

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Карасев Дмитрий Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ
ТРАНЗИЕНТОВ
ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКИХ ОБСЕРВАТОРИЙ

01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
кандидат физ.-мат. наук Лутовинов А.А.

Москва

2010

БЛАГОДАРНОСТИ

Спасибо всем, кто участвовал в моем научном становлении, в первую очередь, научному руководителю Лутовинову Александру Анатольевичу.

Диссертация является результатом работы в отделе Астрофизики высоких энергий Института космических исследований РАН. Я благодарен его руководителю, академику РАН Рашиду Алиевичу Сюняеву, а также небезразличным к моей судьбе сотрудникам отдела, особенно Ревнивцеву Михаилу Геннадьевичу.

Особую благодарность я выражаю моим родителям за всестороннюю помощь и поддержку.

Оглавление

Введение	5
Краткая аннотация	5
Инструменты	8
1 ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ТРАНЗИЕНТА ХТЕJ1901+014.	19
1.1 Быстрый рентгеновский транзистент ХТЕJ1901+014.	19
1.2 Наблюдения и особенности анализа данных	21
1.2.1 Оценка и учет влияния фонового излучения Галактики на спектр и кривую блеска быстрого транзистента ХТЕJ1901+014	22
1.2.2 Оценка и учет влияния дополнительного источника в поле зрения РСА	28
1.2.3 Обобщение методики	31
1.3 ХТЕJ1901+014 по данным космических обсерваторий	32
1.3.1 Исследование свойств во время вспышки (только данные ASM)	32
1.3.2 Временной анализ. Спокойное состояние источника	34
1.3.3 Спектральный анализ. Спокойное состояние источника	36
1.4 Локализация и оптический компаньон	41
1.4.1 Оценка межзвездного поглощения до источника	44
1.4.2 ХТЕJ1901-014 - маломассивная двойная система	46
1.4.3 Обсуждение	48

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЗАКОНА МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ НА ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ РТТ-150	52
2.1 Введение	52
2.2 Метод определения поглощения	56
2.3 Свойства гигантов красного сгущения в диапазонах r', i'	58
2.4 Определение закона и построение карты поглощения	60
2.4.1 Обсуждение	68
3 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРАНЗИЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ AXJ1749.1-2733 И AXJ1749.2-2725	69
3.1 Введение	69
3.1.1 Наблюдения	71
3.2 AXJ1749.1-2733 - транзиентный рентгеновский пульсар	72
3.2.1 Временной анализ	72
3.2.2 Спектральный анализ.	79
3.3 Исследование транзиентного пульсара AXJ1749.2–2725	82
3.4 Идентификация AXJ1749.2–2725 и AXJ1749.1–2733	86
3.4.1 Классы компаньонов и расстояния до систем	91
3.4.2 Выводы	96
Заключение	97
Литература	97

ВВЕДЕНИЕ

Краткая аннотация

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 среди 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 ([1], [2]). 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 [3]. 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, [4], [5]). 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 Cyg X-1, по длительности и интенсивности вполне подходящих под критерии вспышек, наблюдающихся от быстрых транзиентов [6]. 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 [4]. Но если компактный объект, входящий в двойную систему, может иметь любую природу, то неизменная 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 локали-

зовать источник с достаточной точностью во время вспышки; 2) из-за неопределенностей межзвездного поглощения и величины 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.

Инструменты

Международная обсерватория гамма-лучей ИНТЕГРАЛ

Международная астрофизическая обсерватория гамма - лучей ИНТЕГРАЛ [7] была запущена 17 октября 2002 года с космодрома “Байконур” ракетой - носителем “Протон”. Спутник был выведен на высокоапогейную орбиту с перигием 7300 км. и апогеем 153000 км; наклон орбиты составляет 51.6 град; время одного полного оборота - 72 часа. Столь вытянутая орбита позволяет ему проводить практически непрерывные наблюдения ($\sim 85\%$ времени) в условиях постоянного фона вне радиационных поясов Земли.

Основными задачами проекта являются: проведение сверхтонкой ($E/\delta E=500$) спектроскопии космического излучения и построение детальных изображений неба в диапазоне энергий от 15 кэВ до 10 МэВ с одновременным мониторингом космических источников в рентгеновском (3-35 кэВ) и оптическом диапазонах. Для решения поставленных обсерватория оборудована следующими приборами: спектрометр SPI (20 кэВ - 8 МэВ), телескоп IBIS (15-200 кэВ), рентгеновский монитор JEM-X (3-35 кэВ) и оптический монитор OMC (Рис.1).

Телескоп IBIS

В настоящей работе часть анализа свойств источников была выполнена по данным телескопа IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite). С его помощью возможно получить локализацию источников жесткого рентгеновского излучения с точностью до 1.5 угловых минут. Прибор построен по принципу кодирующей апертуры и эффективно работает в диапазоне энергий от 15 кэВ до 200 кэВ. Телескоп состоит из детектора и вольфрамовой кодирующей маски, которая поднята над детектором на 3.2 метра. В детекторе используется два слоя чувствительных элементов, один слой расположен поверх другого. Верхний слой (ISGRI), включающий в себя 16384 кадмий-теллурических (Cd-Te) элемента, позволяет обнаруживать низкоэнер-

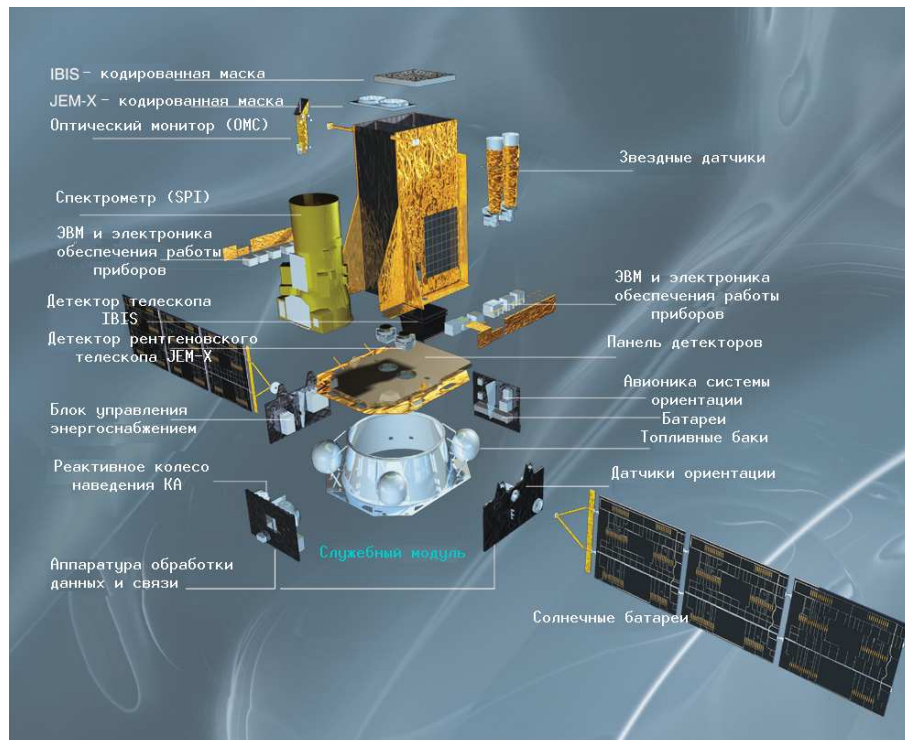


Рис. 1. Бортовая аппаратура обсерватории ИНТЕГРАЛ

гичные гамма-лучи (15-200 кэВ). Второй (PICsIT) слой состоит из 4096 цезий-йодных (CsI) элементов и обеспечивает регистрацию высокоэнергичных гамма-квантов вплоть до энергий ~ 10 МэВ. В данной работе использовались лишь данные слоя ISGRI [8]. Основные характеристики ISGRI/IBIS приведены в таблице 1.

Таблица 1. Научные характеристики телескопа ISGRI/IBIS

Рабочий диапазон энергии	15 кэВ – 200 кэВ
Энергетическое разрешение (FWHM)	7% на 100 кэВ
Эффективная площадь	960 см ² на 50 кэВ
Поле зрения	9° × 9° (кодирование, 100%) 19° × 19° (кодирование, 50%)
Угловое разрешение (FWHM)	12'
Чувствительность в континууме фотонов см ⁻² сек ⁻¹ кэВ ⁻¹ (значимость детектирования 3σ, ΔE = E/2, период накопления сигнала 10 ⁶ сек)	3.8 × 10 ⁻⁷ на 100 кэВ
Чувствительность в линии фотонов см ⁻² сек ⁻¹ (3σ, период накопления сигнала 10 ⁶ сек)	1.3 × 10 ⁻⁵ на 100 кэВ
Абсолютная временная точность (3 σ)	61 μс

Временной анализ данных IBIS/ИНТЕГРАЛ был проведен с использованием программного обеспечения разработанного National Institute of Astrophysics, Палермо, Италия¹ [9]. Для проведения спектрального анализа применялось программное обеспечение созданное в Институте космических исследований РАН, Москва, Россия (описание его основных особенностей можно найти в работах [10] и [11]).

¹<http://www.pa.iasf.cnr.it/~ferrigno/INTEGRALsoftware.html>

Космическая обсерватория RXTE

Космическая обсерватория RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) на сегодняшний день представляет собой инструмент, который наиболее полно позволяет исследовать переменность космических объектов в рентгеновском диапазоне энергий [12]. RXTE был выведен на околоземную круговую орбиту 30 декабря 1995 года. Параметры орбиты: высота – 600 км., наклон – 23° . Спутник оборудован следующими приборами: монитор всего неба ASM (1.5-12 кэВ), спектрометр PCA (2-60 кэВ), спектрометр HEXTE (20-200 кэВ) (Рис.2). В настоящей работе использовались данные приборов ASM и PCA.

Монитор всего неба ASM

Монитор ASM состоит из трех широкоугольных теневых камер, оборудованных ксеноновыми пропорциональными детекторами общей площадью 90 см². ASM – прибор с широким полем зрения, обеспечивающий регулярное наблюдение более 300 рентгеновских источников в диапазоне энергий 1.5-12 кэВ в трех энергетических каналах А (1.5-3 кэВ), В (3-5 кэВ), С (5-12 кэВ) с периодом, равным периоду обращения спутника вокруг Земли – 90 мин. Каждое наблюдение состоит из нескольких измерений длительностью 90 сек., которые могут как непрерывно следовать друг за другом, так и разделяться длительными промежутками времени. Чувствительность прибора – около 20 мКраб, пространственное разрешение $3' \times 15'$. Благодаря широкому полю зрения и достаточно высокой чувствительности прибор хорошо подходит для обнаружения быстрых переменных источников, однако, наличие временных провалов в наблюдении не всегда позволяет детально изучить эту переменность. Результаты наблюдений по всем источникам находятся в свободном доступе (www.xte.mit.edu).

Также следует отметить, что поток, равный 1 Краб для энергетического канала А соответствует 26.8 аппаратным отсчетам/с, для канала В - 23.3; для С - 25.4, и, соответственно, в полном диапазоне энергий 1.5 - 12 кэВ 1 краб – 75.5 отсчетов/с.

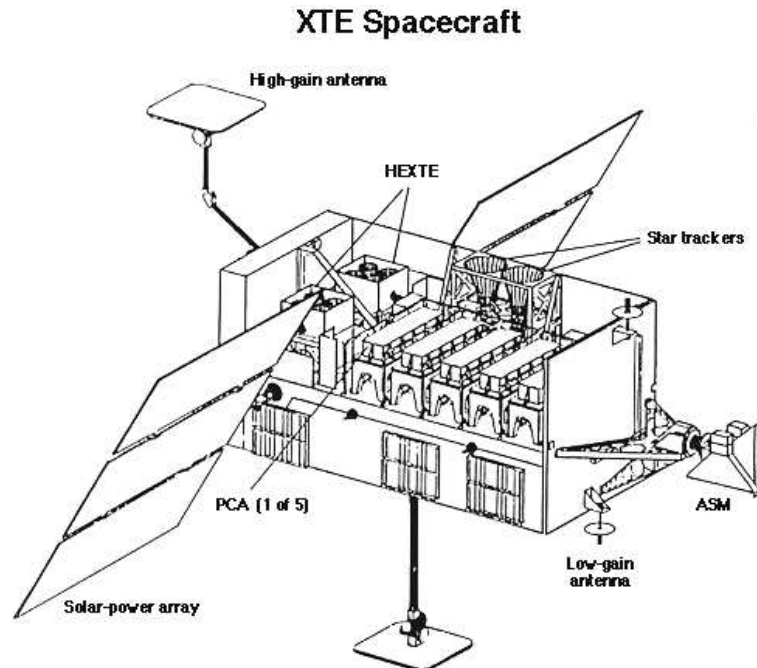


Рис. 2. Космическая обсерватория RXTE.

Спектрометр PCA.

Спектрометр PCA (см. рис. 2; таб.2) представляет собой массив из 5 пропорциональных ксеноновых детекторов (PCU0...PCU4) с пропановым вето-слоем общей площадью 6500 см². Пропановый вето-слой служит для отсеивания фоновых электронов, а также как антисовпадательная защита от фронтально падающих заряженных частиц. Научные данные собираются с трех слоев анодов, расположенных в ксеноновом слое. В самом низу располагается слабый калибровочный источник рентгеновского излучения Am²⁴¹, каждый фотон от которого записывается с индивидуальной меткой.

Поток в 1 Краб в диапазоне 3 - 20 кэВ соответствует 11000 отсчетам/с в случае 5 работающих PCU. Вклад каждого PCU в полный измеренный поток PCU0 - 0.204, PCU1 - 0.204, PCU2 - 0.206, PCU3 - 0.194, PCU4 - 0.192. Модель фона для спектрометра PCA была взята из стандартной базы данных

CALDB² и в настоящем исследовании была выбрана с учетом того, что предполагалось изучение слабого источника. Стоит также отметить что, с 2000 года у PCU0 отсутствует пропановый вето-слой [13], но, несмотря на это, разработчикам прибора удалось подобрать корректную модель фона для этого детектора. При обработке данных наблюдений обсерватории RXTE использовался стандартный набор программ, входящий в пакет HEASOFT 6.0.

Таблица 2. Основные характеристики спектрометра PCA.

значимый энергетический диапазон	3 – 20 кэВ
энергетическое разрешение	<18% на 6 кэВ
радиус поля зрения	1°
наилучшее временное разрешение	1 мкс.
чувствительность	0.1 мКраб
фон	2 мКраб

Космическая обсерватория ROSAT

Космическая рентгеновская обсерватория ROSAT (Roentgen Satellite) была выведена на орбиту 1 июня 1990 года и проработала на орбите около 9 лет³. На борту спутника находился рентгеновский зеркальный телескоп (X-ray Telescope, XRT), в фокальной плоскости которого находилось 3 прибора: два позиционно-чувствительных пропорциональных счётчика (Position Sensitive Proportional Counters, PSPC-B - для точечных наведений и PSPC-C - для обзора) и прибор для получения высококачественных изображений с высоким разрешением (High Resolution Imager, HRI). Ультрафиолетовый телескоп (extreme ultraviolet, XUV) и широкоугольная камера (Wide Field Camera, WFC), которые были установлены соосно XRT, обеспечивали наблюдение в диапазоне от 0.042 до 0.21 кэВ. Общий вид обсерватории ROSAT

²http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/caldb/caldb_intro.html

³<http://www.mpe.mpg.de/xray/wave/rosat/links/index.phpphomepages>

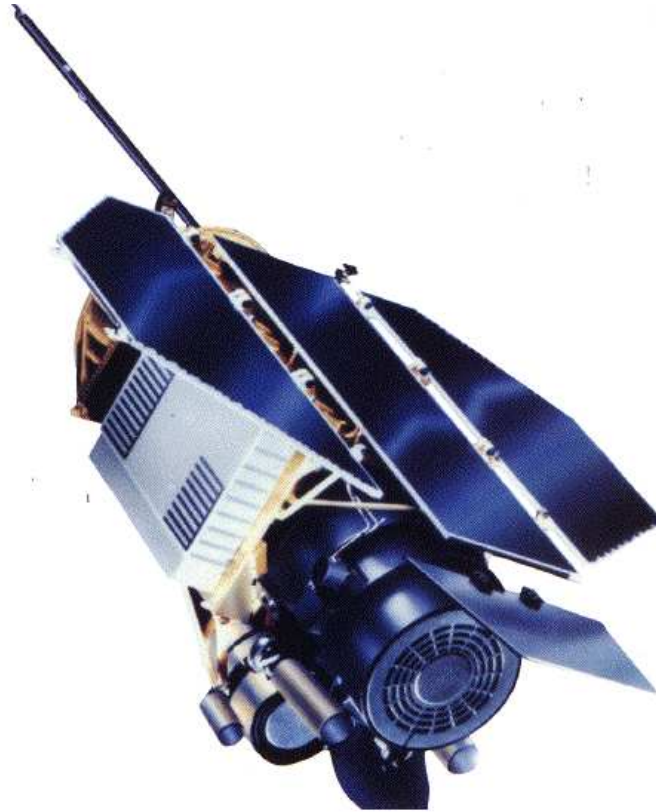


Рис. 3. Общий вид обсерватории ROSAT

показан на рис.3. Уникальной особенностью этой обсерватории было достаточно высокое пространственное разрешение.

В настоящей работе использовались данные приборов PSPC-C и HRI, их основные характеристики приведены в таблице 3. Обработка данных обзора всего неба телескопом PSPC-C/ROSAT была проведена в соответствии со стандартной методикой обработки данных телескопа PSPC для источников, расположенных в поле зрения прибора с некоторым смещением относительно его центра, а также с учетом рекомендаций, приведенных в работе [14]. Калибровочные данные, а также матрица отклика для PSPC-C/ROSAT, были взяты из стандартной базы HEASARC CALDB. При обработке данных наблюдений обсерватории ROSAT использовался стандартный набор программ, входящий в пакет HEASOFT 6.0.

Таблица 3. Основные характеристики приборов обсерватории ROSAT

энергетический диапазон	0.1 – 2.5 кэВ
энергетическое разрешение	PSPC: $\delta E/E=0.43 \times (E/0.93) - 0.5$
эффективная площадь	PSPC: 240 см ² на 1 кэВ HRI: 80 см ² на 1 кэВ
поле зрения	PSPC: радиус 1° HRI: 38' × 38'
пространственное разрешение	HRI: 2''

Космическая обсерватория XMM-Newton

Главной особенностью обсерватории XMM-Newton [15] (рис.4), выведенной на орбиту 10 декабря 1999 года, стало наличие сразу трех рентгеновских телескопов, входящих в состав комплекса EPIC, имеющих рекордную эффективную площадь в диапазоне энергий 0.1-15 кэВ среди телескопов зеркального типа. Каждый телескоп представляет собой модуль зеркал и ПЗС матрицу, расположенную в его фокусе. Зеркальные модули состоят из 58 тонких никелевых зеркал, имеющих форму параболоида, переходящего в гиперboloид, и собранных вместе в конструкцию наподобие “луковицы”. С помощью телескопов этой обсерватории возможно определять положения рентгеновских объектов с точностью лучше чем 2 угловые секунды. В настоящей работе использовались данные рентгеновских телескопов MOS/EPIC и PN/EPIC (таб. 4). Научные данные обсерватории XMM-Newton были обработаны с помощью стандартного программного обеспечения SAS 7.1.0⁴. Стандартным образом была произведена фильтрация протонных вспышек, которые являются результатом взаимодействия мягких протонов в магнитосфере Земли с

⁴<http://xmm2.esac.esa.int/sas/>



Рис. 4. Общий вид обсерватории XMM-Newton

телескопом. Для восстановления спектров и кривых блеска источников отбирались фотоны, попадающие в круг радиусом $14''$ вокруг исследуемого объекта; спектры и кривые блеска фона были получены в областях того же радиуса в окрестности источников.

Таблица 4. Основные характеристики приборов обсерватории XMM-Newton

энергетический диапазон	0.1 – 15 кэВ
энергетическое разрешение	$(E/dE) \sim 20-50$
эффективная площадь	MOS: 922 см^2 на 1 кэВ PN: 1227 см^2 на 1 кэВ
поле зрения	MOS: $33' \times 33'$ PN: $27.5' \times 27.5'$

Конечный модельный анализ временных и спектральных данных был про-

изведен с использованием программного обеспечения, входящего в пакет HEASOFT 6.0 ⁵.

Данные всех рентгеновских обсерваторий, используемые в диссертации, были получены из архива HEASARC и находятся в открытом доступе.

Каталоги и наземные наблюдательные комплексы

Значительная часть работы была выполнена с использованием наземных наблюдательных комплексов, в том числе телескопов РТТ-150, SOFI/NTT и БТА(САО). Основные характеристики перечисленных телескопов приведены в таблице 5.

Российско-турецкий 1.5-м телескоп (РТТ-150) установлен в Государственной Обсерватории Турции ТУБИТАК, на юге Турции, в 50 км от города Анталия, на высоте 2500 м (гора Бакырлытепе). В состав фокальных приборов телескопа входят: ПЗС-фотометр (ПЗС-матрицы Андор DW-436), TFOSC – спектрометр среднего и низкого разрешения (ПЗС-матрица Firechild).

Телескоп NTT (New Technology Telescope) установлен в Чили на горе Cerro la Silla и представляет собой 3.58-м альт-азимутальный телескоп системы Ричи-Кретьена, в котором впервые была применена активная оптика. На текущий момент основными приборами этого телескопа являются широкоугольный инфракрасный спектро-фотометр SOFI и спектрограф EFOSC2. В настоящей работе использовались данные, взятые из общедоступного архива ESO ⁶.

БТА(6-м Большой Телескоп Альт-азимутальный) располагается на горе Пастухова в Карачаево-Черкессии на высоте 2070 м над уровнем моря и является одним из важнейших инструментов Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН).

Полученные оптические данные были обработаны с помощью извест-

⁵<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/lheasoft>

⁶<http://archive.eso.org/>

Таблица 5. Основные характеристики используемых телескопов

телескоп	диаметр зеркала	фотометрическая система; использ. фильтры [16]	поле зрения
РТТ-150 ¹¹	1.5 м	SDSS, Бессель; g', r', i'	Андор DW-436: 8' × 8' TFOSC: 13.3' × 13.3'
NTT ¹²	3.6 м	2MASS; J, H, Ks	SOFI: 2' × 2'
БТА(САО) ¹³	6 м	Бессель; I	14'

ных программных пакетов (*IRAF*⁷, *zhtools*⁸, etc.) и некоторых специальных программ. PSF-фотометрия изображений была выполнена с помощью программного обеспечения DAOPHOT III⁹. Астрометрические решения были получены с помощью программного пакета *WCStools*¹⁰ и каталога 2MASS в качестве опорного.

В работе также использовались данные известных оптических и инфракрасных каталогов, находящихся в открытом доступе, а именно: USNO-B1 – фотометрические данные полученные из обзора Паломар [17]; Hipparcos – фотометрический обзор ближайшей части Галактики данные в системе Hipparcos (преобразовано в систему Джонсона), а также параллаксы для близких звезд [20]; 2MASS¹⁴, [18] – обзор всего неба в ближнем инфракрасном диапазоне, фильтры J, H, Ks; Carsberg Meridian catalog - обзор неба в фильтре r' фотометрической системы SDSS [19]; DENIS¹⁵ – обзор южного неба в ближнем инфракрасном диапазоне, фильтры i(Gunn), H, Ks.

⁷<http://iraf.noao.edu/>

⁸<http://hea-www.harvard.edu/RD/zhtools/>

⁹<http://www.eso.org/sci/data-processing/software/scisoft/>

¹⁰<http://tdc-www.harvard.edu/wcstools/>

¹⁴<http://irsa.ipac.caltech.edu/applications/2MASS>

¹⁵<http://cdsweb.u-strasbg.fr/denis.html>

Глава 1

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ТРАНЗИЕНТА XTEJ1901+014.

1.1 Быстрый рентгеновский транзистент XTEJ1901+014.

Источник XTE J1901+014 был открыт монитором всего неба ASM космической обсерватории RXTE во время вспышки 6 апреля 2002 г, когда поток фотонов от него достигал уровня 0.9-1.2 Краб в диапазоне энергий 1.5-12 кэВ. Из-за технических особенностей монитора ASM (см. Введение) удалось лишь приблизительно оценить длительности этой вспышки: > 2 мин. и < 3.15 часов. Координаты источника в системе единиц (J2000.0) были определены как: R.A. = $19^h 01^m 36^s$, DEC = $+1^\circ 26' 4''$, точность локализации составила $\sim 3'$ [21]. Вывода о природе источника сделано не было, но отмечалось сходство временного профиля этой вспышки с профилем вспышек, наблюдавшихся от микроквара V4641 Sgr. При анализе архивных данных монитора ASM было отмечено наличие еще одной вспышки от исследуемого объекта - в июле 1997 года. Тогда поток в диапазоне энергий 1.5-12 кэВ составлял 0.4 – 0.5 Краб, а длительность вспышки – > 6 мин и < 8 часов [21]. Ни одну из этих вспышек не удалось связать с рентгеновским послесвечением

гамма-всплесков, поскольку подобных событий, локализованных достаточно близко по времени и координатам к исследуемому объекту в соответствующих каталогах обнаружено не было. Стоит отметить, что других столь же интенсивных всплесков рентгеновской активности от источника зарегистрировано не было.

Позже, с использованием каталога обсерватории ROSAT, было установлено, что объект 1RXSJ190141.0+012618, открытый телескопом PSPC-C/ROSAT (R.A. = $19^h 01^m 41^s$, DEC = $+1^\circ 26' 2''$), расположен в пределах ошибки на локализацию источника XTE J1901+014 монитором ASM/RXTE. Анализ архивных данных прибора ROSAT/HRI показал, что во время сеанса наблюдений 3 октября 1994 г. источник также значимо регистрировался, однако, его положение имело некоторое смещение относительно положения, первоначально определенного ROSAT/PSPC (положение источника согласно данным ROSAT/HRI: RA = $19^h 01^m 40.1^s$, DEC = $+1 26' 30''$, точность локализации $10''$). Было сделано предположение, что источник 1RXSJ190141.0+012618, а после уточнения положения с помощью ROSAT/HRI - 1RXH J190140.1+012630, и XTE J1901+014 являются либо одним и тем же объектом, либо источник из каталога ROSAT является невспыхивающим компаньоном транзиентного источника XTE J1901+014 [22]. Но, ввиду относительно большой неопределенности положения XTEJ1901+014, это предположение нуждалось в дополнительной проверке.

Последующие поиск и отождествление оптического компаньона XTEJ1901+014 серьезно осложнялись близостью этого транзиента к галактической плоскости. В частности, воспользовавшись картами DSS (Digital Sky Survey) и оптическими наблюдениями на телескопе JKT, [23] предположил, что компаньоном системы является голубая звезда с координатами (J2000) R.A.= $19^h 01^m 39.^s90$, DEC= $+01^\circ 26' 39.2''$. Дальнейший анализ данных каталога 2MASS показал, что в область ошибки на локализацию источника 1RXH J190140.1+01263 попадает еще одна звезда - 2MASS J19013983+0126325, расположенная несколько ближе к положению

рентгеновского объекта по данным HRI, и достаточно яркая в инфракрасном диапазоне энергий. В таблице 1.1 приведены величины обеих звезд в различных фильтрах.

Из всего выше сказанного понятно, что точности HRI не достаточно для однозначного определения оптического компаньона XTE J1901+014 - *необходимы наблюдения, которые позволят локализовать объект с точностью $\sim 1''$.*

Таблица 1.1. Предполагаемые компаньоны XTEJ1901+014

номер звезды	B	V	R	I	J	H	K
1	21.16 ^a	18.72 ^a	19.65 ^a	18.01 ^a	16.439 ^b	-	-
2	-	-	-	18.1 ^b	13.2 ^b	11.3 ^b	10.4 ^b

- примечание: звездные величины в таблице приведены в соответствии с данными: – JKT (Jacobus Kapryn Telescope) [23]; – каталога DENIS¹; – каталога 2MASS.

