

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Кривонос Роман Александрович

**ЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НА
БОЛЬШИХ УГЛОВЫХ МАСШТАБАХ – ФОНОВОЕ
ИЗЛУЧЕНИЕ ГАЛАКТИКИ И ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЙ ФОН
ВСЕЛЕННОЙ.**

01.03.02 Астрофизика и радиоастрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
к.ф.-м.н. М.Г. Ревнивцев

Москва
2007

Хочу выразить глубокую благодарность моим научным руководителям Алексею Вихлинину и Михаилу Ревнивцеву, за их неоценимую помощь в освоении исследовательского подхода в интересном и непростом пути научного познания.

Диссертация является результатом работы в отделе Астрофизики Высоких Энергий Института Космических Исследований РАН под руководством Рашида Алиевича Сюняева. Огромное спасибо Е.М. Чуразову, С.Ю. Сазонову, А.А. Лутовинову, С.В. Молькову и М.Н. Павлинскому за помощь и плодотворное сотрудничество.

Результаты исследований, представленные в работе, полностью основаны на наблюдательных данных международной гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ, поэтому, я хотел бы выразить признательность разработчикам приборов обсерватории, коллективу Российского Центра Научных Данных проекта ИНТЕГРАЛ под руководством Сергея Андреевича Гребенева, а также лично Рашиду Алиевичу Сюняеву, за участие России в этом эксперименте.

Оглавление

Введение	5
1 Обзор всего неба	13
1.1 Астрофизическая гамма-обсерватория ИНТЕГРАЛ	13
1.2 Обработка наблюдательных данных	15
1.2.1 Метод кодирующей апертуры	15
1.2.2 Алгоритм восстановления изображения	17
1.3 Покрытие и чувствительность обзора	20
1.4 Детектирование источников	21
1.5 Точность определения координат источников	22
1.6 Каталог источников	23
2 Фоновое Излучение Галактики	31
2.1 Введение	31
2.2 Анализ наблюдательных данных	37
2.2.1 Инструментальный фон детектора	39
2.2.2 Функция отклика телескопа <i>IBIS</i> как коллиматора .	43
2.2.3 Вклад точечных источников под порогом детектиро-	
вания	44
2.3 Результаты	46
2.3.1 Морфология	46
2.3.2 Спектр ГРФ	50
2.4 Обсуждение	51
2.5 Заключение	52
3 Космический Рентгеновский Фон	63
3.1 Введение	63
3.2 Кривая подсчетов АЯГ	65
3.3 Функция светимости АЯГ	69
3.3.1 Распределение АЯГ по величине колонке поглощения	71
3.3.2 Функция светимости АЯГ	73
3.3.3 Кумулятивная объемная плотность и светимость . .	73
3.3.4 Систематические погрешности	75
3.3.5 Спектр Космического Рентгеновского Фона	79

3.4	Анизотропия распределения близких АЯГ	83
3.5	Заключение	91
	Заключение	93

Введение

Актуальность темы.

Обзоры неба в рентгеновском диапазоне энергий

Наше понимание окружающей Вселенной значительно расширилось благодаря быстрому развитию наблюдательной астрономии за последние несколько десятков лет. Основной прогресс был достигнут в ранее недоступных, внеатмосферных исследованиях, в том числе в рентгеновском и гамма-диапазонах энергий. Начиная с запусков первых рентгеновских детекторов на ракетах в 1960х годах, появилась возможность непосредственно наблюдать излучение, приходящее из областей, нагретых до температур недостижимых в земных лабораториях или находящихся в специфических условиях межзвездной среды. Были исследованы свойства горячей плазмы на фронтах ударных волн, при перетекании вещества в двойных звездных системах, в нестационарных процессах термоядерного горения на поверхности нейтронных звёзд и белых карликов, а также, при многих других высокоэнергетичных явлениях в межзвездной среде.

Систематическое исследование неба является одним из основных методов астрономии, в том числе рентгеновской. Проведение специализированных обзоров источников рентгеновского излучения позволяет не только открывать новые и систематизировать большое разнообразие уже известных источников, но и применять статистические методы для исследований их распределений в пространстве, что часто дает очень важную информацию о природе этих объектов.

Систематические обзоры всего неба в рентгеновском диапазоне энергий неоднократно проводились различными обсерваториями, в том числе: Ухуру (2-6 кэВ, 1970-1973 гг.), Ariel-V (2-18 кэВ, 1974-1980 гг.), HEAO1 (2-10,13-180 кэВ, 1977-1979), ROSAT (0.1-2.4 кэВ, 1990-1999 гг.), RXTE (3-20 кэВ, 1996-2002 гг.) и др. Как видно, большинство обзоров неба были проведены в области “мягкого” рентгеновского диапазона. Однако, как показали наблюдения, существует большой класс объектов, мягкое рентгеновское излучение которых может быть сильно поглощено в веществе либо межзвездной среды, либо в непосредственной близости от рентгеновского источника. Следовательно, такие объекты будут пропущены в

обзорах стандартного рентгеновского диапазона, что приведет к смещенным оценкам общего подсчёта источников. Поэтому, в настоящее время, в рентгеновской астрономии большое предпочтение отдается систематическим обзорам неба в области как можно более жесткого рентгеновского диапазона, в том числе на энергиях выше 20-ти кэВ. Однако, регистрация излучения таких энергий осложнена по ряду причин. Во-первых, фотоны этого диапазона не могут быть сфокусированы способом, ставшим уже привычным для энергетического диапазона 0.5-10 кэВ, - их проникающая сила слишком велика для этого. Приходится применять другие, менее эффективные, методики восстановления изображений. Во-вторых, становится доминирующей роль шумов детекторов.

Последний систематический обзор всего неба в жестком рентгеновском диапазоне был проведен на спутнике HEAO-1 в полосе энергий 13-180 кэВ с помощью эксперимента A4 более тридцати лет назад. Только сейчас появилась возможность сделать новый обзор всего неба на энергиях жесткого рентгеновского диапазона, в частности с помощью современной гамма-обсерватории *ИНТЕГРАЛ*.

Ярчайшие источники излучения на рентгеновском небе можно грубо разделить на три основные группы:

1. Компактные объекты в нашей Галактике и яркие активные ядра ближайших галактик. Излучение возникает при аккреции вещества на компактный объект (чёрную дыру, нейтронную звезду или белый карлик). Среди ярких источников рентгеновского излучения в нашей Галактике можно также упомянуть протяжённые источники - такие как остатки вспышек сверхновых.
2. Рентгеновский фон Галактики. Протяжённое излучение образованное, по всей видимости, суммарным излучением большого числа звездных систем малой рентгеновской светимости, таких как коронально активные звёзды и аккрецирующие белые карлики. Излучение концентрируется в плоскости Галактики.
3. Космический Рентгеновский Фон (КРФ). Излучение, приходящее со всех направлений небесной сферы, образованное активными ядрами галактик (АЯГ) на различных красных смещениях.

Данная диссертационная работа посвящена свойствам крупномасштабных структур на рентгеновском небе, а именно – рентгеновского фона Галактики и ярчайших активных ядер близких галактик.

Рентгеновский фон Галактики

Галактический рентгеновский фон (ГРФ) представляет собой протяжённое рентгеновское излучение, сконцентрированное в галактической

плоскости. Угловой размер этого излучения составляет около 100° по галактической долготе и $\sim 2^\circ$ по широте. В области галактического центра наблюдается характерное утолщение (“балдж”) с общей протяженностью $\sim 5^\circ$ по галактической широте. Со времени открытия рентгеновского фона Галактики конкурировали две гипотезы его происхождения. В рамках одной гипотезы предполагалось наличие очень горячего газа в Галактике с температурой $> 5 - 10$ кэВ, который и дает наблюдаемое рентгеновское излучение. Однако, это предположение сталкивалось с большими трудностями. Основная проблема заключается в том, что такой газ нельзя удержать гравитационным потенциалом галактической плоскости, следовательно, этот горячий газ должен формировать постоянный отток вещества с большой внутренней энергией. Для того, чтобы сделать излучение ГРФ стационарным, в горячую плазму должен постоянно поступать поток энергии на уровне порядка 10^{43} эрг с^{-1} . Однако, источник такой энергии в Галактике неизвестен. Несмотря на значительные трудности этой гипотезы, она оставалась рабочей практически с открытия ГРФ и до недавнего времени. Альтернативное объяснение происхождения фонового излучения Галактики, как результат суперпозиции излучения большого числа слабых компактных рентгеновских источников, таких как коронально активные звёзды и катаклизмические переменные, не получила широкого признания из-за недостаточной информации о свойствах популяций этих источников в Галактике.

Значительный прогресс в понимании образования рентгеновского фона Галактики был достигнут в последнее время благодаря анализу наблюдательных данных обсерватории RXTE (энергетический диапазон 3-20 кэВ). Было показано, что распределение поверхностной яркости ГРФ в диапазоне 3-20 кэВ хорошо согласуется с распределением интенсивности излучения Галактики в инфракрасном диапазоне, которое, в свою очередь, отражает распределение звёздной массы. Таким образом было показано, что излучательная способность единицы объема Галактики в ГРФ прямо пропорциональна плотности звезд в этом объеме. Функция светимости слабых рентгеновских источников в Галактике, полученная так же при помощи данных обсерватории RXTE, показала, что излучения уже известных классов галактических источников вполне достаточно для объяснения феномена ГРФ. Доминирующий вклад в фоновое рентгеновское излучение Галактики дается объектами малой рентгеновской светимости - аккрецирующими белыми карликами и коронально активными звездами. Последние вносят основной вклад в мягком участке спектра – на энергиях до 12-15 кэВ. На более высоких энергиях (>20 кэВ), доминирует излучение от двойных систем с белыми карликами, аккрецирующими вещество со звезды-компаньона.

Если действительно излучение ГРФ на энергиях > 20 кэВ даётся аккрецирующими белыми карликами, то можно предсказать форму спектра ГРФ на этих энергиях. Рентгеновское излучение у поверхности белого кар-

лика рождается при превращении кинетической энергии аккрецирующего вещества в тепловую. Скорость падения вещества на поверхность белого карлика зависит от его массы и не превышает ~ 1000 км/с. На некоторой высоте от поверхности белого карлика образуется ударная волна, на которой возникает резкий скачок плотности и температуры газа. Жёсткое рентгеновское излучение возникает в оптически тонкой плазме, разогретой до десятков - сотен миллионов градусов за ударной волной. Средняя энергия выходящих фотонов пропорциональна температуре газа, которая, в свою очередь, зависит от скорости падения вещества, и, следовательно, от массы белого карлика. Таким образом, вещество, падающее на белый карлик, не может разогреться до температуры выше некоторой, а значит выходящие фотоны не могут иметь энергию выше некоторой. Если фоновое излучение Галактики в жёстком рентгеновском диапазоне энергий формируется суммарным излучением таких систем, то в спектре ГРФ должен наблюдаться резкий обрыв на энергиях выше 20-ти кэВ.

Фоновое излучение Галактики на энергиях выше 20-ти кэВ изучено недостаточно хорошо. Спектрометры жесткого рентгеновского диапазона с малым полем зрения были не способны на приемлемом уровне регистрировать слабый поток от ГРФ. Увеличение поля зрения спектрометров приводило к тому, что основной вклад в поток, регистрируемый из области галактической плоскости, давало небольшое число относительно ярких галактических (или внегалактических) источников. Для подробного изучения ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне был необходим прибор, обладающий большим полем зрения, и в то же время имеющий способность учитывать вклад излучения ярких точечных источников.

На данный момент, практически единственным научно-исследовательским спутником, способным провести исследование ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне, является международная обсерватория ИНТЕГРАЛ. Сочетание характеристик телескопа с кодирующей апертурой IBIS и полупроводникового детектора ISGRI делают этот эксперимент уникальным для исследования галактического фонового излучения в жёстком рентгеновском диапазоне энергий.

Космический рентгеновский фон

Космический Рентгеновский Фон (КРФ) представляет собой излучение, приходящее со всех направлений небесной сферы и образованное, предположительно, суммарным излучением большого числа активных ядер галактик (АЯГ) на различных красных смещениях. Регистрируемое фоновое излучение относительно хорошо исследовано в диапазоне энергий 2-10 кэВ, где было практически полностью объяснено суммарным излучением большого количества АЯГ.

Глубокие (высококонтрастные) обзоры, проведённые на давние обсерваториями Чандра и XMM-Newton, дали большое количество инфор-

мации по космологической эволюции АЯГ и росту сверхмассивных чёрных дыр во Вселенной. В частности, было обнаружено уменьшение средней светимости АЯГ с одновременным увеличением их общего числа при переходе от больших красных смещений к малым. Другой важный результат связан с открытием большого числа поглощённых АЯГ на средних и больших красных смещениях. Однако, при всех успехах глубоких обзоров, невозможно построить картину эволюции АЯГ и роста сверхмассивных чёрных дыр без отправной точки на красном смещении $z = 0$ (ближняя Вселенная), которую можно получить лишь исследованием всего неба. Для того, чтобы максимально избавиться от эффектов селекции по колонке поглощения, неизбежно присутствующих в прошлых обзорах неба, например, обсерватории ROSAT, необходимо провести обзор неба именно в жестком рентгеновском диапазоне.

Наблюдательный материал диссертационной работы был получен с помощью рентгеновского телескопа IBIS международной гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ, накопленный за время работы миссии в 2003-2006 гг.

Все результаты, выносимые на защиту, получены лично диссертантом или при его определяющем участии.

Цель работы

Целью данной работы являлось систематическое исследование всего неба в жестких рентгеновских лучах (17-200 кэВ) и построение каталога источников всего неба в этом диапазоне энергий.

Обзор всего неба на энергиях выше 20-ти кэВ выступает наблюдательной основой для исследования излучения компактных источников, фонового излучения Галактики и космического рентгеновского фона.

В рамках исследования фонового излучения Галактики, основной целью являлось определение природы его образования на энергиях выше 20-ти кэВ. Для этого были поставлены следующие задачи: 1. построить распределение поверхностной яркости ГРФ и сравнить её с известным распределением видимой звёздной массы Галактики и межзвёздного газа; 2. получить и исследовать спектр ГРФ на энергиях 20-200 кэВ; 3. Оценить объёмную излучательную способность ГРФ и сравнить ее со значением, известным для рентгеновских систем малой светимости в окрестностях Солнца ($\sim 10^{27}$ эрг/сек на массу Солнца).

Основной целью при исследовании космического рентгеновского фона, являлось изучение свойств популяции АЯГ в ближней Вселенной, таких как поверхностная плотность, функция светимости, распределение по значению колонки поглощения, пространственное распределение и вклад в КРФ.

Краткое содержание работы

Во *Введении* даётся краткое описание систематических обзоров неба в рентгеновском диапазоне, описывается ряд полученных результатов и нерешённых проблем, ставятся цели и обосновывается актуальность диссертационной работы.

Первая часть диссертации посвящена описанию обзора всего неба по данным международной гамма-обсерватории ИНТЕГРАЛ. Приводится описание научных инструментов обсерватории и их пригодность для проведения обзора неба в жёстком рентгеновском диапазоне энергий. В главе 1.2 даётся описание алгоритма восстановления изображения неба методом кодирующей апертуры. Описывается базовый метод обработки наблюдательных данных телескопа IBIS с твёрдотельным детектором ISGRI. В главе 1.3 приводится описание обзора всего неба. Каталог источников представлен в главе 1.4.

Вторая часть работы посвящена исследованию фонового излучения Галактики. Чувствительность телескопа IBIS, как телескопа с кодирующей апертурой, к протяженным объектам, размер которых значительно превышает угловое разрешение телескопа, очень мала. Поэтому, потребовалось существенно модифицировать методику анализа наблюдательных данных телескопа, описанию которой посвящена глава 2.2. Результаты анализа приведены в главе 2.3 и могут быть сведены к следующим пунктам. 1) построена карта поверхностной яркости фонового излучения Галактики в диапазоне 17-60 кэВ; 2) получен спектр галактического фона в диапазоне 20-200 кэВ; 3) в спектре обнаружен резкий обрыв на энергиях 50 кэВ, который подтверждает гипотезу образования ГРФ в результате суммарного излучения слабых рентгеновских источников (в данном диапазоне энергий - промежуточных полярных и полярных); 4) используя модели излучения аккрецирующего белого карлика различной массы и аппроксимируя ими полученный спектр ГРФ, получена оценка на среднюю массу аккрецирующего белого карлика в Галактике: ~ 0.5 массы Солнца. Глава 2.4 посвящена обсуждению полученных результатов, которые позволяют сделать вывод о происхождении ГРФ. Сравняется пространственное распределение интенсивности фона в рентгеновском диапазоне с известным распределением возможных источников ГРФ, а именно звёздного населения Галактики и межзвёздного газа. Показано, что карта излучения в диапазоне 17-60 кэВ хорошо согласуется только с распределением поверхностной яркости в спектральном интервале инфракрасного диапазона (4.9 мкм). Основной вклад в излучение Галактики в этом диапазоне дается излучением маломассивных звёзд поздних спектральных классов К-М. Показано сравнение морфологии ГРФ с другими протяженными компонентами излучения Галактики: молекулярный газ, нейтральный водород, а также показана карта гамма-излучения Галактики на энергиях выше 100 МэВ, являющаяся результатом взаимодействия частиц космических лучей высоких энергий с межзвёздной средой. Измеренное распределение

поверхностной яркости ГРФ не согласуется с распределением межзвездного газа в Галактике, а более соответствует распределению звёздной массы. Среди полученных результатов присутствует важная деталь - в спектре ГРФ был обнаружен резкий завал на энергии 50 кэВ.

Обрыв в спектре ГРФ на таких энергиях должен образоваться вследствие ограничения на максимальную температуру горячей плазмы у поверхности белого карлика (основных источников ГРФ на таких энергиях), которое, в свою очередь связано с массой белого карлика.

Таким образом, полученные наблюдательные факты соответствия морфологии ГРФ и звёздного населения Галактики и наличие завала в спектре фонового излучения подтверждают гипотезу формирования ГРФ, как суммарного излучения галактических рентгеновских источников малых светимостей.

В *третьей части* проводится исследование свойств популяции активных ядер галактик на малых красных смещениях и их вклада в космический рентгеновский фон. В главе 3.1 проводится построение кривой подсчётов внегалактических источников, предполагая равномерное распределение источников по небесной сфере. Исследуется поверхностная плотность источников с использованием карты чувствительности обзора.

Чувствительность обзора всего неба (глава 3.1) позволяет регистрировать поток от внегалактических источников со светимостью $L \sim 10^{42} - 10^{43}$ эрг/сек на расстояниях до 50-70 Мпк. Это позволяет исследовать популяцию активных ядер галактик в ближней Вселенной. В главе 3.2 получена функция светимости АЯГ на малых красных смещениях. Отличительной чертой полученной функции светимости является практически полное отсутствие эффектов селекции к АЯГ с колонками поглощения вплоть до $N_H \sim 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Исследуется распределение АЯГ малой ($L < 10^{43.6}$ эрг с^{-1}) и большой светимости по величине колонки поглощения. Показано, что большая доля АЯГ малой светимости ($L < 10^{43.6}$ эрг с^{-1}) имеет значительное поглощение, в отличие от АЯГ больших светимостей. В предположении отсутствия эволюции доли поглощенных источников с красным смещением, и с использованием модели эволюции кумулятивной излучательной способности единичного объема Вселенной с красным смещением, получено предсказание спектра космического рентгеновского фона, которое хорошо согласуется с результатами наблюдений. В главе 3.3 показано, что по результатам обзора неба обсерватории ИНТЕГРАЛ можно утверждать, что в распределении АЯГ на расстояниях $D < 70$ Мпк существует явная анизотропия, по всей видимости связанная с крупномасштабной структурой ближней Вселенной.

