липунов и др.** (Lipunov V.) // *Soviet Astronomy*. 1981. V.25. P. 375.
- Пачинский и Станек** (Paczynski B., Stanek K.) // *Astrophysical Journal*. 1998. V. 494. P. 219.
- Поповский** (Popowski P.) // *Astrophysical Journal*. 2000. V. 528. P. 9.
- Ревнивцев и др.** (Revnivtsev M., Sazonov S., Churazov E.) // *Nature*. 2009. V. 458. P. 1142.
- Ревнивцев и др.** (Revnivtsev M., Burenin R., Sazonov S.) // *Astronomy Letters*. 2010. V. 35. P. 305.
- Романо и Сидоли** (Hillwig T., Gies D., Huang W. et al.) // *Mem. S.A.It.* 2010.V. 000. P.1
- Сакано и др.** (Sakano M., Koyama K., Maeda Y.) // *Astrophysical Journal*. 2002. V. 138. P. 19.
- Стрекер и др.** (Strecker D., Erickson E., Whitteborn F.) // *Astrophysical Journal*. 1979. V. 41. P. 501.
- Тории и др.** (Torii K., Kunugasa K., Katayama K.) // *Astrophysical Journal*. 1998. V. 508. P. 500.
- Удальский** (Udalski) // *Astrophysical Journal*. 2003. V. 590. P. 284.
- Хирас и др.** (Zurita Heras J., Chaty S.) // *Astronomy & Astrophysics*. 2008. V. 489. P. 657.
- Цыганков и др.** (Tsygankov S., Lutovinov A., Churasov E..) // *Astronomy Letters*. 2007. V. 33. P. 368.

055/02/2

Ротапринт ИКИ РАН

Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 15.11.2010

Заказ 2224

Формат 70x 108/32

Тираж 100

0,9 уч.-изд.л.