1.2 Наблюдения и особенности анализа данных

В настоящей работе для всестороннего исследования быстрого транзита XTEJ1901+014 использовались данные детектора ISGRI гамма-телескопа IBIS/ИНТЕГРАЛ, монитора всего неба ASM/RXTE, спектрометра PCA/RXTE, телескопа PSPC-C/ROSAT, а также рентгеновских телескопов PN,MOS/XMM-Newton (даты, номера наблюдений и экспозиции приведены в табл.1.2). Помимо этого были проведены поиск и идентификация оптического компаньона этого объекта. Для чего были использованы данные известных оптических и инфракрасных каталогов USNO-B1 и 2MASS, а также наблюдения на телескопах РТТ-150 и БТА(САО).

¹<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR-3>

Таблица 1.2. Приборы и наблюдения.

Обсерватория/ инструмент	Наблюдение	Дата наблюдения	Эффективная экспозиция, ксек
PSPC-C/ROSAT	RASS 3/17/51	17/09/90	~0.55
PCA/RXTE	30186-01-21-01Z	11/09/98	~0.120
PCA/RXTE	30186-01-21-01A	11/09/98	~0.12
PCA/RXTE	30186-01-16-05S	23/09/98	~1.2
PCA/RXTE	70409-01-01-05Z	21/04/02	~0.15
PCA/RXTE	70409-01-01-05S	21/04/02	~0.06
ISGRI/ИНТЕГРАЛ	орб. 48-70	03-05/03	~1400
ISGRI/ИНТЕГРАЛ	орб. 121,128,131-135	10-11/03	~219
ISGRI/ИНТЕГРАЛ	орб. 172-177,185-188,193	03-04/04	~610
PN/XMM-Newton	0402470401	11/11/06	~5
РТТ-150	-	16/11/07	~3.6
БТА(САО)	-	07/06/08	~0.6

1.2.1 Оценка и учет влияния фонового излучения Галактики на спектр и кривую блеска быстрого транзientа XTEJ1901+014

Одним из приборов, по данным которого проводилось настоящее исследование, был спектрометр PCA обсерватории RXTE. И с этим связаны некоторые особенности анализа данных, которые важно отметить.

Хорошо известно, что этот прибор не способен напрямую локализовать точечные источники, его детектор не обладает позиционной чувствительностью - он просто собирает поток излучения со всего поля зрения и, если в это поле попадает сразу нескольких точечных источников или некоторая фоновая засветка, спектрометр PCA регистрирует суммарный поток, в котором выделить вклад каждого отдельного компонента достаточно трудно. Таким

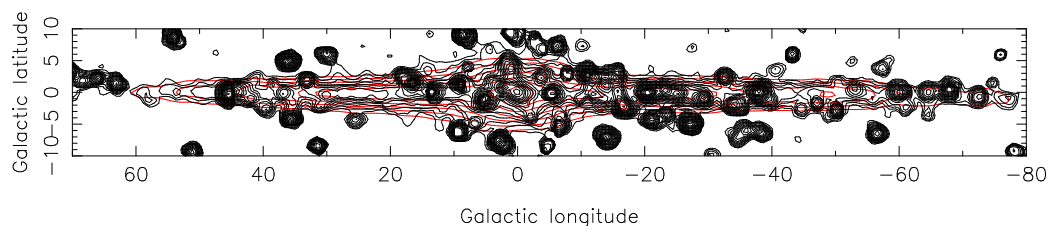


Рис. 1.1. Карта неба вблизи галактической плоскости по данным PCA/RXTE (3 - 20 кэВ) [24]

образом, форма и нормировка спектров исследуемых объектов, в особенности слабых, могут быть существенно искажены.

Транзиентный источник XTEJ1901+014 расположен достаточно близко к плоскости Галактики (галактические координаты $l = 35.38^\circ$, $b = -1.62^\circ$) и попадает в область, где высокую интенсивность имеет фоновое рентгеновское излучение [24]. Таким образом, для того чтобы восстановить реальный спектр и кривую блеска исследуемого объекта, необходимо корректно учесть вклад этого излучения при обработке данных PCA/RXTE.

На рис.2.7 представлено изображение профиля Галактики, полученное по данным обсерватории RXTE, на котором хорошо видно, что помимо точечных источников имеется некоторое распределенное излучение; форма его рентгеновского спектра одинакова в различных частях неба в окрестностях галактической плоскости, временная переменность потока также не выявлена [24]. По результатам современных исследований фоновое излучение представляет собой суперпозицию рентгеновских потоков большого количества точечных объектов [25].

Одними из первых значительных результатов исследования фонового излучения были результаты, полученные в том числе, с помощью спектрометра PCA/RXTE в работе [24]. Следует заметить, что целью той работы было изучение распределения интенсивности фонового излучения по Галактике, поэтому использовались данные, полученные во время перенаведений спутника с одного объекта на другой, когда в его поле зрения попадали области

неба, свободные от точечных источников. Такой подход позволил также получить значимый спектр фонового излучения и определить его нормировку. Однако, когда речь заходит об оценке вклада фонового излучения в спектр отдельного объекта, перенаведения можно использовать лишь для определения потока этого излучения в окрестностях источника (получения нормировки спектра), тогда как значимой формы спектра получить не удастся ввиду малости экспозиции. Поэтому в настоящей работе для изучения фонового излучения помимо перенаведений и сканов предлагается использовать данные, полученные во время точечных наведений на близкие транзиентные пульсары в момент, когда они находились в “выключенном” состоянии. Так удастся получить длительную экспозицию наблюдения “пустой” области неба и в результате - значимый спектр диффузного излучения, который затем вычитается из суммарного с правильной нормировкой. Определить, что вспомогательный пульсар находится в “выключенном” состоянии, можно просто по отсутствию пульсаций наблюдаемого потока.

Для оценки вклада фонового излучения в суммарный спектр РСА/RXTE при изучении транзиента XTEJ1901+014 хорошо подходит наблюдение 30186-01-16-05S. В нем по времени можно выделить две части: собственно перенаведение, во время которого поле зрения спутника перемещалось вдоль параллели $b \sim 1.5^\circ$ (на рис.1.2 первые 400 сек. наблюдения), от долготы $\sim 14^\circ$ до $\sim 35^\circ$ (см.рис.1.2), и точечное наведение на источник. Также хорошо видны моменты, когда в поле зрения прибора во время перенаведения попадали точечные источники (пик на 1.2 в районе 250 секунд) и отрезки времени, когда регистрируется только постоянное излучение, - это и есть фоновое рентгеновское излучение. Наблюдаемое постоянство интенсивности этого излучения при перемещении поля зрения спектрометра РСА вдоль параллели $b \sim 1.5^\circ$ хорошо согласуется с результатом, полученным в работе [24] для параллели $b \sim 0.5^\circ$.

Итак, теперь нам известна интенсивность фонового излучения: в окрестностях исследуемого объекта она соответствует ~ 8.5 отсчетов/с или прибли-

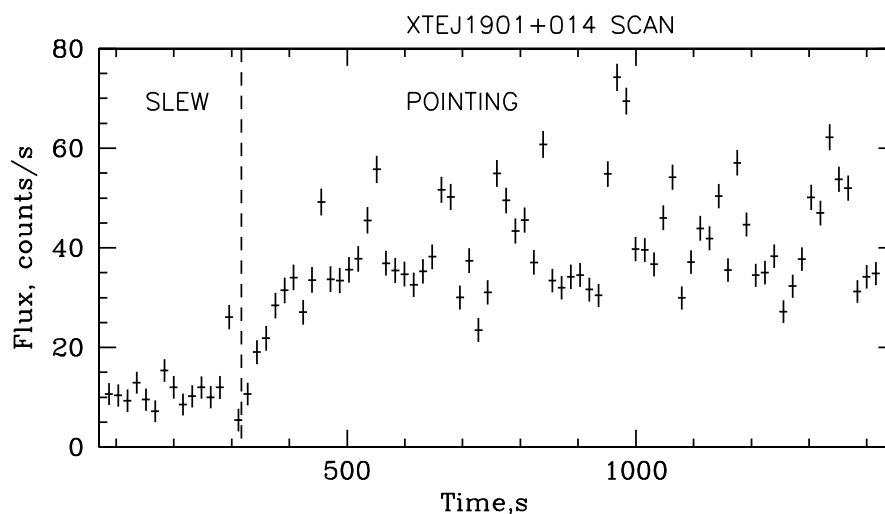


Рис. 1.2. Кривая блеска, полученная по данным наблюдения 30186-01-16-05S спектрометра PCA/RXTE, которая отражает изменение регистрируемого потока в диапазоне энергий 3-20 кэВ, связанное с перемещением поля зрения спектрометра: слева от штриховой линии – перенаведение на источник, справа – собственно наблюдение источника при неподвижном поле зрения PCA/RXTE.

зительно 0.75 мКраб. Далее, чтобы построить значимый спектр фонового излучения необходимо провести специальное исследование некоторого транзитного пульсара в окрестностях источника XTEJ1901+014.

В качестве такого пульсара был выбран GS 1843-02, локализованный с координатами $l \sim 31^\circ$ и $b \sim -0.5^\circ$. Так во “включенном” состоянии (наблюдение 30141-05-01-00, октябрь 1998 года) от него наблюдался значительный поток ~ 150 отсчетов/сек в диапазоне 3-20 кэВ (около 14 мКраб), когерентные пульсации с периодом 94 секунды и спектр с экспоненциальным завалом на высоких энергиях, характерный для рентгеновских пульсаров (для GS 1843-02 завал наблюдался на энергиях выше $\sim 14-15$ кэВ). В “выключенном” состоянии (наблюдение 30141-05-11-00 (октябрь 1998 года рис.1.3) не наблюдалось ни периода в сигнале - спектр мощности соответствовал спектру мощности “белого шума”, ни спектра с завалом на высоких энергиях. Таким образом, регистрируемый в этом наблюдении поток излучения соответствует потоку

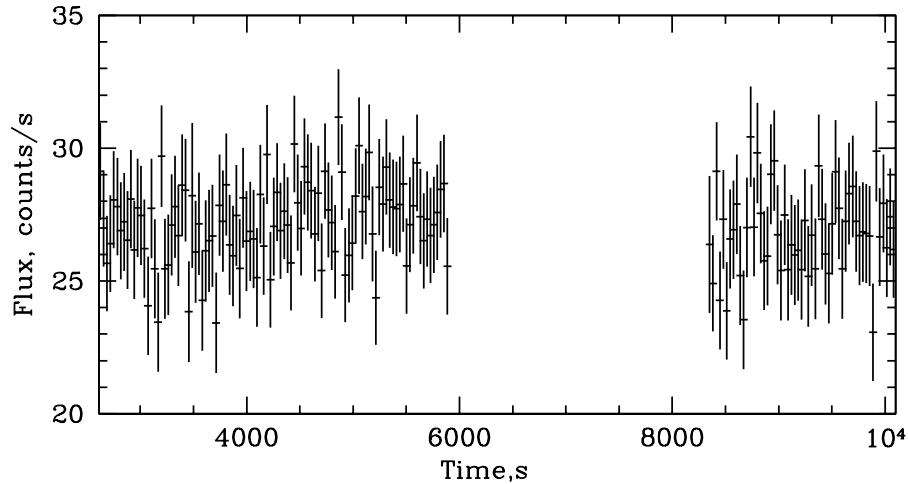


Рис. 1.3. Кривая блеска полученная из точечного наведения 30141-05-11-00 на транзитный пульсар GS 1843-02.

собственно фонового излучения. Его величина, в среднем, составляла ($\sim 25 \pm 2$) отсчетов/с. Для дополнительного подтверждения правильности полученных результатов был проведен анализ наблюдения 30416-01-01-02S области NEW_PULSAR_NEAR_SCUTUM 1.4, в котором источник GS 1843-02 попадал в поле зрения спектрометра с отклонением $\sim 45'$ от оптической оси и других источников в поле зрения не было. В результате в этой области был зарегистрирован постоянный поток равный ($\sim 22 \pm 2$) отсчетов/с и получен спектр, аналогичный спектру, восстановленному при анализе наблюдения 30141-05-11-00 (как по форме так и по нормировке), но меньшей значимости (из-за меньшей экспозиции наблюдения), что подтверждает правильность выбранного метода. Стоит отметить, что если бы в наблюдении 30416-01-01-02S пульсар GS 1843-02 находился во “включенном” состоянии, то, с учетом эффективности коллиматора при оффсете $\sim 40'$, регистрируемый поток от источника должен был составлять ≈ 50 отсчетов/с, которого достаточно для регистрации пульсаций.

Таким образом, было получено очень длительное наблюдение фонового излучения, что дает возможность построить значимый спектр. Затем, пере-

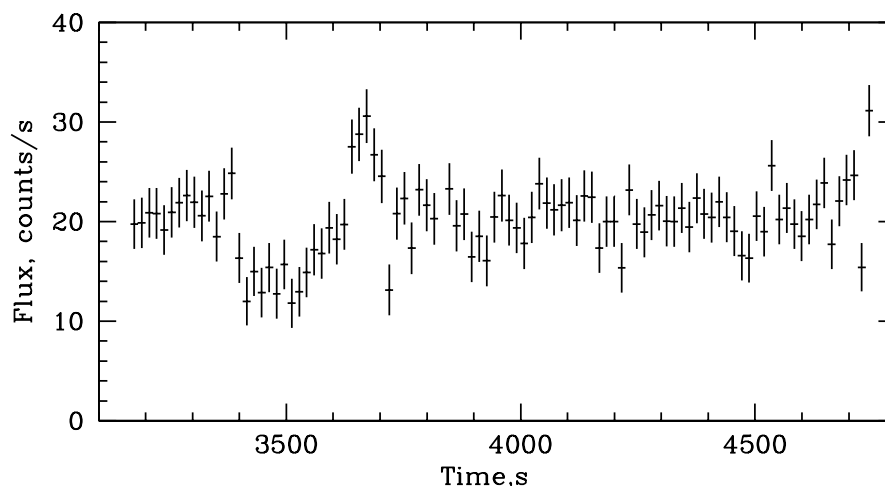


Рис. 1.4. Кривая блеска построенная по наблюдению области NEW_PULSAR_NEAR_SCUTUM (наблюдение 30416-01-01-02S) на которой спаду потока соответствует перенаведение спутника с широты $\sim -0.5^\circ$ на широту $\sim -1.5^\circ$ на долготу $\sim 30^\circ$. Остальная часть - точечное наведение с координатами $L \sim 30^\circ$, $b \sim -0.5^\circ$.

нормировав этот спектр с учетом разного количества работающих детекторов и разных широт, на которых проводилось измерение, а также учитывая тот факт, что его форма одинакова для любой точки Галактики, можно получить правильный спектр фонового излучения на широте исследуемого источника, который затем вычесть из первоначального суммарного.

Отметим, что для исследования фонового излучения брались наблюдения по возможности максимально близкие по времени к наблюдению 30186-01-16-05S источника ХТЕJ1901+014, что обеспечивает пренебрежимо малые различия в матрицах отклика детектора для этих наблюдений (дополнительное исследование матриц отклика подтверждает это). Также отметим хорошее согласие полученных результатов: форма спектра фонового излучения хребта Галактики, изменение интенсивности в зависимости от широты и долготы с результатами, полученными в работе [24].

1.2.2 Оценка и учет влияния дополнительного источника в поле зрения РСА

В самом длительном наблюдении 30186-01-16-05S в поле зрения РСА/RXTE, помимо источника ХТЕJ1901+014 (см. таб.1.2), попадал также другой объект - рентгеновский пульсар ХТЕJ1858+034 (период пульсаций 221 с). Отклонение от оптической оси спектрометра для ХТЕJ1858+034 в этом наблюдении составляло $59.332'$. Таким образом, чтобы получить более качественный спектр исследуемого транзиента необходимо корректно учесть вклад этого пульсар в суммарный спектр и кривую блеска, полученные по данным РСА/RXTE. Зная зависимость эффективности коллиматора от положения источника в поле зрения спектрометра можно определить с каким коэффициентом пересчета будет взят поток от второго источника при оценке вклада в общий поток, измеренный в наблюдении. Также можно проверить возможное соответствие всплесков активности на кривой блеска всплескам именно от другого источника.

На рис.1.5 показана зависимость рентгеновского потока центральных областей Крабовидной туманности от положения в поле зрения спектрометра для одного детектора [26]. Также было проведено дополнительное исследование для уточнения некоторых точек этой зависимости, а именно точек с отклонением $56.992'$ и $59.995'$ - что, в рассматриваемом случае, наиболее важно. В результате было показано, что при отклонении $56.992'$ поток падает приблизительно в 20 раз, а при отклонении $59.995'$ - в 36 раз (т.е. эффективность коллиматора не превышает 0.027) по сравнению с потоком от того же источника (Краба), находящегося в центре поля зрения, что хорошо согласуется с графиком на рис.1.5. Интерполируя данные графика и дополнительного анализа, для отклонения от оптической оси $59.332'$ (соответствующего отклонению ХТЕJ1858+034) была получена эффективность коллиматора 0.031. Все уточнения были проведены по данным калибровочных наблюдений 00028-02-01-00, 00028-13-01-00, 00028-14-01-00 Крабовидной туманности в январе 1996 года.

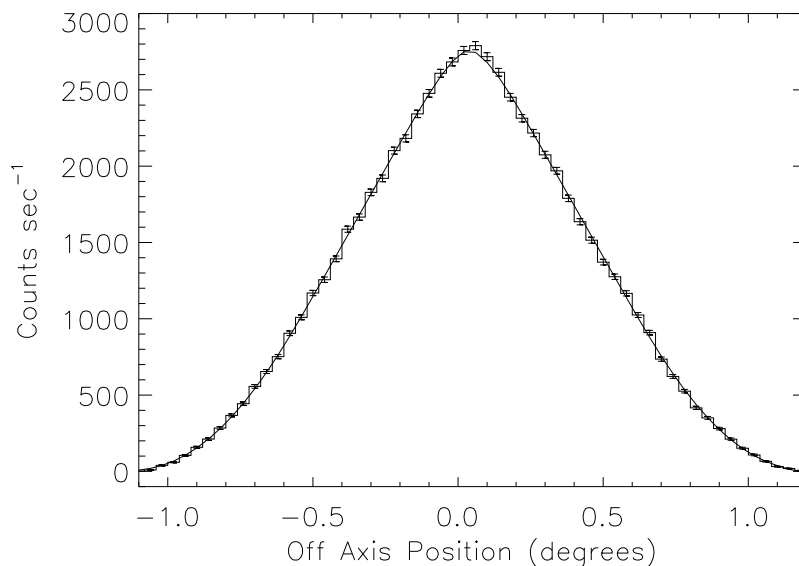


Рис. 1.5. График, отражающий зависимость величины потока Крабовидной туманности от ее положения в поле зрения спектрометра PCA/RXTE. Приведена зависимость только для одного детектора - PCU2 [26].

Согласно работе [27] XTEJ1858+034 - переменный рентгеновский пульсар: интенсивность меняется в диапазоне от 3 мКраб до 25 мКраб. Поэтому необходимо оценить каким был поток и форма спектра этого источника в наблюдении 30186-01-16-05S, чтобы затем вычесть его из суммарного с правильной нормировкой. Эту информацию можно получить, изучая данные точечных наведений спектрометра PCA/RXTE на пульсар XTEJ1858+034. А выбрать среди них такие, в которых величина потока пульсара XTEJ1858+034 не отличалась бы существенным образом от величины в наблюдении 30186-01-16-05S, можно пользуясь данными монитора всего неба ASM/RXTE. На кривой блеска (рис.1.6, а) хорошо видно, что во временных окрестностях наблюдения 30186-01-16-05S поток пульсара XTEJ1858+034, в пределах ошибки ASM/RXTE, оставался постоянным и таким же он был в феврале 1998 года (рис.1.6, б).

Поэтому для оценки потока и построения спектра было выбрано наблю-

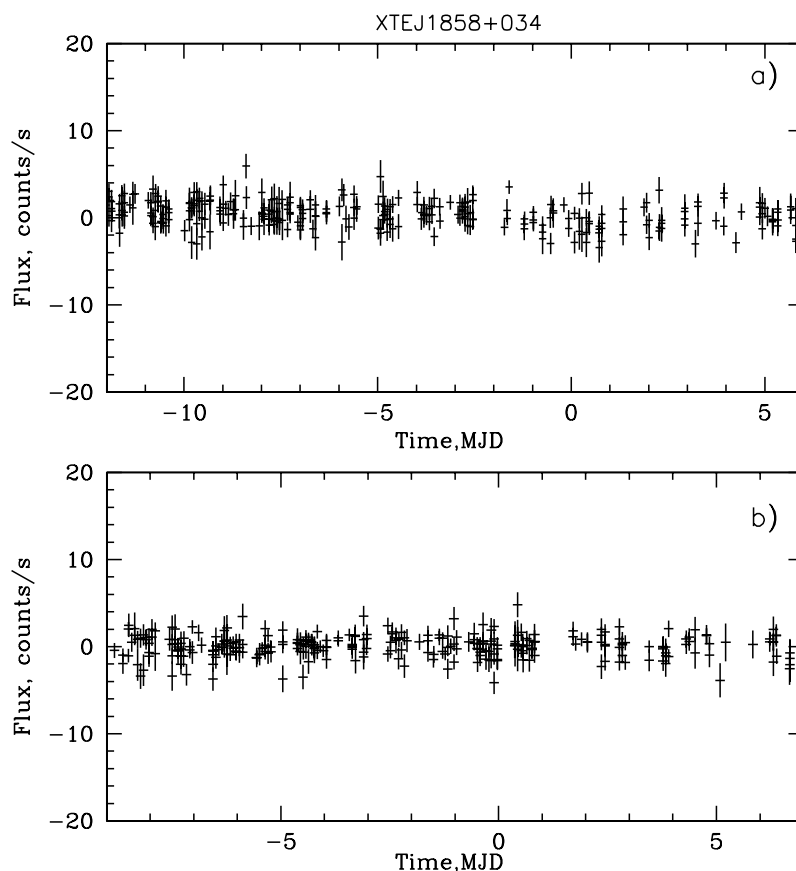


Рис. 1.6. Кривые блеска пульсара XTEJ1858+034 по данным монитора ASM/RXTE, на которых отражено поведение источника в моменты времени, соответствующие наблюдениям 30186-01-16-05S (а) и 30137-01-01-15S (б) PCA/RXTE (нули на оси времени), а также поведение источника в ближайшие несколько дней (по оси абсцисс отложено время в днях) до и после этих наблюдений. Для б) 0 соответствует дате 50872 MJD (или 28/02/98), для б) 0 - 51079 MJD (23/09/98).

дение 30137-01-01-15S (конец февраля 1998 года), откуда стало ясно, что влияние источника XTEJ1858+034 в действительности пренебрежимо мало: вклад в общий поток с учетом эффективности коллиматора не превышает ~ 0.7 отсчетов/с. То есть, даже если допустить, что во время наблюдения 30186-01-16-05S транзиента XTEJ1901+014 величина потока от XTEJ1858+034 была на самом деле в 2-3 раза больше, то и в этом случае, его вклад не превысил бы 2-3 отсчетов/с, что сопоставимо с величиной ста-

статистической ошибки на значение потока ХТЕJ1901+014.

Всвязи с этим ясно, что аперриодические всплески активности интенсивностью до 50-60 отсчетов/с регистрируемые в наблюдениях, скорее всего, не связаны с источником ХТЕJ1858+034, поскольку в этом случае его поток должен был бы достигать ~ 1600 отсчетов/с или около 65 мкраб, чего не отражает кривая блеска на рис.1.6, верхняя панель.

1.2.3 Обобщение методики

В итоге общая методика корректного восстановления кривых блеска, спектров и потоков источников, расположенных вблизи галактической плоскости, по данным спектрометра РСА/RХТЕ может быть записана в виде формулы:

$$righthda = (inida - (ansoda - RIDGE1) \times Eff - RIDGE2) \times rem \quad (1.1)$$

где *righthda* - скорректированные данные для исследуемого источника, *inida* - первоначальные данные, содержащие дополнительные источники и фоновое излучение; *ansoda* - данные по другим наблюдениям источников, попадающих в поле зрения вместе с исследуемым; *RIDGE1*, *2* - данные о фоновом излучении на широте и долготе этих источников и исследуемого источника, соответственно; *Eff* - коэффициент, отражающий эффективность коллиматора при заданном отклонении источника от оптической оси спектрометра ($Eff < 1$); *rem* - поправочный коэффициент пересчета, связанный с тем, что сам исследуемый объект может быть смещен относительно центра поля зрения спектрометра.

В представленном случае отклонение от оптической оси спектрометра для ХТЕJ1901+014 составляет от 1.2' до 7', что также было учтено при получении конечных результатов. Применяемые в этой работе методы могут быть использованы при исследовании других слабых (поток не превышает нескольких десятков мКраб.) источников, локализованных в галактической плоскости.

1.3 Источник ХТЕJ1901+014 по данным космических обсерваторий

1.3.1 Исследование свойств во время вспышки (только данные ASM)

По данным монитора ASM, во время вспышки в июне 1997 поток от источника в диапазоне энергий 1.5-3 кэВ не превышал уровня фона, в диапазоне энергий 3-5 кэВ составлял ~ 0.13 Краб, а в диапазоне энергий 5-12 кэВ достигал величины ~ 0.7 Краб. Эта жесткая вспышка регистрировалась в течение 270 с., что соответствует трем 90 секундным стандартным временным интервалам наблюдений монитора (Рис.1.7, левая панель). Вспышка в апреле 2002 года регистрировалась на протяжении двух стандартных интервалов наблюдений. Максимальный измеренный поток был выше, чем в предыдущем случае, и составил ~ 1.1 Краб и ~ 1.2 Краб в энергетических каналах 3-5 кэВ и 5-12 кэВ, соответственно; в диапазоне энергий 1.5-3 кэВ поток от источника ~ 0.8 Краб также существенно превысил уровень фона (Рис.1.7, правая панель).

Основываясь на калибровках монитора ASM по данным спектрометра PCA, [28] показали, что для источников со степенной формой спектра (в частности, кандидатов в черные дыры) можно оценить индекс наклона, используя отношение скоростей счета в двух жестких энергетических каналах монитора ASM, 3-5 кэВ и 5-12 кэВ:

$$\Gamma_{ASM} = 1.499 \times R + 0.698 \quad (1.2)$$

где R-отношение отсчетов в канале 3-5 кэВ к отсчетам 5-12 кэВ.

Пересчитав отношения потоков для всех 90-секундных. интервалов, в которых источник регистрировался монитором ASM, мы можем приблизительно проследить эволюцию его спектра во время обеих вспышек. Если во время вспышки в июле 1997 г. спектр источника был довольно жестким и практиче-

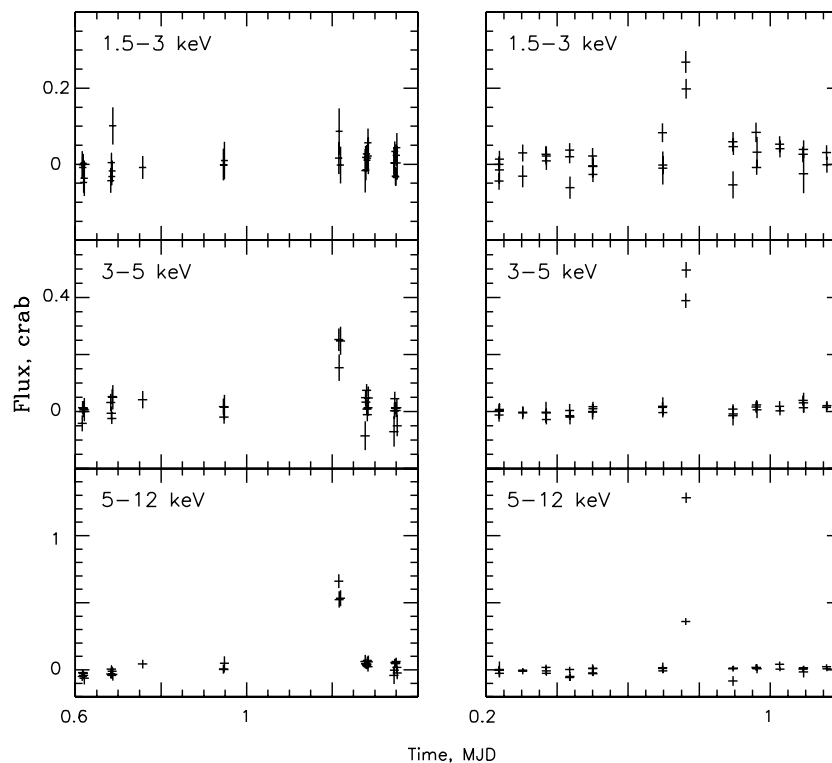


Рис. 1.7. Кривые блеска источника XTEJ1901+014 по данным прибора ASM/RXTE (1.5-12 кэВ) во время вспышечной активности: левая панель – июнь 1997 года; правая панель – апрель 2002 года. Время в MJD за 0 для левой панели взято 50619 (20/06/97 00:00:00) ; для правой панели взято 52370 (06/04/02 00:00:00). Поток, равный одному Краб, соответствует 75 отсчета/с. Величина одного наблюдательного временного интервала 90 с.