В *Заключении* перечислены все результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты, выносимые на защиту

1. Представлен каталог источников жесткого рентгеновского излучения из обзора всего неба, выполненного в данной работе по результатам наблюдений обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Чувствительность обзора на порядок величины превышает чувствительность последнего подобного обзора всего неба в жестком рентгеновском диапазоне энергий, проведенного обсерваторией НЕАО-1.
2. Показано, что распределение поверхностной яркости фонового излучения Галактики в диапазоне 17-60 кэВ пропорционально распределению ее поверхностной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне. Сделан вывод, что объемная излучательная способность Галактики в диапазоне энергий 17-60 кэВ пропорциональна плотности звезд, что подтверждает гипотезу формирования рентгеновского фона Галактики в результате сложения излучения слабых источников.
3. Получен спектр фонового излучения Галактики в диапазоне энергий 20-200 кэВ. Обнаружен резкий завал в спектре на энергиях выше 50-ти кэВ. Используя модель формирования фонового излучения Галактики в результате сложения излучения большого количества катаклизмических переменных малой рентгеновской светимости, сделана оценка средней массы аккрецирующих белых карликов в двойных звездных системах в Галактике.
4. Получена кривая подсчетов активных ядер галактик в диапазоне энергий 17-60 кэВ по данным обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ* до порога чувствительности 10^{-11} эрг/сек/см². Показано, что вклад АЯГ, детектируемых выше порога чувствительности, в полное излучение космического рентгеновского фона составляет порядка 1-го процента.
5. Используя результаты обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, построена функция светимости АЯГ на малых красных смещениях в диапазоне энергий 17-60 кэВ. Показано, что относительная доля поглощенных источников ($N_H > 10^{22}$ см⁻²) с малой светимостью ($L < 10^{43.6}$ эрг/сек) больше относительной доли поглощенных источников с большой светимостью. Полученное распределение поглощенных источников по величине колонки поглощения совместно с измеренной эволюцией кумулятивной излучательной способности единичного объема Вселенной с красным смещением позволяет успешно описать спектр КРФ в диапазоне энергий 5-200 кэВ.
6. Обнаружена анизотропия объемной плотности АЯГ в ближней Вселенной ($D < 70$ Мпк). Распределение объемной плотности АЯГ хорошо согласуется с известной крупномасштабной структурой распределения галактик в ближней Вселенной.

Часть 1

Обзор всего неба

1.1 Астрофизическая гамма-обсерватория ИНТЕГРАЛ

Астрофизическая гамма-обсерватория *ИНТЕГРАЛ* предназначена для проведения наблюдений в жестком рентгеновском и гамма диапазоне электромагнитного спектра. Обсерватория является совместным проектом Европейского Космического Агенства (ESA), Российского Космического Агенства (РКА) и американского NASA. Обсерватория была выведена на высокоапогейную орбиту в октябре 2002 года с помощью российской ракеты – носителя Протон. Основные научные приборы *ИНТЕГРАЛа* включают в себя три рентгеновских телескопа, использующих для построения изображений принцип кодирующей апертуры. Технические характеристики приборов приведены в таблице 1.1, расположение телескопов на спутнике, показано на Рис. 1.1.

Телескоп *IBIS* спроектирован для построения изображений неба в диапазоне энергий 15 кэВ- 10 МэВ. Прибор состоит из кодирующей маски, поднятой над плоскостью детектора на высоту 3.2 метра. Толщина маски 12 мм, размер элементов составляет 11.2 мм. Пространственное разрешение фактически определяется угловым размером элемента маски, видимого детектором, и составляет около 12-ти угловых минут. Поле зрения прибора в области полного кодирования (тень, создаваемая мас-

Таблица 1.1. Основные приборы обсерватории *ИНТЕГРАЛ*

Прибор	Энергетический диапазон диапазон (кэВ)	Поле зрения ^а	Угловое разрешение	Энергетическое разрешение
<i>IBIS/ISGRI</i>	15 кэВ – 10 МэВ	9° × 9° / 28° × 28°	12'	4.8 кэВ @ 60 кэВ
<i>SPI</i>	20 кэВ – 8 МэВ	16° × 16° / 34° × 34°	2.5°	2.5 кэВ @ 1.33 МэВ
<i>JEM-X</i>	3 – 35 кэВ	5° × 5° / 13° × 13°	1'	1 кэВ @ 10 кэВ

^аПоле зрения для полного / частичного кодирования

кой, полностью попадает на детектор) составляет 9×9 градусов, поле зрения частичного кодирования – $28^\circ \times 28^\circ$. Для регистрации излучения используются два слоя детекторов. Верхний слой (*ISGRI*), включающий в себя 16384 кадмий-теллуридовых (Cd-Te) элемента, позволяет регистрировать жесткие рентгеновские и мягкие гамма-лучи. Второй слой (*PICsIt*) состоит из 4096 цезий-йодовых (CsI) элементов и обеспечивает регистрацию высокоэнергичных гамма-квантов. Рабочий энергетический диапазон верхнего слоя 17-200 кэВ, нижнего – 200 кэВ – 10 МэВ.

Гамма-спектрометр *SPI* обладает значительно лучшим энергетическим разрешением, чем *IBIS*, но уступает ему в угловом разрешении. Прибор состоит из 19 шестиугольных регистрирующих элементов, изготовленных из германия высокой чистоты и охлаждаемых до температуры 90 К. Основная задача *SPI* – тонкая спектроскопия в рентгеновском и гамма диапазоне.

Рентгеновский монитор *JEM-X* состоит из двух идентичных модулей, каждый из которых представляет собой телескоп с кодирующей маской. Детектором является газовый счетчик, заполненный смесью ксенона и метана. *JEM-X* работает в “мягком” рентгеновском диапазоне 3-35 кэВ. Монитор предназначен для поиска новых рентгеновских источников и отождествления источников, обнаруженных в жестком рентгеновском диапазоне.

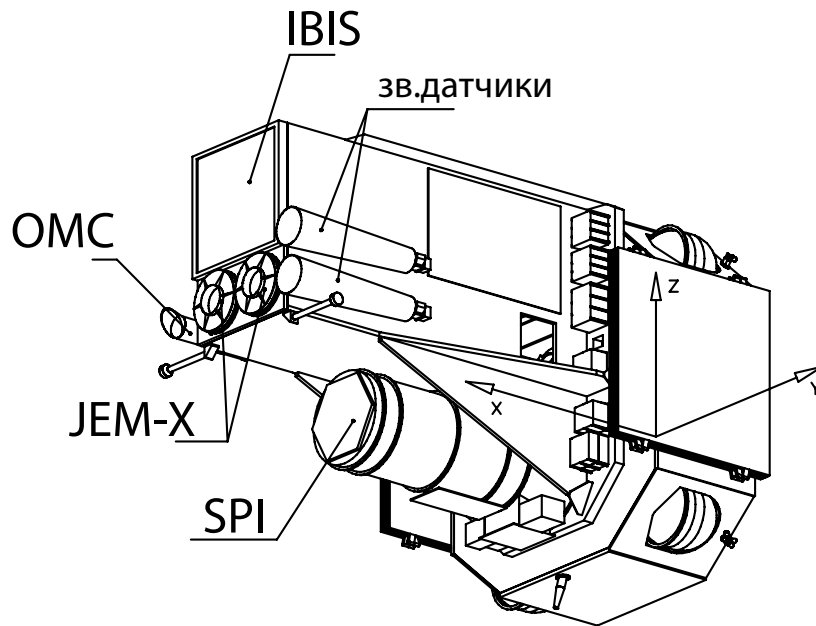


Рис. 1.1 Обсерватория *ИНТЕГРАЛ*. Расположение основных научных приборов.

Для проведения высокочувствительного обзора всего неба, наиболее подходящим инструментом среди приборов обсерватории является теле-

скоп *IBIS* с детектором *ISGRI*. Прибор обладает широким полем зрения ($28^\circ \times 28^\circ$) и высокой чувствительностью, что важно для покрытия всего неба за разумное время. Угловое разрешение в $12'$ достаточно для того, чтобы избежать проблемы наложения источников, а точность определения координат новых источников $2-3'$ позволяет проводить их оптическое отождествление.

1.2 Обработка наблюдательных данных

Все рентгеновские телескопы обсерватории *ИНТЕГРАЛ* используют принцип кодирующей апертуры, что определяет специфику проведения наблюдений и работу с полученными экспериментальными данными.

1.2.1 Метод кодирующей апертуры

Построение изображений неба в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах энергий является трудной задачей. Применение традиционных способов построения изображений путём фокусировки фотонов телескопами косоугольного падения возможно в настоящее время только на сравнительно малых энергиях – до 10 кэВ. Для фотонов более высоких энергий, с гораздо большей проникающей способностью, эффективность телескопов косоугольного падения быстро падает, угол, на который можно отклонить такой фотон уменьшается, размеры оптической системы неизбежно растут. Все это приводит к тому, что в настоящее время не существует телескопов косоугольного падения, работающих в жестком рентгеновском диапазоне (хотя попытки создать такие приборы предпринимаются, см. NuSTAR (CalTech), HERO (MSFC) и т.д.).

Для построения изображений в жестком рентгеновском диапазоне в настоящее время используется *принцип кодирующей апертуры*. Данный метод получил широкое распространение для приборов рентгеновского и жесткого рентгеновского диапазона (см. например, телескопы SpaceLab2-XRT, МИР/КВАНТ/ТТМ, ГРАНАТ/СИГМА, ВерроSAX/WFC, RHESSI, SWIFT/BAT) из-за простоты реализации и приемлемого углового разрешения (угловые минуты). Основными элементами рентгеновского телескопа с кодирующей апертурой являются: кодирующая маска и позиционно-чувствительный детектор.

Суть метода показана на Рис. 1.2 и заключается в следующем: рентгеновское излучение от удаленного точечного источника падает на позиционно-чувствительный детектор через маску, расположенную на некотором расстоянии от детектора. Маска состоит из набора прозрачных и непрозрачных элементов, чередующихся определенным образом. Положение тени маски на детекторе зависит от направления падающего фронта рентгеновского излучения, и, следовательно, от положения рентге-

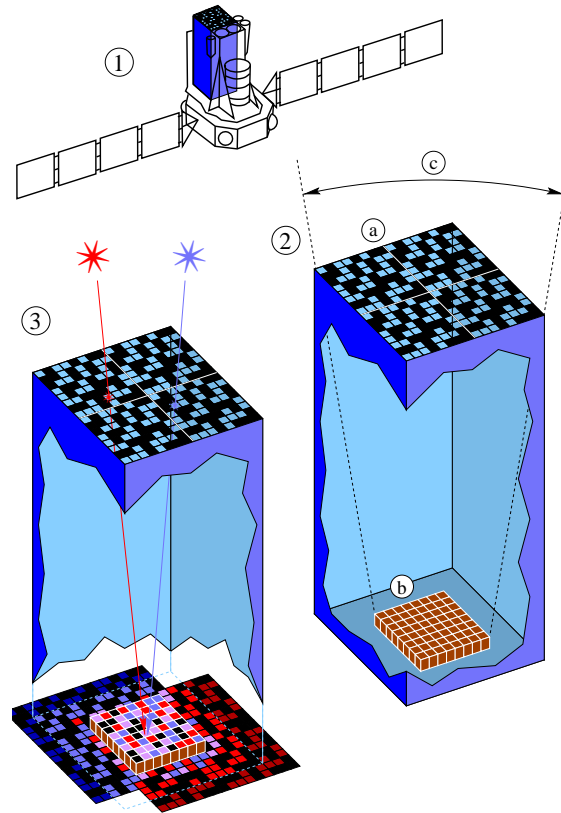


Рис. 1.2 Принцип кодирующей апертуры, реализованный для телескопа *IBIS* обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. На рисунке: (1) Относительное расположение телескопа на спутнике (см. также Рис. 1.1), (2) демонстрация поля зрения (с) телескопа с маской (а) и детектором (b), (3) засветка двумя источниками и запись суперпозиции двух теней от маски на детекторе. Иллюстрация взята с сайта Европейского Центра Научных Данных обсерватории *ИНТЕГРАЛ* (<http://isdc.unige.ch>).

новского источника в поле зрения телескопа. При наличии в поле зрения нескольких источников на детекторе образуется тень, соответствующая суперпозиции различных засветок. Поэтому полный образ, регистрируемый детектором (тенеграмма), является наложением теней от маски, создаваемых всеми источниками в поле зрения прибора. Результатом декодирования является изображение участка небесной сферы, содержащего наблюдаемые источники излучения. Такое изображение может быть получено путем кросс-корреляции тенеграммы детектора с функцией пропускания маски.

Угловое разрешение системы с кодирующей апертурой определяется геометрическими параметрами телескопа, а именно размером элемента маски (l) и высотой расположения маски над плоскостью детектора (h)

$$\Delta\alpha = \arctan(l/h).$$

Отклик системы с кодирующей апертурой на излучение точечного источника, находящегося на бесконечности, зависит от расположения прозрачных и непрозрачных элементов маски. Для маски телескопа *IBIS* использовался базовый узор, разработанный в работе [73], и повторенный четыре раза. Область неба, в которой источники создают тень маски, полностью уместяющуюся на детекторе определяет *зону полного кодирования* телескопа и соответственно, в случае если только часть тени маски уместяется на детекторе – *зону неполного кодирования*.

1.2.2 Алгоритм восстановления изображения

Программа наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ состоит из интервалов с типичной длительностью около 2000 секунд. В ходе каждого наведения производится накопление тенеграммы детектора *ISGRI*.

Каждый элемент детектора представляет собой CdTe полупроводниковый диод с приложенным обратным напряжением. В области электронно-дырочного перехода образуется зона, “обедненная” носителями тока, т.е. обладающая высоким удельным сопротивлением. Фотон, при попадании на чувствительный элемент полупроводникового детектора испытывает фотопоглощение. Из атома кристаллической решетки выбивается фотоэлектрон с энергией, пропорциональной энергии падающего фотона. Фотоэлектрон вызывает рождение электронно-дырочных пар, которые под действием приложенного электрического поля дрейфуют к электродам полупроводникового диода, вызывая во внешней цепи электрический импульс. Заряд, собранный на электродах пропорционален энергии падающего фотона, время роста токового фронта зависит от того, на какой глубине в детекторе был поглощен фотон.

Электрические импульсы от всех элементов детектора фильтруются системой антисовпадательной защиты, которая регистрирует прохождение заряженных частиц высоких энергий через объём детектора.

События, зарегистрированное на всех CdTe элементах и не отфильтрованные системой антисовпадательной защиты, записываются в так называемые “фотонные листы”, содержащие информацию о координате события, времени его прихода, амплитуде и времени роста токового фронта, созданного этим событием. “Фотонные листы” в дальнейшем анализируются, с их помощью строятся тенеграммы детектора, и т.д.

В связи с вариациями параметров детектора со временем (например, температуры детектора) фотоэлектрон, выбитый из атома кристаллической решётки фотоном одной и той же энергии, может вызвать рождение разного количества электрон-дырочных пар, что ведёт к собиранию разного заряда на электродах детектора и соответственно к разной амплитуде импульса во внешней цепи. Таким образом, энергетическая шкала

детектора может смещаться. Для контроля и исправления этого эффекта нами был использован набор флуоресцентных линий вольфрама и свинца, возникающих в материале телескопа (см. Рис.1.3, справа).

Для последующего восстановления изображения неба из накопленного набора событий создаётся тенеграмма детектора в выбранном диапазоне энергий. В дальнейшем, если не будет оговорено специально, в работе используется диапазон энергии 17-60 кэВ, где детектор IGSRI имеет оптимальное соотношение чувствительности и скорости счета фоновых событий. Перед применением алгоритма восстановления изображения неба матрица детектора была пересчитана на опорную сетку, размер элементов которой равен 1/3 размера элемента маски (размер элемента маски и детектора составляет 11.2×11.2 и 4×4 мм соответственно). Приведение тенеграммы детектора к опорной сетке приводит к небольшому ухудшению пространственного разрешения телескопа, однако позволяет напрямую использовать стандартные методы восстановления изображений в инструментах с кодирующей апертурой [53].

Величина потока f источника, находящегося в поле зрения телескопа, равна разнице между потоками в открытых (источник+фон) и закрытых элементах маски:

$$f = \sum_{M=1} D - BAL \sum_{M=0} D, \quad (1.1)$$

где D матрица отсчётов детектора, $M = 1$ или 0 соответствует открытым или закрытым элементам маски, соответственно. $BAL \approx 1$ – так называемая балансировочная матрица, которая учитывает неоднородности фоновой засветки детектора:

$$BAL = \frac{\sum_{M=1} D_b}{\sum_{M=0} D_b}, \quad (1.2)$$

здесь D_b – тенеграмма детектора накопленная на большом числе наблюдений без ярких источников в поле зрения телескопа (фоновая засветка детектора). Как видно из уравнений (1.1) и (1.2) математическое ожидание величины потока f в поле без источников равно нулю.

Восстановление изображения неба ведётся по алгоритму описанному в работе [53], когда каждый элемент матрицы маски соответствует $n \times n$ элементам детектора. Исходный детектор представляется как $n \times n$ независимых детекторов. Конструируются $n \times n$ независимых изображений неба, которые затем комбинируются в одно конечное изображение. Точечный источник будет представлен на таком изображении квадратом из $n \times n$ элементов. В нашем случае, это означает, что функция отклика на точечный источник будет приблизительно квадратом со сторонами длиной из 3 элементов детектора или $12' \times 12'$.

Следует отметить, что поскольку матрица детектора, используемая при восстановлении изображения была получена приведением тенеграммы детектора к опорной сетке, то смежные элементы вновь пересчитанной

матрицы детектора не будут полностью статистически независимыми. Последнее будет относиться и к элементам матрицы восстановленного изображения. Следовательно, среднеквадратичное отклонение значений потоков на изображении неба от нулевого значения будет немного меньше, чем значение, ожидаемое из величины пуассоновской скорости счета детектора. Характерный масштаб корреляции порядка размера одного матричного элемента.

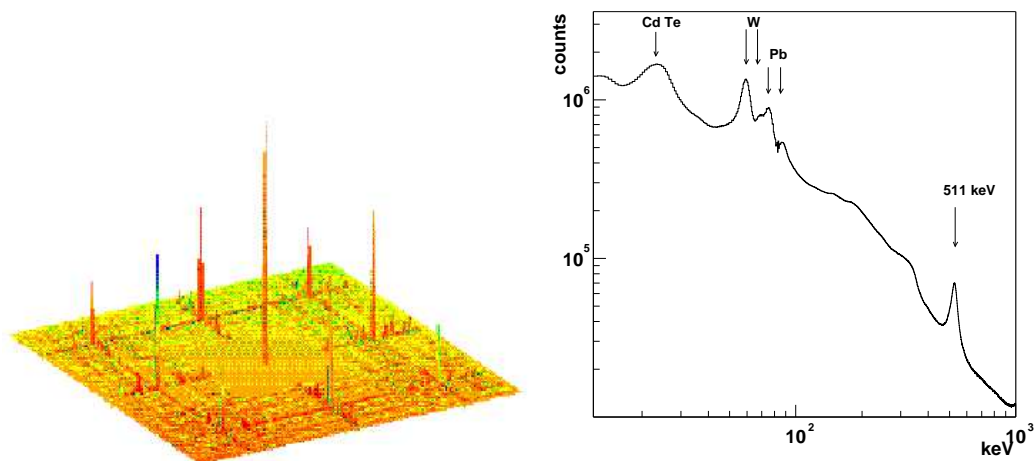


Рис. 1.3 **Слева:** Инструментальная функция отклика телескопа *IBIS* на точечный источник. Повтор базового рисунка на маске телескопа вызывает появление характерных боковых пиков в функции отклика. **Справа:** спектр фона детектора *IBIS/ISGRI* (взято из работы [238]), положение фоновых флуоресцентных линий вольфрама и свинца, используемых в нашей работе для контроля энергетической шкалы детектора, показаны стрелками.

Хорошо известно, что максимальное отношение сигнал–шум при детектировании точечных источников достигается при использовании в качестве “оптимального” фильтра, функции отклика прибора на точечный источник. В нашем случае, поскольку при построении изображения выбранного участка неба используется большое число изображений, полученных в отдельных (различных) наведениях, то эффективная функция отклика телескопа на точечный источник является практически гауссианой. Анализ изображений различных точечных источников показал, что функция отклика *IBIS/ISGRI* хорошо описывается двумерной гауссианой с параметром $\sigma_r = 1.25'$.