ски неизменным с $\Gamma_{ASM} \sim 1.2$, то в апреле 2002 г. наклон спектра изменился от $\sim 2.4 \pm 0.1$ в первом интервале наблюдений монитора ASM до 1.4 ± 0.1 во втором. Такое разное поведение спектра источника может быть связано с тем, что обсерватория RXTE наблюдала разные фазы вспышек в 1997 и 2002 гг.

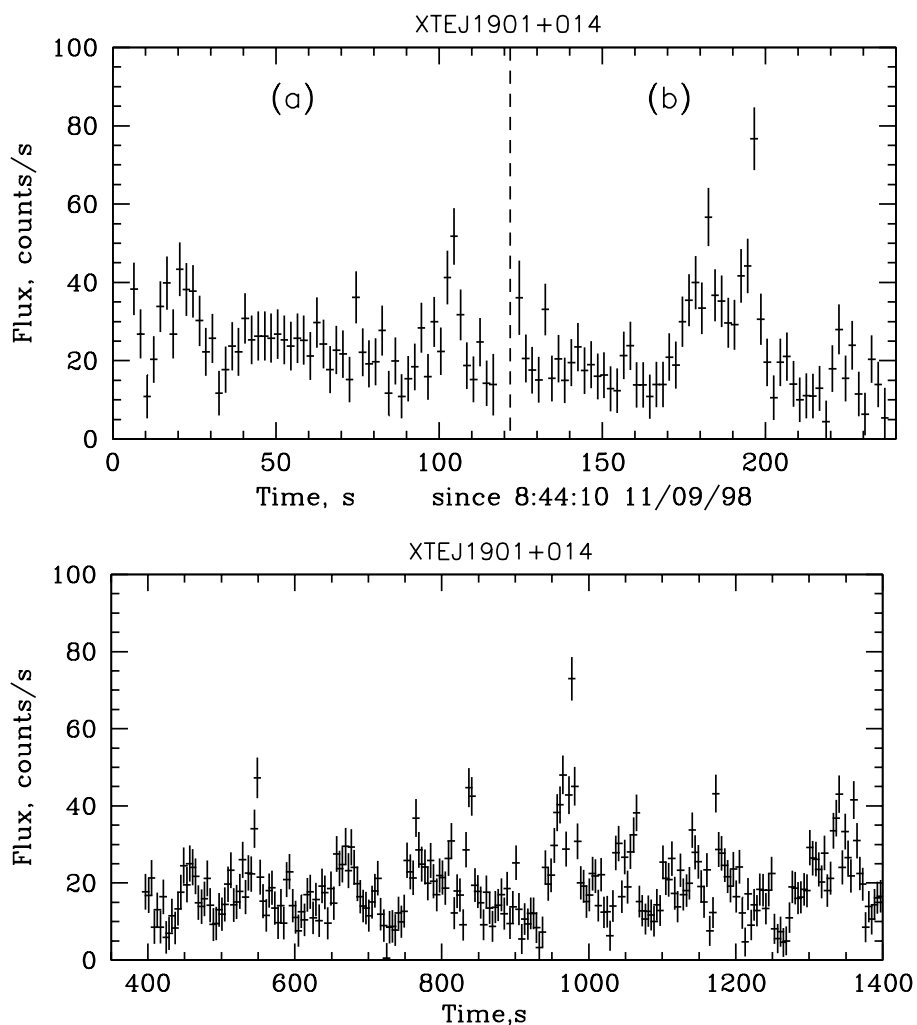


Рис. 1.8. Кривые блеска источника XTEJ1901+014, полученные по данным: наблюдений 30186-01-21-01A (а) и 30186-01-21-01Z (б) (верхняя панель); наблюдения 30186-01-16-05S PCA/RXTE с учетом диффузного излучения галактики (нижняя панель)

1.3.2 Временной анализ. Спокойное состояние источника

Прежде стоит отметить, что за все время наблюдений источника XTE J1901+014 различными обсерваториями рентгеновской активности, подобной той, что отмечалась в 1997 и 2002 гг., обнаружено не было. Там монитор всего неба ASM вне вспышек объект значимо не регистрирует. Однако, наблюдения источника более чувствительными приборами: спектрометром PCA/RXTE,

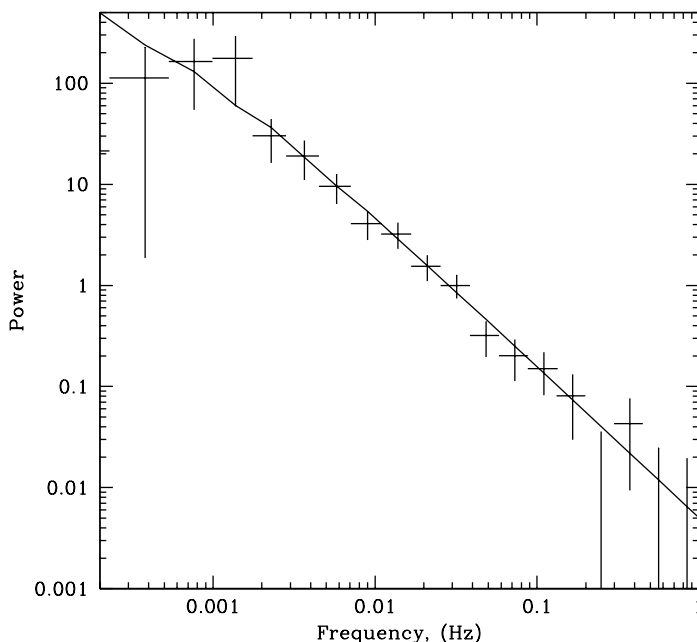


Рис. 1.9. Спектр мощности источника XTEJ1901+014, полученный по данным прибора PN/XMM-Newton. Сплошной линией показан результат наилучшей аппроксимации моделью степенного закона.

телескопами IBIS/ИНТЕГРАЛ, PSPC/ROSAT и PN/XMM-Newton отмечают наличие слабого постоянного излучения от исследуемого объекта в широком диапазоне энергий. Причем его интенсивность значимо не изменилась за более чем 16 лет: начиная с обзора всего неба обсерватории ROSAT (1990 г) и заканчивая наблюдениями XMM-Newton в 2006 году (см. таб.1.2), поток XTEJ1901+014 составлял ~ 2.7 мКрб в широком диапазоне энергий 0.6-100 кэВ.

Во всех наблюдениях PCA/RXTE отмечается наличие некоторой временной переменности – ряд всплесков активности длительностью $\sim 40-60$ сек, в максимуме которых поток от источника составляет от 7 до 9 мКрб (Рис.1.8). Однако, какой-либо периодичности появления этих всплесков выявлено не было.

В наблюдении XMM-Newton исследуемый объект регистрировался наиболее значимо и для выявления временных особенностей был построен спектр мощности источника по данным телескопа PN/XMM-Newton. Полученный спектр не выявил какой-либо периодической переменности потока от исследуемого объекта (Рис.1.9), однако, его наклон ~ -1.5 , согласно [29], характерен для аккрецирующих систем. Кроме того, в нем присутствует неявная особенность (выполаживание) вблизи частоты 0.001 Гц, которая, в соответствии с результатами той же работы, может быть связана с наличием горячей короны. На кривых блеска, построенных по данным XMM-Newton, также отмечается существование некоторой аperiodической переменности, спектрально соответствующей спокойному состоянию (как для PCA/RXTE).

1.3.3 Спектральный анализ. Спокойное состояние источника

Несмотря на относительно малую экспозицию наблюдений источника XTE J1901+014 спектрометром PCA обсерватории RXTE (см. табл.1.2) удалось восстановить качественные спектры постоянного излучения объекта для обеих серий наблюдений источника в 1998 и 2002 гг. Сравнение полученных спектров показало их практически полное совпадение как по форме, так и по потоку, что позволило в дальнейшем исследовать усредненный по всем наблюдениям спектр источника. Методика корректного восстановления спектров объектов, расположенных вблизи галактической плоскости, подробно описана выше.

Степень влияния фонового излучения Галактики на реальный спектр источника и важность его учета хорошо демонстрируется на рис.1.10, на котором приведены общий спектр, полученный спектрометром PCA (Рис.1.10а), спектр фонового рентгеновского излучения Галактики на широте исследуемого объекта (Рис.1.10в) и истинный спектр источника XTE J1901+014 в диапазоне энергий 3-20 кэВ (Рис. 1.10б).

Дальнейший анализ полученного спектра проводился с использованием

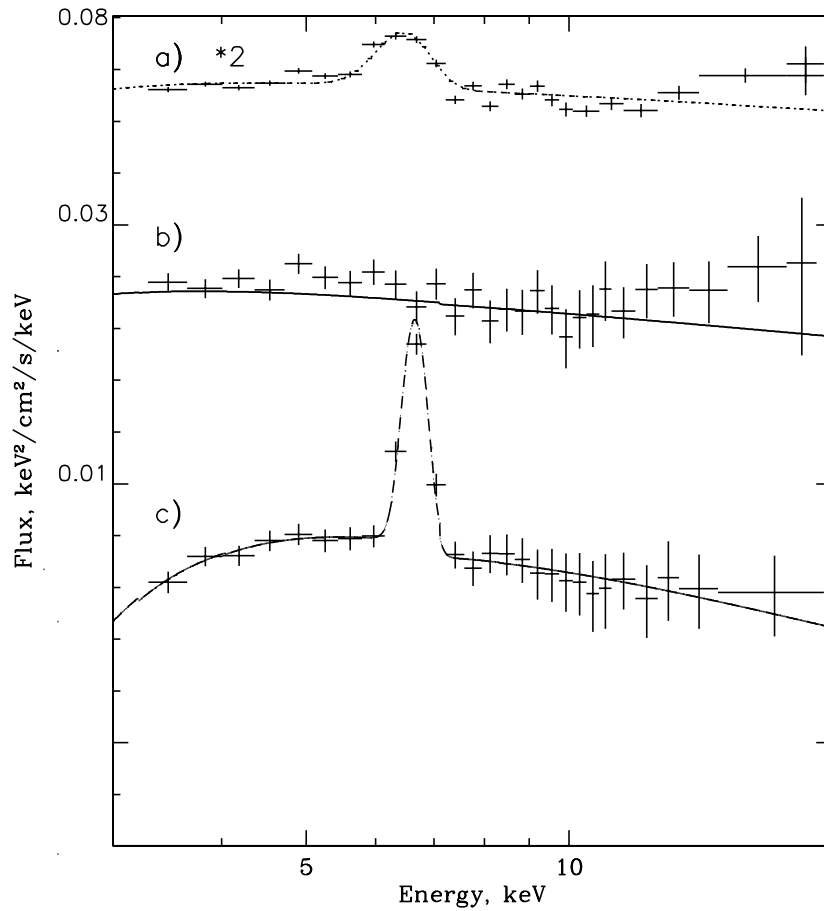


Рис. 1.10. а) Энергетический спектр области неба радиусом 1 град., содержащей источник XTEJ1901+014, построенный по данным спектрометра PCA/RXTE (для наглядности интенсивность удвоена); б) истинный энергетический спектр источника XTEJ1901+014; в) энергетический спектр диффузного излучения Галактики. Линиями показаны модели, наилучшим образом описывающие полученные спектры.

программы XSPEC². При этом, помимо прочего, учитывалась систематическая погрешность 1%, связанная с процессом восстановления данных с помощью программного обеспечения. Спектр источника был аппроксимирован простой моделью степенного закона:

$$A(E) = K \times (E/1keV)^{-\Gamma}$$

где Γ - фотонный индекс, K - нормировка фотон/кэВ/см²/с на 1кэВ.

Используя данные обзора всего неба телескопом PSPC-C/ROSAT, также был получен значимый спектр объекта в диапазоне 0.6-2 кэВ, нормировка которого хорошо совпадает с нормировкой спектра по данным PCA (3-20 кэВ), однако, для описания совместного спектра PSPC-PCA помимо модели степенного закона потребовалось введение фактора межзвездного поглощения $M(E) = \exp(-N_H \times \sigma(E))$, где $\sigma(E)$ – сечение поглощения (без учета томпсоновского рассеяния), которое в направлении на данный источник, по результатам анализа, соответствует поверхностной плотности атомов водорода $N_H = (3.4 \pm 0.7) \times 10^{22}$ атомов/см². В результате были получены следующие параметры наилучшей аппроксимации: $\Gamma = 2.26 \pm 0.03$, $\chi^2 = 0.63$ (43 d.o.f.). Модель, описываемая этими параметрами, показана на рис. 1.11 сплошной линией.

Спектр источника в жестком рентгеновском диапазоне энергий (> 20 кэВ), полученный по данным детектора ISGRI обсерватории ИНТЕГРАЛ, также хорошо описывается моделью степенного закона с тем же самым наклоном. Принимая во внимание неизменность спектра источника в диапазонах энергий 0.6-2 кэВ и 3-20 кэВ, одинаковую форму спектра и потоки как выше 20 кэВ, так и ниже, логично предположить, что форма спектра источника постоянна и в широком диапазоне энергий 0.6-100 кэВ. В таком случае, комбинируя данные обсерваторий ROSAT, RXTE и ИНТЕГРАЛ,

²<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xanadu/xspec/index.html>

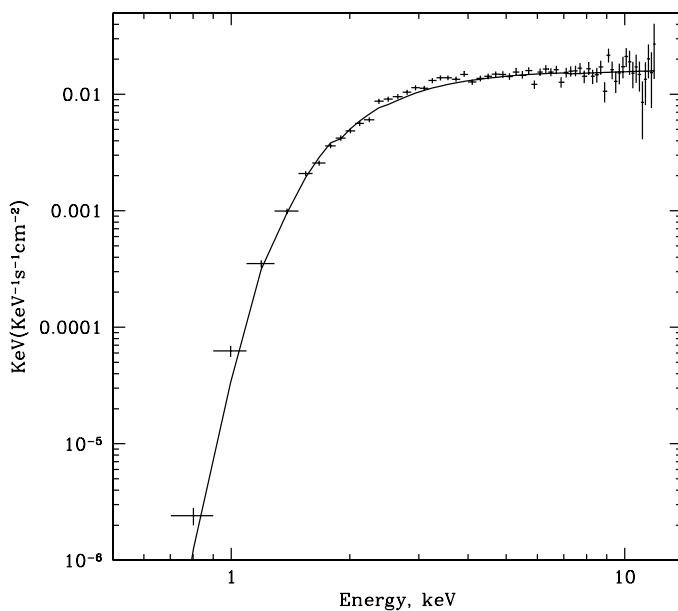
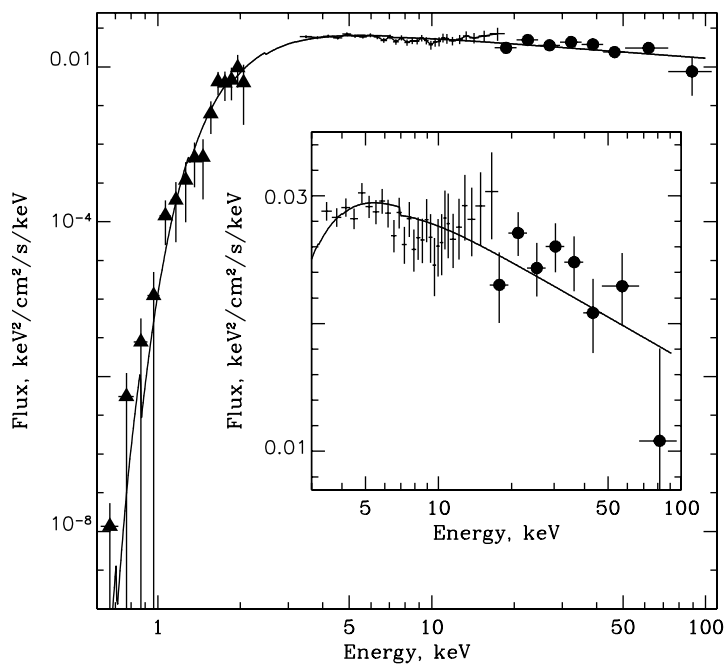


Рис. 1.11. Верхняя панель: широкополосный энергетический спектр (0.6-100 кэВ) источника XTEJ1901+014 по данным приборов PSPC-C/ROSAT (треугольники), PCA/RXTE (крестики) и ISGRI/ИНТЕГРАЛ (кружки). Нижняя панель: энергетический спектр источника XTEJ1901+014 в диапазоне 0.5-12 кэВ, полученный по данным прибора PN/XMM-Newton и аппроксимированный моделью спеленного закона с учетом межзвездного поглощения.

можно получить широкополосный спектр изучаемого объекта (Рис. 1.11, верхняя панель). Для этого в пакете XSPEC спектр, полученный телескопом ISGRI/ИНТЕГРАЛ, был добавлен к спектрам, полученным приборами PSPC-C/ROSAT и PCA/RXTE, со свободной нормировкой и совместно промоделирован степенным законом. Результаты такой аппроксимации показали, что совпадают не только фотонные индексы, но и нормировки спектров, а это подтверждает наше предположение о постоянстве потока и формы спектра излучения источника XTE J1901+014 в широком диапазоне энергий (в спокойном состоянии).

Исследование спектра источника во время всплесков активности в наблюдениях 30186-01-16-05 и 30186-01-21-01А не обнаружило изменений в его форме — менялась лишь величина потока.

Наблюдения источника обсерваторией XMM-Newton в 2007 году, позволили получить качественный значимый спектр источника XTE J1901+014 в диапазоне 0.5-12 кэВ (рис. 1.11, нижняя панель). Для описания спектра также была выбрана модель степенного закона с учетом поглощения и в результате были получены следующие параметры наилучшей аппроксимации: $\Gamma = 1.98 \pm 0.03$, $\chi^2 = 1$ и $N_H = (2.6 \pm 0.5) \times 10^{22}$ атомов/см². Эти результаты хорошо согласуются с результатами описанного выше спектрального анализа с использованием комбинации данных различных обсерваторий, что подтверждает сделанный ранее вывод о постоянстве формы спектра. Также отметим, что спектральные данные приборов MOS и PN совпадают друг с другом. Однако, вызывает вопросы столь большое значение величины межзвездного поглощения в направлении на источник, получаемое таким образом, при том что стандартные карты [30], [31] дают величину в 3 раза меньшую. К тому же, как будет показано ниже, XTEJ1901+014, по всей видимости — маломассивная система. Однако, в этом случае, вероятно, что часть поправки на поглощение может быть связана с существованием так называемых затравочных фотонов приходящих от поверхности нейтронной звезды, и обладающих определенной минимальной энергией, которые затем компто-

низуются на горячей короне. Но какая именно доля величины поглощения может быть связана с этим эффектом, непонятно. Известный источник GS 1826-24 является маломассивной системой с нейтронной звездой и потому не имеет внутреннего поглощения, а поправку на поглощение, получаемую при аппроксимации спектра источника, а именно $N_H = 0.3 \times 10^{22}$ атомов/см², связывают с комптонизацией затравочных фотонов [32]. С другой стороны, оценки поглощения, приведенные в большинстве атласов, сделаны по данным радионаблюдений облаков нейтрального водорода, и разрешение таких карт $\sim 0.5^\circ$, в результате - с их помощью невозможно обнаружить и учесть некоторые локальные неоднородности межзвездной среды.

Предполагая маломассивность двойной системы XTE J1901+014, её рентгеновский спектр можно попробовать описать комбинацией двух чернотельных спектров один из которых в этом случае, представляет собой излучение аккреционного диска, а второй - излучение пограничного слоя (см., например, [33]). Применение такой модели дает следующие параметры наилучшей аппроксимации: $N_H = (1.4 \pm 0.6) \times 10^{22}$, $kT_1 = 0.82 \pm 0.03$ кэВ, $kT_2 = 2.57 \pm 0.05$ кэВ, что, в общем, хорошо согласуется с наблюдаемыми значениями температур пограничного слоя и аккреционного диска (см., [34]).

1.4 Локализация и оптический компаньон

Источник XTE J1901+014 многократно попадал в поле зрения телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ в 2003-2004 гг во время глубоких наблюдений области, касательной к галактическому спиральному рукаву в созвездии Стрельца, что позволило зарегистрировать его на высоком уровне значимости ($> 20\sigma$, рис.1.12) и существенно улучшить точность его локализации до $\sim 1.2'$. Отметим, что источник 1RXH J190140.1+012630 продолжает уверенно попадать и в уточненную область ошибки на локализацию исследуемого источника (рис.1.12), при этом расстояние от центра локализации XTE J1901+014 ИНТЕГРАЛА до 1RXH J190140.1+012630 не превышает $0.3'$.

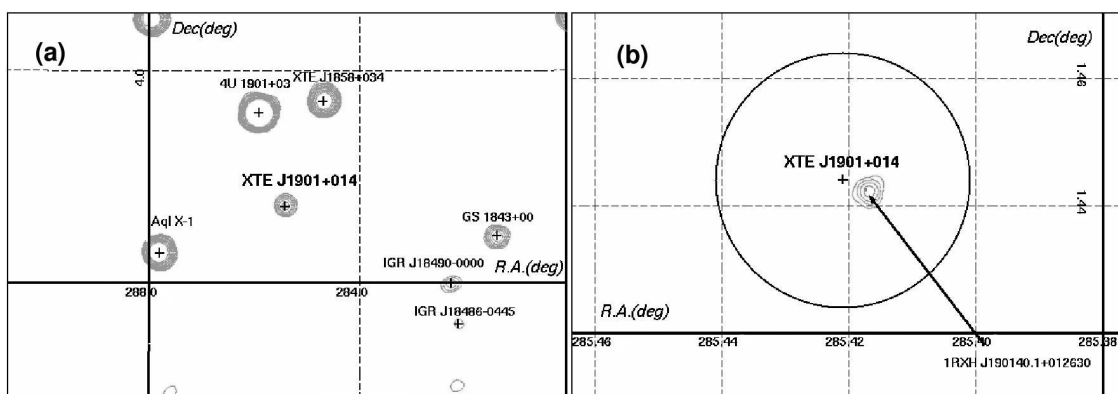


Рис. 1.12. Изображение области неба, содержащей источник XTE J1901+014, полученное по данным детектора ISGRI/ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 18-100 кэВ (а) и по данным прибора HRI/ROSAT в диапазоне энергий 0.1-2.4 кэВ (б). На последнем изображении также показаны центр локализации источника прибором ISGRI/ИНТЕГРАЛ и ошибка на локализацию источника этим прибором (круг радиусом $\sim 1.2'$). Положение источника 1RXH J190140.1+012630 показано контурами интенсивности.

Полученные результаты позволяют с высокой долей вероятности предполагать, что эти источники тождественны.

Однако, значительно улучшить точность локализации источника позволили последующие наблюдения XMM-Newton. Во время наблюдения обсерватории XMM-Newton источник XTE J1901+014 попал в центр поля зрения приборов PN, MOS. Статистическая ошибка на положение источника была определена, используя стандартную процедуру для поиска и локализации источников данной обсерваторией, и в результате составила $\sim 0.3''$. К сожалению, в поле зрения прибора MOS2 помимо исследуемого источника, не попадало источников, достаточно ярких (соответственно с малой статистической ошибкой локализации) для того чтобы можно было уточнить систематическую ошибку для данного наблюдения. Поэтому было взято стандартное значение этой ошибки $\sim 2''$, что соответствует 1σ для MOS. Таким образом, XTE J1901+014 был локализован обсерваторией XMM-Newton с координа-

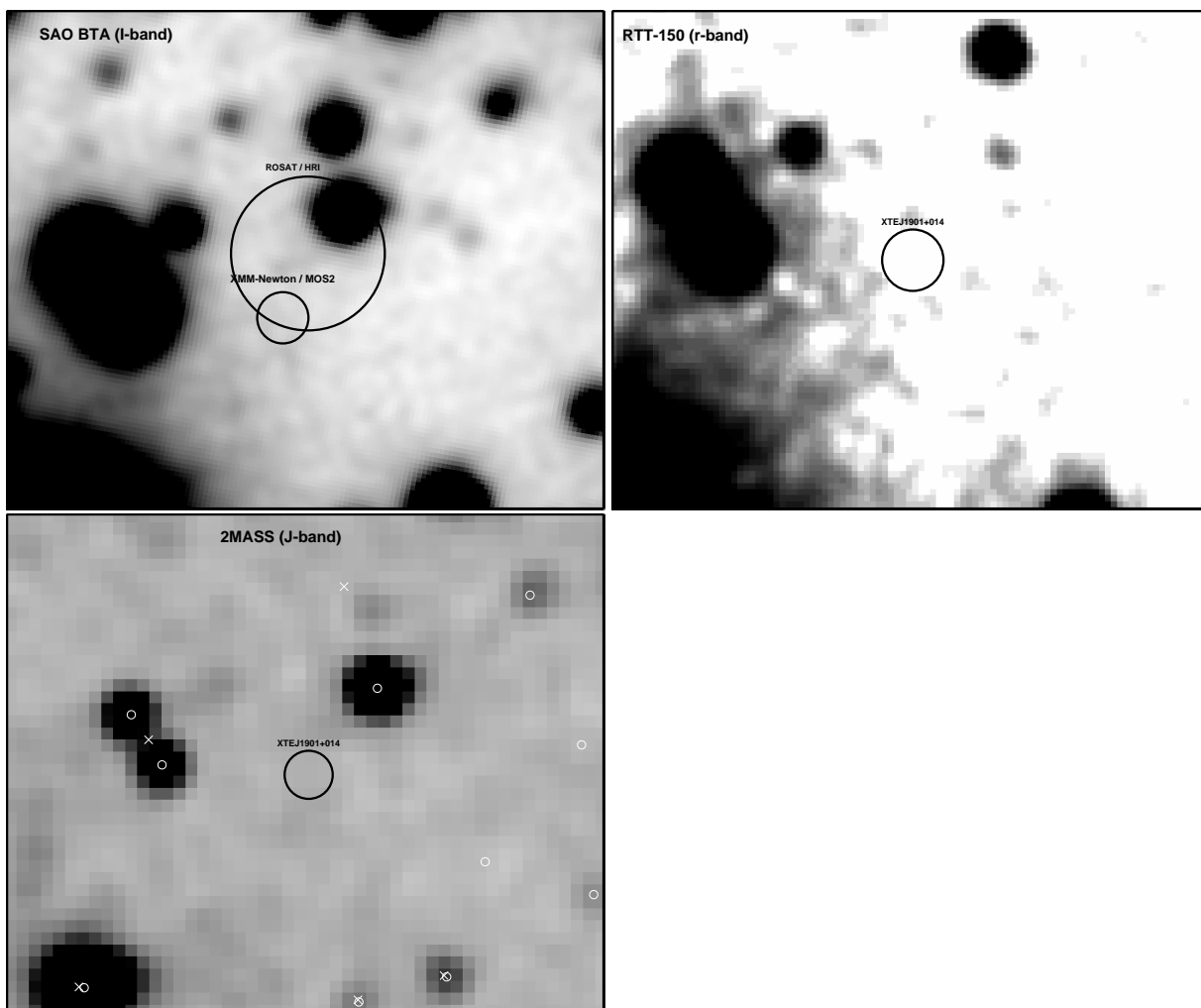


Рис. 1.13. Изображение области неба, содержащей источник XTE J1901+014 слева направо: а) в диапазоне I по данным телескопа БТА (САО); б) в диапазоне r' по данным телескопа РТТ-150; в) в инфракрасном диапазоне J по данным каталога 2MASS. На изображениях отмечены центр локализации и радиус ошибки на локализацию ($\sim 2''$) источника XTE J1901+014 телескопом MOS/XMM-Newton и HRI/ROSAT [35], а также кружками и крестиками положения ближайших источников из каталогов 2MASS и USNO-B1.