Наличие периодических структур на маске телескопа *IBIS* приводит к появлению характерных ложных пиков (“духов”) на восстановленном изображении вокруг каждого реального источника (см. Рис. 1.3, слева). Фактически, такие пики являются как бы “боковыми лепестками” функ-

ции отклика прибора на точечный источник. Зная её точный вид и величину потока от источника (1.1) теоретически можно полностью очистить восстановленное изображение от “духов”, итерационно повторяя процедуру вычитания отсчетов с детектора для каждого источника, попавшего в поле зрения телескопа. Однако, точность знания функции отклика прибора на точечный источник конечна. На уровне 1% от пикового значения и меньше вклад в вид функции отклика телескопа начинают вносить уже очень малые детали конструкции телескопа, такие как болты крепления маски к раме телескопа, рамки крепления детектора и т.д. и в настоящее время наши знания о функции отклика IBIS/ISGRI не превышают 0.1%. Это приводит к тому, что в случае присутствия яркого источника в поле зрения телескопа неучтенные части боковых “лепестков” функции отклика телескопа необратимым образом портят полученное изображение, что, в свою очередь, сказывается на пределе детектирования слабых источников в некоторых областях изображения.

В результате всех описанных выше процедур, каждое наблюдение *ИНТЕГРАЛа* было преобразовано в изображение размером $28^\circ \times 28^\circ$ с угловым размером элемента изображения $4'$.

Анализ усредненных изображений участков небесной сферы, расположенных на больших угловых расстояниях, сильно затруднен эффектами проекции на плоскость. Наиболее важный из них – это деформация функции отклика на точечный источник, которая проявляется при больших отклонениях от центра проекции. Данный эффект приводит к неправильной оценке потоков и положений источников, а также сильно затрудняет поиск источников. Для построения суммарного изображения неба в максимально однородной сетке в нашей работе использовался специальный метод разбиения небесной сферы на элементарные площадки *HEALPIX* (**H**ierarchical **E**qual **A**rea **i**so**L**atitude **P**ixelization of a sphere, [60]). В этом методе, площадь и форма каждого элемента не зависит от положения на сфере, что позволяет аккумулировать поток со всех направлений без влияния проекционных эффектов и проводить анализ по всей сфере однородным образом. Восстановленные изображения небесной сферы всех наблюдений приводились к опорной сетке небесных координат и складывались в соответствующих элементах *HEALPIX* – карты.

1.3 Покрытие и чувствительность обзора

Обзор всего неба, проведенный в данной работе, основан на результатах наблюдений, проведенных обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* в течении четырёх лет работы (2002-2006 гг).

Для обзора всего неба были использованы данные, находящиеся в свободном доступе, данные, принадлежащие научной группе проекта *ИНТЕГРАЛ*, и данные российской квоты наблюдений в период времени с де-

кабря 2002 по июнь 2006. Карта экспозиции обзора показана на Рис. 1.4. Полное время экспозиции, используемое в обзоре, составляет 33 миллиона секунд¹. Покрытие неба как функция порога чувствительности детектирования источников со значимостью не ниже 5σ , представлена на Рис. 1.5. На рисунке показано, что с характерной чувствительностью 1 и 5 мКраб покрыто 12 и 80% неба, соответственно.

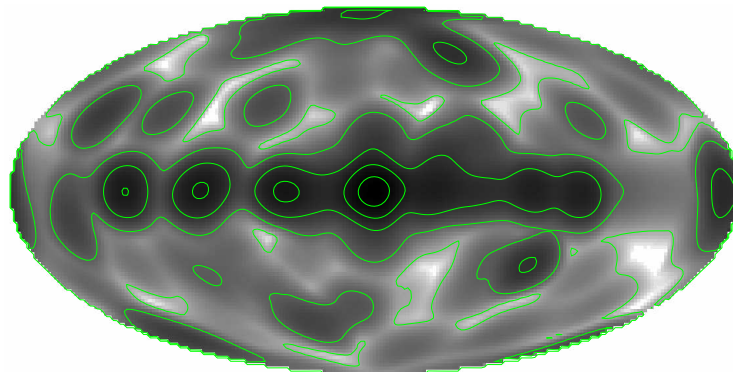


Рис. 1.4 Карта экспозиции наблюдений, проведенных на обсерватории *ИН-ТЕГРАЛ* с помощью телескопа *IBIS* с 2002 по 2006 гг. Экспозиция скорректирована на мертвое время наблюдений. Контуры ограничивают области с экспозициями $10, 150, 800 \times 10^3$ секунд, 2 и 4 миллиона секунд.

1.4 Детектирование источников

Поиск источников был проведен: (i) в отдельных наблюдениях с длительностью около 2000 секунд и чувствительностью 20-30 мКраб; (ii) в изображениях неба, накопленных за орбиту обсерватории ($\sim 2 \times 10^5$ секунд) с чувствительностью 4-5 мКраб; (iii) в картах неба, полученных после усреднения результатов всех наблюдений, с характерной чувствительностью 1 мКраб (экспозиция составляет 33 миллиона секунд на все небо).

Детектирование источников проводилось на участках неба с размерами $20^\circ \times 20^\circ$, спроецированных с накопленной (в *HEALPIX* разбиении) карты всего неба.

На Рис. 1.5 (справа) показано распределение значения отношения сигнал/шум для элементов спроецированного изображения с размером $20^\circ \times 20^\circ$. Из рисунка видно, что распределение хорошо описывается нормальным законом с нулевым средним и единичной дисперсией $N(0, 1)$, и, следовательно для поиска новых источников мы можем поставить порог детектирования, исходя из теоретических оценок.

¹Здесь и далее, время экспозиции приводится с учётом доли “мёртвого времени” наблюдений

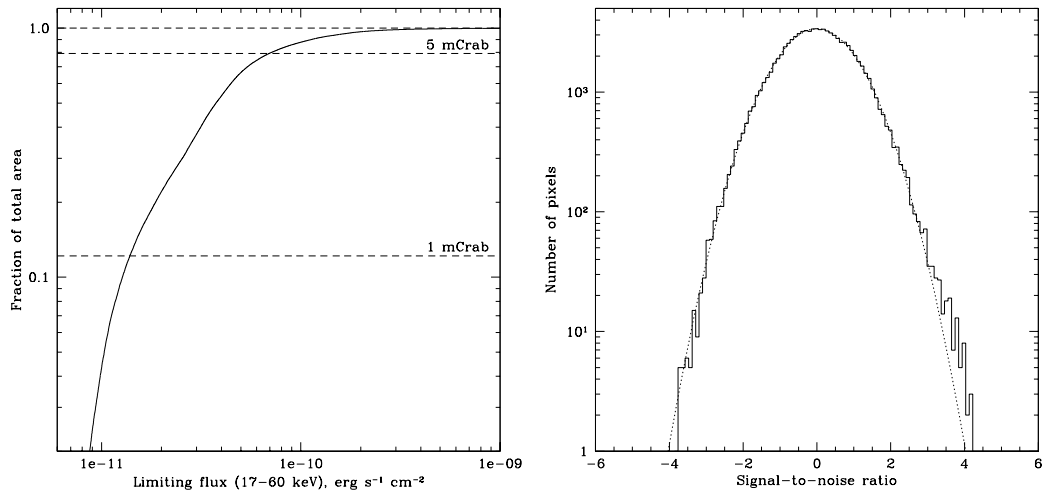


Рис. 1.5 **Слева:** Доля покрытия всего неба в зависимости от чувствительности детектирования источников на уровне значимости не ниже 5σ . **Справа:** Распределение отношения сигнал/шум для произвольного участка неба с размерами $20^\circ \times 20^\circ$. Пунктирная кривая показывает нормальное распределение с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

Для углового разрешения телескопа *IBIS* все небо содержит приблизительно 10^6 статистически независимых точек. Таким образом, для того, чтобы в обзоре неба получить не более 1-2 ложных источников мы можем выбрать порог детектирования на уровне 5σ . Для поиска источников в отдельных наблюдениях *ИНТЕГРАЛа* (~ 16 тыс. наблюдений), каждое из которых имеет 128^2 статистически независимых точек неба, был выбран порог детектирования 6σ . Такой порог так же дает математическое ожидание количества ложных источников не более ~ 1 .

Из поиска источников исключались области (“мёртвые зоны”) вокруг ярких источников с выраженными систематическими эффектами, которые приводят к появлению ложных пиков на изображении. Общая площадь таких областей не превышает 100 кв. градусов на всем небе, что не оказывает существенного влияния на площадь покрытия обзора.

1.5 Точность определения координат источников

Координаты источников были измерены аппроксимацией наблюдаемых пиков потоков на изображении двумерной гауссианой ($\sigma = 1.25'$). Для оценки эффективной точности определения координат источников, было построено распределение отклонений измеренных координат источника от известных по оптическим каталогам для большого количества наблюде-

ний. Точность определения координат зависит от отношения сигнал/шум источника. Измеренный 68% доверительный интервал для источников со значимостью детектирования $\sigma = 5 - 6$, $\sigma = 10$ и $\sigma > 20$ составляет 2.1', 1.5' и меньше, чем 0.8' соответственно.

1.6 Каталог источников

Каталог источников содержит 400 объектов разной природы, обнаруженных на уровне значимости больше 5σ в полосе энергий 17-60 кэВ. Большинство источников в каталоге (213) галактического происхождения, среди которых 87 маломассивных двойных систем, 74 массивных двойных систем, 21 катаклизмических переменных. Внегалактические объекты (136) в основном представлены активными ядрами галактик. Каталог источников представлен в таблице 1.2:

Колонка (1) – номер источника в каталоге. *Колонка (2)* – имя источника. Для источников, природа которых была определена до наблюдений *ИНТЕГРАЛа*, приведены оригинальные имена, для остальных приведено имя из каталога *ИНТЕГРАЛа* (IGR J...). *Колонки (3,4)* – координаты источника в экваториальной системе координат (эпоха 2000 года). *Колонка (5)* – измеренный поток источника на карте неба, накопленной за все время работы обсерватории. Поток указан в тысячных долях от наблюдаемого потока Крабовидной туманности в энергетическом диапазоне обзора, для источника, имеющего форму спектра аналогичную спектру Крабовидной туманности. Поток 1 мКраб соответствует 1.43×10^{-11} эрг/сек/см². *Колонка (6)* – Общий астрофизический тип источника. LMXB и HMXB – маломассивная и массивная рентгеновская двойная система, соответственно, CV – катаклизмическая переменная, SNR/PWN – остаток сверхновой (supernova remnant) или туманность пульсарного ветра (pulsar wind nebula), SGR – источник повторяющихся мягких гамма-всплесков, Star – звезда, SymbStar – симбиотическая звезда, PSR – изолированный пульсар, RS CVn – коронально активная двойная звезде, AGN – активное ядро галактики, Cluster – скопление галактик. *Колонка (7)* – Комментарии по отождествлению. *Колонка (8)* – Ссылка на работу (работы), в которой (которых) было сделано открытие источника или определение его природы.

Таблица 1.2. Каталог источников

Имя	RA	Dec	Поток, мКрАб	Тип	Отождествление	Ссылка
GR J00234+6141	5.723	61.700	0.38 ± 0.10	CV		[50, 21]
TYCHO SNR	6.334	64.150	0.64 ± 0.10	SNR		
V709 Cas	7.205	59.300	3.91 ± 0.11	CV		[12]
IGR J00291+5934	7.254	59.563	4.01 ± 0.11	LMXB		
87GB003300.9+593328	8.977	59.827	0.72 ± 0.11	AGN		[46]
IGR J00370+6122	9.286	61.386	0.60 ± 0.11	HMXB		[49]
MRK 348	12.181	31.947	5.18 ± 0.58	AGN	NGC 262	
1WGA J0053.8-722	13.526	-72.468	2.36 ± 0.38	HMXB		
Gamma Cas	14.176	60.712	3.17 ± 0.12	Star		
SMC X-1	19.299	-73.449	30.54 ± 0.36	HMXB		
1A 0114+650	19.516	65.289	7.64 ± 0.14	HMXB		
4U 0115+63	19.625	63.746	2.01 ± 0.14	HMXB		
NGC 0526A	20.951	-34.925	3.84 ± 0.81	AGN		
IGR J01363+6610	24.060	66.188	15.61 ± 2.20 ^{R185}	HMXB		[63, 198]
RX J0137.7+5814	24.443	58.221	0.77 ± 0.20			
ESO 297- G 018	24.639	-40.020	3.85 ± 0.80 ^{R374}	AGN		
4U 0142+61	26.630	61.738	2.02 ± 0.19	AXP		
RJ 0146.9+6121	26.744	61.351	2.57 ± 0.20	HMXB		
IGR J01528-0326	28.208	-3.450	1.14 ± 0.21	AGN	MCG -01-05-047	[32]
NGC 788	30.277	-6.819	3.37 ± 0.20	AGN		
IGR J02095+5226	32.392	52.458	2.76 ± 0.50	AGN	LEDA 138501 1ES 0206+522 NGC 931	
MRK 1040	37.063	31.316	3.39 ± 0.57	AGN	NGC 973	[32]
IGR J02343+3229	38.599	32.475	2.71 ± 0.44	AGN	IRAS 02313+3217	
NGC 1052	40.267	-8.236	1.48 ± 0.30	AGN		
NGC 1068	40.687	-0.010	1.32 ± 0.21	AGN		
4U 0241+61	41.262	62.464	3.32 ± 0.42	AGN		
IGR J02466-4222	41.644	-42.360	2.16 ± 0.38	AGN?	MCG -07-06-018	[214]
IGR J02524-0829	43.115	-8.486	2.20 ± 0.47	AGN?	MCG-02-08-014	
NGC 1142	43.804	-0.186	3.22 ± 0.25	AGN	NGC 1144	
PERSEUS CLUSTER ^a	49.973	41.509	2.49 ± 0.24	Cluster		
1H 0323+342	51.140	34.168	1.91 ± 0.33	AGN		
GK Per	52.777	43.880	1.82 ± 0.27	CV		
IGR J03334+3718	53.362	37.313	1.37 ± 0.29	AGN		[31, 214]
NGC 1365	53.428	-36.170	2.30 ± 0.46	AGN		
V 0332+53	53.751	53.172	135.14 ± 0.44	HMXB		
4U 0352+30	58.849	31.036	36.69 ± 0.62	HMXB	X Per	
3C111	64.581	38.013	5.47 ± 0.61	AGN		
LEDA 168563	73.044	49.531	3.09 ± 0.78	AGN	1RXS J045205.0+493248	
ESO 033-G002	74.001	-75.538	1.36 ± 0.19	AGN		
IGR J05007-7047	75.203	-70.775	1.18 ± 0.17	HMXB	IGR J05009-7044	[213]
V1062 Tau	75.617	24.732	3.67 ± 0.62 ^{R102}	CV		
IRAS 05078+1626	77.705	16.513	4.14 ± 0.53	AGN		
4U 0513-40	78.534	-40.069	3.39 ± 0.60	LMXB		
AKN 120	79.026	-0.140	5.86 ± 2.46	AGN		
IGR J05305-6559 ^b	82.636	-65.984	1.72 ± 0.34			
LMC X-4	83.210	-66.367	15.95 ± 0.17	HMXB		
Crab	83.632	22.016	1000.00 ± 0.41	PSR		
TW Pic	83.689	-57.988	0.97 ± 0.27	CV		
A 0535+262	84.735	26.324	3.45 ± 0.42	HMXB		
LMC X-1	84.912	-69.748	3.72 ± 0.17	HMXB		
PSR 0540-69	85.005	-69.338	1.70 ± 0.17	PSR		
BY Cam	85.713	60.868	2.48 ± 0.51	CV		[12]
MCG 8-11-11	88.801	46.437	3.92 ± 1.05	AGN		
IRAS 05589+2828	90.601	28.461	3.38 ± 0.71	AGN		
ESO 005- G 004	92.575	-86.554	1.76 ± 0.32	AGN		
MRK 3	93.908	71.036	4.77 ± 0.21	AGN		
4U 0614+091	94.282	9.139	20.81 ± 0.67	LMXB		
IGR J06239-6052 ^b	95.936	-60.974	1.16 ± 0.22			
MRK 6	103.048	74.423	2.55 ± 0.21	AGN		
IGR J07264-3553	111.595	-35.900	1.89 ± 0.42	AGN	LEDA 096373	
EXO 0748-676	117.146	-67.754	19.32 ± 0.35	LMXB		
IGR J07563-4137	119.055	-41.638	0.86 ± 0.17	AGN	IGR J07565-4139 2MASX J07561963-4137420	[22, 213]
IGR J07597-3842	119.934	-38.727	2.03 ± 0.18	AGN		[48, 145]
ESO 209-G012	120.496	-49.734	1.16 ± 0.17	AGN		
IGR J08023-6954	120.762	-69.924	3.70 ± 0.96			[193]
PG 0804+761	122.952	76.102	2.01 ± 0.43	AGN		
Vela pulsar	128.835	-45.182	7.03 ± 0.12	PSR		
4U 0836-429	129.354	-42.894	29.46 ± 0.12	LMXB		
FAIRALL 1146	129.621	-35.983	1.14 ± 0.17	AGN		
IGR J08408-4503	130.218	-45.056	0.33 ± 0.12	HMXB		[61]
S5 0836+71	130.340	70.902	2.43 ± 0.23	AGN		[46]
Vela X-1	135.531	-40.555	187.16 ± 0.14	HMXB		
IGR J09026-4812	135.648	-48.221	1.32 ± 0.13			[22]
IRAS 09149-6206	139.043	-62.330	1.44 ± 0.18	AGN		
X 0918-548	140.102	-55.196	3.34 ± 0.15	LMXB		
SWIFT J0920.8-0805	140.213	-8.086	2.51 ± 0.70	AGN	MCG-01-24-012	

Таблица 1.2 (продолжение)