тами: R.A. = $19^h01^m:40.^s22$, Dec = $+01^\circ26'25''.4$ (J2000) и точностью $\sim 2''$, что в пределах ошибки совпадает с результатами из [36], но несколько отличается от положения источника, по данным HRI/ROSAT.

Последующие наблюдения этой области оптическими телескопами РТТ-150 и БТА (САО) не позволили однозначно определить оптический компаньон источника ввиду слабости последнего (см. Рис.1.13а,б). Нам удалось получить лишь верхние пределы на величины в соответствующих оптических диапазонах. В результате верхний предел на величину в фильтре g' составил ~ 22.8 (РТТ-150), а на величину в фильтре I ~ 24.5 (БТА). Полученные пределы, а также отсутствие сигнала в инфракрасном области спектра (см., например, Рис.1.13) свидетельствуют о том, что рассматриваемая система вряд ли является массивной двойной системой в нашей Галактике, что согласуется с предположением, высказанным в работе [36].

1.4.1 Оценка межзвездного поглощения до источника

В нашем случае более точному определению возможного типа системы сильно мешала неопределенность величины межзвездного поглощения в направлении на источник. Поэтому были сделаны некоторые оценки поглощения, используя звезды, близкие к ХТЕ J1901+014, а именно лежащие в окружности радиусом $4'$ с центром в ХТЕ J1901+014.

Поскольку цвета звезд зависят только от величины поглощения, используя данные каталогов 2MASS и USNO-B1 и варьируя поглощение, были определены классы соседних звезд, опираясь на цветовые таблицы из работы [37]. А затем, используя цветовую диаграмму K(J-K) из работы [5]), подбиралось расстояние таким образом, чтобы полученному выше J-K соответствовало K, характерное для звезды данного класса. На рис.1.14 представлена зависимость поглощения от расстояния, полученная описанным выше методом. Здесь величина ошибки на поглощение определяется шагом, с которым варьировалось поглощение, а величина ошибки на расстояние связана с ошибками на диаграмме K(J-K). На рисунке представлены результаты для ~ 30

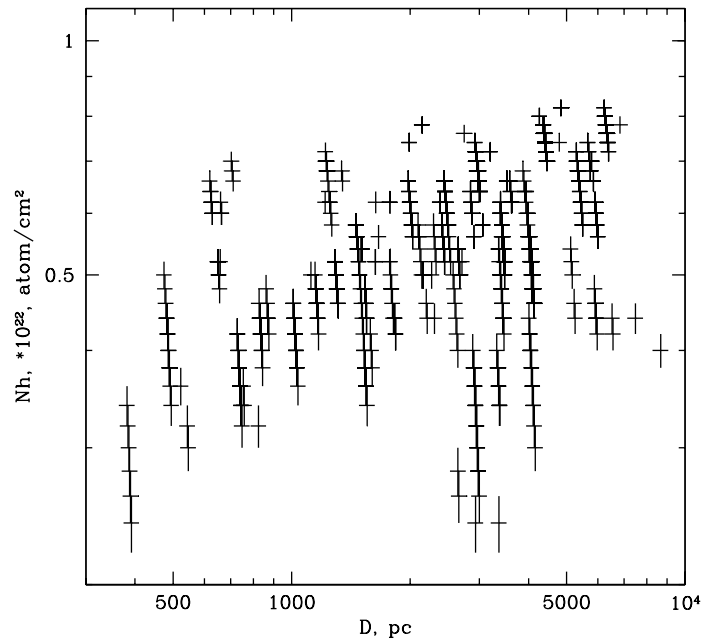


Рис. 1.14. Зависимость поглощения от расстояния, полученная из оценок поглощения и расстояния для соседних с ХТЕ J1901+014 звезд на основании данных каталогов 2MASS и USNO-B1.

звезд. В связи с тем, что величины, полученные из каталога USNO-B1, имеют достаточно большие ошибки ($\sim 0.15-0.3$ звездной величины), возникает некоторая неопределенность в определении типов звезд, т.е. одному набору величин из каталога соответствует, в зависимости от поглощения, несколько типов звезд и, соответственно, получается несколько точек на рисунке для одной комбинации величин из каталога. Кроме того, возможно, что при изменении поглощения тип звезды не меняется, и в этом случае на рис.1.14 возникают вертикальные тренды из крестиков. Из построенной зависимости поглощения от расстояния следует, что величина N_H для самых далеких звезд ($\sim 5-7$ кпк) не превышает 0.8×10^{22} атом/ см^2 . Полученные результаты не противоречат и даже достаточно хорошо согласуются с данными, получен-

ными из карт поглощения нейтрального водорода [30] в данном направлении $(0.6-0.8) \times 10^{22}$ атом/см². Собственно этот дополнительный анализ имел своей целью выявить лишь возможное грубое несоответствие между величиной поглощения в направлении на источник и картой поглощения.

1.4.2 XTEJ1901-014 - маломассивная двойная система

Теперь, получив оценки межзвездного поглощения в направлении на источник, а также верхние пределы в двух оптических диапазонах, попытаемся выделить классы звезд, которые потенциально могут быть компаньонами исследуемой системы, а также определить на каком расстоянии при этом они должны находиться.

Предполагая что спектр звезды соответствует спектру черного тела, были построены зависимости расстояния до звезды от температуры ее поверхности (класса) таким образом, чтобы удовлетворить полученным верхним пределам на цвета. Отметим, что вследствие известной неоднозначности соответствия тип-светимость для каждого класса звезд брались максимальное и минимальное значение светимости для оценки верхнего и нижнего предела на расстояние до системы. Анализ был проведен для случаев с различным поглощением $N_H=0.8 \times 10^{22}$ атом/см² (максимальное межзвездное в данном направлении), $N_H=1.4 \times 10^{22}$ атом/см² (это значение получено при аппроксимации рентгеновского спектра источника моделью комбинации черных тел) и $N_H=2.6 \times 10^{22}$ атом/см² (аппроксимация спектра степенным законом). Его результаты представлены на рис.1.15. Здесь длинной штриховой линией отмечено расстояние до края Галактики в данном направлении ($\sim 18-20$ кпк). Таким образом, из рис.1.15 ясно, что ни при одном из выбранных поглощений компаньоном системы не может быть ОВ-гигант — типичный компаньон быстрых рентгеновских транзиентов. Возможными оптическими компаньонами системы являются звезды поздних спектральных классов G-K. Дополнительное поглощение в этом случае может возникать либо на краю наклоненного аккреционного диска, либо из-за неоднородностей межзвезд-

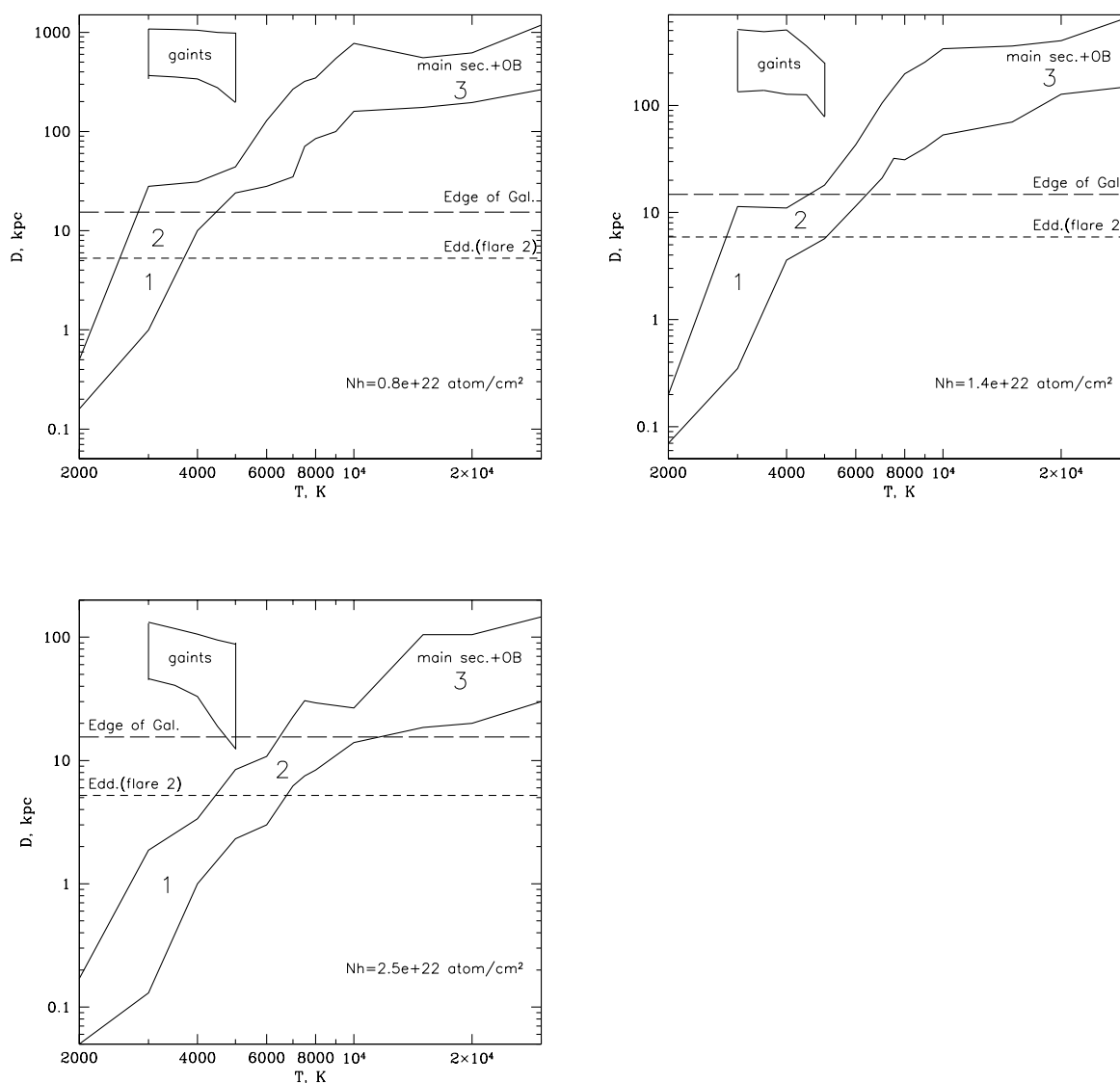


Рис. 1.15. Зависимость расстояние до звезд от их температур (типов) для различных величин поглощения. Звезды главной последовательности и ОВ-гиганты представлены широкой полосой; также отмечена область гигантов. Длинная пунктирная линия показывает расстояние до края Галактики в направлении на источник; короткими пунктирами отмечено расстояние, где источник достиг бы эддингтоновского предела светимости для нейтронной звезды во время вспышки 2002 года. Цифры отмечают следующие регионы: 1, звезда этого типа может быть оптическим компаньоном источника ХТЕ 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.

ной среды на луче зрения, либо благодаря “затравочным” фотонам. Другими возможными компаньонами являются сильно удаленные звезды классов А и F. В этом случае дополнительное поглощение может существовать в системе из-за наличия звездного ветра. Однако, если предположить, что расстояние до исследуемого объекта менее 5 кпк, то получается, что во время вспышки 2002 года источник становился сверхэддингтоновским. На рис.1.15 показано (короткой штриховой линией) расстояние, на котором во время этой вспышки источник достигал бы эддингтоновского предела светимости для нейтронной звезды. Отметим, что ограничение сверху, получаемое для поглощения из рис.1.14 для расстояний до $\sim 7 - 8$ кпк, существенно сужает класс возможных оптических звезд-компаньонов.

1.4.3 Обсуждение

В настоящей работе на основании рентгеновских, оптических и инфракрасных данных были проведены исследования с целью установления природы источника ХТЕ J1901+014.

По результатам временного и спектрального анализа интенсивных вспышек 1997 и 2002 гг можно сделать вывод, что они, скорее всего, не относятся к всплескам первого рода, связанным с термоядерными взрывами на поверхности нейтронных звезд, т.к., в отличие от последних, со временем либо не меняют жесткости, либо становятся даже более жесткими.

Совместный анализ данных обсерваторий ИНТЕГРАЛ, RXTE и ROSAT впервые позволил построить широкополосный (0.6-100 кэВ) энергетический спектр исследуемого объекта. Этот спектр хорошо описывается моделью степенного закона с фотонным индексом ~ 2.26 . В спектре источника не обнаружено завалов на энергиях 20-30 кэВ, характерных для рентгеновских пульсаров (см., например, [40]), а также, после учета вклада диффузионного рентгеновского излучения Галактики, никаких эмиссионных линий. Такой нетепловой спектр без признаков завала может косвенно указывать на то, что компактным объектом в данной системе является черная дыра. Резуль-

таты спектрального анализа по более поздним данным XMM-Newton, хорошо согласуются с результатами, полученными по ИНТЕГРАЛ, RXTE и ROSAT.

Какой-либо долговременной периодичности в поведении источника XTEJ1901+014 не выявлено, однако, в диапазоне энергий 3-20 кэВ обнаружена коротковременная аperiodическая переменность, представляющая собой ряд всплесков активности длительностью 40 – 60 с., поток в максимуме которых в 1.5 – 3 раза превосходит поток, регистрируемый от источника в спокойном состоянии. Форма спектра источника во время этих всплесков остается той же, что и в спокойном состоянии.

Спектр мощности источника с наклоном ~ -1.5 – является типичным для аккрецирующих двойных систем; какой-либо периодической переменности потока излучения источника выявлено не было.

Используя данные обсерватории XMM-Newton, удалось определить положение исследуемого объекта с точностью $\sim 2''$, что в дальнейшем позволило провести наблюдения этой области неба телескопами РТТ-150 и БТА (САО) с целью поиска оптического компаньона. Проведенные наблюдения позволили получить только верхние пределы на величины объекта в g' и I диапазонах (22 и 24.5 величины, соответственно), что в совокупности с отсутствием значимого сигнала в инфракрасной области спектра [36] говорит о том, что система должна быть маломассивной.

Серьезной проблемой, которая мешает окончательно разобраться в природе исследуемого объекта является значительное превышение величиной поглощения, получаемой при аппроксимации рентгеновского спектра ($1.4-2.6 \times 10^{22}$ атом/см² в зависимости от применяемой спектральной модели), величины межзвездного поглощения в направлении на источник $(0.6 - 0.8) \times 10^{22}$ атом/см². Отметим, что, несмотря на избыточное поглощение в спектре, объект не может быть поглощенной массивной системой, т.е. системой находящейся в некотором газово-пылевом “коконе”, поскольку в этом случае значения поглощения, получаемые из анализа рентгеновских спектров оказываются существенно большими (см., например, [41]). Кроме того, как было

отмечено [36] в этом случае должен был бы регистрировать избыток инфракрасного излучения из исследуемой области, однако, этого не наблюдается.

Возможным объяснением повышенного поглощения могут быть, например, поглощение в короне над краями наклоненного аккреционного диска, красный гигант в качестве оптического компаньона и т.д. Еще одной возможной причиной наблюдаемого избыточного поглощения может быть существование так называемых затравочных фотонов (*seed-photons*), приходящих от поверхности нейтронной звезды, имеющих определенную минимальную энергию и затем комптонизирующихся на горячей короне. Однако, типичная поправка, связанная с этим эффектом, оказывается меньше наблюдаемого избытка поглощения в спектре источника ХТЕ J1901+014. Наконец, повышенное поглощение может быть связано с локальными неоднородностями в направлении на источник, например со случайным попаданием на луч зрения какого-нибудь небольшого молекулярного или газо-пылевого облака.

Также остается неопределенным расстояние до объекта, поскольку это сильно зависит от типа системы (см. рис.1.15). Если предположить, что во время вспышек светимость источника достигает эддингтоновского предела для нейтронной звезды, то расстояние до объекта соответствует ~ 5 кпк. Если система расположена на таком расстоянии или ближе, то оптическим компаньоном в ней могут быть только звезды поздних спектральных классов (рис.1.15); если же система расположена существенно дальше, то в качестве оптического компаньона могут уже выступать звезды главной последовательности типа поздних А или F классов. Однако в этом случае во время вспышек источник становится существенно сверхэддингтоновским, подобно V4641 Sgr (см. [42]). Последнее также возможно, если компаньоном в системе является далекий красный гигант (рис.1.15в).

В заключение отметим, что ХТЕ J1901+014 существенно отличается от других известных быстрых транзиентов, таких как IGR J17544-2619 [43], ХТЕ J1739-302 [44], [45], AX J1749.1-2733 [47], SAXJ1818.6-1703 [48] и др., и, по-видимому, является первым быстрым рентгеновским транзиентом в ма-

ломассивной двойной системе. Отметим также интересное сходство между ХТЕ J1901+014 и Swift J195509.6+261406, природу которого, так же как и ХТЕ J1901+014, изначально пытались связать с гамма-всплеском [49].

В результате проведенного исследования можно заключить что источник ХТЕ J1901+014 является маломассивной системой, а значит - первым маломассивным быстрым рентгеновским транзиентом.

Глава 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЗАКОНА МЕЖЗВЕЗДНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В НАПРАВЛЕНИИ НА ЦЕНТР ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ РТТ-150

2.1 Введение

По результатам предыдущей части работы можно однозначно подчеркнуть критическую важность точного определения межзвездного поглощения в направлении на исследуемый источник. А поскольку большинство объектов класса быстрых рентгеновских транзиентов локализованы в галактической плоскости и, в частности, в направлении на галактический центр, вторая часть настоящей диссертации полностью посвящена изучению особенностей межзвездной среды в направлении на центр Галактики и отработке методов

корректного определения величины межзвездного поглощения.

В 2008 году рентгеновской космической обсерваторией Chandra было проведено сверхглубокое (экспозиция составила ~ 1 Мсек) наблюдение области, расположенной в непосредственной близости от галактического центра (так называемого поля CBF, Chandra Bulge Field, $l \sim 0.1^\circ$, $b \sim -1.42^\circ$), целью которого было разрешение фонового рентгеновского излучения Галактики на точечные источники. Результаты этих наблюдений показали, что действительно, фоновое рентгеновское излучение Галактики, считавшееся ранее диффузным излучением межзвездной среды, является суммарным излучением большого количества дискретных источников звездной природы [25]. Однако для сравнения, например, результатов подсчетов рентгеновских источников в этой области, с результатами, полученными в окрестности Солнца или в других областях Галактики, необходимо детальное понимание состава звездного населения в области CBF, а также определение межзвездного поглощения в этом направлении.

Карты межзвездного поглощения, включающие область CBF, были построены в работах [50], [51], [52]. Как правило, они имели невысокое угловое разрешение, а также, в значительной степени опирались на стандартный закон поглощения ([53]; [54]; [55]), который, как показывают исследования последних лет, не совсем подходит для областей галактического балджа ([56], [58], [57], [59], [60]). Карта поглощения, с несколько лучшим угловым разрешением была построена в работе [62], однако в ней также использовалось предположение стандартного закона поглощения. В более поздней статье [59] для центральной области ($6.6' \times 6.6'$) поля CBF была получена карта поглощения с высоким разрешением по данным космического телескопа Hubble, где также отмечалось отклонение закона поглощения в данной области от стандартного.

Наблюдения и методы анализа данных

Глубокое исследование поля CBF было проведено на основе фотометриче-

ских наблюдений, выполненных телескопом РТТ-150 в полосах (фильтрах) g' , r' и i' фотометрической системы SDSS (рис.2.1). Полная экспозиция наблюдений в каждом из фильтров составила от 300 до 700 с, в результате чего удалось покрыть область размером $30' \times 30'$ во всех трех фильтрах.

Исследуемое поле находится достаточно близко к галактическому центру, вследствие чего плотность звезд на луче зрения очень велика, поэтому для большей точности в определении звездных величин была использована PSF-фотометрия изображений.

Для получения корректных фотометрических решений непосредственно перед наблюдением поля CBF были проведены дополнительные наблюдения фотометрических стандартов SDSS [63], в частности звезд SA 92_282, Wolf_1346, PG2336+004B, SA112_805 и др. Таким образом, для фотометрической поправки, представленной в виде $= Z_p + ext \times (airmass - 1)$, были получены значения $Z_{p,r'} = 2.03 \pm 0.03$, $ext_{r'} = 0.16 \pm 0.02$ и $Z_{p,i'} = 2.54 \pm 0.02$, $ext_{i'} = 0.10 \pm 0.02$ для полос r' и i' , соответственно. Среднее значение величины воздушной массы во время наблюдения поля составляло $\sim 2.75 \pm 0.15$. В результате поправка в фильтре r' составила $\sim 2.32 \pm 0.03$ величины, а для i' — 2.72 ± 0.04 величины.

Для дополнительной проверки была также проведена калибровка полученных данных на основании известных оптических и инфракрасных каталогов: Carlsberg Meridian Catalog для фильтра r' и DENIS для i' . В результате фотометрические поправки составили $\sim 2.28 \pm 0.06$ величины для полосы r' и 2.76 ± 0.05 величины для полосы i' , что хорошо согласуется с результатами, полученными при исследовании стандартных звезд.

Для проведения синтетической фотометрии был использован пакет SYNPHOT/IRAF. Отождествление звезд из каталога Hipparcos/Tycho и 2MASS было произведено с помощью программ, входящих в пакет *WCStools*¹. Также использовались программы пакета HEASOFT.

Поскольку влияние межзвездного поглощения тем слабее чем больше дли-

¹<http://tdc-www.harvard.edu/wcstools/>

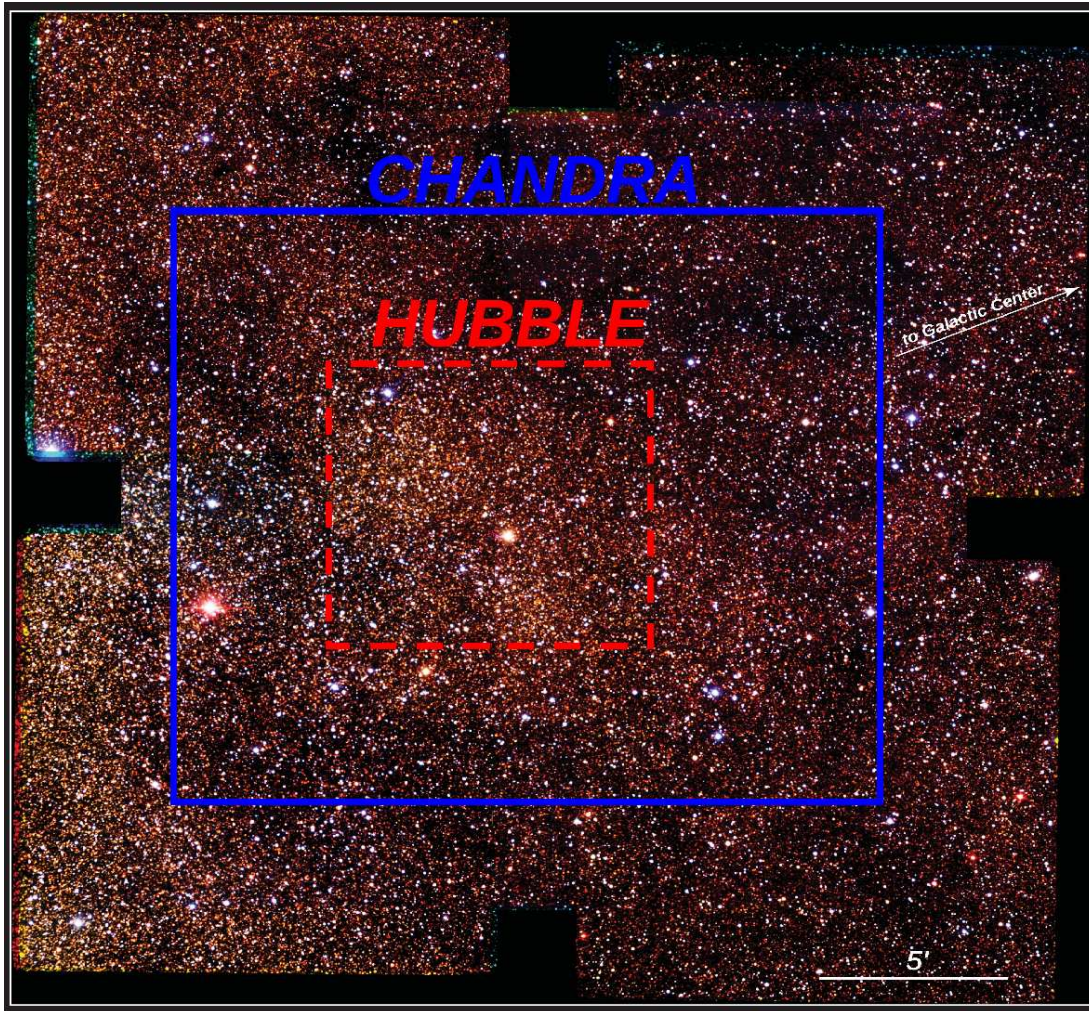


Рис. 2.1. Изображение области поля СВФ, полученное комбинированием изображений РТТ-150 в трех фильтрах g' , r' и i' . Прямоугольниками показаны области покрытые обсерваторией Chandra и телескопом Hubble.

на волны излучения, то для построения карты поглощения были использованы лишь изображения полученные в полосах r' и i' , как самые "глубокие".

2.2 Метод определения межзвездного поглощения по положению гигантов красного сгущения

Исследование свойств межзвездной среды с использованием фотометрических данных большого количества звезд фактически сводится к сравнению наблюдаемых величин звезд в разных фильтрах с их абсолютными значениями в соответствующих фильтрах. Однако основной проблемой в этом случае является точное определение класса (как спектрального класса, так и класса светимости) наблюдаемых звезд и зачастую сделать это без спектрометрического анализа оказывается невозможным. Таким образом, нам требуется среди всех звезд найти такие, класс которых можно было бы легко определить, плотность которых достаточно велика и светимость которых при этом не зависит или зависит слабо от положения в Галактике.

В качестве таких стандартных объектов часто берут группу красных гигантов (см. [66], [67]; [68]; [69]), имеющих примерно одинаковое значение светимости, составленную преимущественно из поздних G и ранних K-гигантов и образующих сгущение на диаграмме цвет-светимость. Кроме того, их светимость слабо зависит от металличности и потому неизменна даже для объектов, лежащих в балдже Галактики [69]. Глубины наблюдений телескопа РТТ-150 достаточно для того, чтобы регистрировать гиганты сгущения, расположенные на расстоянии центра Галактики. Таким образом, суть методики определения межзвездного поглощения, используемой в данной работе, состоит в следующем: для разных областей исследуемого поля строятся диаграммы цвет-видимая величина $r'(r' - i')$, для которых затем определяется положение центроида гигантов красного сгущения в соответствующих координатах (Рис.2.2). Затем полученные величины яркости r'_{RCG} и цвета $(r' - i')_{RCG}$ гигантов красного сгущения сравниваются с величи-

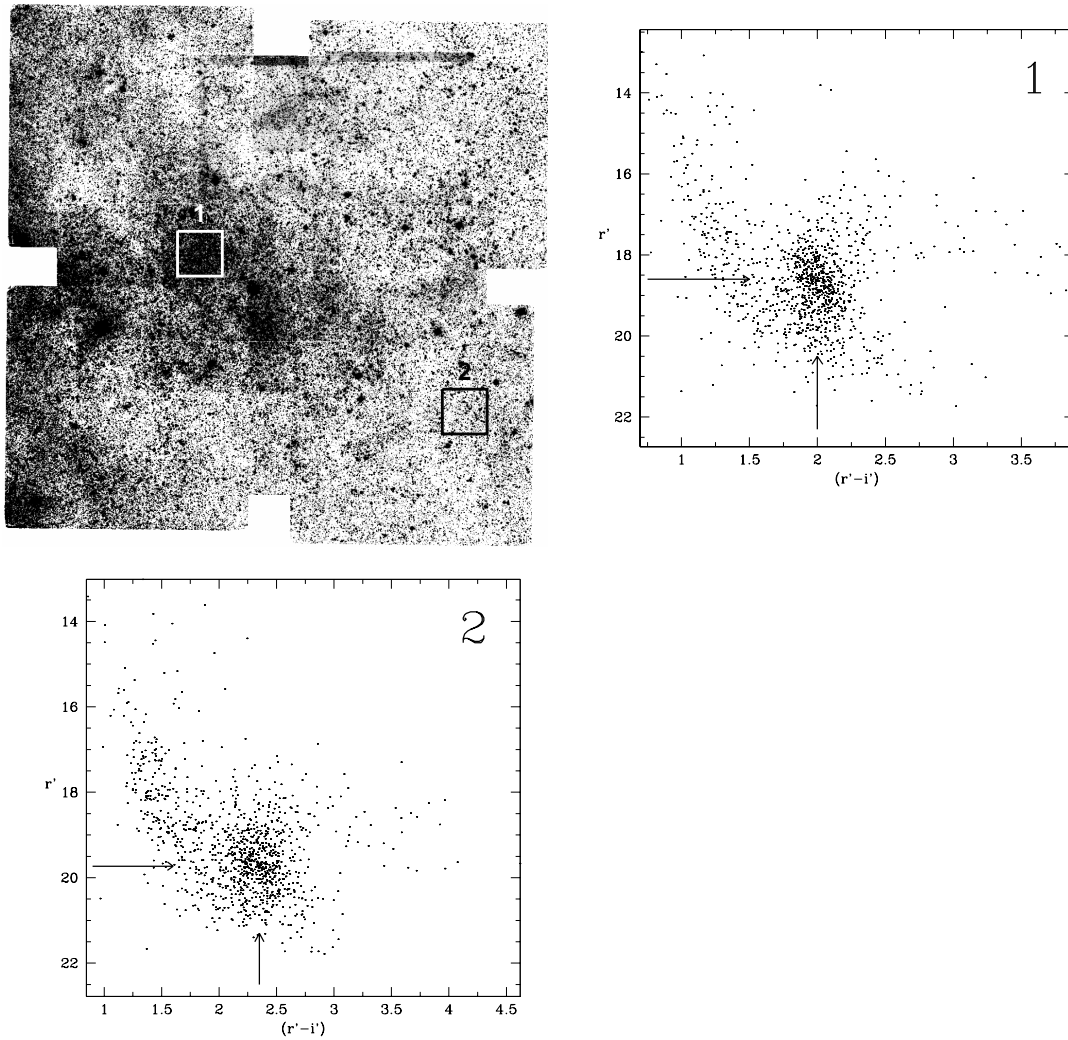


Рис. 2.2. Изображение области поля СВФ в фильтре i' , полученное РТТ-150. Квадратиками отмечены области для которых построены диаграммы цвет-видимая величина расположенные справа. На рис. справа и внизу стрелочками показаны положения центроидов гигантов красного сгущения для соответствующих областей поля (слева).

ной r'_0 или цветом $(r' - i')_0$ гигантов красного сгущения, полученными из калибровочной диаграммы цвет-абсолютная величина $r'(r' - i')_0$. Величину поглощения A можно определить двумя способами: 1) из соотношения $(A_{r'} - A_{i'}) = (r' - i')_{RCG} - (r' - i')_0$, при известном законе поглощения можно получить соответствующие величины $A_{r'}$ или $A_{i'}$; 2) при известном расстоянии D до балджа Галактики $A_{r'} = r'_{RCG} - r'_0 + 5 - 5 \log(D)$.

Следует отметить, что в вышеописанной методике предполагается, что основная масса поглощающей пыли находится между исследуемым звездным населением и наблюдателем, что предполагает отсутствие большого количества пыли в области, где находятся гиганты красной группы. Это предположение представляется разумным, с учетом того, что исследуемая область звезд балджа в СВФ расположена на высоте около 200 пк над плоскостью диска Галактики. Дополнительная проверка этой гипотезы на самосогласованность будет приведена ниже.

2.3 Свойства гигантов красного сгущения в диапазонах r', i'

Прежде всего, необходимо получить значения яркости и цвета гигантов красного сгущения для используемых диапазонов r' и i' . Обычно для получения диаграммы цвет-абсолютная величина используются данные каталогов Hipparcos или Tycho, где собраны звезды разных спектральных классов и классов светимости с известными расстояниями до них. Однако, поскольку фотометрическая система SDSS², в которой производились наблюдения телескопа РТТ-150, отличается от стандартной (Джонсон, Бессель), в которой производились наблюдения спутником Hipparcos, сделать это напрямую не представляется возможным. Для решения этой задачи мы воспользовались возможностями синтетической фотометрии с помощью программного пакета SYNPHOT/IRAF. Отождествив с помощью пакета *WCStools* звезды из каталогов Hipparcos (новая редакция [20]) и 2MASS, мы получили выборку

²<http://www.sdss.org>

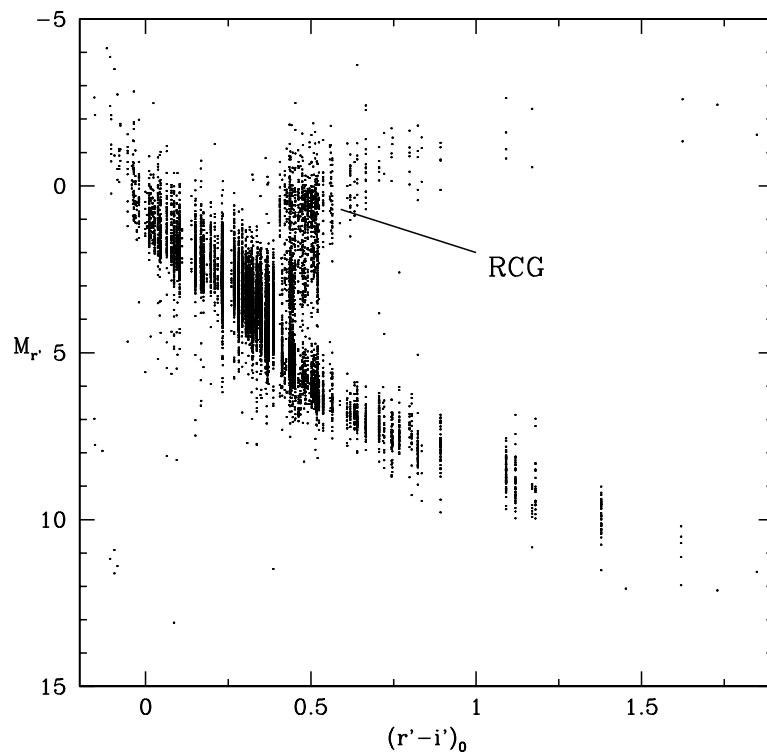


Рис. 2.3. Диаграмма цвет-абсолютная величина в координатах $M_{r'} - (r' - i')$, полученная на основании синтетической фотометрии.

~ 10000 звезд с известными расстояниями (были взяты звезды, расположенные ближе 100 пк) и фотометрией в 6 фильтрах B, V, I, J, H, K_s . Используя спектральный атлас Брузуала-Перссона-Ганна-Страйкера [64], [65] и пакет SYNPHOT определялась спектральная модель, дающая наилучшую аппроксимацию фотометрических данных в этих шести фильтрах, и устанавливались классы звезд из выборки. Затем для этих звезд были синтезированы величины в фотометрических полосах r' и i' , задаваясь абсолютным значением в полосе V в качестве нормировочного, и построена калибровочная диаграмма (рис.2.3).

На полученной диаграмме ясно видны ветвь красных гигантов и сгущение

на этой ветви в районе $r'_0 = -0.6 - 1.6$ и $(r' - i')_0 = 0.4 - 0.6$. Для определения более точного положения последнего оно было аппроксимировано функцией Гаусса по каждой из координат. В итоге удалось получить абсолютное положение центроида гигантов красного сгущения для используемой фотометрической системы $r'_0 = 0.43 \pm 0.05$, $(r' - i')_0 = 0.47 \pm 0.06$; ширина пика красных гигантов вдоль координаты яркости составляет $\sigma = 0.22 \pm 0.02$ (рис.2.4)

Для проверки того насколько на самом деле соответствуют действительности синтезированные величины мы провели следующий тест: повторили описанную выше процедуру, но теперь использовали для звезд выборки лишь значения в 5 фильтрах B, V, I, H, Ks и, используя их, синтезировали величину в фильтре J , которую затем сравнили с реально наблюдаемой. В результате было показано, что отклонение между синтезированной и реальной величинами имеет нормальное распределение с шириной на полувысоте около 0.04 величины (см. рис.2.5), что подтверждает оправданность синтетической фотометрии для решения поставленной задачи.

2.4 Определение закона и построение карты поглощения

В ряде работ ([56], [58], [59], [60]) по исследованию балджа Галлактики и, в частности поля СBF, отмечается, что закон поглощения в направлении на галактический центр заметно отличается от стандартного ([50], [53], [54], [55]) причем как для оптического так и для инфракрасного диапазонов. Поэтому мы не можем воспользоваться стандартными соотношениями между фотометрическими полосами и восстановить универсальное значение $E(B - V)$ для исследуемой области неба на основании известного $A_{r'}$.

Таким образом, прежде чем строить карту поглощения необходимо уточнить закон поглощения. В рамках решения этой задачи мы также исследовали положение гигантов красного сгущения на диаграмме цвет-видимая величина, построенной для разных областей поля СBF. В качестве таких областей были взяты квадратные участки поля с угловым размером $\sim 2' \times 2'$,

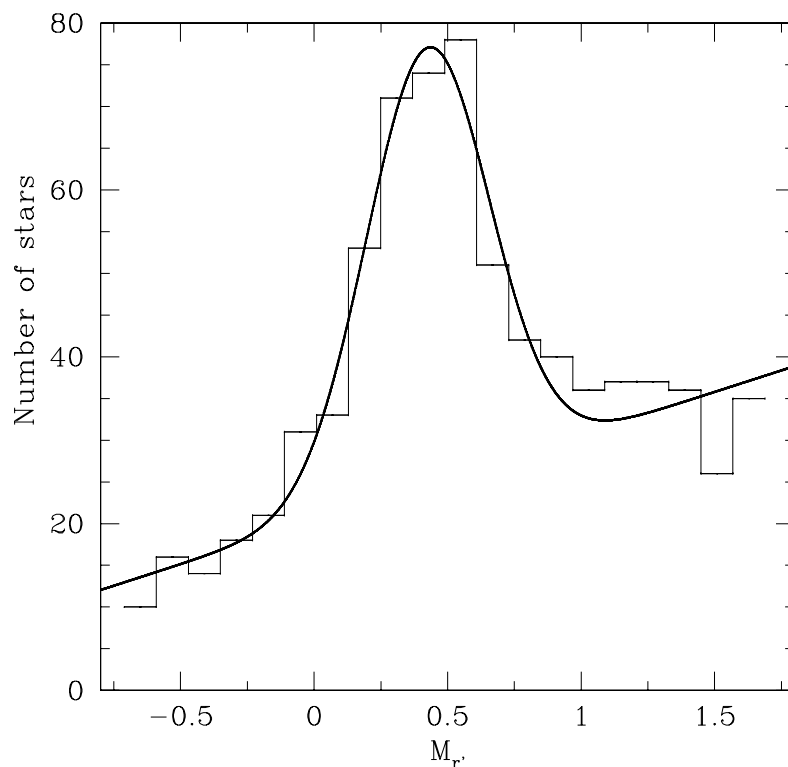


Рис. 2.4. Гистограмма, показывающая положение центроида гигантов красного сгущения на диаграмме цвет-абсолютная величина в координатах $M_{r'} - (r' - i')_0$.

среди которых были отобраны те, в которых сгущение наиболее хорошо регистрировалось и в которых положение центроида гигантов красного сгущения отстояло от предела детектирования в этой области на ≈ 1 и более величину. При этом предел детектирования в фильтре r' для наших наблюдений составляет 21.7. Далее исследовалась зависимость видимой величины r' центроида сгущения от значения цвета центроида сгущения $r' - i'$ (рис. 2.6). В результате мы получили зависимость $r' = 2.53 \times (r' - i') + 13.84$, наклон которой определен с точностью ± 0.04 , а константа - ± 0.1 . Таким образом, становится очевидно, что закон поглощения в исследуемой области всюду существенно отличается от стандартного. А именно, если в стандартном случае

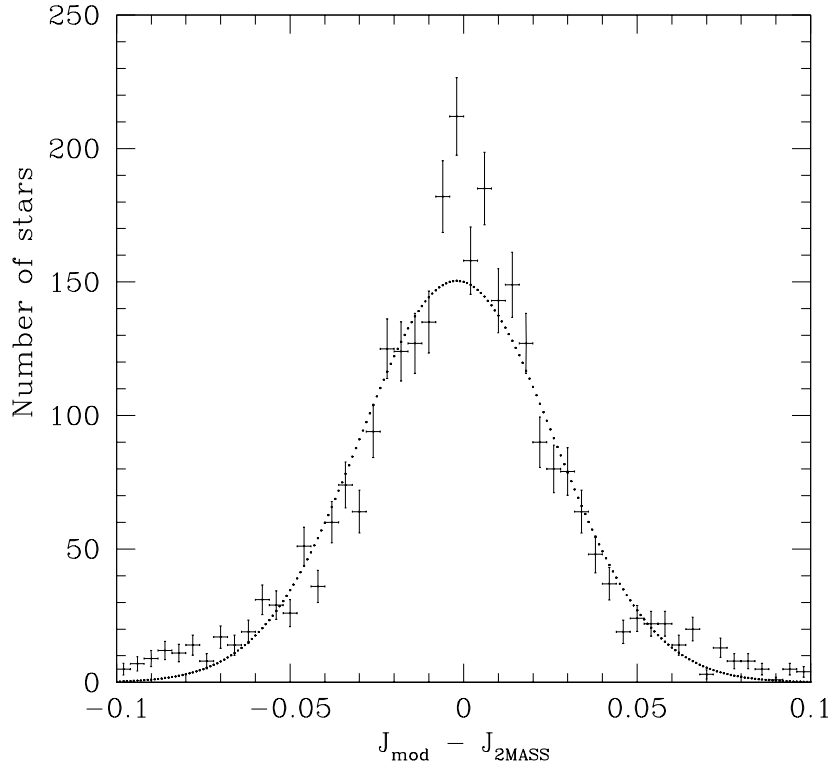


Рис. 2.5. Гистограмма, показывающая точность синтетической фотометрии на примере сравнения реальных абсолютных величин в фильтре J , полученных из корреляции каталогов Hipparcos и 2MASS с синтезированными величинами в фильтре J .

$A_{r'}/(A_{r'} - A_{i'}) = 4.3$, то в нашем случае $A_{r'}/(A_{r'} - A_{i'}) = 2.53 \pm 0.04$. При этом необходимо отметить, что в пределах исследуемой области закон поглощения с точностью до ошибки измерений можно считать одинаковым.

Как было отмечено ранее, красные гиганты, образующие сгущение, находятся примерно на одном расстоянии, равном расстоянию до центра Галактики. Следовательно, используя полученную выше зависимость, можно оценить это расстояние. Например, для $(r' - i') = (r' - i')_0 = 0.47$, получаем непоглощенную величину $r' = 15.03$ и далее с помощью формулы, связывающей наблюдаемую и абсолютные величины, получим $\log(D) = 3.92 \pm 0.04$,

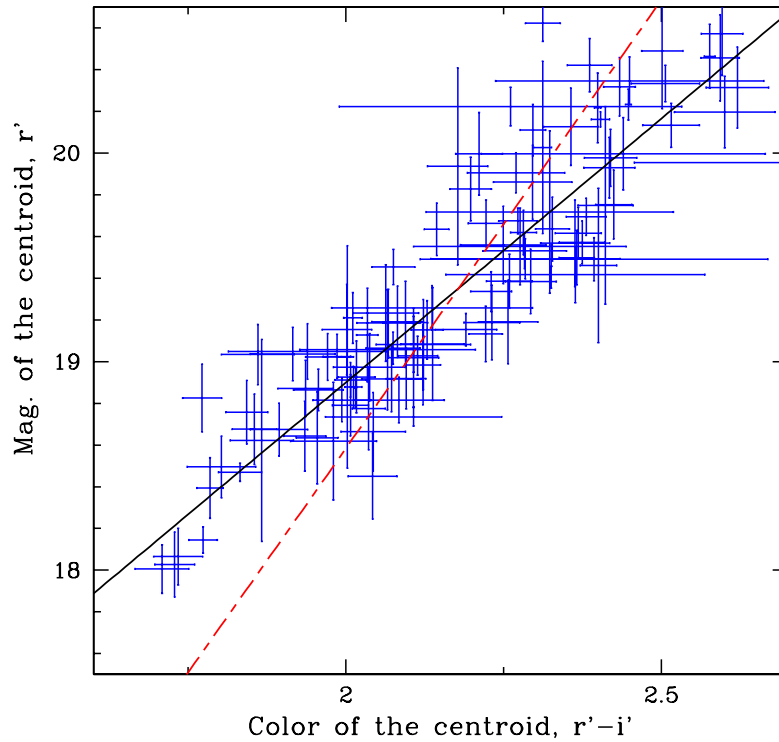


Рис. 2.6. Зависимость наблюдаемого цвета гигантов красного сгущения $r' - i'$ от видимой величины в полосе r' , отражающая закон поглощения в данной области неба. Получена на основании исследования положения гигантов красного сгущения на диаграмме цвет-видимая величина для поля СВФ. Для сравнения штрих-пунктирной линией показан наклон регрессии в предположении стандартного закона поглощения.

откуда $D = 8.3 \pm 0.8$ кпк, что хорошо согласуется с результатами других измерений [69], [70], [71], [72]. Стоит отметить, что если предположить что для данной области применим стандартный закон поглощения, то наилучшим образом зависимость видимой величины r' центроида сгущения от значения цвета центроида сгущения $r' - i'$ аппроксимируется прямой вида $r' = 4.3 \times (r' - i') + 10.0$ (см. рис.2.6). Отсюда следует, что расстояние до гигантов красного сгущения должно быть ~ 2 кпк. Соответствующее среднее значение поглощения в данном направлении на расстоянии ~ 2 кпк было

бы $A_r \sim 10$ при том, что карта из работы [50], построенная в предположении стандартного закона поглощения и учитывающая вклад всей пыли в Галактике вдоль луча зрения, дает среднюю величину $A_r=3.5$ по полю. Таким образом, применение стандартного закона поглощения в нашем случае приводит к противоречиям с наблюдательными данными.

Итак, используя полученные калибровочные значения центроида сгущения красных гигантов и расстояния до центра Галактики (в дальнейшем оно принято $D = 8.3$ кпк), мы можем построить карту поглощения одним из упомянутых выше методов. Здесь мы применяем второй метод, поскольку значение величины r' центроида гигантов красного сгущения нам удалось в среднем определить точнее чем цвет $r' - i'$. В результате мы получили карту с разбросом значений поглощения $A_{r'} = 3.0 - 5.5$ по полю (рис.2.7). Стандартная ошибка на величину $A_{r'}$ при этом меняется от 0.15 для наименее поглощенных областей поля до 0.35 величины для наиболее поглощенных. Отметим, что значительная доля этой ошибки, а именно ~ 0.1 величины, связана с неточностью определения расстояния до центра Галактики. Оставшаяся часть ошибки определяется точностью определения центроида гигантов красного сгущения, которая тем выше чем дальше величина r' сгущения от порога детектирования телескопа.

Максимальное угловое разрешение карты, полученное нами при анализе непересекающихся площадок, составляет $1.5'$. Карта, приведенная на рис.2.7, построена с разрешением $\sim 1'$, однако значения поглощения, полученные для этой карты, получены с использованием звезд во взаимно пересекающихся площадках радиусом $1.5' - 2'$ вокруг исследуемого направления. Радиус площадки подбирался из требования, чтобы на диаграмме присутствовало более 300 гигантов красного сгущения.

Отметим, что среднее значение поглощения $A_{r'}$ в центральной части поля ~ 4 хорошо согласуется со средней величиной поглощения в близком по диапазону фильтре F625W (~ 4) космического телескопа Hubble, полученной в работе [59].

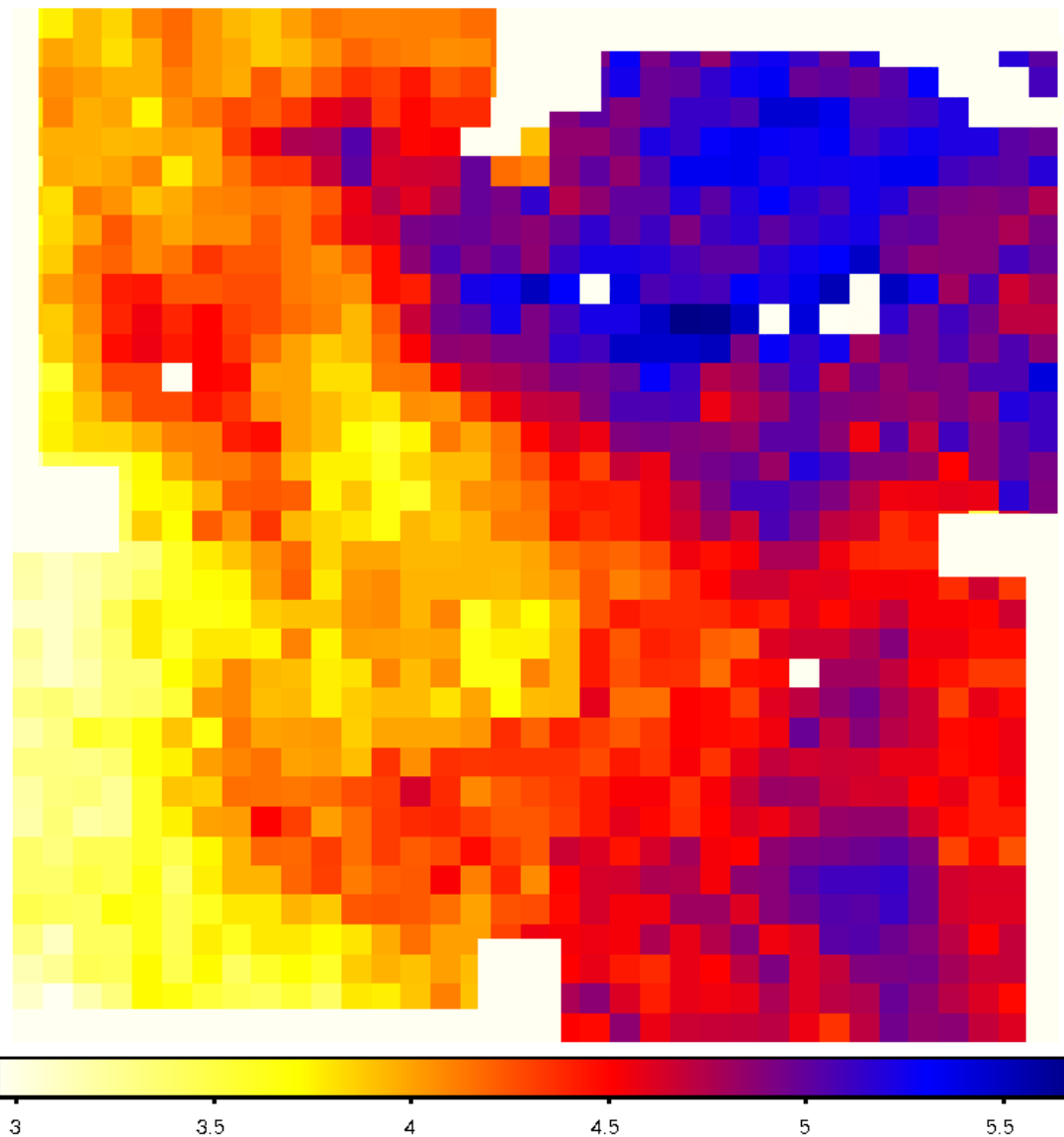


Рис. 2.7. Карта поглощения, построенная для поля СВФ с использованием метода, основанного на исследовании положения гигантов красного сгущения на диаграмме цвет-видимая величина. Белым цветом отмечены области, где не удалось значимо определить положение центроида гигантов красного сгущения. Центру поля соответствуют галактические координаты $l = 0.085^\circ$; $b = -1.404^\circ$.

Исследуя распределение яркости гигантов красной группы в малых областях, внутри которых мы предполагаем межзвездное поглощение не зависящим от направления, можно сделать дополнительную проверку нашего предположения о том, существенно ли влияние пыли, возможно расположенной внутри балджа Галактики, на наше определение закона поглощения. Действительно, если внутри балджа Галактики наличествует значительное количество пыли, то гиганты красной группы на одном и том же луче зрения будут испытывать дополнительное поглощение/покраснение и будут формировать сгущение на диаграмме цвет-видимая величина, вытянутое в направлении, зависящем от закона поглощения. Таким образом, их распределение по оси видимых величин будет значительно превышать таковое для ситуации без дополнительной пыли в балдже. Для проверки этой гипотезы мы построили распределение видимых величин звезд в области сгущения красных гигантов и сравнили ширину этого распределения с шириной, предсказываемой в модели. Модель распределения гигантов красной группы по видимой величине была рассчитана с учетом распределения звезд на луче зрения в исследуемом направлении (модель звездного населения была взята из работы [59]) и в предположении, что внутренний разброс значений абсолютных звездных величин гигантов красной группы равняется $\sigma_{r'} = 0.22$ (т.е. равен значению, полученному нами из анализа каталога *Hipparcos*). Для проведения этого теста мы использовали область с самым малым поглощением. Это необходимо для того, чтобы неполнота детектирования слабых звезд не мешала нам правильно определять ширину пика сгущения красных гигантов. Полученное значение ширины пика $\sigma = 0.35 \pm 0.08$ (рис.2.8) лишь незначительно превышает ширину пика сгущения красных гигантов, полученную в модели. Это означает, что внутренняя пыль в балдже не оказывает сколь-нибудь значимого влияния на наше определение поглощения в выбранном направлении и на определение закона поглощения.

Необходимо отметить, что в нашем случае неоднозначность определения значений видимых величин звезд в исследуемой области из-за эффекта сли-

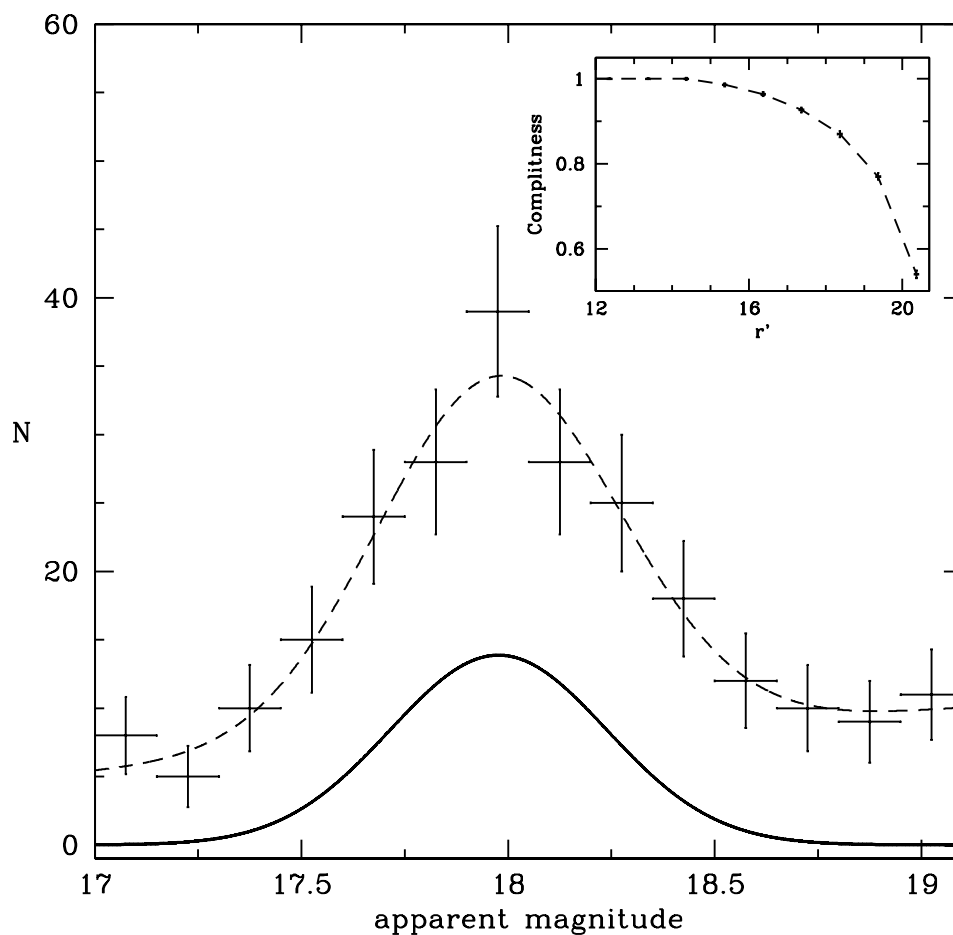


Рис. 2.8. Сравнение распределения видимых величин звезд в области сгущения красных гигантов с шириной, предсказываемой в модели. Крестики – наблюдаемое дифференциальное распределение количества звезд в поле РТТ-150; сплошная кривая – смоделированное дифференциальное распределение гигантов красного сгущения как функция их собственной величины; пунктирная линия – часть того же самого распределения, дополненная линейной функцией для корректной аппроксимации наблюдаемого распределения. На вставке представлена зависимость средней (для наших наблюдений) полноты детектирования от звездной величины объекта.