Имя	RA	Dec	Поток, мКраб	Тип	Отождествление	Ссылка
IGR J09251+5219	141.274	52.331	4.09 ± 0.79	AGN	Mrk 110	
IGR J09446-2636 ^c	146.124	-26.628	2.73 ± 0.52	AGN	1RXS J094436.5-263353 6dF J0944370-263356	
NGC 2992	146.431	-14.335	3.55 ± 0.27	AGN		
MCG-5-23-16	146.916	-30.947	6.82 ± 0.59	AGN	ESO 434-G040	
IGR J09522-6231	148.025	-62.523	0.82 ± 0.15			[214]
NGC 3081	149.859	-22.816	3.23 ± 0.39	AGN		
IGR J10095-4248	152.449	-42.800	1.50 ± 0.27	AGN	ESO 263-G013	
GRO J1008-57	152.447	-58.298	4.11 ± 0.12	HMXB		
IGR J10100-5655	152.529	-56.914	1.20 ± 0.13	HMXB		[110, 145]
IGR J10109-5746	152.753	-57.795	1.01 ± 0.13	SimbStar?	2RXP J101103.0-574810	23,67
NGC 3227	155.876	19.867	6.32 ± 0.58	AGN		
IGR J10252-6829	156.287	-68.460	3.14 ± 0.87			[193]
NGC 3281	157.935	-34.855	2.70 ± 0.45	AGN		
3U 1022-55	159.401	-56.801	4.11 ± 0.47 ^{R85}	HMXB		
IGR J10386-4947	159.676	-49.789	1.03 ± 0.17	AGN	SWIFT J1038.8-4942	[159]
IGR J10404-4625	160.124	-46.391	1.47 ± 0.24	AGN	LEDA 93974	[22, 146]
η Car	161.189	-59.719	0.68 ± 0.12	Star		
IGR J11085-5100	167.144	-51.014	0.19 ± 0.17			[193]
Cen X-3	170.306	-60.628	52.23 ± 0.13	HMXB		
IGR J11215-5952	170.429	-59.869	1.09 ± 0.13	HMXB		[125, 162]
IGR J11305-6256	172.779	-62.945	3.45 ± 0.14	XRБ		[174, 146]
IGR J11321-5311	173.047	-53.200	22.36 ± 2.14			[107]
NGC 3783	174.739	-37.766	8.58 ± 1.30	AGN		
IGR J11395-6520	174.858	-65.406	10.68 ± 0.86 ^{R88}	RS CVn?	HD 101379	
IGR J11435-6109	176.031	-61.106	0.88 ± 0.15	HMXB		[64, 87]
A 1145.1-6141	176.870	-61.956	22.91 ± 0.15	HMXB		
4U 1145-619 ^b	177.000	-62.207	3.57 ± 0.15	HMXB		
IGR J12026-5349	180.686	-53.823	1.70 ± 0.21	AGN	WKK0560	[193, 213]
NGC 4051	180.781	44.525	2.11 ± 0.48	AGN		
NGC 4138	182.352	43.672	1.67 ± 0.34	AGN		
NGC 4151	182.634	39.408	33.11 ± 0.30	AGN		
1ES 1210-646	183.269	-64.917	0.66 ± 0.18			
IGR J12143+2933	183.597	29.561	0.67 ± 0.25	AGN	WAS 49B	
NGC 4253	184.592	29.825	1.07 ± 0.21	AGN		
NGC 4258	184.747	47.309	1.33 ± 0.39	AGN		
PKS 1219+04	185.588	4.230	0.91 ± 0.16	AGN		
MRK 50	185.860	2.676	0.91 ± 0.16	AGN		
NGC 4388	186.444	12.664	12.50 ± 0.21	AGN		
NGC 4395	186.462	33.565	1.08 ± 0.20	AGN		
GX 301-2	186.651	-62.772	122.97 ± 0.19	HMXB		
XSS J12270-4859	186.978	-48.907	1.39 ± 0.33	CV		[144]
3C273	187.271	2.050	9.66 ± 0.16	AGN		
IGR J12349-6434	188.724	-64.565	3.56 ± 0.19	SimbStar?	RT Cru	[39, 143]
NGC 4507	188.908	-39.905	7.64 ± 0.34	AGN		
IGR J12391-1612	189.792	-16.186	2.10 ± 0.43	AGN	LEDA 170194 XSS 12389-1614	[193, 213]
NGC 4593	189.910	-5.347	4.09 ± 0.18	AGN		
WKK 1263	190.356	-57.841	0.89 ± 0.22	AGN		
PKS 1241-399	191.057	-40.115	1.24 ± 0.28	AGN		
4U 1246-588	192.386	-59.090	2.36 ± 0.21	HMXB?		[123]
3C279	194.030	-5.779	1.05 ± 0.19	AGN		
2S 1254-690	194.392	-69.296	2.60 ± 0.24	LMXB		[124]
Coma	194.865	27.938	1.58 ± 0.15	Cluster		
1RXP J130159.6-635806 ^b	195.495	-63.969	1.64 ± 0.20	HMXB		[40]
PSR B1259-63 ^b	195.699	-63.836	1.01 ± 0.19	HMXB		
MRK 783	195.741	16.361	0.86 ± 0.22	AGN		
IGR J13038+5348	195.951	53.798	2.19 ± 0.46	AGN	MCG+09-21-096	[31, 214]
NGC 4945	196.364	-49.470	13.92 ± 0.25	AGN		
ESO 323-G077	196.607	-40.423	1.94 ± 0.24	AGN		
IGR J13091+1137	197.270	11.619	2.44 ± 0.29	AGN	NGC 4992	[193, 213]
IGR J13109-5552	197.689	-55.865	1.29 ± 0.21		PMN J1310-5552	[193]
NGC 5033	198.350	36.572	0.84 ± 0.19	AGN		
IGR J13149+4422 ^c	198.743	44.389	1.51 ± 0.27	AGN	Mrk 248	
Cen A	201.363	-43.019	39.19 ± 0.22	AGN		
4U 1323-619	201.643	-62.136	5.28 ± 0.18	LMXB		
IGR J13290-6323 ^c	202.268	-63.392	2.30 ± 0.37 ^{R92}			
ESO 383-G018	203.332	-34.030	1.22 ± 0.27	AGN		
BH CVn	203.699	37.182	0.57 ± 0.26	RS CVn		
MCG-6-30-15	203.990	-34.288	2.53 ± 0.26	AGN	ESO 383-G035	
NGC 5252	204.564	4.528	3.45 ± 1.03	AGN		
MRK 268	205.420	30.395	1.22 ± 0.21	AGN		
4U 1344-60	206.894	-60.615	4.16 ± 0.17	AGN		
IC 4329A	207.333	-30.309	11.28 ± 0.36	AGN		
IGR J14003-6326	210.204	-63.414	0.89 ± 0.15			[93]
V834 Cen	212.196	-45.382	4.11 ± 0.91	CV		
Circinus galaxy	213.290	-65.342	13.11 ± 0.18	AGN		
NGC 5506	213.312	-3.220	9.32 ± 0.46	AGN		
IGR J14175-4641	214.296	-46.671	0.91 ± 0.19	AGN		[193, 145]

Таблица 1.2 (продолжение)

Имя	RA	Dec	Поток, мКрб	Тип	Отождествление	Ссылка
NGC 5548	214.541	25.155	1.44 ± 0.35	AGN		
ESO 511-G030	214.885	-26.633	2.32 ± 0.63	AGN		
IGR J14298-6715	217.388	-67.251	0.89 ± 0.18			[93]
IGR J14331-6112	218.273	-61.221	1.00 ± 0.15			[93]
IGR J14471-6414	221.528	-64.284	0.86 ± 0.15			[93]
IGR J14471-6319	221.834	-63.289	0.66 ± 0.16	AGN		[193, 145]
IGR J14493-5534	222.311	-55.589	1.15 ± 0.16	AGN	2MASX J14491283-5536194	[112, 14]
IGR J14515-5542	222.887	-55.691	1.08 ± 0.15	AGN	WKK 4374	[110, 145]
IGR J14536-5522	223.421	-55.363	1.20 ± 0.16	CV		[110, 144]
IGR J14552-5133	223.846	-51.571	0.98 ± 0.16	AGN	WKK 4438	[193, 145]
IGR J14561-3738 ^c	224.055	-37.632	0.98 ± 0.18	AGN	ESO 386- G 034	[216]
IC 4518A	224.427	-43.125	1.70 ± 0.16	AGN		
IGR J15094-6649	227.382	-66.816	1.05 ± 0.21	CV		[193, 144]
PSR 1509-58	228.480	-59.145	8.85 ± 0.15	PSR		
4U 1516-569	230.167	-57.168	7.64 ± 0.15	LMXB		
IGR J15360-5750	234.014	-57.806	0.93 ± 0.15			[193]
4U 1538-522	235.600	-52.385	16.42 ± 0.13	HMXB		
XTE J1543-568	236.011	-56.748	0.84 ± 0.14	HMXB		
4U 1543-624	236.964	-62.578	2.27 ± 0.18	LMXB		
NY Lup	237.052	-45.472	4.10 ± 0.14	CV	1RXS J154814.5-452845	
XTE J1550-564	237.751	-56.474	28.65 ± 0.14	LMXB		
IGR J15539-6142	238.468	-61.676	0.85 ± 0.17			[93]
4U 1556-605	240.363	-60.716	0.84 ± 0.16	LMXB		
WKK 6092	242.981	-60.637	1.16 ± 0.17	AGN		
4U 1608-522	243.177	-52.425	6.48 ± 0.13	LMXB		
IGR J16167-4957	244.162	-49.975	1.45 ± 0.14	CV	1RXS J161637.2-495847	[264, 12]
IGR J16175-5059	244.357	-50.972	0.60 ± 0.13	PSR	PSR J1617-5055	
IGR J16185-5928	244.635	-59.468	1.21 ± 0.16	AGN	WKK 6471	[193, 145]
IGR J16195-4945	244.893	-49.755	1.80 ± 0.14	HMXB	AX J161929-4945	[264, 243]
IGR J16195-2807	244.871	-28.151	2.07 ± 0.31	RS CVn?	1RXS J161933.6-280736	[22]
Sco X-1	244.981	-15.637	581.08 ± 0.44	LMXB		
IGR J16207-5129	245.194	-51.505	3.01 ± 0.14	HMXB		[264, 243]
SWIFT J1626.6-5156	246.659	-51.938	23.58 ± 1.88 ^{R399}	LMXB		[178]
4U 1624-49	247.002	-49.209	3.88 ± 0.14	LMXB		
IGR J16318-4848	247.953	-48.819	19.53 ± 0.14	HMXB		[183, 42]
IGR J16320-4751	248.013	-47.876	15.34 ± 0.14	HMXB	AX J1631.9-4752	[241, 132]
4U 1626-67	248.076	-67.466	13.58 ± 0.34	LMXB		
4U 1630-47	248.503	-47.391	44.73 ± 0.14	LMXB		
ESO 137-G34	248.790	-58.088	1.18 ± 0.16	AGN		
IGR J16358-4726 ^b	248.992	-47.407	1.42 ± 0.13	HMXB		[184, 168]
AX J163904-4642	249.768	-46.707	3.95 ± 0.13	HMXB		[27]
4U 1636-536	250.230	-53.751	38.18 ± 0.14	LMXB		
IGR J16418-4532	250.465	-45.534	3.50 ± 0.14	HMXB		[242, 265]
GX 340+0	251.449	-45.616	28.85 ± 0.14	LMXB		
IGR J16465-4507 ^b	251.648	-45.118	1.66 ± 0.14	HMXB		[130, 133]
IGR J16479-4514	252.015	-45.207	3.41 ± 0.14	HMXB		[155, 133]
IGR J16482-3036	252.058	-30.591	1.82 ± 0.17	AGN	2MASX J16481523-3035037	[22, 146]
PSR J1649-4349	252.373	-43.823	2.24 ± 0.15	PSR		
IGR J16500-3307	252.493	-33.113	1.12 ± 0.16		1RXS J164955.1-330713	[22]
NGC 6221	253.120	-59.215	1.33 ± 0.19 ^e	AGN		
NGC 6240	253.305	2.429	3.26 ± 0.97	AGN		
MKN 501	253.464	39.751	3.16 ± 0.30	AGN		
GRO J1655-40	253.499	-39.844	2.85 ± 0.14	LMXB		
IGR J16558-5203	254.032	-52.078	2.05 ± 0.15	AGN		[264, 145]
IGR J16562-3301	254.073	-33.045	1.38 ± 0.14		SWIFT J1656.3-3302	
Her X-1	254.455	35.343	89.19 ± 0.28	LMXB		
AX J1700.2-4220	255.082	-42.335	1.17 ± 0.14	HMXB		[144]
OAO 1657-415	255.199	-41.656	63.72 ± 0.14	HMXB		
XTE J1701-462	255.232	-46.197	39.26 ± 2.50 ^{R407}	LMXB		
GX 339-4	255.705	-48.792	46.69 ± 0.15	LMXB		
4U 1700-377	255.984	-37.842	193.92 ± 0.14	HMXB		
GX 349+2	256.431	-36.421	40.74 ± 0.13	LMXB		
4U 1702-429	256.566	-43.037	14.93 ± 0.15	LMXB		
4U 1705-32	257.223	-32.322	1.93 ± 0.12	LMXB		
4U 1705-440	257.234	-44.102	25.00 ± 0.14	LMXB		
1RXS J170849.0-400910	257.214	-40.142	1.31 ± 0.14	AXP		
IGR J17091-3624	257.308	-36.408	5.35 ± 0.13	LMXB		[111, 126]
XTE J1709-267	257.386	-26.658	13.92 ± 0.67 ^{R171}	LMXB		
XTE J1710-281	257.549	-28.128	2.39 ± 0.12	LMXB		
RX J1713.7-3946	257.991	-39.862	0.61 ± 0.14	SNR	G347.3-0.5	
Oph cluster	258.114	-23.347	3.66 ± 0.13	Cluster		
SAX J1712.6-3739	258.153	-37.645	3.97 ± 0.13	LMXB		
4U 1708-40	258.120	-40.858	1.02 ± 0.14	LMXB		
V2400 Oph	258.149	-24.244	2.64 ± 0.13	CV		
KS 1716-389	259.003	-38.879	5.08 ± 1.23	HMXB	XTE J1716-389	[2, 41]
NGC 6300	259.244	-62.830	3.29 ± 0.31	AGN		
IGR J17195-4100	259.911	-41.023	1.92 ± 0.14	CV	1RXS J171935.6-410054	[264, 12]
XTE J1720-318	259.993	-31.753	2.59 ± 0.11	LMXB		
IGR J17200-3116	260.022	-31.294	1.86 ± 0.11	HMXB?	1RXS J172006.1-311702	[264, 145]

Таблица 1.2 (продолжение)

Имя	RA	Dec	Поток, мКрАб	Тип	Отождествление	Ссылка
IGR J17204-3554	260.087	-35.900	0.79 ± 0.12	AGN		[22, 13]
EXO 1722-363	261.295	-36.282	8.18 ± 0.12	HMXB		
IGR J17254-3257	261.354	-32.953	1.57 ± 0.11	LMXB	1RXS J172525.5-325717	[264, 30]
IGR J17269-4737	261.681	-47.647	12.43 ± 1.59 ^{R364}	XRB	XTE J1726-476	[251]
4U 1724-30	261.888	-30.804	17.09 ± 0.10	LMXB	Terzan 2	
IGR J17285-2922	262.163	-29.370	3.68 ± 0.57 ^{R120}	LMXB?	XTE J1728-295	[264, 11]
IGR J17303-0601	262.579	-5.971	3.54 ± 0.30	CV	1RXS J173021.5-055933	[264, 57]
GX 9+9	262.934	-16.952	11.08 ± 0.16	LMXB		
GX 354-0	262.988	-33.833	35.54 ± 0.10	LMXB		
GX 1+4	263.011	-24.747	54.39 ± 0.11	LMXB		
IGR J17320-1914	263.001	-19.195	1.14 ± 0.14	Nova	V2487 Oph	[12]
IGR J17331-2406	263.291	-24.142	1.24 ± 0.10			[131]
RapidBurster	263.349	-33.387	3.73 ± 0.11	LMXB		
IGR J17350-2045 ^c	263.740	-20.754	0.90 ± 0.12			
IGR J17353-3539 ^c	263.830	-35.663	0.80 ± 0.10			
IGR J17353-3257	263.848	-32.934	1.38 ± 0.10		IGR J17354-3255	[112]
IGR J17364-2711	264.117	-27.199	1.60 ± 0.30			[35]
GRS 1734-292	264.371	-29.139	5.18 ± 0.10	AGN		[169]
IGR J17379-3747 ^c	264.465	-37.774	6.34 ± 0.91 ^{R165}			
SLX 1735-269	264.571	-26.991	10.00 ± 0.10	LMXB		
4U 1735-444	264.748	-44.453	25.07 ± 0.17	LMXB		
IGR J17391-3021	264.812	-30.355	1.08 ± 0.09	HMXB	XTE J1739-302	[231, 229]
GRS 1736-297	264.899	-29.736	4.99 ± 0.52 ^{R409}			
XTE J1739-285 ^b	264.975	-28.496	2.01 ± 0.10	LMXB		[28]
IGR J17402-3656	265.087	-36.936	0.87 ± 0.12	Open star cluster	NGC 6400	
SLX 1737-282 ^b	265.168	-28.313	3.66 ± 0.09	LMXB		
IGR J17407-2808 ^b	265.175	-28.133	1.47 ± 0.11	HMXB	2RXP J174040.9-280852	[105, 227]
IGR J17419-2802 ^b	265.485	-28.031	8.11 ± 0.10 ^{R409}			[66]
2E 1739.1-1210	265.484	-12.188	1.78 ± 0.20	AGN	IGR J17418-1212	
XTE J1743-363	265.753	-36.377	2.86 ± 0.11	HMXB?		[227]
1E 1740.7-294	265.976	-29.748	27.91 ± 0.09	LMXB		
IGR J17445-2747	266.082	-27.772	4.39 ± 0.67 ^{R165}			[22]
IGR J17448-3231 ^{bc}	266.190	-32.528	0.56 ± 0.10			
KS 1741-293 ^b	266.242	-29.337	5.11 ± 0.09	LMXB		
GRS 1741.9-2853 ^b	266.250	-28.917	3.05 ± 0.09	LMXB		
IGR J17456-2901 ^b	266.401	-29.026	5.61 ± 0.09		Nuclear stellar cluster	[17, 109]
1E 1742.8-2853 ^b	266.500	-28.914	5.95 ± 0.09	LMXB?		
A 1742-294	266.517	-29.508	11.82 ± 0.09	LMXB		
IGR J17464-3213	266.564	-32.237	32.30 ± 0.10	LMXB	H1743-322/XTE J1746-322	[185]
1E 1743.1-2843 ^b	266.580	-28.735	5.45 ± 0.09	LMXB		
SAX J1747.0-2853 ^b	266.761	-28.883	3.03 ± 0.09	LMXB		
SLX 1744-299/300 ^b	266.834	-30.010	7.57 ± 0.09	LMXB		
IGR J17473-2721	266.841	-27.352	5.14 ± 0.73 ^{R304}			[65]
IGR J17475-2253 ^c	266.901	-22.862	0.97 ± 0.10			
IGR J17475-2822	266.864	-28.364	2.51 ± 0.10	Molecular cloud	SgrB2	[188]
GX 3+1	266.983	-26.563	10.14 ± 0.10	LMXB		
A 1744-361	267.052	-36.133	16.22 ± 0.11 ^{R181}	LMXB		
4U 1745-203	267.217	-20.359	12.03 ± 0.54 ^{R120}	LMXB		
AX J1749.1-2733 ^b	267.275	-27.550	1.48 ± 0.10	XRB?		[227]
IGR J17488-3253	267.223	-32.907	1.34 ± 0.10	AGN		[264, 145]
AX J1749.2-2725 ^b	267.292	-27.421	1.60 ± 0.09	HMXB		
SLX 1746-331	267.477	-33.201	0.82 ± 0.10	LMXB		
4U 1746-37	267.548	-37.046	2.95 ± 0.12	LMXB		
IGR J17505-2644 ^c	267.636	-26.744	0.66 ± 0.10			
GRS 1747-313	267.689	-31.284	1.39 ± 0.09	LMXB	Terzan 6	
XTE J1751-305	267.816	-30.616	5.91 ± 0.61 ^{R299}	LMXB		
IGR J17513-2011	267.820	-20.184	1.62 ± 0.12	AGN		[22, 145]
SWIFT J1753.5-0127	268.361	-1.452	3.44 ± 0.24	LMXB?		[167, 246]
AX J1754.2-2754	268.495	-28.026	2.05 ± 0.53	LMXB		
IGR J17544-2619	268.619	-26.325	0.65 ± 0.09	HMXB		[232, 88]
IGR J17585-3057 ^c	269.636	-30.956	0.79 ± 0.09			
IGR J17597-2201	269.946	-22.026	5.61 ± 0.11	LMXB?	XTE J1759-220	[127, 134]
GX 5-1	270.283	-25.075	45.54 ± 0.10	LMXB		
GRS 1758-258	270.302	-25.743	54.32 ± 0.10	LMXB		
GX 9+1	270.385	-20.527	15.47 ± 0.12	LMXB		
IGR J18027-2016	270.666	-20.283	4.07 ± 0.12	HMXB	IGR/SAX J18027-2017	[189, 5]
IGR J18027-1455	270.692	-14.910	2.05 ± 0.15	AGN	1RXS J180245.2-145432(f)	[264, 142]
IGR J18048-1455	271.180	-14.925	1.06 ± 0.15	HMXB		[22, 31]
XTE J1807-294	271.770	-29.430	0.95 ± 0.10	LMXB		
SGR 1806-20	272.162	-20.404	3.26 ± 0.12	SGR		
PSR J1811-1925	272.862	-19.423	0.99 ± 0.13	PSR/PWN	SNR G11.2-0.3	
IGR J18135-1751	273.397	-17.858	1.28 ± 0.14	PWN/SNR?	HESS J1813-178	[253]
GX 13+1	273.629	-17.155	11.96 ± 0.14	LMXB		
M 1812-12	273.780	-12.094	26.22 ± 0.16	LMXB		
GX 17+2	274.006	-14.035	55.95 ± 0.15	LMXB		
IGR J18170-2511 ^c	274.295	-25.142	0.82 ± 0.11			
XTE J1817-330	274.431	-33.020	7.57 ± 0.11	LMXB		
SAX J1818.6-1703	274.699	-17.033	1.48 ± 0.15	HMXB		[163]
AX J1820.5-1434	275.112	-14.564	2.19 ± 0.16	HMXB		