пания звезд препятствует более точному определению влияния пыли в балдже Галактики. Однако, даже более точная фотометрия части исследуемого поля, проведенная при помощи наблюдений телескопа Хаббл, не выявила наличие значительного количества внутренней пыли в балдже (ее влияние возможно лишь на уровне дополнительного покраснения не более ~ 0.05 величин, см. [59]).

2.4.1 Обсуждение

В настоящей части диссертации отработана методика оценки межзвездного поглощения в направлении на центр Галактики, получена карта поглощения широкой части поля ($30' \times 30'$) CBF с наилучшим на данный момент угловым разрешением $\sim 1'$ [73].

Покрытие карты сопоставимо с покрытием карты данного поля, полученной [62] по данным каталога 2MASS на основе исследования покраснения ветки красных гигантов балджа. Однако, в последнем случае неопределенность закона поглощения в диапазонах длин волн каталога 2MASS в направлении на данное поле может приводить к существенным неточностям в определении величины поглощения. Полученная карта избавлена от этого недостатка, поскольку нам удалось определить закон поглощения и корректно учесть его влияние на получаемую величину поглощения $A_{r'}$.

Важно отметить, что закон поглощения в исследуемой области неба существенно отличается от стандартного, что предположительно связано с особыми свойствами пыли в окрестностях балджа Галактики. Полученный закон, однако, учитывает вклад как дисковой пыли, распределенной вдоль луча зрения, так и пыли у галактического балджа (напомним, что использованный нами метод предполагает отсутствие большого количества пыли в области, где находятся гиганты красной группы). Для более детального исследования свойств именно пыли балджа необходимо отделить вклад пыли диска от пыли балджа в полученную величину поглощения.

Глава 3

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРАНЗИЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ AXJ1749.1-2733 И AXJ1749.2-2725

3.1 Введение

Третья часть работы посвящена исследованию природы двух близких транзистентных источников, расположенных в направлении на центр Галактики. Здесь, в том числе, применяется отработанный в предыдущей части метод по оценке межзвездного поглощения.

Первый из этих объектов, AX J1749.1-2733, был обнаружен 19 Сентября 1996 года космической обсерваторией ASCA [74]. Несмотря на длительную экспозицию наблюдений источника обсерваторией ASCA в течении многих лет значимый уровень регистрации его излучения отмечался только в сентябре 1996 года и марте 1998 года, что явно указывает на транзистентную

природу этого объекта. Поскольку рентгеновский поток, наблюдавшийся от источника, был очень слабым, $(1.5 - 6) \times 10^{-12}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий 0.7 – 10 кэВ, точное восстановление его спектральных параметров было весьма затруднительно. Тем не менее [74] удалось сделать некоторые оценки и выявить присутствие сильного внутреннего поглощения в этой системе.

9 сентября 2003 г космическая обсерватория ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 20-60 кэВ зарегистрировала короткую (длительность ~ 1 день) вспышку от источника AX J1749.1-2733 с потоком в максимуме ~ 40 мКраб [75]. По данным обсерватории ИНТЕГРАЛ удалось определить положение источника: RA=17h 49m 07s, Dec=-27°32'4" (J2000) с точностью 1.8' [76], что хорошо согласуется с координатами этого объекта, определенными по данным обсерватории ASCA — RA=17h 49m 10s, Dec=-27°33'1"(J2000) точность $\sim 55''$, [74]. Детальное исследование свойств объекта во время этой вспышки позволило [4] классифицировать его как быстрый рентгеновский транзиент с массивным компаньоном. Последующий анализ архивных данных ИНТЕГРАЛ показал, что в 2004-2007 гг. источник AX J1749.1-2733 время от времени значимо регистрировался, однако средняя величина рентгеновского потока от него не превышала 5 – 8 мКраб. Тем не менее, на основании этих данных в работе [5] было высказано предположение о наличии ~ 185 дневного орбитального периода у этой системы, что, в том числе, опираясь на работы [77], [78] позволило авторам допустить, что AX J1749.1-2733 - массивная двойная система, со звездой компаньоном класса Ве.

Наблюдения обсерватории SWIFT в 2007 году в мягком рентгеновском диапазоне энергий (2-12 кэВ), позволили [79] улучшить точность локализации системы до 3.8" и подтвердить наличие сильного внутреннего поглощения (полное поглощение: $N_H \simeq 19 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$) в данной системе.

Второй объект нашего исследования расположен в нескольких угловых минутах от источника AX J1749.1–2733 — это еще один сильно поглощенный ($N_H \sim 10^{23} \text{ см}^{-2}$) транзиентный рентгеновский источник AX J1749.2-2725. Он был обнаружен обсерваторией ASCA в марте 1995 года и локализован с

координатами RA=17^h49^m10.^s1, Dec=-27°25'16" и точностью около 50" [80]. Кроме того, от этого объекта были зарегистрированы когерентные пульсации с периодом ~ 220.4 с, в результате чего он был классифицирован как рентгеновский пульсар в массивной двойной системе. Эти результаты и выводы были позднее подтверждены [74] на основании данных последующих наблюдений ASCA в 1998 году. К сожалению, точность локализации обоих источников, обсерваториями ASCA и ИНТЕГРАЛ не позволяет определить оптические компаньоны в этих двойных системах.

3.1.1 Наблюдения

Источники AX J1749.1-2733 и AX J1749.2-2725 вместе наблюдались космической обсерваторией XMM-Newton 31 Марта 2007 года. Для проведения временного и спектрального исследований источника AX J1749.1-2733 были использованы, преимущественно, данные камеры PN телескопа EPIC/XMM-Newton, а данные камеры MOS2 применялись для дополнительной проверки результатов. С помощью прибора MOS2 также было проведено полное изучение свойств источника AX J1749.2-2725 и, кроме того, что явилось наиболее важным, определены положения исследуемых источников с точностью, достаточной для оптической идентификации. Полная экспозиция этого наблюдения составила ~ 6 ксек.

Для уточнения локализаций источников, полученных по данным обсерватории XMM-Newton и окончательного вывода о координатах источников были использованы результаты стандартного анализа данных космической обсерватории Chandra, полученные во время наблюдений источников AX J1749.1–2733 и AX J1749.2–2725 8 Февраля 2008 г (Obs.ID 9013) и 27 Апреля 2008 г (Obs.ID 7504), соответственно.

Жесткое рентгеновское излучение источника AX J1749.1–2733 исследовалось по данным телескопа IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ во время вспышки 9 Сентября 2003 с экспозицией около 50 ксек.

Для проведения оптической идентификации были использованы данные инфракрасного прибора SOFI телескопа NTT, взятые из общедоступного архива ESO ¹. Наблюдения источников проводились: 20 марта 2001 г. для AX J1749.2–2725, полные экспозиции в фильтрах *H* и *Ks*, составили 12 сек и 18 сек, соответственно, разрешение 0.144'' на пиксель; 3-4 апреля 2007 для AX J1749.1–2733, в фильтрах *H* и *Ks* полные экспозиции составили 95 сек и 1289 сек, соответственно, разрешение 0.288'' на пиксель. Фотометрические решения для наблюдений SOFI/NTT источника AX J1749.1–2733 были взяты из работы [5], а решения для AX J1749.2–2725 были получены используя данные наблюдений стандартных звезд из архива ESO. Дополнительно с помощью телескопа PTT-150 были проведены наблюдения области неба в окрестностях исследуемых объектов в фильтре *i'* – *SDSS*.

3.2 AXJ1749.1-2733 - транзиентный рентгеновский пульсар

3.2.1 Временной анализ

На рис.3.1а показана периодограмма излучения источника AX J1749.1-2733, полученная по данным камеры XMM-Newton/PN (6-10 кэВ) методом “наложения эпох” в диапазоне энергий 6-10 кэВ. Хорошо заметен значимый пик ($\sim 6\sigma$) распределения χ^2 вблизи периода ~ 132 с, свидетельствующий о наличии когерентного сигнала. Кроме этого, по разные стороны от главного пика отмечается наличие пиков меньшей интенсивности: на периодах ~ 66 с. и ~ 198 с. (значимость $\sim 3\sigma$), которые соответствуют полупериоду и полуторам периодам от 132 с, соответственно. Чтобы проверить что регистрируемая периодичность действительно связана с источником AX J1749.1-2733, а не с особенностями приборов или обработки данных, была построена периодограмма фонового излучения для области неба, близкой к исследуемому источнику. В результате каких-либо значимых отклонений от среднего на

¹<http://archive.eso.org/>

распределении χ^2 вблизи периодов 66, 132 или 198 с на этой периодограмме выявлено не было (рис.3.1б). Это подтверждает предположение о том, что наблюдаемая периодичность рентгеновского потока связана именно с источником AX J1749.1-2733.

Анализ архивных данных телескопа IBIS/ИНТЕГРАЛ от 9 сентября 2003 г позволил выявить пульсации рентгеновского потока от источника AX J1749.1-2733 с тем же периодом и в жестком рентгеновском диапазоне (>20 кэВ). На Рис.3.1, (в), показана периодограмма излучения источника, полученная в диапазоне энергий 20-50 кэВ в окрестности периодов ~ 66 , ~ 132 , и ~ 198 с. Результаты обсерватории ИНТЕГРАЛ подтверждают результаты, обсерватории XMM-Newton — хорошо видны соответствующие пики на распределении χ^2 . При этом необходимо отметить, что значимости ~ 66 и ~ 132 секундных пиков по данным ИНТЕГРАЛ примерно одинаковы $\sim 15 - 16\sigma$.

В таблице 3.1 приведены уточненные величины предполагаемых периодов (как ≈ 132 — секундного, так и в два раза меньшего) по данным разных приборов. Ошибки (соответствуют 1σ) определялись на основании анализа большого числа сгенерированных кривых блеска [82].

Как говорилось выше, в непосредственной близости к исследуемому источнику расположен другой транзистный рентгеновский пульсар AX J1749.2-2725 с периодом пульсаций рентгеновского потока ≈ 220 с. [80]. Вследствие малого углового расстояния между этими двумя источниками ($\sim 8'$), существует вероятность “перетекания фотонов” от одного источника к другому в процессе первичного анализа данных телескопа IBIS (поскольку его угловое разрешение составляет $12'$). Чтобы оценить возможное влияние подобного эффекта был проведен аналогичный временной анализ излучения пульсара AX J1749.2-2725. На 3.1,(г) показана результирующая периодограмма для этого источника, на которой хорошо видно отсутствие значимых пиков как вблизи периода ~ 132 с, так и 220 с (отметим, что пика вблизи 220 с нет и на периодограмме для AXJ1749.1-2733, 3.1,в). Наиболее вероятно, что либо пульсар AX J1749.2-2725 находился в “выключенном” состоянии, либо его

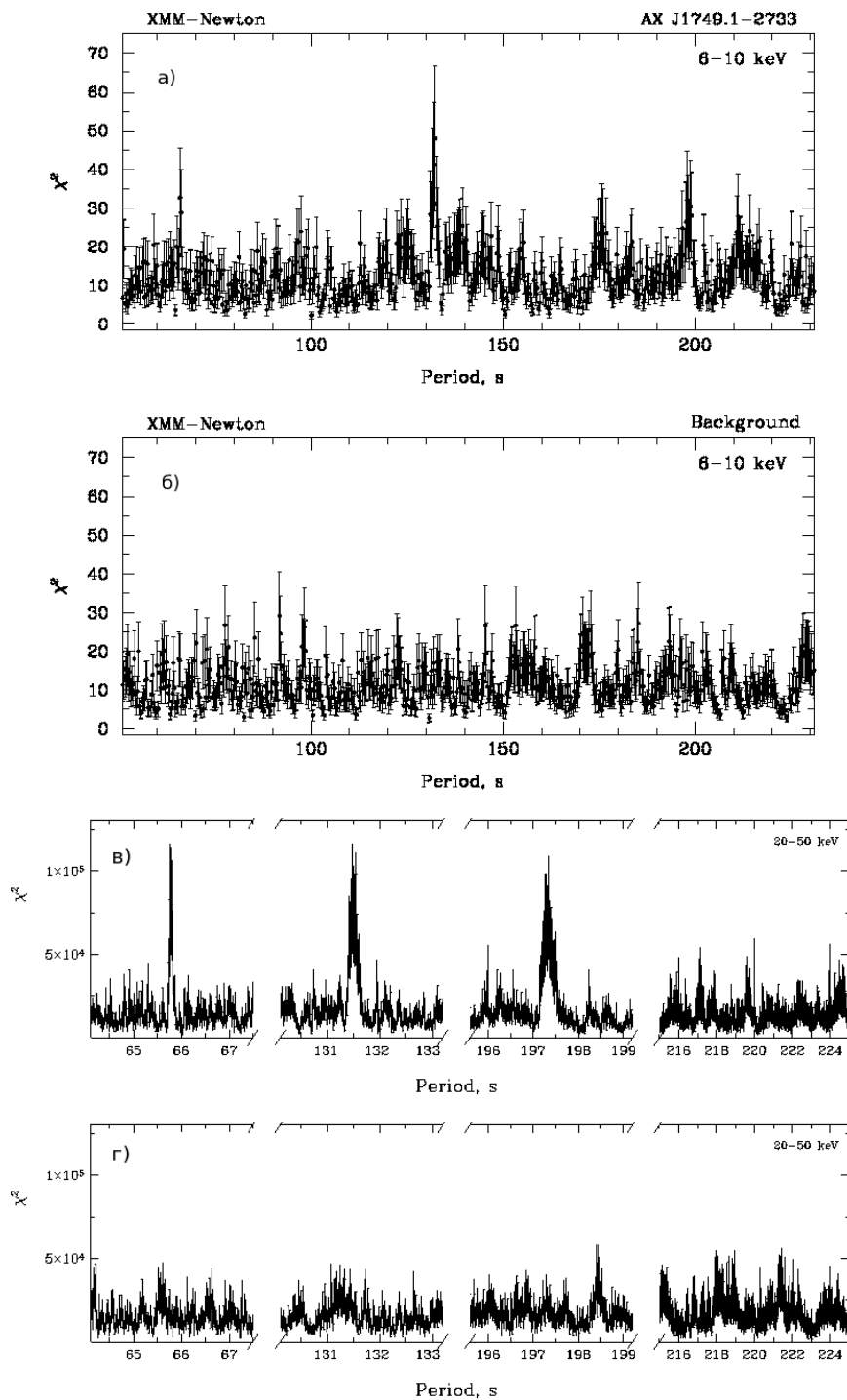


Рис. 3.1. Периодограммы излучения AX J1749.1-2733 и фона, полученные: по данным обсерватории XMM-Newton (инструмент PN) в диапазоне энергий 6-10 кэВ (панели а,б); по данным IBIS/ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 20-50 кэВ (панели в,г).

Таблица 3.1. Периоды пульсаций AX J1749.1-2733

ДАТА	ОБСЕРВАТОРИЯ	ПЕРИОД ПУЛЬСАЦИЙ, с
Сент. 9, 2003	ИНТЕГРАЛ	$131.54 \pm 0.02, 65.77 \pm 0.01$
Март 31, 2007	ХММ-Newton	$131.95 \pm 0.24, 66.05 \pm 0.15$

поток не превышал порог детектирования телескопа IBIS/ИНТЕГРАЛ во время наблюдения [4], и поэтому его излучение не влияет на результаты исследования источника AX J1749.1-2733 с помощью этой обсерватории.

Таким образом, можно уверенно заявить об открытии пульсаций рентгеновского потока от источника AX J1749.1-2733. Однако, остается вопрос об истинном значении их периода. На Рис.3.2 представлены результаты свертки кривых блеска источника с периодом ~ 132 с, полученных по данным обсерваторий ХММ-Newton и ИНТЕГРАЛ для диапазонов энергий 3-6, 6-10, 20-30, 30-40 и 40-60 кэВ; данные различных обсерваторий были свернуты с соответствующими периодами из таблицы 3.1. Из рисунка видно, что профиль импульса источника имеет явно выраженную двухпиковую структуру на всех энергиях, что приводит к появлению на периодограммах дополнительного пика вблизи ~ 66 с.

Чтобы выяснить, какой из периодов является истинным, был проведен следующий анализ: профиль пульсаций источника, свернутый с периодом 131.54 с, вместе с удвоенным (взятым дважды) профилем пульсаций источника, свернутым с периодом 65.77 с (см. таб. 3.1), полученные по данным телескопа IBIS/ИНТЕГРАЛ в диапазоне энергий 20-60 кэВ сравнивались между собой (Рис.3.3а). Из рисунка видно, что не существует значимого различия между профилями импульса, полученными для этих двух периодов. По-видимому, это является следствием относительно низкой интенсивности излучения источника и как следствие – больших неопределенностей регистрируемой от него скорости счета. Для формализации этого теста был вы-

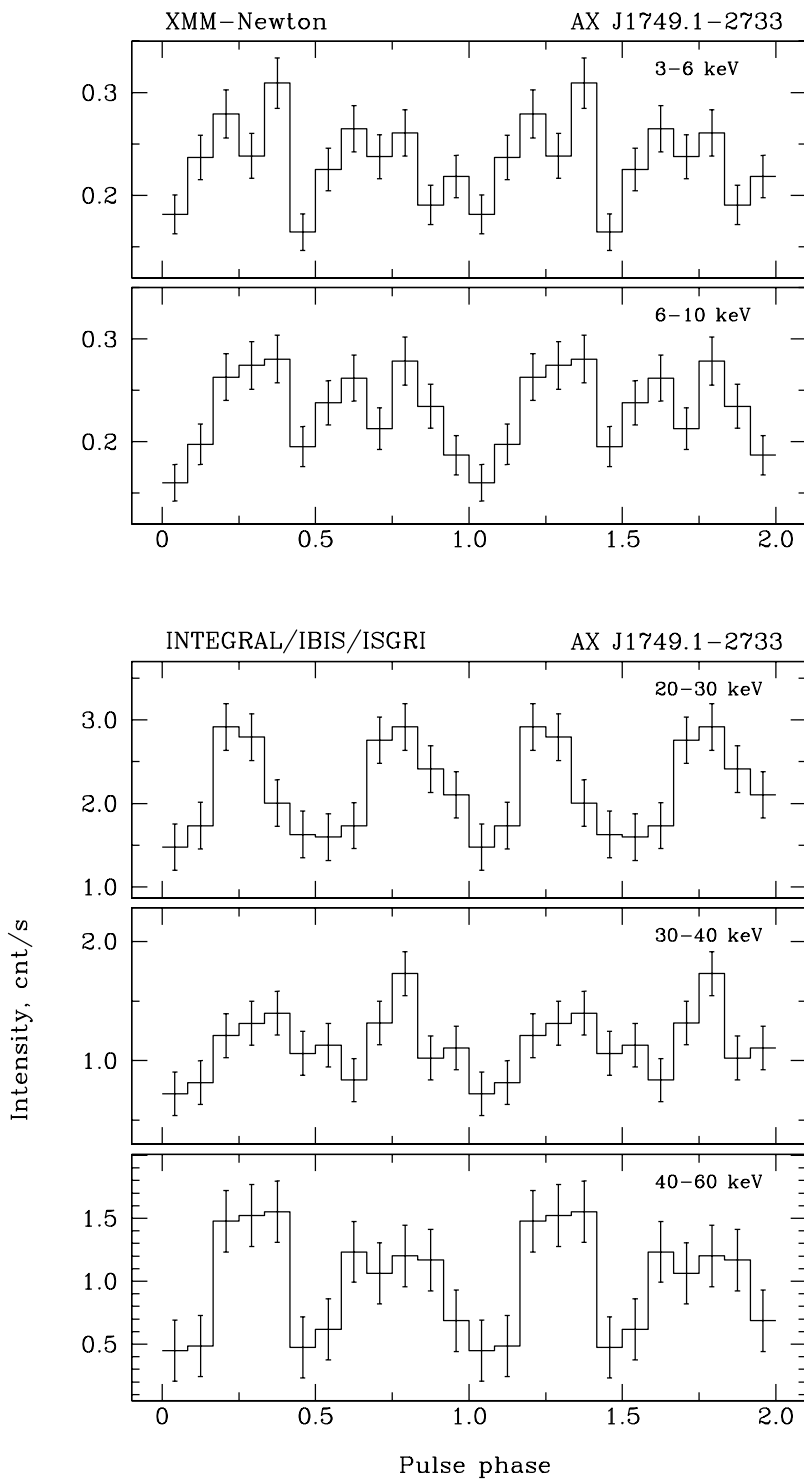


Рис. 3.2. Профили импульса AX J1749.1-2733 в диапазонах энергий 3-6, 6-10, 20-30, 30-40 и 40-60 кэВ, полученные по данным XMM-Newton/PN (две верхние панели) и INTEGRAL/IBIS (3 нижние панели) для периодов 131.95 с и 131.54 с, соответственно. Ошибки соответствуют 1σ .

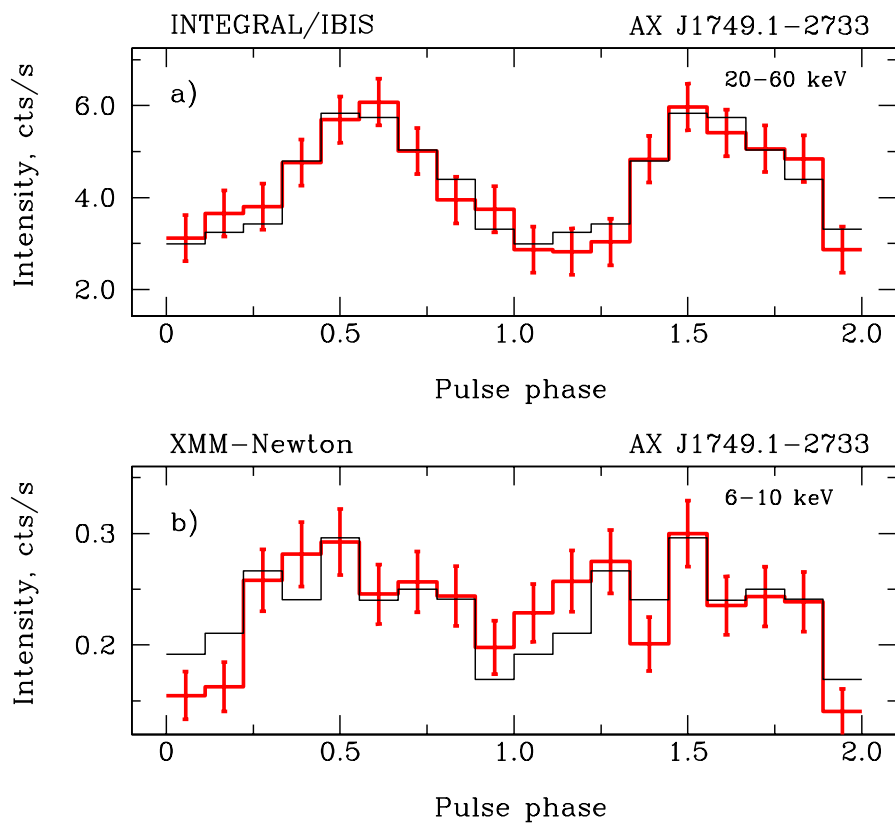


Рис. 3.3. (а) Профиль импульса AX J1749.1-2733, полученный по данным прибора IBIS/ИНТЕГРАЛ, и свернутый с двумя разными периодами: 131.54 с (жирная линия) и 65.77 с (взят дважды на рисунке, тонкая линия). (б) Тоже самое, но по данным полученным обсерваторией XMM-Newton/PN для периодов 131.95 с и 66.05 с, соответственно.

бран простой критерий в виде $\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(X_i - \mu_i)^2}{\sigma_i^2}$, где X_i - скорость счета в i -ом бине свернутой с периодом ~ 132 с кривой блеска, μ_i скорость счета в i -ом бине свернутой с ~ 66 с, кривой блеска, которая в данном случае рассматривается как модельная кривая; σ_i соответствующая неопределенность скорости счета в i -ом бине. Приложение этого теста к данным телескопа IBIS/ИНТЕГРАЛ дает величину $\chi^2 = 6.8$ для 9 степеней свободы, что означает — различие между экспериментальными данными и моделью несущественно. Этот результат отражает практически одинаковую значимость 66-с и 132-с пиков на соответствующей периодограмме (Рис.3.1, в).

Такая же процедура была проведена для данных обсерватории XMM-Newton, полученных в диапазоне энергий 6-10 кэВ. Кривая блеска источника была свернута с соответствующими периодами (см. таб.3.1), в результате было обнаружено, что разница между профилями пульсаций в этом энергетическом диапазоне существенно более значима (Рис.3.3б): $\chi^2 = 22$ для 9 степеней свободы соответствует вероятности ~ 0.01 что это различие случайно. Таким образом, основываясь на результатах анализа данных XMM-Newton можно заключить, что истинный периодов пульсаций источника AX J1749.1-2733, скорее всего, равен ≈ 132 с.

Как видно из таблицы 3.1 во время наблюдения обсерватории XMM-Newton, период пульсации был несколько длиннее, чем во время наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ, хотя вследствие достаточно большой неопределенности полученных значений периода это различие не очень значимо ($\sim 2\sigma$). Если все же предположить, что это приращение периода в действительности имеет место, то его можно связать с замедлением вращения нейтронной звезды с формальным темпом $\dot{P}/P \simeq 10^{-3} \text{ yr}^{-1}$, что согласуется что типичной скоростью изменения периода для рентгеновских пульсаров (см. подробнее [83, 84]).

Для всех энергетических диапазонов была вычислена доля пульсирующего излучения, представляемая в виде: $PF = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min})$, где I_{min} и I_{max} — скорости счета в минимуме и максимуме профиля импульса за

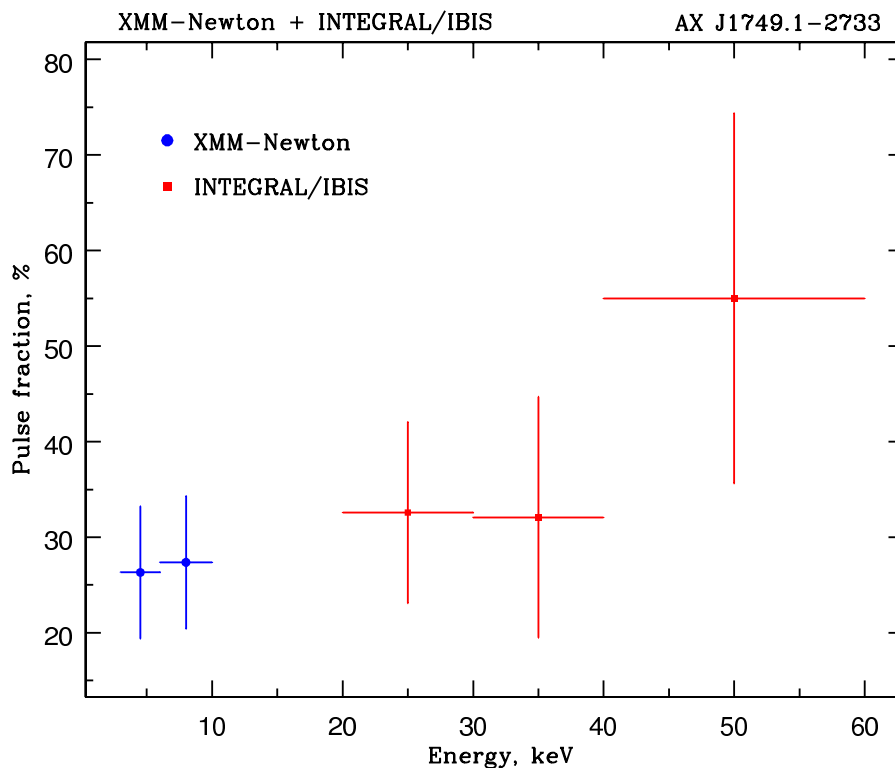


Рис. 3.4. Зависимость доли пульсирующего излучения от энергии пульсара AXJ1749.1-2733, полученная по данным обсерваторий XMM-Newton (кружки) и INTEGRAL (квадраты), соответственно.