Таблица 1.2 (продолжение)

Имя	RA	Dec	Поток, мКрб	Тип	Отождествление	Ссылка
IGR J18214-1318	275.340	-13.299	1.36 ± 0.15			[22]
4U 1820-303	275.921	-30.362	29.26 ± 0.11	LMXB		
IGR J18249-3243	276.206	-32.738	0.92 ± 0.11	AGN	PKS 1821-327?	[14]
4U 1822-000	276.312	0.007	1.59 ± 0.16	LMXB		
4U 1822-371	276.447	-37.106	25.61 ± 0.14	LMXB		
IGR J18257-0707	276.480	-7.145	1.03 ± 0.15			[22]
LS 5039	276.554	-14.861	0.57 ± 0.16	HMXB		
GS 1826-24	277.367	-23.798	73.65 ± 0.13	LMXB		
AX J183039-1002	277.660	-10.049	0.84 ± 0.16			
IGR J18325-0756	278.112	-7.938	1.89 ± 0.15			[128]
SNR 021.5-00.9	278.394	-10.572	2.88 ± 0.16	SNR		
PKS 1830-211	278.421	-21.068	2.34 ± 0.15	AGN		
3C382	278.738	32.660	2.77 ± 1.22	AGN		
RX J1832-33	278.933	-32.990	9.59 ± 0.13	LMXB		
AX J1838.0-0655	279.503	-6.911	2.03 ± 0.15	SNR/PWN	HESS J1837-069	[138]
ESO 103-G035	279.632	-65.422	4.64 ± 0.94	AGN		
Ser X-1	279.991	5.041	10.27 ± 0.13	LMXB		
IGR J18410-0535	280.262	-5.577	1.11 ± 0.15	HMXB	AX J1841.0-0536	[205]
1E 1841-045	280.329	-4.938	2.48 ± 0.15	PSR/PWN		
3C390.3	280.578	79.763	4.30 ± 0.44	AGN		
AX J1845.0-0433	281.253	-4.574	1.43 ± 0.14	HMXB		[123]
GS 1843+00	281.404	0.868	4.63 ± 0.13	HMXB		
PSR J1846-0258	281.613	-2.983	1.57 ± 0.15	PSR/PWN	AXP?	
A 1845-024	282.048	-2.426	0.93 ± 0.13	HMXB		
IGR J18483-0311	282.071	-3.172	3.18 ± 0.14			[38]
IGR J18486-0047 ^c	282.104	-0.787	1.07 ± 0.13			
IGR J18490-0000	282.258	-0.013	1.13 ± 0.13			[156]
4U 1850-087	283.265	-8.702	5.02 ± 0.15	LMXB		
IGR J18539+0727	283.500	7.488	0.69 ± 0.12	LMXB?		[129, 126]
4U 1849-31	283.761	-31.155	6.40 ± 0.18	CV	V1223 Sgr	
XTE J1855-026	283.870	-2.601	10.61 ± 0.13	HMXB		
IGR J18559+1535	283.987	15.629	1.59 ± 0.16	AGN	2E 1853.7+1534	[20, 145]
IGR J18578-3405	284.469	-34.096	4.01 ± 0.64 ^{R408}	AGN?		
XTE J1858+034	284.673	3.437	12.09 ± 0.12	HMXB		
HETE J19001-2455	285.039	-24.917	7.03 ± 0.21	LMXB		
XTE J1901+014	285.415	1.447	2.59 ± 0.12	HMXB?		[92]
4U 1901+03	285.917	3.207	31.22 ± 0.12	HMXB		
SGR 1900+14	286.839	9.322	0.91 ± 0.11	SGR		
XTE J1908+094	287.219	9.374	1.45 ± 0.12	LMXB		
4U 1907+097	287.406	9.833	14.59 ± 0.12	HMXB		
IGR J19108+0917	287.641	9.312	2.70 ± 0.55			
X 1908+075	287.701	7.595	13.04 ± 0.12	HMXB		
Aql X-1	287.814	0.584	12.30 ± 0.12	LMXB		
SS 433	287.957	4.979	8.78 ± 0.11	HMXB		
IGR J19140+098	288.526	9.885	8.99 ± 0.12	HMXB	IGR J19140+0951	[78, 206]
GRS 1915+105	288.801	10.947	261.49 ± 0.12	LMXB		
4U 1916-053	289.686	-5.247	8.04 ± 0.16	LMXB		
SWIFT J1922.7-1716	290.615	-17.300	8.38 ± 1.23 ^{R309}			[250]
1H 1934-063	294.422	-6.240	1.24 ± 0.22	AGN		
RX J1940.2-1025	295.050	-10.446	2.32 ± 0.28	CV	V1432 Aql	[12]
NGC 6814	295.685	-10.331	3.30 ± 0.29	AGN		
XSS J19459+4508	296.887	44.883	1.06 ± 0.31	AGN	IGR J19473+4452 2MASX J19471938+4449425	[193, 213]
KS 1947+300	297.397	30.211	13.11 ± 0.30	HMXB		
3C403	298.024	2.445	5.18 ± 1.56	AGN		
4U 1954+319	298.933	32.094	4.76 ± 0.27	HMXB		
Cyg X-1	299.588	35.202	736.49 ± 0.24	HMXB		
Cygnus A	299.863	40.736	4.03 ± 0.23	AGN		
SWIFT J2000.6+3210	300.101	32.166	1.89 ± 0.26	HMXB	IGR J20006+3210	[250, 77]
IGR J20187+4041	304.647	40.706	1.32 ± 0.19	AGN	2MASX J20183871+4041003 IGR J2018+4043	[33, 34]
IGR J20286+2544	307.140	25.746	2.31 ± 0.41	AGN	MCG +04-48-002	[14, 148]
EXO 2030+375	308.062	37.638	33.45 ± 0.19	HMXB		
Cyg X-3	308.108	40.959	160.81 ± 0.18	HMXB		
4C +74.26	310.576	75.141	2.74 ± 0.85	AGN		
MRK 509	311.036	-10.727	3.85 ± 0.58	AGN		
IGR J20569-4940	314.215	49.679	1.03 ± 0.22		3A 2056+493	
SAX J2103.5+4545	315.901	45.753	10.47 ± 0.18	HMXB		
S5 2116+81	318.736	82.045	2.48 ± 0.67	AGN		
IGR J21178+5139	319.441	51.650	1.35 ± 0.24	AGN	2MASX J21175311+5139034	[14]
IGR J21237+4218	320.960	42.316	1.03 ± 0.18	CV	V2069 Cyg	
IGR J21247+5058	321.161	50.973	5.98 ± 0.24	AGN		[264, 142]
IGR J21277+5656	321.930	56.943	1.87 ± 0.31	AGN		[20]
4U 2127+119	322.502	12.172	3.72 ± 0.47	LMXB		
CV Cyg	323.449	51.122	3.15 ± 0.26	CV		[12]
IGR J21343+4738	323.625	47.614	1.09 ± 0.21		1RXS J213419.6+473810	
SS Cyg	325.711	43.574	2.89 ± 0.22	CV		
Cyg X-2	326.170	38.319	25.81 ± 0.23	LMXB		
NGC 7172	330.490	-31.864	4.18 ± 0.35	AGN		

Таблица 1.2 (продолжение)

Имя	RA	Dec	Поток, мКраб	Тип	Отождествление	Ссылка
BL Lac	330.645	42.267	1.31 ± 0.26	AGN		[46]
4U 2206+543	331.992	54.513	6.40 ± 0.25	HMXB		
FO Aqr	334.402	-8.301	3.28 ± 0.99 ^{R25}	CV		
NGC 7314	338.890	-26.021	1.51 ± 0.40	AGN		
IGR J22367-1231	339.176	-12.539	1.83 ± 0.39	AGN	MRK 915	
IGR J22517+2218 ^c	342.939	22.316	2.45 ± 0.43 ^{R316}			
3C 454.3	343.490	16.143	9.73 ± 0.38	AGN		[46]
MR 2251-178	343.465	-17.616	3.32 ± 0.34	AGN		
NGC 7469	345.825	8.879	3.31 ± 0.54	AGN		
MRK 926	346.166	-8.689	2.49 ± 0.37	AGN		
Cas A	350.846	58.813	3.68 ± 0.11	SNR		
IGR J23523+5844 ^c	358.079	58.745	0.62 ± 0.10			

^aДоминирует тепловое излучение.

^bПространственно плохо разрешенные источники. Приведенный поток следует использовать с осторожностью.

^cНовые источники, открытые в данном обзоре.

^eМожет содержать поток от ESO 138-G1 (AGN, $\sim 6.5'$ от NGC6221)

^RПоток источника был измерен на карте неба накопленной за указанную орбиту.

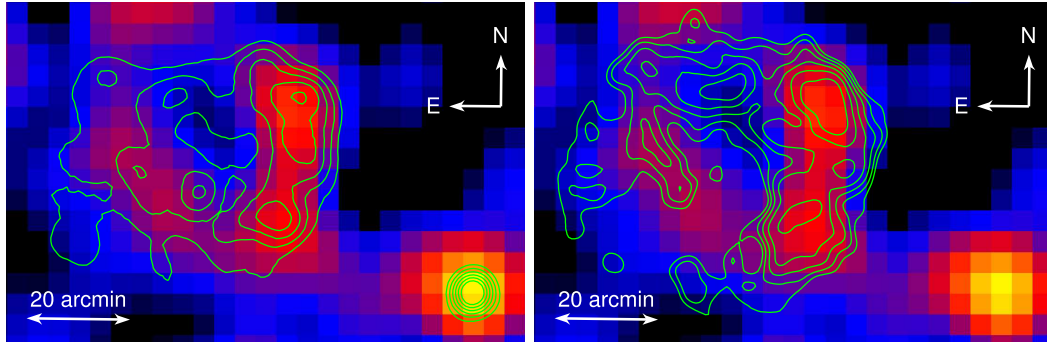


Рис. 1.6 Распределение поверхностной яркости области остатка вспышки сверхновой RX J1713.7-3946 в диапазоне энергий 17–60 кэВ. Значимость детектирования составляет $4 - 5\sigma$ вдоль протяженной структуры. Контуры обозначают распределение поверхностной яркости в диапазоне 0.1-2.4 кэВ по данным спутника РОСАТ (слева) и распределение интенсивности гамма-лучей высоких энергий из эксперимента H.E.S.S. (справа).

Остаток вспышки сверхновой RX J1713.7-3946

В качестве одного из интересных результатов обзора всего неба можно привести обнаружение остатка вспышки сверхновой RX J1713.7-3946.

Расширяющаяся оболочка сверхновой RX J1713.7-3946 была обнаружена в обзоре всего неба проведенного в мягком рентгеновском диапазоне энергий (0.1-2.4 кэВ) спутником РОСАТ [172]. Остаток вспышки виден на изображении, как протяженный источник рентгеновского излучения, с характерным “лимбом” размер которого составляет примерно 24 угловых минуты. Исследования спектра RX J1713.7-3946, с помощью данных обсерватории АСКА [100, 230], не показали наличия эмиссионных линий, что было истолковано в пользу нетеплового механизма излучения.

Недавнее детектирование лучей сверхвысоких энергий в ТэВ-ом диапазоне, от RX J1713.7-3946, с помощью сети черенковских детекторов H.E.S.S. [1], подтвердило гипотезу ускорения частиц космических лучей в расширяющихся оболочках сверхновых.

В ходе проведения обзора всего неба, было обнаружено протяженное излучение от остатка вспышки сверхновой RX J1713.7-3946. Это первое детектирование расширяющейся оболочки в жестком рентгеновском диапазоне энергий. Построение изображения объектов, размер которых превышает угловое разрешение телескопа *IBIS* ($12'$) невозможно, однако, можно получить некоторую, ограниченную информацию о поверхностной яркости протяженного объекта [199, 200]. На Рис. 1.6 показано распределение поверхностной яркости излучения от RX J1713.7-3946 в диапазоне 17–60 кэВ. Контурами изображена карта, полученная на спутнике РОСАТ (слева) и с помощью данных H.E.S.S. (справа).

На рисунке хорошо видно соответствие морфологии оболочки RX J1713.7-3946 в мягком рентгеновском диапазоне, на ТэВ-ных энергиях и в жестком рентгеновском диапазоне. Как предполагается, источником излучения расширяющейся оболочки сверхновой, на этих энергиях, может служить синхротронное излучение 100 ТэВ-ных электронов [100].

Часть 2

Фоновое Излучение Галактики

2.1 Введение

Более тридцати лет назад, при исследовании Галактики в рентгеновском диапазоне энергий, было обнаружено, что кроме излучения компактных источников, вдоль галактической плоскости также присутствует некое “диффузное” излучение – галактический рентгеновский фон (ГРФ) [260, 266]. Угловой размер этого излучения составляет около 100° по галактической долготе и $\sim 2^\circ$ по широте. В области галактического центра наблюдается характерное утолщение (“балдж”) с общей протяженностью $\sim 5^\circ$ по галактической широте (Рис. 2.1).

К моменту обнаружения ГРФ диффузная компонента излучения Галактики была обнаружена в гамма-диапазоне $h\nu \gtrsim 10 - 100$ МэВ (см. например, Рис. 2.2). Природа этого диффузного излучения, открытого еще в начале 70х годов, вскоре была разъяснена [104, 221, 222, 101, 85]. Как оказалось, это излучение возникает в ходе следующих процессов: (i) взаимодействие высокоэнергичных частиц космических лучей – протонов и лёгких ядер с межзвёздной средой. Излучение образуется при распаде продуктов реакции – π_0 мезонов; (ii) обратное комптоновское рассеяние фотонов видимого, инфракрасного, а также фотонов реликтового излучения на электронах космических лучей высоких энергий; (iii) тормозное излучение релятивистских электронов космических лучей. Морфология диффузного гамма-излучения хорошо согласуется с распределением вещества межзвёздной среды, т.е. среды которая взаимодействует с космическими лучами высоких энергий. Однако, как показали многочисленные расчеты и измерения свойств космических лучей, их объёмная плотность в области энергий меньше \sim МэВ сильно недостаточна для формирования наблюдаемого фонового излучения Галактики в стандартном и жестком рентгеновском диапазонах.

Дополнительные сложности для модели формирования ГРФ в результате взаимодействия космических лучей с межзвёздной средой возникли, когда обнаружилось, что излучение ГРФ обладает спектральными особенностями характерными для излучения обычной горячей оптически тонкой

плазмы [см. например, обзор 237].

Таким образом, со времени открытия ГРФ фактически основная гипотеза о его формировании предполагала наличие очень горячего газа в Галактике с температурой $> 5 - 10$ кэВ, который и дает наблюдаемое рентгеновское излучение [236, 237, 51]. Однако, эта гипотеза сталкивалась с большими трудностями. Основная проблема заключается в том, что такой газ нельзя удержать гравитационным потенциалом галактической плоскости, следовательно, этот горячий газ должен формировать постоянный отток вещества с большой внутренней энергией. Для того, чтобы сделать излучение ГРФ стационарным, в горячую плазму должен постоянно поступать поток энергии на уровне порядка 10^{43} эрг с^{-1} . Однако, источник такой энергии в Галактике неизвестен. Несмотря на значительные трудности этой гипотезы, она оставалась рабочей практически с открытия ГРФ и до недавнего времени. Альтернативное объяснение происхождения фонового излучения Галактики, как результат суперпозиции излучения большого числа слабых компактных рентгеновских источников, таких как коронально активные звёзды и катаклизмические переменные, не получила широкого признания из-за недостаточности информации о свойствах популяций этих источников в Галактике.

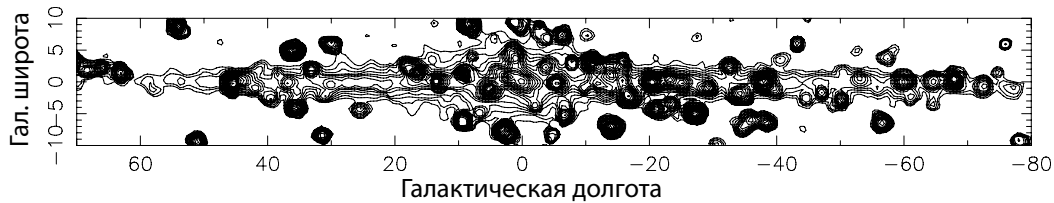


Рис. 2.1 Карта поверхностной яркости в энергетическом диапазоне 3-20 кэВ центральной части Галактики по данным обсерватории *RXTE* (из работы [194]). Галактические компактные источники видны на карте как пятна повышенной поверхностной яркости с характерным размером 1° . Протяженный объект вдоль галактической плоскости представляет собой фоновое излучение Галактики.

Рентгеновский фон Галактики являлся объектом наблюдений практически всех рентгеновских обсерваторий. Разрешить фоновое излучение на отдельные источники не получалось даже с использованием рентгеновских телескопов последнего поколения [224, 81, 51]. Это привело к признанию гипотезы излучения горячей плазмы в качестве “рабочей” в течении долгих лет, несмотря на все ее недостатки.

Значительный прогресс в понимании образования рентгеновского фона Галактики был достигнут в последнее время благодаря анализу наблюдательных данных обсерватории *RXTE* (энергетический диапазон 3-20 кэВ). Было показано, что распределение поверхностной яркости ГРФ в диапазоне 3-20 кэВ хорошо согласуется с распределением интенсивности излу-

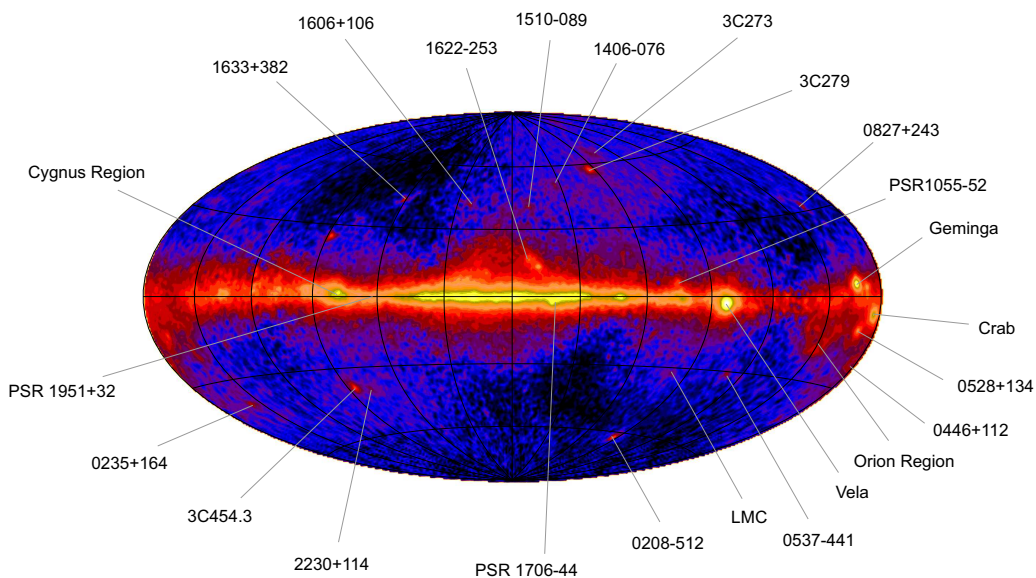


Рис. 2.2 Карта всего неба на энергиях выше 100 МэВ в галактических координатах, полученная с помощью телескопа EGRET, обсерватории им. Комптона в 1991–2000 гг. Протяженная область вдоль галактической плоскости, представляет собой диффузное излучение Галактики. На рисунке также обозначены другие источники гамма-излучения, такие как пульсары и активные ядра галактик. Излучение Галактики в гамма-диапазоне является результатом взаимодействия высокоэнергетических частиц космических лучей с веществом межзвездной среды и полем излучения Галактики. Карта взята с сайта Института внеземной физики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия, <http://www.mpe.mpg.de>.