вычетом фона (Рис.3.2). На рисунке 3.4 показана зависимость этой величины от энергии для исследуемого источника. Видно, что доля пульсирующего излучения, относительно неизменная в энергетическом диапазоне 3 – 40 кэВ и составляющая $\sim 25 - 30\%$, в жестком рентгеновском диапазоне (> 40 кэВ) увеличивается до $\sim 50\%$, что также типично для рентгеновских пульсаров [85].

3.2.2 Спектральный анализ.

Прежде всего отметим, что данные обсерваторий ИНТЕГРАЛ и XMM-Newton были получены не только в разное время, но также при разном состоянии источника – ИНТЕГРАЛ наблюдал источник в сентябре 2003 г.

во время вспышки, тогда как XMM-Newton, наблюдавший AX J1749.1-2733 в марте 2007 г., вероятнее всего, регистрировал его в спокойном состоянии. Поэтому совместный анализ данных этих обсерваторий с целью построения широкополосного спектра источника и определения его параметров возможен только в предположении, что форма этого спектра не менялась во время вспышки, а менялась только его нормировка. Однако, как было показано в работе [4], форма спектра источника, возможно, менялась во время вспышки. Поэтому ниже приведены результаты спектрального анализа излучения пульсара AXJ1749.1-2733 в спокойном состоянии только по данным XMM-Newton и лишь для приблизительных оценок результаты совместного спектрального анализа данных обсерваторий XMM-Newton и ИНТЕГРАЛ.

Спектр источника, полученный по данным камеры PN/XMM-Newton хорошо описывается простой моделью степенного закона с фотонным индексом $\Gamma = 1.17_{-0.06}^{+0.23}$ и поглощением $N_H = 21.1_{-1.3}^{+2.7} \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Соответствующий непоглощенный поток от источника составляет $\sim 1.8 \times 10^{-11} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в диапазоне энергий 3 – 10 кэВ (отметим что по данным приборов MOS1,2/XMM-Newton получается подобный результат).

Ранее спектр источника в мягком рентгеновском диапазоне (2 – 10 кэВ) исследовался по данным телескопа XRT обсерватории SWIFT [86, 79] и обсерватории ASCA [74]. В этих работах аппроксимация спектра также проводилась с использованием модели степенного закона с фотопоглощением. Полученные в них модельные оценки величины N_H хорошо согласуются с результатами нашего исследования, однако, фотонный индекс Γ имеет несколько больший разброс, что может быть связано с вариациями формы спектра, подобным найденным во время вспышки [4]. С другой стороны, необходимо указать на присутствие существенных неопределенностей для величин фотонных индексов, определяемых по данным обсерваторий SWIFT и ASCA и поэтому, формально говоря, наши результаты лежат внутри соответствующих доверительных интервалов.

Приблизительная оценка межзвездного поглощения в направлении

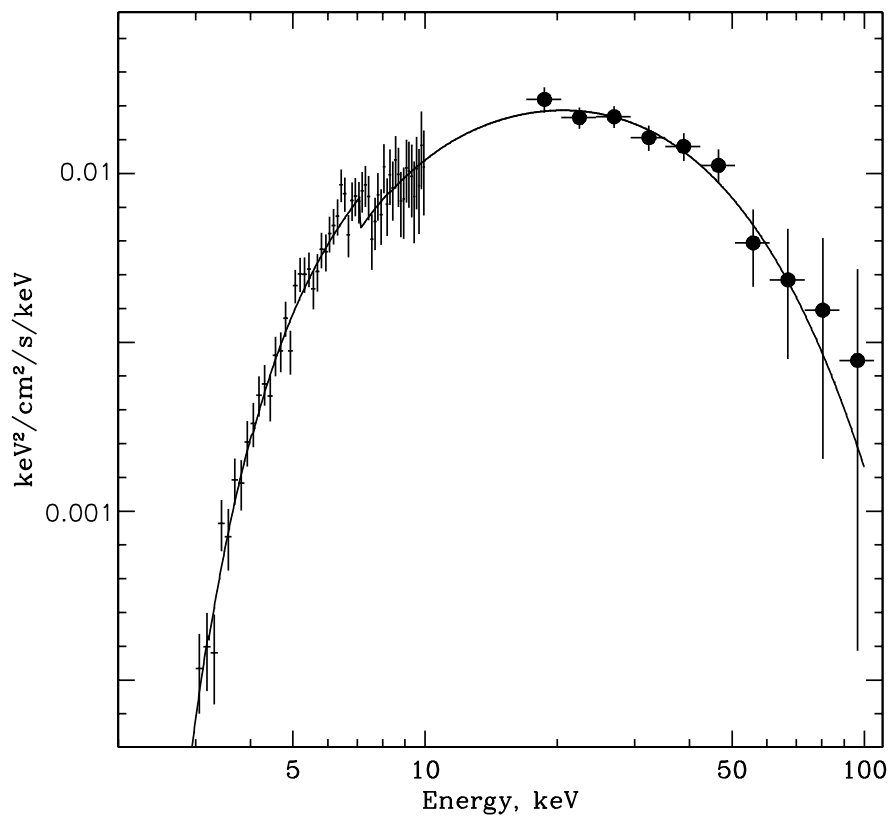


Рис. 3.5. Широкополосный энергетический спектр источника AXJ1749.1-2733 в диапазоне энергий 3-100 кэВ; данные обсерваторий XMM-Newton и ИНТЕГРАЛ, показаны крестиками и кружками, соответственно. Нормировка спектра, полученного по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ, при моделировании была оставлена в качестве свободного параметра.

на источник по карте поглощения из работы [30] дает величину $N_H \simeq 1.63 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, что более чем на порядок меньше чем величина, полученная из спектрального анализа данных XMM-Newton. Таким образом, на основании результатов, полученных в этой работе по данным XMM-Newton, а также более ранних оценок по данным ASCA и SWIFT можно сделать вывод о том, что AX J1749.1-2733 – сильно поглощенная массивная двойная система с рентгеновским пульсаром.

Формальная совместная аппроксимация данных обсерваторий XMM-Newton и ИНТЕГРАЛ (нормировка данных последнего была оставлена в качестве свободного параметра) стандартной для рентгеновских пульсаров моделью степенного закона с завалом на высоких энергиях [87] с учетом фотопоглощения дает следующие результаты: фотонный индекс $\Gamma = 1.03_{-0.24}^{+0.18}$, энергию слома $E_{cut} = 7.1_{-0.9}^{+0.6}$ кэВ, характерную энергию спада $E_{cut} = 19.8_{-2.6}^{+1.9}$ keV, и поглощение $N_H = (20.2_{-1.9}^{+1.0}) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$; приведенный $\chi^2 = 0.94$ (Рис.3.5). Отметим, что несмотря на приблизительность и некоторую произвольность при комбинации данных обсерваторий XMM-Newton и ИНТЕГРАЛ полученные значения являются весьма типичными для рентгеновских пульсаров [40]. Для указанной выше модели потоки от источника в диапазоне 3 – 100 кэВ во время наблюдений XMM-Newton и ИНТЕГРАЛ отличаются примерно в 6 раз: $\sim 4.9 \times 10^{-11} \text{ эрг см}^{-2}\text{с}^{-1}$ против $\sim 2.8 \times 10^{-10} \text{ эрг см}^{-2}\text{с}^{-1}$, соответственно. Последнее значение, взятое из работы [4] было получено с использованием комбинации данных телескопов JEM-X и IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ.

3.3 Исследование транзиентного пульсара AX J1749.2–2725

Как было отмечено выше, во время наблюдения 31-го марта 2007 года источника AX J1749.1–2733 еще один транзиентный рентгеновский пульсар AX J1749.2–2725 попал в поле зрения камеры MOS2 обсерватории XMM-Newton. Источник удалось идентифицировать по наличию пульсации рент-

геновского потока с периодом ~ 220 с, впервые обнаруженных от него по данным обсерватории ASCA [80]. Периодограмма AX J1749.2–2725, полученная по данным прибора MOS2/XMM-Newton в диапазоне энергий 2–10 кэВ, представлена на Рис.3.6, верхняя панель. Несмотря на то, что поток от источника достаточно слабый, на ней хорошо заметен значимый пик вблизи периода ~ 220 с. Более точный анализ, аналогичный тому, что был проведен для источника AX J1749.1–2733, позволил измерить величину периода $\sim 216.86 \pm 0.14$ с. Профиль импульса источника, свернутый с этим периодом, представлен на Рис.3.6, нижняя панель, откуда хорошо видно, что он имеет выраженную однопиковую структуру. Доля пульсирующего излучения в диапазоне энергий 2–10 кэВ составляет $\sim 70\%$. Спектр источника хорошо описывается моделью степенного закона с фотонным индексом $\Gamma = 1.41_{-1.06}^{+0.75}$ и фотопоглощением $N_H = 14.1_{-7.96}^{+6.13} \times 10^{22}$ см $^{-2}$ (приведенный $\chi^2 = 0.73$ для 18 степеней свободы, Рис.3.7, верхняя панель). Непоглощенный поток источника в диапазоне энергий 2 – 10 кэВ по данным обсерватории XMM-Newton составил $\sim 2.6 \times 10^{-12}$ эрг см $^{-2}$ с $^{-1}$ — это значение на порядок меньше того, которое было зарегистрировано от источника обсерваторией ASCA в 1995 году [80]. Это указывает на то, что XMM-Newton, по всей видимости, наблюдал пульсар AX J1749.2–2725 в спокойном состоянии. Тем не менее, параметры спектров источника, полученных по данным обсерваторий XMM-Newton и ASCA, хорошо согласуются между собой, а некоторое отличие между ними может объясняться присутствием значительных неопределенностей, связанных с тем, что поток от источника довольно слабый. Соответствующие доверительные контуры для фотонного индекса и поглощения показаны на рис. 3.7, нижняя панель. Несмотря на это, очевидно, что величина поглощения полученная из аппроксимации спектра значительно превышает величину, получаемую из стандартных карт [30], [50] в направлении на источник, что является прямым указанием на присутствие в системе внутреннего поглощения.

Сравнение полученных результатов с результатами [74, 80] показывает,

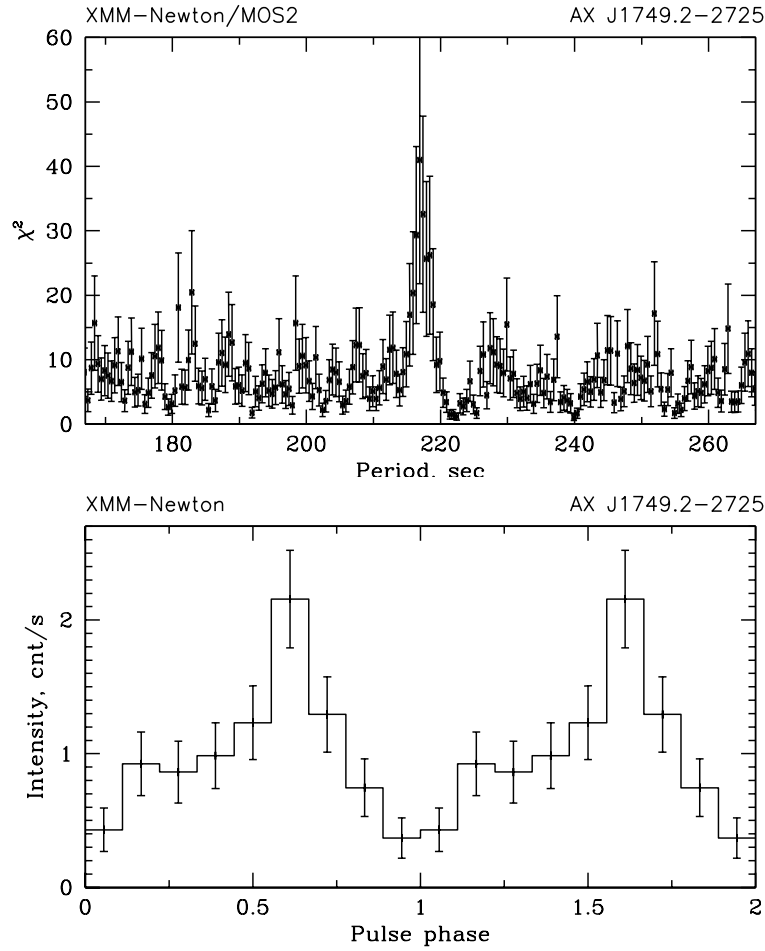


Рис. 3.6. Периодограмма (верхняя панель) и профиль пульсаций (нижняя панель) источника AX J1749.2–2725, восстановленные по данным камеры MOS2/XMM-Newton в диапазоне энергий.

что вращение нейтронной звезды, входящей в систему AX J1749.2–2725, значительно ускорилось за 12 лет, а средний темп ускорения составил: $\dot{P}/P \simeq -1.3 \times 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ (где \dot{P} - приращение периода). Используя выражение для максимально возможного ускорения вращения за счет переноса момента при аккреции из работы [88], можно приблизительно оценить рентгеновскую светимость источника $L_{X,2-100\text{keV}} \simeq 2.1 \times 10^{35} \text{ эрг с}^{-1}$ (здесь $L_{X,2-100\text{keV}}$ - рентгеновская светимость в диапазоне энергий 2 – 100 кэВ рассматривается как болометрическая). Далее, с учетом коэффициента преобразования ~ 3 , по-

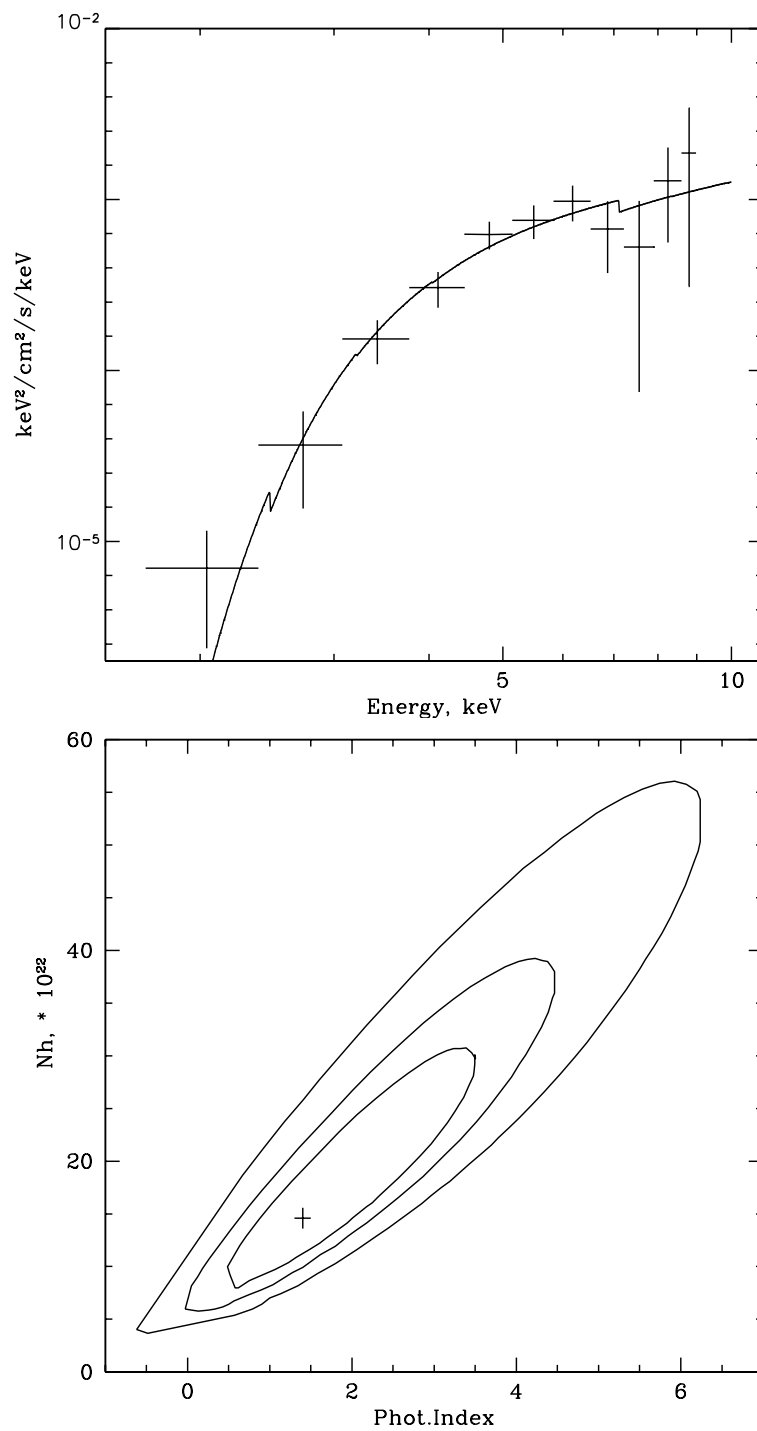


Рис. 3.7. Спектр источника AX J1749.2–2725, полученный по данным XMM-Newton/MOS2 в марте 2007 года (верхняя панель). Непрерывная линия соответствует модели, которая наиболее хорошо описывает данные. Доверительные контуры для предложенной модели (нижняя панель).

лученного на основании анализа широкополосных спектров [40], можно пересчитать светимость в диапазоне энергий 2–100 кэВ в светимость в диапазоне энергий 2–10 кэВ (для которого известен поток от источника по данным обсерватории XMM-Newton) $L_{X,2-10keV} \simeq 7 \times 10^{34}$ эрг с^{-1} и затем получить оценку расстояния до объекта $d \simeq 16$ кпк.

3.4 Идентификация оптических компаньонов рентгеновских пульсаров AX J1749.2–2725 и AX J1749.1–2733

Изображение области неба в диапазоне энергий 2–10 кэВ по данным MOS2/XMM-Newton, содержащее рентгеновские пульсары AX J1749.1–2733 и AX J1749.2–2725, показано на Рис.3.8. Видно, что оба источника попадали в поле зрения XMM-Newton во время точечного наведения последнего на AX J1749.1–2733. С помощью стандартной процедуры *eboxdetect*, входящей в состав программного пакета SAS, были определены координаты этих объектов, при этом статистические ошибки на локализации источников составили 0.4'' и 0.7'' для AX J1749.1–2733 и AX J1749.2–2725, соответственно. Однако, согласно данным калибровок² систематическая ошибка наведения обсерватории XMM-Newton, связанная с конечной точностью позиционирования с помощью звездных датчиков, может существенно превышать статистическую и достигать $\sim 2''$. Обычно чтобы минимизировать эту неопределенность используют какие-либо источники, попадающие в поле зрения прибора вместе с исследуемым такие, оптические компаньоны которых хорошо известны. В нашем случае подобных объектов в поле зрения нет и, следовательно, систематическая ошибка не может быть определена стандартным образом. Однако, справедливо предположить, что так как источники расположены близко друг к другу и достаточно далеко от края поля зрения (где сильны искажения) систематическая ошибка для них должна быть одинаковой.

Изображения участков неба в окрестностях исследуемых пульсаров, по-

²<http://xmm2.esac.esa.int/external/>

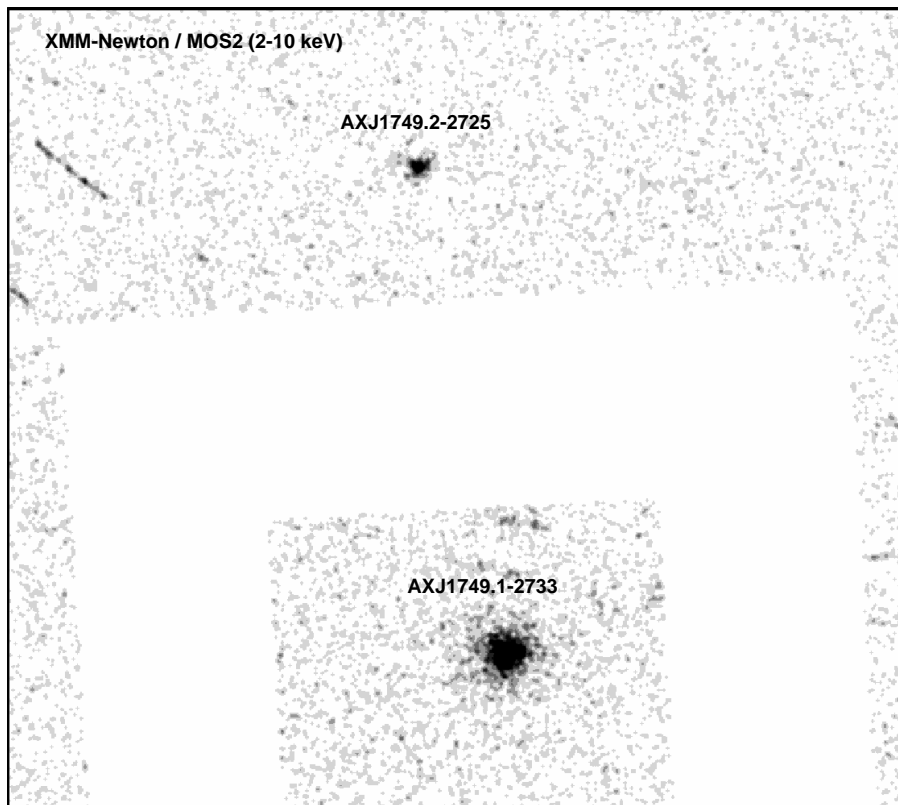


Рис. 3.8. Изображения неба в окрестностях рентгеновских пульсаров AX J1749.2–2725 и AX J1749.1–2733, полученное по данным камеры MOS2 обсерватории XMM-Newton в диапазоне энергий 2–10 кэВ.

лученные с помощью телескопа SOFI/NTT в диапазоне K_s , показаны на Рис. 3.9. Хорошо видно, что в радиус ошибки XMM-Newton для источника AX J1749.2–2725 попадает только одна звезда, расположенная менее чем в $1''$ от центра локализации объекта в рентгеновском диапазоне (Рис. 3.9, слева). Это делает разумным предположение о том, что именно эта звезда является оптическим компаньоном пульсара AX J1749.2–2725, а разница в положениях между ними соответствует величине систематической ошибки – сдвига XMM-Newton.

Что касается второго источника, AX J1749.1–2733, то для него нет такой определенности в выборе компаньона: в радиус ошибки XMM-Newton этого объекта попадают две звезды (см. рис. 3.9, справа). Первая – распо-

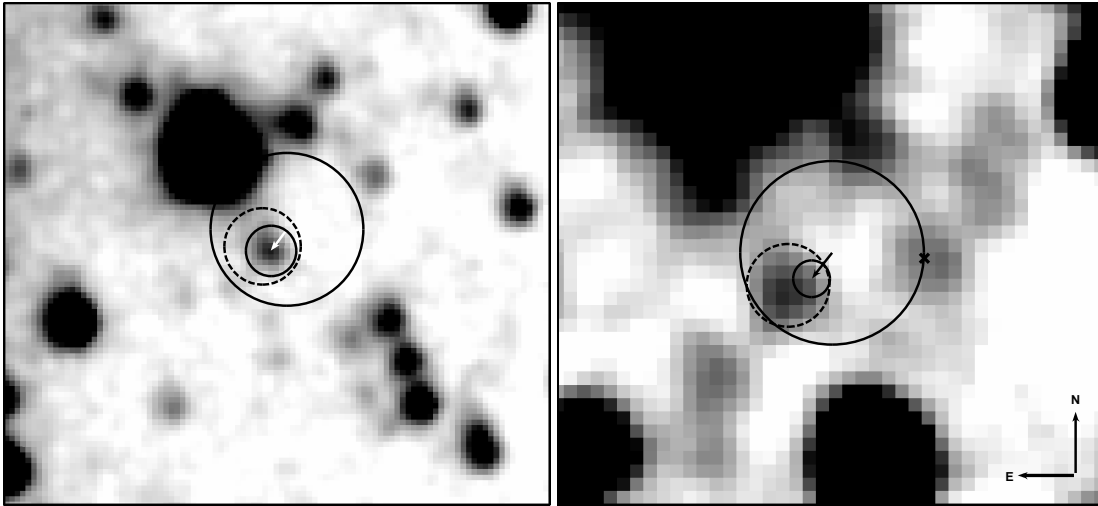


Рис. 3.9. Изображения неба в окрестностях рентгеновских пульсаров AX J1749.2–2725 (слева) и AX J1749.1–2733 (справа), полученные телескопом SOFI/NTT в диапазоне K_s . Большие кружки показывают величину стандартной (статистическая плюс систематическая) ошибки позиционирования наблюдений XMM-Newton/MOS2. Стрелки показывают направление и величину предлагаемого систематического сдвига изображения неба, полученного XMM-Newton, относительно соответствующих инфракрасных изображений. Маленький кружок показывает только величину статистической неопределенности измерений XMM-Newton, после применения соответствующего систематического сдвига. Пунктирные кружки показывают величину абсолютной точности позиционирования обсерваторией Chandra исследуемых источников. Положение звезды, предложенной [5] в качестве компаньона для AX J1749.1–2733, отмечено крестиком (правая панель).

ложена достаточно близко к центру локализации, и вторая - расположена на краю круга ошибки (рис. 3.9, справа, крестик). Однако, коррекции систематического сдвига посредством сопоставления центроидов источника AX J1749.2–2725 в рентгеновском и оптическом диапазонах (см. выше; см. рис. 3.9, стрелочки) убирает эту неопределенность и однозначно указывает на первую звезду, как на оптический компаньон системы AX J1749.1–2733. Следует заметить также, что систематическая ошибка, связанная с возможным поворотом поля зрения для XMM-Newton пренебрежимо мала³.

Для дополнительно подтверждения полученных выше результатов были использованы предварительно обработанные данные наблюдений обсерваторией Chandra пульсаров AX J1749.1–2733 и AX J1749.2–2725. Пунктирными окружностями на рис. 3.9 показаны величины абсолютной астрометрической ошибки Chandra на позиции этих пульсаров. Неопределенность в обоих случаях составляет около 1'' и она, преимущественно, систематическая. Из рисунка видно, что локализации источников, полученные по данным обсерватории Chandra, полностью подтверждают правильность выбора оптических компаньонов исследуемых пульсаров, сделанного по данным обсерватории XMM-Newton. В результате координаты оптических компаньонов объектов AX J1749.2–2725 и AX J1749.1–2733 (и следовательно самих пульсаров): RA, Dec: $17^h 49^m 12^s.41$, $-27^\circ 25' 38''.1$ (неопределенность $\sim 0''.1$) и $17^h 49^m 06^s.94$, $-27^\circ 32' 32''.5$ (неопределенность $\sim 0''.2$), соответственно.

Отметим, что оптический компаньон источника AX J1749.1–2733, установленный в настоящей работе, значимо регистрировался телескопом SOFI/NTT на протяжении всего времени экспозиции с неизменной величиной. Необходимо также отметить, что предложенная нами звезда отличается от той, что предлагалась в работе [5] в качестве оптического компаньона этого объекта (Рис. 3.9, крестик).