чения Галактики в инфракрасном диапазоне, которое, в свою очередь, отражает распределение звездной массы [194]. Таким образом, было показано, что излучательная способность единицы объема Галактики в ГРФ прямо пропорциональна плотности звезд в этом объеме. Функция светимости слабых рентгеновских источников в Галактике, полученная так же при помощи данных обсерватории RXTE, показала, что излучения уже известных классов галактических источников вполне достаточно для объяснения феномена ГРФ [215]. Доминирующий вклад в фоновое рентгеновское излучение Галактики дается объектами малой рентгеновской светимости - аккрецирующими белыми карликами и коронально активными звездами. Последние вносят основной вклад в мягком участке спектра - на энергиях до ~ 10 кэВ. На более высоких энергиях (> 20 кэВ), преобладает вклад от двойных систем с белыми карликами, аккрецирующими вещество со звезды-компаньона.

Если действительно излучение ГРФ на энергиях > 20 кэВ дается аккрецирующими белыми карликами, то можно предсказать форму спектра

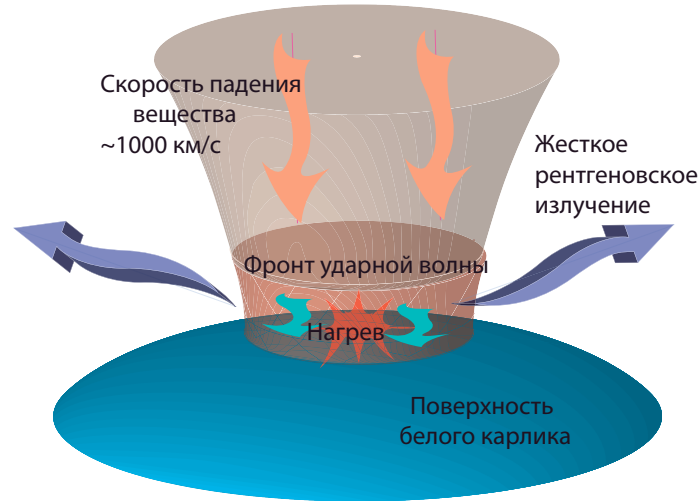


Рис. 2.3 Схематическое изображение аккреции на замагниченный белый карлик (промежуточный поляр или поляр). Вещество падает на белый карлик со скоростью порядка 1000 км/сек, которая зависит от массы белого карлика. На определенной высоте от поверхности образуется ударная волна, за которой вещество разогревается до температуры 20–30 кэВ и излучает фотоны жесткого рентгеновского диапазона. Температура выходящего излучения зависит от скорости падения вещества, и, соответственно, массы белого карлика.

ГРФ на этих энергиях. Рентгеновское излучение у поверхности белого карлика рождается при превращении кинетической энергии аккрецирующего вещества в тепловую. В зависимости от величины напряженности магнитного поля белого карлика, существует два механизма генерации рентгеновского излучения. При слабом магнитном поле ($B = 0.1 \div 1$ МГс), вещество, аккрецируемое со звезды-компаньона, образует аккреционный диск, который продолжается практически до поверхности белого карлика и рентгеновское излучение возникает в оптически тонком пограничном слое между внутренним краем аккреционного диска и поверхностью белого карлика, где вещество тормозится о поверхность и разогревается до десятков и сотен миллионов градусов. При увеличении напряженности магнитного поля, аккреционный диск у поверхности белого карлика разрушается и вещество стекает на магнитные полюса белого карлика по магнитным силовым линиям. Если белый карлик обладает сильным магнитным полем ($B = 10 \div 100$ МГс), то аккреционный диск не образуется совсем и вещество стекает непосредственно со звезды-компаньона на магнитные полюса белого карлика [263, 166].

Скорость падения вещества на поверхность замагниченного белого карлика зависит от его массы и не превышает ~ 1000 км/с. На некоторой высоте от поверхности белого карлика образуется ударная волна, на ко-

торой возникает резкий скачок плотности и температуры газа. Жёсткое рентгеновское излучение возникает в оптически тонкой плазме, разогретой до десятков - сотен миллионов градусов за ударной волной (Рис.2.3). Средняя энергия выходящих фотонов пропорциональна температуре газа, которая, в свою очередь, зависит от скорости падения вещества, и, следовательно, от массы белого карлика. Таким образом, вещество, падающее на белый карлик, не может разогреться до температуры выше некоторой, а значит выходящие фотоны не могут иметь энергию выше некоторой. Если фоновое излучение Галактики в жёстком рентгеновском диапазоне энергий формируется суммарным излучением таких систем, то в спектре ГРФ должен наблюдаться резкий обрыв на энергиях выше 20-30-ти кэВ.

Фоновое излучение Галактики на энергиях выше 20-ти кэВ было изучено крайне плохо [177, 220, 95]. Приборы с малым полем зрения были не способны на приемлемом уровне зарегистрировать слабый поток от ГРФ. Увеличение поля зрения спектрометров приводило к тому, что основной вклад в поток, регистрируемый из области галактической плоскости, давало небольшое число относительно ярких галактических (или внегалактических) источников. Для подробного изучения ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне был необходим прибор, обладающий большим полем зрения, и, в то же время, имеющий возможность учитывать вклад излучения ярких точечных источников.

Следует отметить, что наблюдение ГРФ на более высоких энергиях $h\nu \gtrsim 0.5 - 1$ МэВ сильно упрощается из-за отсутствия излучения от галактических двойных систем, излучение которых, как правило имеет экспоненциальный обрыв на энергиях $< 50 - 100$ кэВ. Это позволяет в значительной степени меньшей степени зависеть от углового разрешения при конструировании эксперимента для изучения фонового излучения Галактики в гамма-диапазоне. Однако для жесткого рентгеновского диапазона вклад ярких точечных источников предявляет собой серьезнейшую проблему при изучении ГРФ.

Для того, чтобы понять природу галактического фонового излучения в жестком рентгеновском диапазоне энергий, необходимо детально исследовать следующие вопросы:

- Соответствует ли пространственное распределение ГРФ распределению видимой звёздной массы, или оно больше повторяет распределение межзвёздного газа в Галактике (или фонового излучения Галактики в гамма-диапазоне)?
- Каков спектр ГРФ в диапазоне энергий 20-500 кэВ? В отличие от фонового излучения Галактики в гамма-диапазоне, информация о спектр ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне крайне противоречива [177, 220, 95, 117, 239]. Получение любой качественной информации о поведении спектра в этой области позволит восстано-

вить широкополосный спектр галактического фонового излучения от нескольких кэВ до сотен ГэВ. Если гипотеза формирования ГРФ в результате сложения излучения от большого числа звёздных систем малой рентгеновской светимости верна, то должен существовать резкий завал в спектре фонового излучения на энергиях выше 20-ти кэВ, где основной вклад в излучение ГРФ должны вносить двойные системы с аккрецирующим белым карликом.

- Какова излучательная способность (светимость) Галактики в жестком рентгеновском диапазоне? Если фоновое рентгеновское излучение Галактики образовано точечными источниками, то оценка объёмной излучательной способности ГРФ должна согласовываться со значением, известным для рентгеновских систем малой светимости в окрестностях Солнца (например [215]).

Взаимное согласие результатов полученных по всем указанным выше пунктам, позволит однозначно ответить на вопрос о природе фонового жесткого рентгеновского излучения Галактики.

На данный момент практически единственным научно-исследовательским спутником, способным провести такое комплексное исследование является международная гамма-обсерватория *ИНТЕГРАЛ*. Сочетание характеристик телескопа с кодирующей апертурой *IBIS* и полупроводникового детектора *ISGRI*, делают этот эксперимент уникальным для исследования галактического фонового излучения в жёстком рентгеновском диапазоне энергий:

- Прибор имеет широкое поле зрения $\sim 28^\circ \times 28^\circ$ (область полного кодирования составляет $9^\circ \times 9^\circ$), что позволяет собирать большой поток от ГРФ, имеющего малую поверхностную яркость. С другой стороны, поле зрения не столь велико, чтобы структурные особенности такого протяжённого источника излучения как галактический фон, были полностью размыты.
- Углового разрешения прибора ($12'$) достаточно, для того, чтобы уверенно избежать проблем, связанных с наложением источников (поверхностная плотность источников на пределе детектирования *IBIS/ISGRI* составляет не более ~ 0.1 источника на кв.градус). С помощью известной функции пропускания коллиматора телескопа *IBIS* и восстановленных при помощи методов кодирующей апертуры потоков точечных источников можно практически идеально учесть вклад точечных источников в полную засветку детектора и таким образом выделить скорость счёта, создаваемую ГРФ.
- Рабочий энергетический диапазон детектора *ISGRI* находится в полосе 17-200 кэВ, что соответствует плохо изученному участку спектра ГРФ.

- Чувствительность детектирования точечного источника для характерной экспозиции ~ 1 млн. сек., накопленной в любой точке плоскости Галактики, составляет $\sim 10^{-11}$ эрг см^{-2} с^{-1} . Для источника, находящегося на расстоянии Центра Галактики (~ 8 кпк), это соответствует светимости $L \approx 10^{35}$ эрг с^{-1} . После вычитания вклада источников светимостью больше L в полную светимость Галактики основной вклад дает излучение ГРФ (см. Рис. 2.4) [215] (подробнее об этом в 2.2.3)

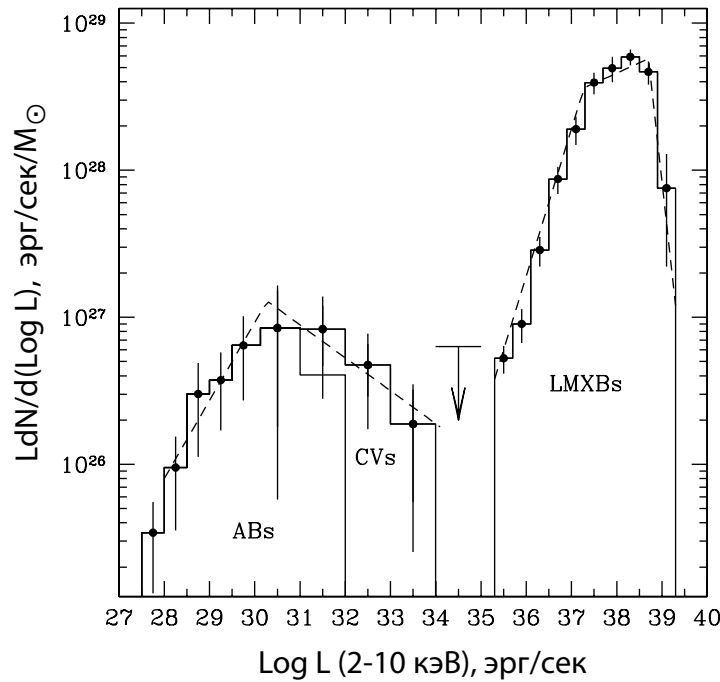


Рис. 2.4 Дифференциальная функция светимости галактических источников в диапазоне энергий 2–10 кэВ. Область малых светимостей занимают коронально активные звезды (ABs) и катаклизмические переменные (CVs). На больших светимостях расположены двойные системы с нейтронными звёздами и чёрными дырами. Аппроксимация функции светимости изображена штриховыми линиями. Рисунок взят из работы Сазонова и др. [215].

2.2 Анализ наблюдательных данных

Техническому описанию обработки данных телескопа IBIS в стандартном режиме работы был посвящен §1.2, однако для исследования фонового излучения Галактики необходимо существенным образом модифицировать подход к обработке наблюдательных данных.

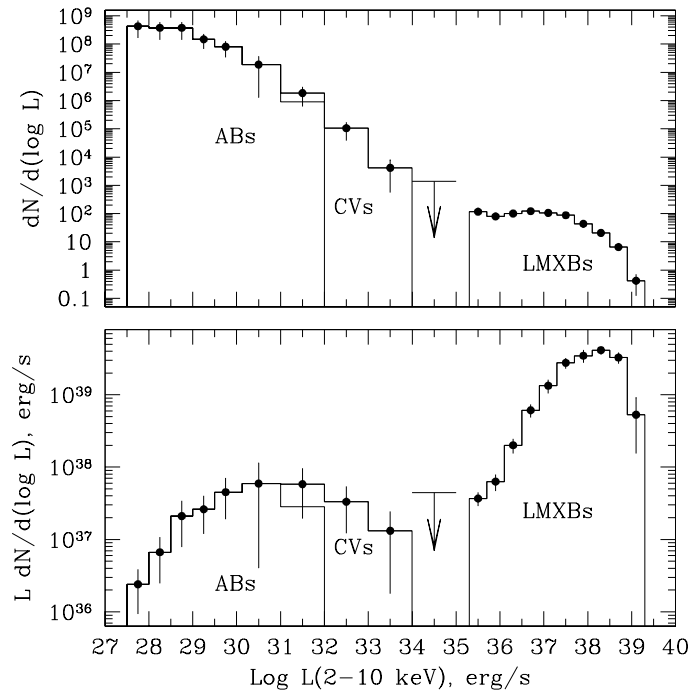


Рис. 2.5 **Верхняя панель:** Функция рентгеновской светимости галактических источников, пересчитанная на массу Галактики. **Нижняя панель:** Удельный вклад источников разных типов в полную светимость Галактики.

Метод кодирующей апертуры (§1.2.1), использовавшийся при восстановлении изображений неба телескопом *IBIS*, не приспособлен для построения изображений протяженных объектов с размерами, превышающими его угловое разрешение 12'. Поэтому, для исследования ГРФ (угловые размеры $\sim 100^\circ \times 5^\circ$) мы использовали *IBIS/ISGRI* как спектрометр (детектор с коллиматором). В этом случае, *IBIS* как спектрометр собирает фотоны с большой области неба, а *IBIS* как телескоп с кодирующей апертурой измеряет потоки ярких источников. Зная инструментальную функцию отклика телескопа на точечный источник, расположенный в любом месте поля зрения инструмента, можно оценить суммарный вклад потока от всех источников в поле зрения в общую скорость счёта детектора, что позволяет измерить поток от ГРФ. Успешность этого метода восстановления информации о ГРФ зависит от точности предсказания инструментального фона детектора.

Перед последующим анализом среди всех наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ были отобраны наблюдения, удовлетворяющие следующим критериям: (i) наблюдение проводится не в самом начале или конце ор-

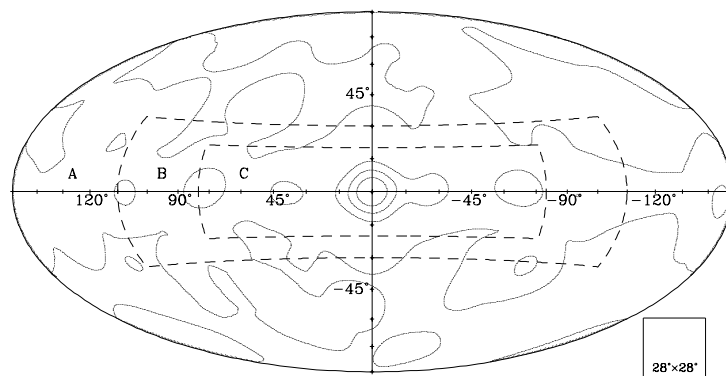


Рис. 2.6 Обозначение участков неба, используемых в работе. Области “А” ($|l| > 120^\circ$ и $|b| > 30^\circ$, исключая круг с радиусом 30° вокруг Крабовидной туманности) и “В” ($90^\circ < |l| < 120^\circ$ и $20^\circ < |b| < 30^\circ$) содержат внегалактические поля, которые использовались для калибровки модели фона. Область “В” также была использована для оценки точности модели фона. Фоновое излучение Галактики исследовалось в области “С” ($|l| < 80^\circ$ и $|b| < 20^\circ$). Контуров отображают уровни постоянной экспозиции 5.3, 3.5, 1.8 млн. сек., и 50000 сек. Поле зрения телескопа *IBIS* схематически изображено в правом нижнем углу рисунка.

биты: скорость счёта детектора сильно зависит от фоновой обстановки, поэтому наблюдения проведенный во время входа/выхода космического аппарата (КА) в радиационные пояса Земли были отброшены; (ii) в наблюдениях нет признаков наличия вспышечной активности Солнца, нет никаких всплесковых событий; (iii) после вычитания вклада от обнаруженных источников разброс значений потоков в разных точках изображения не сильно превышает теоретически ожидаемое (из-за пуассоновской скорости счёта фотонов) значение. После проведения отбора, только 60% наведений было допущено к последующему анализу.

2.2.1 Инструментальный фон детектора

Скорость счёта детектора *ISGRI* состоит из нескольких компонент:

- Космический Рентгеновский Фон (КРФ),
- Поток от точечных источников в поле зрения телескопа *IBIS*,
- Фоновое излучение Галактики, если в поле зрения телескопа находится галактическая плоскость,
- Внутренний (инструментальный) фон детектора, вызванный разными процессами, включая активацию элементов материала КА, взаимодействие частиц космических лучей с материалом детектора и д.р. [25, 238].

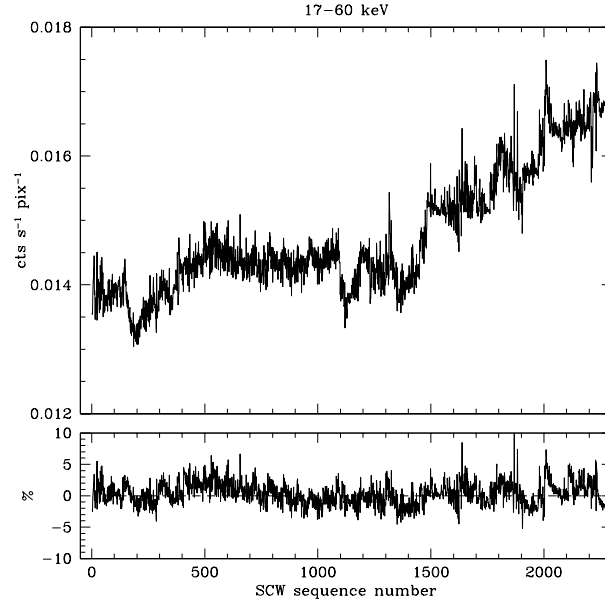


Рис. 2.7 **Верхняя панель:** Скорость счёта детектора *ISGRI* в диапазоне энергий 17 – 60 кэВ в зависимости от номера наблюдения. Показаны только наблюдения из области “В” (см. Рис. 2.6). **Нижняя панель:** Разность между предсказанной и наблюдаемой скоростью счёта детектора (в процентах относительно наблюдаемой скорости счёта).

Для того, чтобы измерить поток, регистрируемый от галактического фона, необходимо отделить из полной скорости счёта детектора все остальные (кроме ГРФ) составляющие.

Космический рентгеновский фон даёт вклад в общую скорость счёта детектора на уровне ~ 0.5 Краб в энергетическом диапазоне 17-100 кэВ во всех направлениях небесной сферы. Ввиду достаточно большого поля зрения *ISGRI* значения потока КРФ, получаемого с разных направлений на небе, не должны отличаться более чем на \sim несколько процентов[37], т.е. поток КРФ может быть представлен, как постоянная “подложка” в скорости счёта детектора при всех ориентациях КА.

Поскольку телескоп *IBIS* непосредственно детектирует и измеряет потоки точечных источников в его поле зрения, их вклад может быть практически идеально вычтен из общей скорости счёта детектора. Каталог источников, используемый для оценки полного потока точечных источников, представлен в §1.6.

Внутренний (инструментальный) фон детектора не является постоянным, а напротив, обладает достаточно сильной переменностью (см. Рис. 2.7, верхняя панель). Для того, чтобы предсказать скорость счёта инструментального фона детектора, были разработаны две модели. В первой модели значение фоновой скорости счёта предсказывалось на основании

измерений “опорных” скоростей счёта, во второй модели значение инструментального фона вычислялось в результате интерполяции значений фона в близких по времени наблюдениях телескопа, но направленных в области далеко от галактической плоскости.

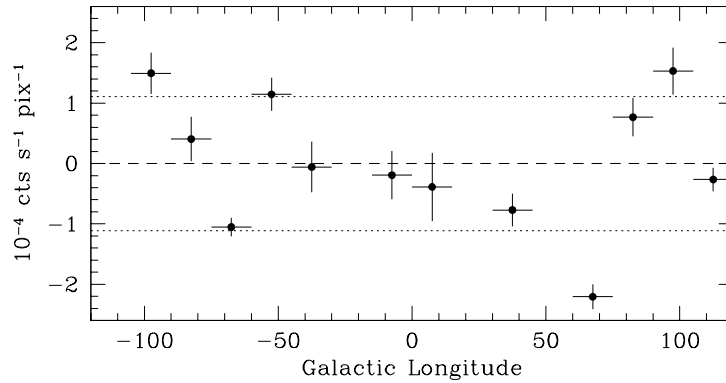


Рис. 2.8 Разность между предсказанной и наблюдаемой скоростью счёта детектора *ISGRI* для наблюдений из области “В” (см. Рис. 2.6), усредненная по галактической долготе. Пунктирные линии показывают 1σ интервал значений разности (1.1×10^{-4} отсч. $\text{с}^{-1}\square^{-1}$), где символ \square – обозначает элемент детектора

Модель 1: Индикаторы фона детектора

Для предсказания скорости счёта детектора в любой момент времени, можно использовать индикаторы фоновой обстановки. Среди которых: скорость счёта заряженных частиц по данным монитора IREM (Integral Radiation Environment Monitor), скорость счёта высокоэнергичных событий по данным телескопа *SPI*, скорость счёта антисовпадательной защиты *ISGRI* и скорость счёта детектора *ISGRI* в высоких энергетических каналах. После подробного исследования, нами был выбран последний индикатор, как наиболее точно описывающий внутренний фон детектора в интересующих нас энергетических каналах (17-200 кэВ). Эффективная площадь детектора *ISGRI* в полосе энергий 0.6 – 1 МэВ составляет менее 40 см^2 , следовательно, можно ожидать, что вклад инструментального фона полностью преобладает в скорости счёта H в этой полосе энергий.

Модель фона детектора представлена в виде линейной комбинации скорости счёта детектора H и параметра G , который представляет собой коэффициент сдвига энергии фотонов при изменении параметра “gain” детектора (см. §1.2.2). Для учёта долговременных вариаций скорости счёта детектора в модель также был включён параметр времени T в кубической форме:

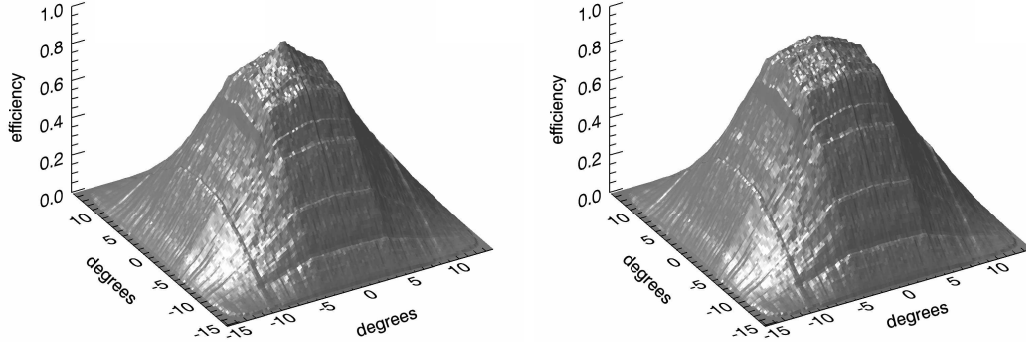


Рис. 2.9 Инструментальная функция отклика телескопа *IBIS* на точечный источник как коллиматора. Коэффициент пропускания потока в зависимости от направления представлен для энергетических диапазонов 17-60 кэВ (слева) и 86-129 кэВ (справа). Для построения функции пропускания, принимались во внимание геометрические особенности телескопа.

$$P = a_0 + a_1H + a_2G + a_3T + a_4T^2 + a_5T^3 \quad (2.1)$$

Коэффициенты a_i модели 2.1 были получены из анализа наблюдений телескопа при его наведениях на внегалактические поля (области “А” и “В” на Рис. 2.6), где поток от ГРФ пренебрежимо мал [194] (здесь и далее, мы рассматриваем скорость счёта детектора после вычитания вклада точечных источников).

Для того, чтобы проверить качество модели фона детектора, мы определили коэффициенты модели 2.1, используя наблюдения из области “А”, и сравнили предсказанную (P) и измеренную (M) скорости счёта детектора для наблюдений области “В”. На Рис. 2.7 показан результат (нижняя панель). Точность модели фона детектора определяется разностью скоростей счёта $P - M$. Идеальная модель должна давать среднее значение разности- ноль и разброс значений разностей, определяемой пуассоновской скоростью счёта событий. После применения модели фона (2.1), среднеквадратичное отклонение величины $P - M$ составило $\sim 1.8\%$ относительно измеренной скорости счёта. Следует отметить, что разброс величины $P - M$ содержит в себе статистические флуктуации потока скорости счёта детектора (M) (за счет пуассоновской скорости счёта событий в энергетических каналах конечной ширины).

Чтобы оценить систематическую неопределенность модели (2.1), необходимо уменьшить вклад статистических вариаций M . Для этого, мы усреднили величину $P - M$ вдоль галактической широты (см. Рис. 2.8). Среднеквадратичное отклонение $\sqrt{\langle(P - M)^2\rangle}$ составило 1.1×10^{-4} отсч. сек $^{-1}$ \square^{-1} в диапазоне энергий 17-60 кэВ ($\sim 1\%$ от скорости счёта M), что соответствует потоку ~ 10 мКраб, для спектра, подобного

спектру Крабовидной туманности.

Модель 2: “Качающийся коллиматор”

В данной модели использовалась специальная серия наблюдений, проведенная обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* в области галактического центра. Оптическая ось телескопа двигалась вдоль галактического меридиана с амплитудой $\pm 25^\circ$ по галактической широте. Один проход длился около 10-ти часов. Уникальность этих наблюдений и их полезность для исследования фонового излучения Галактики заключается в следующем. За время одного прохода фоновая обстановка на орбите *ИНТЕГРАЛа* (72 часа) не успевает значительно измениться и все изменения в полной скорости счёта детектора при движении через галактический центр вызываются наличием ГРФ в поле зрения телескопа. Таким образом, измеряя скорость счёта детектора в крайних положениях “качаний” $|b| > 20^\circ$, где вклад от ГРФ незначителен [194], можно предсказать ожидаемый инструментальный фон детектора в направлении на ГРФ, используя простую интерполяцию.

Проверка точности вычитания инструментального фона на высоких энергиях (> 600 кэВ), показала, что систематическая неопределенность ($\sim 0.5\%$ от наблюдаемой скорости счёта детектора) не превышает статистическую неопределенность для экспозиции ~ 1 млн. сек. В частности, это означает, что модель “качающегося коллиматора” примерно в семь раз более эффективна, чем модель детектора, основанная на индикаторах: ~ 15 и ~ 100 мКраб (в диапазоне энергий $0.6 - 1$ МэВ) соответственно. Поэтому, для построения спектра ГРФ мы использовали только эту модель.

2.2.2 Функция отклика телескопа IBIS как коллиматора

Одна из ключевых характеристик эксперимента *IBIS/ISGRI* состоит в обладании широким полем зрения и способностью выделить поток от точечных источников из полной скорости счёта детектора. Неточность в вычитании потока от источников может значительно ухудшить построение карты и спектра ГРФ.

Существует две основных причины для неправильного учёта потока источников: (i) плохое знание функции отклика прибора на точечный источник, что может привести к недочитанию или перевычитанию вклада источника в скорость счёта детектора; (ii) конечная непрозрачность закрытых элементов маски телескопа, что приведет к недооценке потока источника методом кодирующей апертуры и, следовательно, к недочитанию вклада потока источника в скорость счёта детектора.

Для того, чтобы определить точность функции отклика прибора на точечный источник, а также функцию отклика прибора “как коллима-

тора”, мы использовали многочисленные наблюдения яркого и постоянного рентгеновского источника – Крабовидной туманности, проведенные при различных его положениях в поле зрения телескопа.

Наша модель функции отклика прибора *IBIS/ISGRI* как коллиматора учитывает геометрию телескопа, а также зависимость от энергии и направления поглощения фотонов конструкционными особенностями телескопа *IBIS* [179]. Пример функции отклика для диапазонов энергии 17-60 кэВ и 86-129 кэВ представлен на Рис. 2.9.

Разность между предсказанной (в рамках модели функции отклика прибора *IBIS/ISGRI* как коллиматора) и измеренной скоростью счёта детектора для наблюдений Крабовидной туманности не демонстрирует зависимости от потока источника и наблюдаемый разброс значений не превышает систематических неопределённостей измерений. Следовательно, мы можем заключить, что ни процедура удаления вклада потоков источников из скорости счёта детектора, ни конечная прозрачность маски не вносят дополнительной систематической неопределённости в используемый метод.

2.2.3 Вклад точечных источников под порогом детектирования

Как уже отмечалось во Введении, все предыдущие измерения фонового излучения Галактики в жестком рентгеновском диапазоне имели значительный недостаток из-за того, что не могли достаточно точно учесть вклад потоков относительно ярких точечных источников в галактической плоскости. В нашей работе с помощью эксперимента *IBIS/ISGRI* поток от ярких ($L \gtrsim 10^{35}$ эрг/сек) точечных источников практически полностью (§2.2.2) вычитается из полной скорости счёта детектора. Однако, остаточный поток точечных источников под порогом детектирования, т.е. со светимостью $L \lesssim 10^{35}$ эрг/сек, может привести к смещению оценок потока ГРФ.

Для проверки “чистоты” измерения потока ГРФ можно использовать широкополосную функцию светимости галактических рентгеновских источников, полученную в работах [67, 72, 215], которая изображена на Рис. 2.4,2.5. Функция светимости состоит из двух широких компонент, которые возникают в результате вклада маломассивных рентгеновских двойных с нейтронными звездами и черными дырами (LMXB, $L \sim 10^{35} - 10^{39}$ эрг s^{-1}) и катаклизмических переменных вместе с коронально активными звездами ($10^{28} - 10^{34}$ эрг s^{-1}). Источники, дающие широкий пик на малых светимостях предположительно являются источниками излучения ГРФ. Таким образом, для того, чтобы получить “чистые” измерения ГРФ необходимо избавиться от вклада маломассивных двойных с нейтронными звездами и черными дырами, т.е. от вклада яркой компоненты функции светимостей,

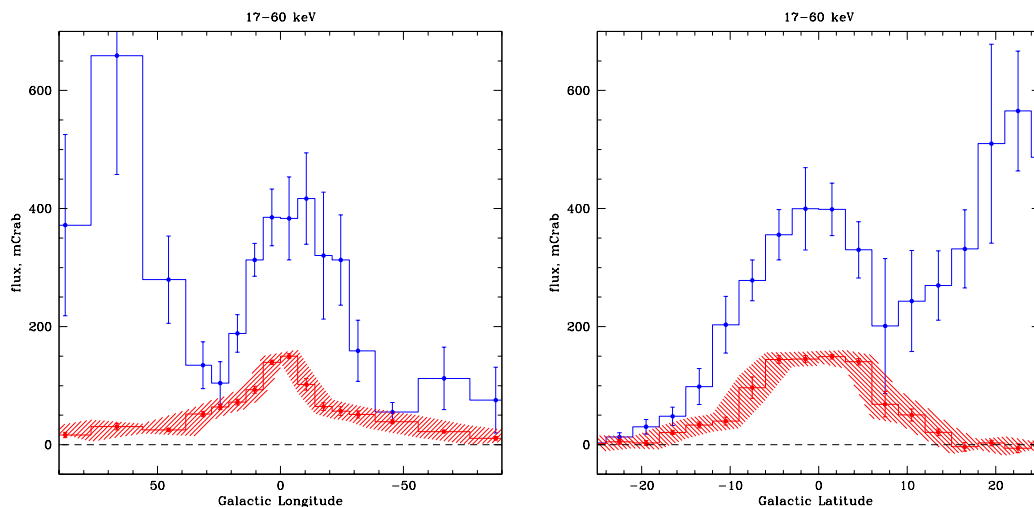


Рис. 2.10 Профиль поверхностной яркости фонового излучения Галактики в диапазоне энергий 17–60 кэВ по галактической долготе (красная гистограмма, слева) и широте (справа). При построении профилей использовались наведения обсерватории, центр которых находился в полосе $|b| < 5^\circ$ и $|l| < 5^\circ$, соответственно. Систематические ошибки измерения поверхностной яркости показаны заштрихованными областями. Суммарный вклад точечных источников излучения показан синей гистограммой. Ошибки на синей гистограмме показывают среднеквадратичные отклонения измерений суммарного потока всех источников в отдельных наблюдениях от среднего значения.

показанной на Рис.2.4.

Характерная экспозиция наблюдений, проведенных обсерваторией *ИНТЕГРАЛ* в любой точке галактической плоскости составляет 0.5-0.8 млн. сек., что соответствует пределу детектирования $\sim 10^{-11}$ эрг см^{-2} с^{-1} в полосе энергий 17–60 кэВ. При такой чувствительности маломассивные рентгеновские двойные в нашей Галактике (основная часть которых находится на расстоянии Галактического центра от нас) имеющие светимость выше $\sim 10^{35}$ эрг/сек будут задетектированы (и, следовательно, учтены) *ИНТЕГРАЛ*ом. А, как видно из Рис.2.4, вклад ЛМХВ меньших светимостей в полную излучательную способность единичной звездной массы Галактики гораздо меньше, чем вклад катаклизмических переменных и коронально активных звезд. Таким образом, мы можем сделать вывод, что чувствительность используемых наблюдений *ИНТЕГРАЛ*а достаточна для того, чтобы получать “чистые” измерения ГРФ.

2.3 Результаты

2.3.1 Морфология

Для каждого наведения обсерватории, были получены: 1) суммарный поток точечных источников, 2) скорость счёта детектора после вычета вклада точечных источников и 3) предсказанная скорость счёта инструментального фона.

На Рис. 2.10 показаны профили поверхностной яркости фонового излучения Галактики и суммарного излучения ярких точечных источников по галактической долготе и широте. Для профилей по долготе (широте), использовались наблюдения, при которых поле зрения находилось внутри полосы $\pm 5^\circ$ по галактической широте (долготе). Затем измеренный поток усреднялся в соответствующих интервалах по долготе и широте. Синей гистограммой показан суммарный поток точечных источников. Вертикальные отрезки на синей гистограмме показывают среднеквадратичное отклонение потоков источников, измеренных в отдельных наблюдениях, относительно среднего значения. На профиле по долготе виден вклад от хорошо известных ярких точечных источников расположенных в плоскости Галактики: Лебедь X-1 ($l \sim 70^\circ$), GRS 1915+105 ($l \sim 45^\circ$), и GX 301-2 ($l \sim -60^\circ$). На профиле по широте, виден пик от источника Скорпион X-1. Красной гистограммой показано измеренное распределение поверхностной яркости фонового излучения Галактики. Заптрихованная область показывает статистическую и систематическую неопределенность измерения поверхностной яркости ГРФ.

Поскольку телескоп *IBIS* использовался как спектрометр с коллиматором с полем зрения $\sim 15^\circ \times 15^\circ$ (ширина на полувысоте), то угловое разрешение полученных срезов поверхностной яркости (Рис. 2.10) составляет $\sim 15^\circ$. К сожалению, такое пространственное разрешение не позволяет исследовать морфологические особенности ГРФ на масштабе $1-2^\circ$, такие как балдж/бар в центральной части Галактики [45, 194] и спиральные рукава. Детальное определение структуры объёмной излучательной способности Галактики в излучении ГРФ при данном уровне чувствительности и углового разрешения не представляется возможным.

Однако, для того, чтобы извлечь информацию о трёхмерной структуре ГРФ, можно сравнить полученные профили поверхностной яркости с профилями поверхностной яркости других компонент излучения Галактики, пространственная структура которых хорошо изучена. В частности, было показано, что наилучшим образом фоновое излучение Галактики в стандартном рентгеновском диапазоне описывается пространственным распределением яркости Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне [195]. Мы так же сравним профили ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне с профилями яркости Галактики в ИК диапазоне.

Карта Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне была полу-

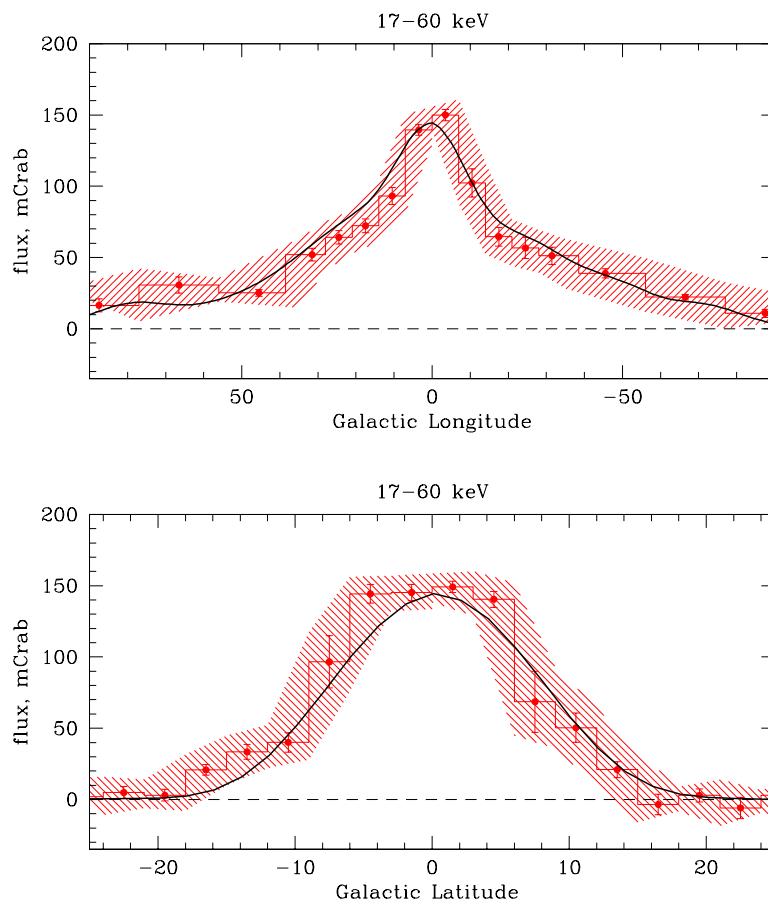


Рис. 2.11 Профиль поверхностной яркости фонового излучения Галактики в диапазоне энергий 17–60 кэВ вдоль галактической долготы (красная гистограмма с заштрихованной областью, верхняя панель) и широты (нижняя панель). Сплошная кривая показывает профиль поверхностной яркости Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне на длине волны 4.9 мкм. Профиль в инфракрасном диапазоне был свёрнут с функцией отклика телескопа *IBIS* как коллиматора на точечный источник. Нормировка ИК профиля была получена из пропорциональности рентгеновского и инфракрасного потоков (см. Рис. 2.13).

чена, используя данные прибора DIRBE обсерватории COBE (данные взяты из архива LAMBDA центра космических полётов им. Годдарда, <http://lambda.gsfc.nasa.gov>). Для того, чтобы уменьшить влияние эффекта межзвёздного покраснения, мы использовали спектральный диапазон, центрированный на длину волны 4.9 мкм.