Изображение неба в окрестностях AX J1749.1–2733 в диапазоне i' , полученное телескопом РТТ-150, показано на Рис. 3.10. Заметим, что ни один

³<http://xmm2.esac.esa.int/external/>

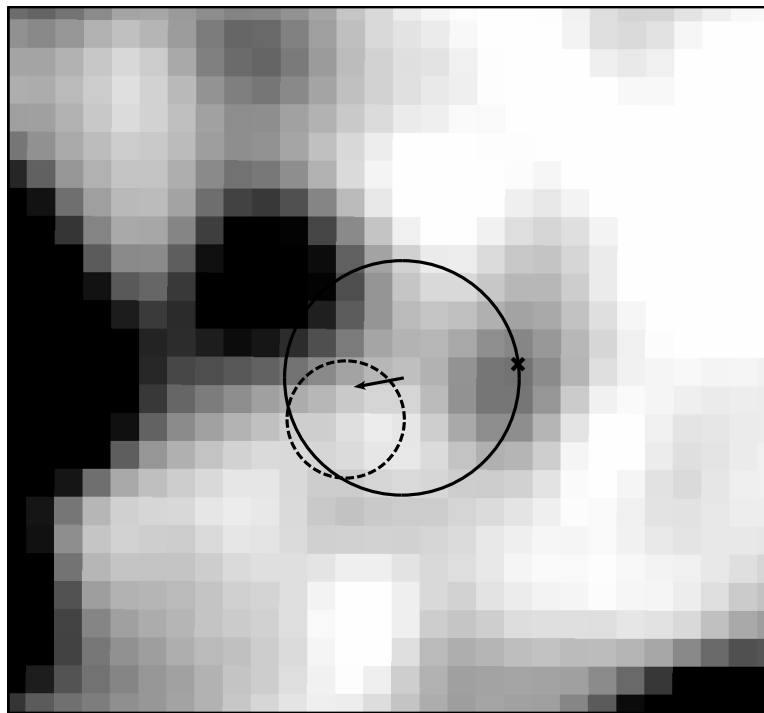


Рис. 3.10. Изображение области неба в окрестностях AX J1749.1–2733 в диапазоне i' , полученное с помощью телескопа РТТ-150. Окружность соответствует стандартной астрометрической неопределенности измерений XMM-Newton/MOS2 (соответствует большой окружности на правой панели Рис. 3.9). Крестиком отмечена звезда, предложенная в работе [5], в качестве оптического компаньона пульсара AX J1749.1–2733.

из компаньонов не был зарегистрирован в оптическом диапазоне. Причин у этого несколько: компаньон AX J1749.2–2725 сложно наблюдать с помощью РТТ-150 поскольку он попадает в “крылья” PSF соседней яркой звезды и неразличим как отдельный объект; а для значимой регистрации компаньона AX J1749.1–2733 оказалось недостаточно выделенной экспозиции.

Величины и верхние пределы компаньонов приведены в Таблице 3.2: величины в фильтрах $JHKs$ были получены по данным телескопа SOFI/NTT, а верхние пределы в диапазоне i' — по данным РТТ-150.

Таблица 3.2. Величины предложенных компаньонов

band	AX J1749.2–2725	AX J1749.1–2733
i	–	>20.5
J	18.58 ± 0.21	> 18.7
H	16.57 ± 0.07	17.43 ± 0.14
Ks	14.95 ± 0.05	15.18 ± 0.03

3.4.1 Оценка спектрального класса звезд компаньонов и расстояния до систем

Используя результаты фотометрического анализа звезд компаньонов исследуемых пульсаров (см. таб.3.2) можно попытаться определить классы этих звезд. Однако, прежде необходимо оценить величину межзвездного поглощения до центра Галактики в направлении на эти пульсары, которая затем будет использована в качестве некоторого ориентира, позволяющего провести самосогласованное исследование классов звезд-компаньонов.

Используя изображения, полученные SOFI/NTT в диапазонах H и Ks , были построены диаграммы цвет-видимая величина для всех звезд, попадающих в области $1' \times 2'$ в окрестностях исследуемых пульсаров (Рис. 3.11 для AX J1749.2–2725). На диаграмме хорошо видна ветка красных гигантов балджа, а также так называемая область гигантов красного сгущения (RCG). Пользуясь техникой, описанной в предыдущей части диссертации, можно оценить величину поглощения до галактического центра. Так сравнивая значения цвета и величины центроида гигантов красного сгущения, полученные из этой диаграммы, с их абсолютными значениями ($(H - K)_0 = 0.08 \pm 0.03$ и $H_0 = -1.44 \pm 0.05$ – получены отождествлением гигантов из каталога Hipparcos и каталога 2MASS), удалось получить следующие оценки межзвездного поглощения: $A_H = 2.1 \pm 0.1$ и $A_H = 1.42 \pm 0.25$ для полей в окрестностях источников AXJ1749.2-2725 и AXJ1749.1-2733, соответственно.

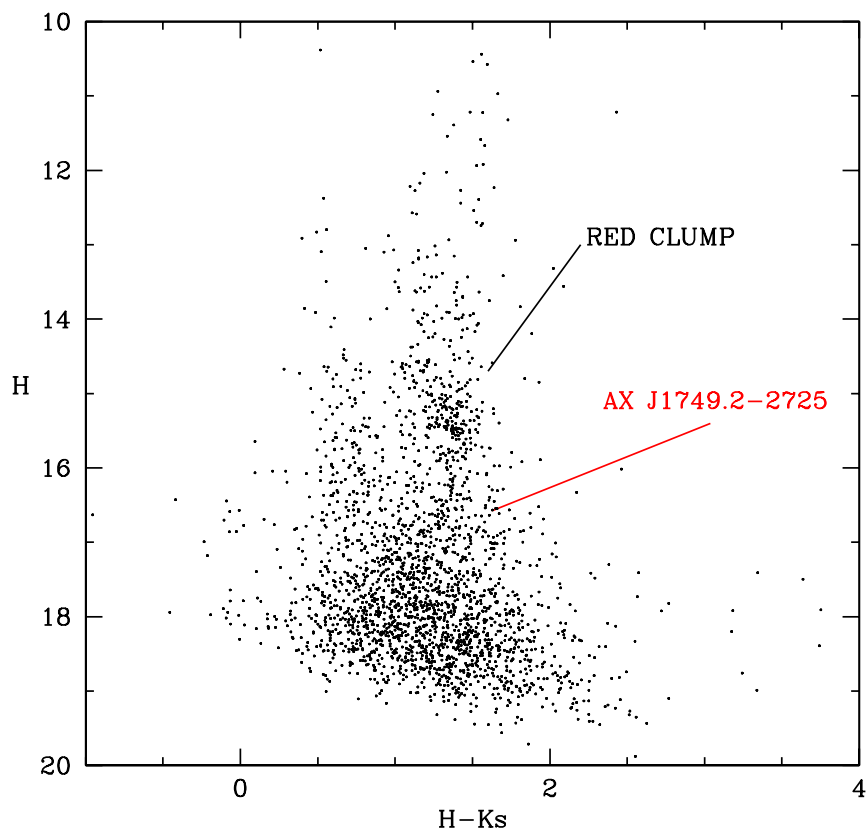


Рис. 3.11. Диаграмма цвет-видимая величина, построенная для звезд в окрестностях ($1' \times 2'$) источника AX J1749.2–2725 по данным наблюдений телескопа SOFI/NTT.

Закон поглощения определенный по положению гигантов красного сгущения для этих полей: $A_H/E(H-K) = 1.67 \pm 0.12$, демонстрирует существенное отличие последнего от стандартного $A_H/E(H-K) = 2.75$ [54]. Здесь для проведения оценок использовались данные о положении гигантов только в двух областях неба, в отличие от предыдущей части диссертации, где поле делилось на множество более мелких частей. Однако, при известном расстоянии до галактического центра достаточно провести наблюдение даже одной области, поскольку после коррекции видимой величины центроида гигантов на расстояние отличает её от абсолютной только поправка на поглощение, а поправка на цвет, вообще от расстояния не зависит, а зависит только от величины поглощения.

Исследование в фильтрах J и Ks также выявляет сильное различие между законом поглощения в направлении на центр Галактики в окрестностях пульсара AXJ1749.2-2725 – $A_J/E(J-K) = 1.29 \pm 0.14$ и стандартным – $A_J/E(J-K) = 1.69$. Полученные результаты хорошо согласуются как с результатами предыдущей части диссертации, так и с результатами других, более ранних работ [86], [87].

Однако, понятно, что пользуясь только этими оценками невозможно понять где именно и каким образом в данном направлении стандартный закон переходит в нестандартный, поэтому в дальнейших оценках заложены следующие предположения: изменение величины и цвета близких звезд (расположенных ближе центра Галактики) происходит по стандартному закону поглощения, а далеких – по нестандартному.

Теперь можно определить классы компаньонов исследуемых объектов. Для этого варьируя расстояние, класс объекта и поглощение до него, подбираются классы звезд с расстояниями и поглощениями до них (звезд), которые хорошо описывают наблюдаемые величины объектов в фильтрах H и Ks.

Понять же для звезд каких классов при такой оценке необходимо использовать стандартный закон поглощения, а для каких нестандартный можно следующим образом: предположим, что компаньоны исследуемых пульсаров локализованы в центре Галактики и сделаем соответствующие поправки (получены выше) наблюдаемых величин компаньонов в фильтре H на расстояние и поглощение до галактического центра; затем сравнивая полученные таким образом “абсолютные” (корректированные) величины источников в фильтре H с абсолютными величинами звезд различных классов легко понять какие из них могли бы лежать в центре Галактики будучи компаньонами источников, а какие лежали бы, при этом, дальше или ближе галактического центра.

Определившись с границами применимости того или иного закона поглощения и применяя методику, описанную выше, можно определить звездами каких классов вероятнее всего являются компаньоны источников

AX J1749.2–2725, AX J1749.1–2733 и на каком расстоянии они при этом находятся. Диаграмма (рис. 3.12, верхняя панель) демонстрирует возможность того, что звезда некоторого класса может быть оптическим компаньоном объекта AX J1749.2–2725. Так только звезды, попадающие в белые области диаграммы могут потенциально быть компаньонами этого пульсара. Если же звезда попадает в голубую область, то быть компаньоном она не может по одной из следующих причин: 1) звезда этого класса располагалась бы ближе центра Галактики, но поправка на поглощение при этом превышала бы поглощение до галактического центра; 2) или она располагалась бы дальше центра Галактики, но поглощение в направлении на источник было бы при этом меньше, чем поглощение до галактического центра. Таким образом, из полученной диаграммы видно, что компаньоном AX J1749.2–2725 вероятнее всего могут быть звезды спектральных классов В1-3, расположенные позади центра Галактики (рис. 3.12, верхняя панель). Применяя те же рассуждения для пульсара AX J1749.1–2733 можно заключить что, этот источник, вероятнее всего, также расположен за галактическим центром и его компаньоном могут быть звезды классов В0-В3 (см. рис. 3.12, нижняя панель).

Из диаграммы хорошо видно, что гиганты спектральных классов G5-K0 также могут быть компаньонами объектов (см. рис. 3.12). Причем это не кажется удивительным, принимая во внимание, недавнее открытие нового класса симбиотических рентгеновских двойных систем, состоящих из компактного объекта (вероятнее всего нейтронной звезды), на которую аккрецирует звездный ветер с красного гиганта позднего М-класса [89]. Хотя если в нашем случае положить звезды М0–9III в качестве компаньонов исследуемых объектов, то, например, AX J1749.2–2725 должен будет располагаться на расстоянии 40–54 кпк, а AX J1749.1–2733 – 30–40 кпк, т.е. вне Галактики. Наличие фотометрических данных в большем количестве фильтров позволило бы получить более точные результаты соответствующих оценок.

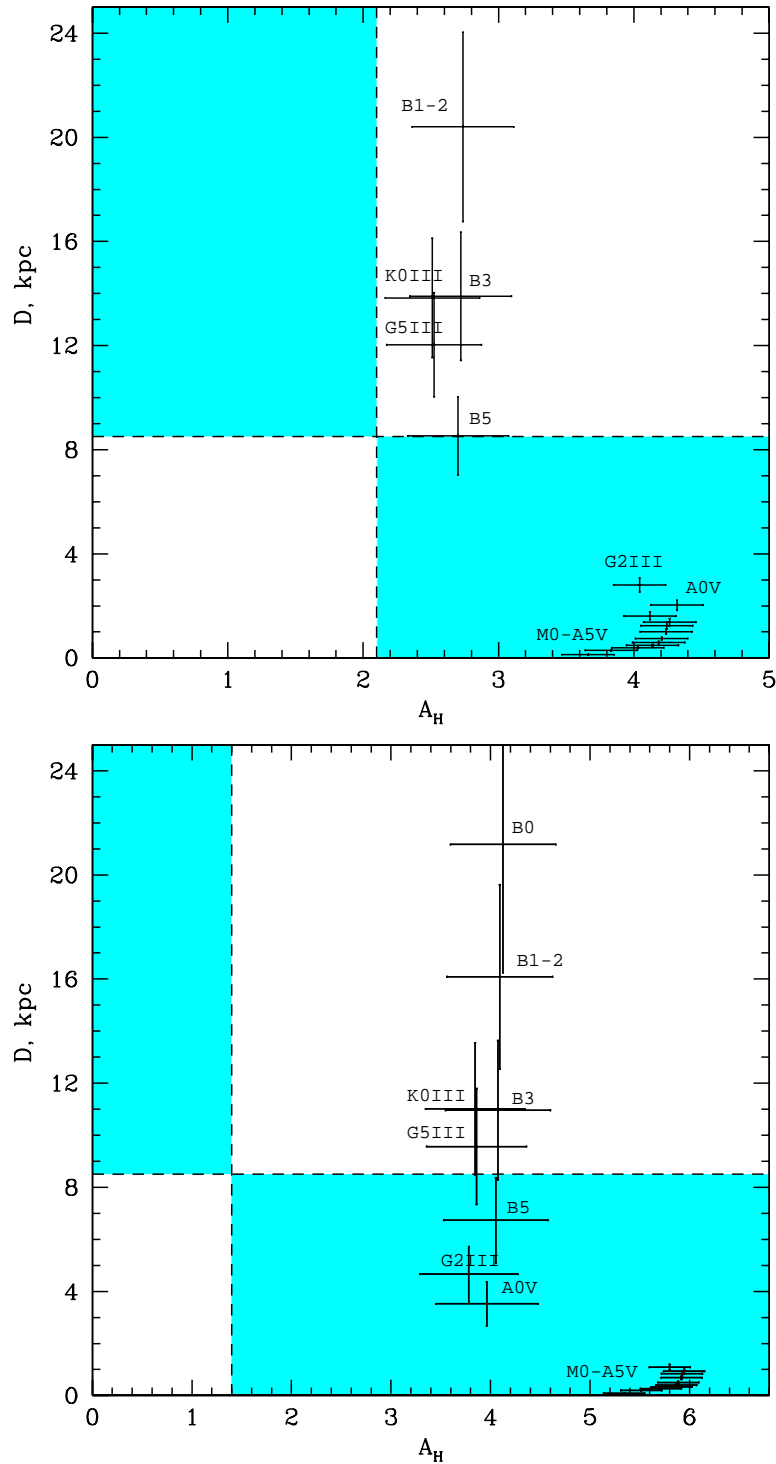


Рис. 3.12. Диаграмма поглощение в фильтре Н – расстояние, показывающая каким образом должны быть локализованы звезды различных типов и с каким поглощением, чтобы описать наблюдаемые величины компаньонов источников в фильтрах Н и Ks: AX J1749.2–2725 - верхняя панель; AX J1749.1–2733 - нижняя панель. Пунктирные вертикальная и горизонтальная линии показывают величину поглощения и расстояние до центра Галактики. Потенциально возможные классы оптических компаньонов лежат в белых областях диаграммы.

3.4.2 Выводы

Открыты пульсации рентгеновского потока от источника AX J1749.1-2733 с периодом 131.95 с по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ и XMM-Newton. На основании данных обсерваторий XMM-Newton и Chandra были значительно улучшены точности локализации двух рентгеновских пульсаров AX J1749.1–2733 и AX J1749.2–2725, что позволило определить оптические компаньоны этих систем. Было показано, что закон поглощения в направлении на центр Галактики в окрестностях этих объектов значительно отличается от стандартного. Используя, в частности, этот результат удалось выделить наиболее возможные спектральные классы для звезд компаньонов обоих источников и показать, что они входят в число массивных двойных систем, расположенных позади центра Галактики, вероятно, в одном из спиральных рукавов [90]. Компаньоном пульсара AX J1749.2–2725 при этом, вероятнее всего, является звезда класса В3, расположенная на расстоянии $d = 14 \pm 2.5$ кпк, а для AX J1749.1–2733 – либо звезда класса В3 на расстоянии $d = 11 \pm 3$ кпк, либо В1-2 и $d = 16 \pm 3.5$ кпк. Отметим, что для системы AX J1749.2–2725 последнее хорошо согласуется с оценками, полученными из наблюдаемого темпа ускорения вращения нейтронной звезды (см. пункт 3.3, настоящей диссертации).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- 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.*

Литература

- [1] Castro-Tirado A., Brandt S. // *Astron. Astrophys.*, **337**, 379 (1999)
- [2] Arefiev V., Priedhorsky W., Borozdin K. // *Astrophys. J.*, **586**, I. 2. 1238 (2003)
- [3] Negueruela, I.; Smith, D. M.; Reig, P. // *Proceedings of the The X-ray Universe 2005 (ESA SP-604)*, p.165 (2006)
- [4] Grebenev S.A., Sunyaev R.A. // *Astron.Letters*, **33**, 175 (2007)
- [5] Zurita Heras J., Chaty S. // *Astron. Astrophys.*, **489**, 657 (2008)
- [6] Golenetskii S., Aptekar R., Frederiks D., // *Astrophys. J.*, **596**, 1113 (2003)
- [7] Winkler C., Courvoisier T.J.-L., Di Cocco G., et al. // *Astron. Astrophys.*, **411**, L1 (2003)
- [8] Lebrun, F., Leray, J. P., Lavocat P., et al. // *Astron. Astroph.*, **441**, 141 (2003)
- [9] Segreto A., Ferrigno C., arXiv:astro-ph/0709.4132, (2007)
- [10] Ревнивцев М.Г., Сюняев Р.А., Варшалович Д.А. и др. // *ПАЖ* **30**, 430 (2004)
- [11] Krivonos, R., Revnivitsev, M., Lutovinov et al., // *Astron. Astrophys.*, **475**, 775 (2007)
- [12] H. V. Bradt, R. E. Rothschild, J. H. Swank, et al., // *Astron. Astrophys.*, **97**, 355 (1993)
- [13] Revnivitsev M., Sazonov S., Jahoda K., et al. // *Astron. Astrophys.*, **418**, 927 (2004)

- [14] I. T. Belloni, G. Hasinger, and C. Izzo, // *Astron. Astrophys.*, **283**, 1037 (1994)
- [15] Jansen F., Lumb D., Altieri B., et al., // *Astron. Astroph.*, **365**, p.L1-L6 (2001)
- [16] Bessell, Michael S., // *Annual Review of Astron. Astroph.*, **43**, 293 (2005)
- [17] Monet D.G.; Levine S.E.; Canzian, B., et al., // *Astron. J.*, **125**, I. 2, 984, (2003)
- [18] Skrutskie, M. F.; Cutri, R. M.; Stiening, R., et al., // *Astron. Journal*, **131**, I. 2, P.1163, (2005)
- [19] Evans, D.W., Irwin, M.J., Helmer, L., // *Astron. Astroph.*, **395**, 347 (2002)
- [20] F. van Leeuwen and E. Fantino, // *Astron. Astroph.*, **439**, 791 (2005)
- [21] Remillard R., Smith D., // *Astron. Telegram*, **88**, 1 (2002)
- [22] Wijnands, R., // *Astron. Telegram*, **89**, 1 (2002)
- [23] Powell C., Norton A., Haswell C., et al. // *Astron. Telegram*, **93**, 1 (2002)
- [24] M. Revnivtsev, S. Sazonov, M. Gilfanov, et al., // *Astron. Astrophys.*, **452**, 169 (2006)
- [25] Revnivtsev M., Sazonov, S.; Churazov, E., et al., // *Nature*, **458**, 7242, pp. 1142 (2009)
- [26] K. Jahoda, C.B. Markwardt, Y. Radeva, et al., // *Astrophys. J.*, **163**, 401 (2006)
- [27] Remillard, R.; Levine, A.; Takeshima, T., et al., // *IAU Circ.*, 6826, 2 (1998)
- [28] D. Smith, W. Heindl, H. Swank, et al., // *Astrophys. J.*, **569**, 362 (2002)
- [29] L. Titarchuk, N. Shaposhnikov, and V. Arefiev, // *Astrophys. J.*, **660**, 334 (2007).
- [30] J. M. Dickey and F. J. Lockman, // *Astron. Astrophys.* **28**, 215 (1990)
- [31] Kalberla P. M. W., Burton W. B., Hartmann D., et al. // *Astron. Astrophys.*, **440**, 775 (2005)

- [32] Georganopoulos, M.; Kirk, J. G.; Mastichiadis, A. // *Astronomical Society of the Pacific*. ISBN: 1-58381-059-5, p.116 (2001)
- [33] N. R. Sibgatullin and R. A. Sunyaev // *Astron. Lett.*, **26**, 699 (2000)
- [34] M. Gilfanov and M. Revnivtsev, *Astron. Nachrichten* **326**, 812 (2005)
- [35] D. I. Karasev, A. A. Lutovinov, and S. A. Grebenev // *Astron. Lett.*, **33**, 159 (2007)
- [36] D. Smith, R. Rampy, and I. Negueruela // *Astron. Telegram*. 1268, 1 (2007)
- [37] D. Bonneau, J. M. Clausse, X. Delfosse, et al. // *Astron. Astrophys.*, **456**, 789 (2006)
- [38] R. Stubbings and A. Pearce // *IAU Circ. No.* 7253 (1999)
- [39] V. Sguera, E. J. Barlow, A. I. Bird, et al. // *Astron. Astrophys.*, **444**, 221 (2005)
- [40] E. V. Filippova, S. S. Tsygankov, A. A. Lutovinov, R.A.Sunyaev // *Astron. Lett.*, **31**, 729 (2005)
- [41] A. Lutovinov, M. Revnivtsev, M. Gilfanov, et al. // *Astron. Astrophys.*, **444**, 821 (2005)
- [42] M. Revnivtsev, M. Gilfanov, E. Churazov, et al. // *Astron. Astrophys.*, **391**, 1013 (2002)
- [43] R. Sunyaev, S. Grebenev, A. Lutovinov, et al. // *Astron.Telegram.*, **190**, 1 (2003)
- [44] S. Smith, W. Heindl, C. Markwardt, et al. // *Astrophys.J.*, **638**, 974 (2006)
- [45] A. Lutovinov, M. Revnivtsev, S. Molkov, et al. // *Astron. Astrophys.*, **430**, 997 (2005)
- [46] Karasev D., Tsygankov S., Lutovinov A., Churazov E., Sunyaev R. // *ATel*, 1245, 1 (2007)
- [47] D. Karasev, S. Tsygankov, and A. Lutovinov // *MNRAS*, **386**, 10 (2008)
- [48] S. A. Grebenev and R. A. Sunyaev // *Astron. Lett.*, **31**, 672 (2005)

- [49] M. Kasliwal, S. Cenko, S. Kulkarni S., et al. // *Astrophys. J.*, **678**, 1127 (2008)
- [50] Schlegel D., Finkbeiner D., Davis M. // *Astrophys. J.*, **525**, 500 (1998)
- [51] Dutra, C. M.; Santiago, B. X.; Bica, E. L. D.; Barbuy, B. // *MNRAS*, **338**, 253 (2003)
- [52] Marshall D. J., Robin A. C., Reylly C., et al. // *Astron. Astrophys.*, **453**, 635 (2006)
- [53] D.C.B. Whittet, I.G. van Breda, and I.S. Glass // *MNRAS*, **177**, 625 (1976)
- [54] Cardelli, J. A., Clayton, G. C., Mathis, J. S. // *Astrophys. J.*, **345**, 245 (1989)
- [55] He L., Whittet D. C. B., Kilkenny D. // *Astrophys. J.*, **101**, 335 (1995)
- [56] Popowski, Piotr // *Astrophys. J.*, **528**, 9 (2000)
- [57] Sumi T. // *MNRAS*, **349**, 193 (2004)
- [58] Udalski // *Astrophys. J.*, **590**, 284 (2003)
- [59] Revnivtsev, M.; van den Berg, M.; Burenin, R., et al. // *Astron. Astrophys.*, **515**, 49 (2010)
- [60] Karasev D., Lutovinov A., Burenin R., *MNRAS*, 409, 69 (2010)
- [61] A. A. Lutovinov, S. V. Molokov, and M. G. Revnivtsev, *Astron. Lett.* **29**, 713 (2003)
- [62] Revnivtsev M., Burenin, R., Sazonov S., *Astronomy Letters*, **35**, 305 (2009)
- [63] Smith J. A., Tucker D. L., Kent S., et al. // *Astrophys. J.*, **123**, 2121 (2002)
- [64] Strecker, D.W., Erickson, E.F., et al. // *Astrophys. J.*, **41**, 501 (1979)
- [65] Gunn, J.E. and Stryker, L.L. // *Astrophys. J.*, **52**, 121 (1983)
- [66] Stanek K. Z., Mateo M., Udalski A., et al. // *Astrophys. J.*, **429**, 73 (1994)
- [67] Stanek K. Z., Udalski A., Szymanski M., et al. // *Astrophys. J.*, **477**, 163 (1997)
- [68] Stanek K.Z. and Garnavich P.M. // *Astrophys. J.*, **503**, 131 (1998)

- [69] Paczynski and Stanek // *Astrophys. J.*, **494**, 219 (1998)
- [70] Eisenhauer, F.; Schodel, R.; Genzel, R., et al., *Astrophys. J.*, **597**, 121 (2003)
- [71] Ghez, A. M., Salim, S., Weinberg, N. N. // *Astrophys. J.*, **689**, 1044 (2008)
- [72] Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S. // e-print arXiv:1006.0064 (2010)
- [73] Карасев Д.И., Ревнивцев М.Г., Лутовинов А. А., Буренин Р. А. // *Письма в Астрономический журнал*, **36**, 11, 832 (2010)
- [74] Sakano M., Koyama K., Maeda Y. // *Astrophys. J.*, **138**, 19 (2002)
- [75] Grebenev S.A., // Report at the 5th INTEGRAL Workshop, Munich, February 16-20, (2004)
- [76] Sguera V., Bazzano A., Bird A. et al. // *Astrophys. J.*, **646**, 452 (2006)
- [77] Corbet R. // *Astron. Astroph.*, **141**, 1, p. 91 (1984)
- [78] Corbet R. // *MNRAS*, **220**, 1047 (1986)
- [79] Kong A. // *Astron. Telegram*, 1039, 1 (2007)
- [80] Torii K., Kunugasa K., Katayama K. // *Astrophys J.*, **508**, 854 (1998)
- [81] D. J. Kirkpatrick, N. I. Reid, et al. // *Astrophys. J.*, **519**, 802 (1999).
- [82] Tsygankov S., Lutovinov A., et al. // *Astron. Letters*, **31**, 88 (2005)
- [83] Bildsten, L., Chakrabarty D., Chiu J. // *Astrophys. J.*, **113**, 367 (1997)
- [84] Lutovinov A., Grebenev S., et al. // *Astron. Lett.*, **20**, 538 (1994)
- [85] Tsygankov S., Lutovinov A., et al. // *Astron. Letters*, **533**, 368 (2007)
- [86] Romano P., Mangano V. // *Astron. Telegram*, 1040, 1 (2007)
- [87] White N., Swank J., Holt S. // *Astrophys. Journal*, **270**, 711 (1983)
- [88] Lipunov V. // *Soviet Astron.*, **25**, 375 (1981)
- [89] Nespoli E., Fabregat J., Mennickent R. // *Astron. Astrophys.*, **516**, A94 (2010)
- [90] Lutovinov A., Revnivitsev M., Gilfanov M., et al. // *Astron. Astrophys.*, **444**, 821 (2005)