Мы применили простейшую коррекцию на межзвёздное покраснение, используя предположение, что звёздное излучение Галактики в диапазоне 1.2–4.9 мкм, должно иметь спектральную форму, соответствующую излучению абсолютно чёрного тела с температурой $\sim 4000 - 5000$ К [114], а покраснение на длине волны 4.9 мкм значительно меньше, чем на 1.2 мкм.

$$A_{4.9 \text{ мкм}} = \frac{-2.5}{A_{1.2 \text{ мкм}}/A_{4.9 \text{ мкм}} - 1} \left[\ln \left(\frac{I_{1.2 \text{ мкм}}}{I_{4.9 \text{ мкм}}} \right) - \ln \left(\frac{I_{1.2 \text{ мкм}}^0}{I_{4.9 \text{ мкм}}^0} \right) \right]$$

где A – коэффициент межзвёздного покраснения на длине волны 1.2 и 4.9 мкм. Для вычислений использовались значения коэффициентов поглощения из работ [135, 90]. Приведенная коррекция, конечно же является приблизительной и, скорее всего, имеет точность не лучше, чем $\sim 10\%$.

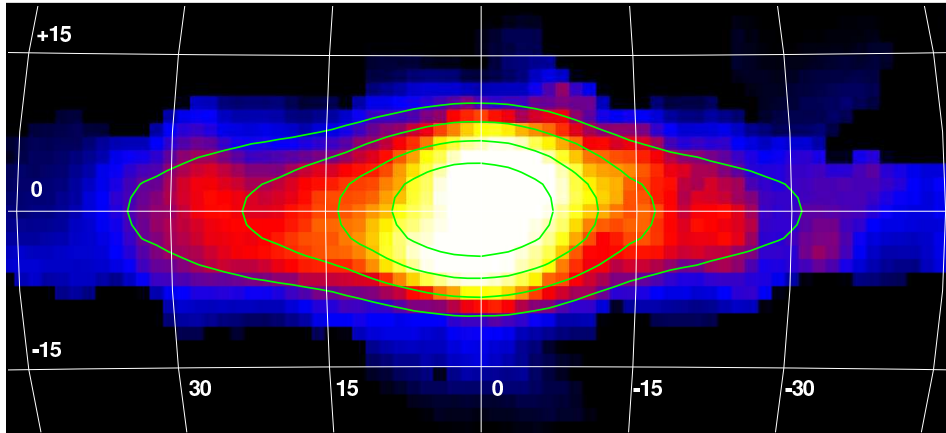


Рис. 2.12 Поверхностная яркость фонового излучения Галактики по данным эксперимента *IBIS/ISGRI* обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в диапазоне энергий 17–60 кэВ. Контуры показывают уровни одинаковой поверхностной яркости Галактики в инфракрасном диапазоне, на длине волны 4.9 мкм. Карта Галактики в инфракрасном диапазоне была свёрнута с функцией отклика телескопа *IBIS* как коллиматора на точечный источник. Уровни контуров соответствуют интенсивности $1.0, 1.4, 1.8, 2.2 \times 10^{-5}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ на поле зрения телескопа.

Карта излучения Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне была свёрнута с функцией отклика телескопа *IBIS* как коллиматора (Рис. 2.9). Полученные ИК профили показаны на Рис. 2.11. Зависимость потока ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне от собранного полем зрения

IBIS потока Галактики в ИК диапазоне показана на Рис. 2.13. Как видно из приведённых рисунков, распределение поверхностной яркости фонового рентгеновского излучения Галактики хорошо согласуется с картой Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне, которая отражает распределение звёздной массы в Галактике. Для сравнения полученной карты ГРФ с распределением излучения межзвёздного вещества в Галактике, мы приводим Рис. 2.14, где наряду с профилем распределения поверхностной яркости ИК излучения Галактики, показаны профили излучения молекулярного газа (радиоизлучение CO, 115 ГГц), нейтрального водорода (линия на длине волны 21 см.) и профиль интенсивности гамма-излучения Галактики¹, на энергиях выше 100 МэВ (см. также Рис. 2.2). Хорошо видно, что карта ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне не согласуется ни с одной из приведенных карт, кроме карты звёздного населения (ближний ИК диапазон), что полностью подтверждает результат исследования фонового излучения Галактики с помощью наблюдений обсерватории RXTE в диапазоне энергий 3–20 кэВ [194].

Предполагая линейную пропорциональность между излучательной способностью Галактики в жестком рентгеновском и ближнем инфракрасном диапазоне, можно оценить объёмное энерговыделение ГРФ в полосе энергий 17–60 кэВ по известной светимости Галактики в ИК диапазоне [45].

Коэффициент пропорциональности ИК и рентгеновского потока, измеренный на всём наборе данных (время экспозиции порядка 10 млн. сек.), используя модель фона детектора “1” (см. §2.2.1), даёт величину $F_{17-60 \text{ кэВ}}/F_{4.9 \text{ мкм}} = (7.52 \pm 0.33) \times 10^{-5}$ (Рис. 2.13). Используя более точную модель “2”, но на меньшем наборе наблюдений (экспозиция ~ 1 млн. сек.), отношение потоков равно $F_{17-60 \text{ кэВ}}/F_{4.9 \text{ мкм}} = (8.44 \pm 0.28) \times 10^{-5}$ (см. Рис. 2.15). Оба значения согласуются друг с другом, если учесть неопределённости измерений.

Интересно проверить пропорциональность поверхностной яркости Галактики в ИК и жестком рентгеновском диапазоне для разных областей Галактики. Для этого мы измерили отношение потоков для центральной части Галактики, где доминирует излучение от “балджа” ($|l| < 10^\circ$) и диска Галактики ($|l| > 20^\circ$). Результат представлен на Рис. 2.15. На доступном уровне точности, коэффициенты пропорциональности согласуются со значением, полученным по всей Галактике. Это позволяет сделать вывод об *одинаковых свойствах звёздного населения Галактики, образующих ГРФ, на больших угловых масштабах.*

Используя светимость галактического балджа в ближнем ИК диапазоне $\lambda = 4.9 \text{ мкм}$ из работы Двек и др. [45] $L_{4.9 \text{ мкм}}^{\text{балдж}} = 4.3 \times 10^7 L_\odot$, мы оценили светимость центральной части Галактики как $L_{17-60 \text{ кэВ}}^{\text{балдж}} = (1.23 \pm 0.05) \times$

¹Карты диффузного гамма-излучения, HI и CO были получены с помощью утилиты Skyview (<http://skyview.gsfc.nasa.gov>) на сайте NASA/GSFC.

10^{37} эрг с^{-1} . Предполагая, что масса балджа $M_{\text{балдж}} = 1 - 1.3 \times 10^{10} M_{\odot}$ (например, Двек и др. [45]), удельная светимость ГРФ на единицу массы Солнца составляет $L_{17-60 \text{ кэВ}}/M_{\text{балдж}} = 0.9 - 1.2 \times 10^{27}$ эрг/сек/ M_{\odot} .

Предполагая отношение массы диска Галактики и балджа как 2:1, мы оценили полную светимость Галактики в диапазоне энергий 17–60 кэВ как $(3.7 \pm 0.2) \times 10^{37}$ эрг с^{-1} .

2.3.2 Спектр ГРФ

Используя специальные наблюдения галактического Центра, дающие минимальные систематические неопределенности при оценке инструментального фона детектора (см. §2.2.1), был построен спектр фонового излучения Галактики в полосе энергий 17–200 кэВ, который изображен на Рис. 2.16. На рисунке также показан суммарный спектр точечных источников в области галактического Центра.

После вычитания вклада от точечных источников в полную скорость счета детектора *ISGRI* не обнаружено значимого сигнала от фонового излучения Галактики на энергиях выше 50–60 кэВ, что указывает на *обнаружение резкого обрыва спектра в жестком рентгеновском диапазоне, предсказанного на основании гипотезы о суммарном излучении аккрецирующих белых карликов как основной компоненте излучения ГРФ на этих энергиях*. Верхний предел на поток ГРФ из области галактического Центра (с поле зрения телескопа *IBIS*) в полосе энергий 57–86 кэВ составляет ~ 60 мКраб (2σ), что показано на профиле интенсивности ГРФ по галактической широте (Рис. 2.17, сверху).

Выше было показано, что объёмная излучательная способность ГРФ согласуется с распределением звёздной массы Галактики. Это даёт нам возможность построить широкополосный спектр фонового излучения Галактики единичной массы звёздного вещества. Пересчет потока ГРФ в каждом энергетическом диапазоне в излучательную способность единичной звёздной массы Галактики делался через карту поверхностной яркости Галактики в ИК диапазоне. Карта поверхностной яркости Галактики в ИК диапазоне была свёрнута с функцией отклика телескопа *IBIS* как коллиматора *в соответствующем энергетическом диапазоне*. Последнее особенно важно, т.к. форма функции отклика телескопа изменяется при переходе к высоким энергиям (см. Рис. 2.9). Используя полученные коэффициенты и удельную светимость Галактики в ИК диапазоне 4.9 мкм, мы построили широкополосный спектр ГРФ единичной звёздной массы (Рис. 2.18).

2.4 Обсуждение

Полученный спектр ГРФ можно сравнить с композитным спектром слабых рентгеновских источников. К сожалению, для получения такого спектра необходимо иметь измерения спектров всех источников, использованных для построения функции светимости слабых рентгеновских источников в Галактике [215] (Рис. 2.4). Ввиду отсутствия такого набора спектров, мы построили приближенный композитный спектр этих источников, используя предположение, что источники одного класса имеют одинаковую форму спектра.

В качестве исходных спектров были взяты спектры: V711 Tau (двойная система с коронально активной звездой), AM Her (поляр – аккрецирующий белый карлик с сильным магнитным полем), SU UMa (карликовая новая – аккрецирующий белый карлик со слабым магнитным полем). Для спектра промежуточных полярных (аккрецирующих белых карликов с промежуточным значением величины магнитного поля), которые вносят основной вклад в излучение ГРФ на энергиях выше ~ 20 -ти кэВ, мы использовали модельный спектр из работы [225] для массы белого карлика $0.5M_{\odot}$.

Температура оптически тонкой плазмы, излучающей на поверхности аккрецирующего магнитного белого карлика, зависит, в основном, от его массы [см., например, 3]. Это происходит из-за того, что температура такой оптически тонкой плазмы задается температурой аккрецирующего вещества после его прохождения через ударную волну у поверхности белого карлика (см. Рис.2.3). Температура плазмы за фронтом ударной волны равняется приблизительно вириальной температуре у поверхности белого карлика:

$$kT \sim \frac{GM_{\text{WD}}}{R_{\text{WD}}}$$

что означает, что в диапазоне масс $M_{\text{WD}} \sim 0.3 - 1.0M_{\odot}$, температура плазмы $kT \propto M^{1.6-1.7}$ (из отношения масс–радиус для белого карлика, см. например в [160]), т.е. достаточно сильно чувствительна к значению массы БК. Теоретические расчеты эволюции звезд предсказывают, что средняя масса белых карликов в нашей Галактике должна быть равна приблизительно $\sim 0.5M_{\odot}$ [см., например, 18, 19, 103, 171]. Как видно из Рис. 2.18, модельный спектр излучения аккрецирующих белых карликов с массой $\sim 0.5M_{\odot}$ (пунктирная кривая) хорошо согласуется с измеренным спектром ГРФ (синие точки). Для сравнения приведены также модельные спектры с массами белого карлика 0.3 и 0.5 массы Солнца. Видно, что завал в этих спектрах не согласуется с измеренной формой спектра ГРФ.

Используя результаты, приведенные выше, мы можем заключить, что: *форма спектра фонового излучения Галактики, на энергиях выше 20-ти кэВ, может быть использована для определения средней массы аккреци-*

рующихся белых карликов в Галактике. Точная оценка средней массы белых карликов в таких системах, возможна только при более точном определении относительного вклада отдельных классов источников в ГРФ. На данном уровне доступной точности, мы можем заключить, что средняя масса аккрецирующих белых карликов согласуется с величиной 0.5 массы Солнца, предсказываемой по результатам эволюционных расчетов.

2.5 Заключение

1. Показано, что распределение поверхностной яркости ГРФ в полосе энергий 17–60 кэВ, хорошо согласуется с распределением поверхностной яркости Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне. Это полностью подтверждает результат, полученный в диапазоне энергий 3–20 кэВ [194]. Распределение поверхностной яркости диффузного гамма-излучения Галактики, излучения нейтрального межзвёздного водорода (карта *HI*) и молекулярного газа (карта *CO*) не согласуется с полученной картой ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне. Используя пропорциональность между картами Галактики в ближнем ИК и жестком рентгеновском диапазоне, была получена оценка объёмной светимости ГРФ единицы звёздной массы в полосе энергий 17–60 кэВ $(0.9 - 1.2) \times 10^{27}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{M}_{\odot}^{-1}$. Это значение согласуется (с учетом энергетического диапазона) со значением излучательной способности слабых рентгеновских источников Галактики [215, 194]. Оценка полной рентгеновской светимости фонового излучения Галактики составляет $(3.7 \pm 0.2) \times 10^{37}$ эрг с^{-1} в диапазоне 17–60 кэВ.

Однако следует отметить, что различие морфологии ГРФ в жестком рентгеновском и гамма-диапазоне не является достаточным аргументом, для того, чтобы полностью отвергнуть гипотезу диффузного образования ГРФ. Действительно, жесткое рентгеновское излучение Галактики может образоваться в результате тормозного излучения низкоэнергетичных ($\lesssim 0.5 \text{MэВ}$) электронов космических лучей (см., например, [222, 139, 208, 82]), заключенных в некоторой ограниченной области в непосредственной близости от места их рождения особой конфигурацией магнитного поля. Такая конфигурация излучающих областей возможна, из-за того, что длина свободного пробега электронов таких энергий мала в присутствии хоть и слабого, но “запутанного” магнитного поля Галактики [269] (движение таких заряженных частиц практически невозможно в направлениях, перпендикулярных линиям магнитного поля). Если, предположить, что пространственное расположение таких излучающих областей повторяет распределение звёздной массы Галактики, то морфология жесткого фонового излучения Галактики будет повторять распределение излучения в ближнем инфракрасном диапазоне.

2. Показано, что коэффициент, связывающий значения поверхностной яркости Галактики в излучении ГРФ (17–60 кэВ) и в ближнем ИК диапа-

зоне, одинаков (с точностью до погрешностей измерений) в разных областях Галактики (диск Галактики, центральная часть/балдж, и вся Галактика), что позволяет сделать вывод об одинаковых свойствах звёздного населения Галактики, образующих ГРФ, на больших угловых масштабах.

3. Получен спектр ГРФ в диапазоне энергий 17–200 кэВ. В спектре обнаружен резкий обрыв на энергиях 50–60 кэВ. Форма спектра согласуется со спектральной формой излучения аккрецирующих магнитных белых карликов в двойных системах. Вклад этих систем в общее излучение ГРФ является преобладающим в этом диапазоне энергий. Форма спектра позволяет сделать приблизительную оценку средней массы аккрецирующих белых карликов в Галактике, которая составляет $\sim 0.5M_{\odot}$.

4. Показано, что фоновое излучение Галактики не детектируется в диапазоне энергий ~ 60 –200 кэВ. Верхний предел на излучение ГРФ в полосе энергий 57–86 кэВ составляет ~ 60 мКраб (2σ) для прибора с полем зрения телескопа *IBIS* ($\sim 28^{\circ} \times 28^{\circ}$). Обнаруженный ранее сигнал от ГРФ в этом диапазоне энергий (например, [220]), скорее всего принадлежит излучению неучтенных точечных источников с жестким рентгеновским спектром (например, АЯГ).

Следует отметить, что свойства модели инструментального детектора *ISGRI* резко ухудшаются на энергиях выше 100 кэВ. Поэтому, для того, чтобы поставить уверенные верхние пределы на излучение или измерить излучение ГРФ на этих энергиях, необходимо существенным образом модифицировать модель инструментального фона детектора *ISGRI* либо провести глубокие наблюдения ГРФ в специальной моде “качающегося коллиматора”.

Полученные результаты, полностью подтверждают выводы исследования ГРФ в диапазоне энергий 3–20 кэВ [194, 195], внося существенный вклад в разрешение 30-летнего спора о природе образования фонового рентгеновского излучения Галактики.

Сейчас можно с уверенностью сказать, что по меньшей мере большая часть галактического рентгеновского фона является результатом суперпозиции излучения двойных звёздных систем Галактики малой рентгеновской светимости $10^{28} - 10^{34}$ эрг/сек. Основной вклад в излучение ГРФ на малых энергиях ($\lesssim 10$ кэВ) вносят звёзды или звёздные системы со вспышечной активностью. В области больших энергий, становится доминирующим вклад аккрецирующих белых карликов со слабым (промежуточные поляры) или сильным (поляры) магнитным полем.

В заключение следует отметить недавний прогресс в разрешении потока ГРФ на точечные источники в области малых энергий $\lesssim 10$ кэВ. Результаты наблюдения области галактического Центра на спутнике Чандра, показали, что около 40% ГРФ в полосе 4–8 кэВ, объясняется суммарным излучением слабых точечных источников [196]. В работе [197] было проведено исследование близкой карликовой галактики М32, фоновое рентгеновское излучение которой (после вычета потока от ярких

точечных источников) также демонстрирует пропорциональность рентгеновского потока и плотности старого звездного населения.

Перспективы исследования фонового излучения Галактики в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах

Общий вид спектра излучения Галактики в “фоновых” компонентах показан на Рис. 2.19. Наиболее изученной областью до недавнего времени, оставался участок гамма-диапазона от десятков МэВ до сотен ГэВ. Предполагалось, что диффузная природа образования фонового излучения “продолжается” и в область малых энергий, до десятков кэВ. Результаты исследования ГРФ в диапазоне 3-20 кэВ [194, 195] и результаты, полученные в настоящей работе показали, что галактический фон в полосе энергий 3–100 кэВ обязан своим происхождением звездному населению Галактики, а не межзвездному газу. Это открытие ставит новый вопрос: на каких энергиях происходит смена природы формирования фона от суперпозиции излучения слабых компактных источников к диффузному излучению межзвездного вещества? Для ответа на этот вопрос, необходимо детально исследовать излучение Галактики в области энергий от 100 до МэВ. В области центра Галактики в такой полосе энергий серьезным ограничивающим фактором может стать диффузное излучение позитронного континуума [36], вклад которого в полную поверхностную яркость становится доминирующим на энергиях 300-500 кэВ.

Вклад ярких компактных источников в общее излучение Галактики, на энергиях 100-500 кэВ уменьшается, но остаётся довольно высоким по сравнению с вкладом фонового излучения (см. Рис. 2.16). Поэтому, для исследования галактического фона в этом диапазоне энергий также необходим прибор, способный собирать поток с достаточно большого телесного угла и отделять поток от точечных источников.

Как уже отмечалось выше, эксперимент *IBIS/ISGRI* обладает необходимыми характеристиками, но 1) эффективная площадь детектора *ISGRI* значительно уменьшается на энергиях выше 100 кэВ и 2) качество модели фона сильно падает на этих энергиях. Фактически единственным способом избежать проблем, связанных с недостатками модели инструментального фона детектора *ISGRI* является использование специальной программы наблюдений, аналогично той, которая дала нам возможность построить спектр ГРФ высокого качества в диапазоне 17-100 кэВ.

В этих наблюдениях оптическая ось телескопов перенаводилась с высоких галактических широт в низкие ($\pm 30^\circ$) через галактическую плоскость. Это позволило использовать очень простую и эффективную модель фона “качающегося коллиматора”. Полное время экспозиции составило около миллиона секунд. В настоящее время обсерваторией ИНТЕГРАЛ проводится серия таких наблюдений с ожидаемой экспозицией 4 млн. секунд. Для того, чтобы избежать влияния позитронного континуума, широтные перенаведения проводятся вдали от галактического цен-

тра, в районе долготы $l = 315^\circ$. Ожидается, что использование этих наблюдений позволит построить спектр галактического фона до энергий, где начнется вклад диффузного излучения Галактики, возникающего при взаимодействии электронов космических лучей и межзвездной среды.

Для исследования галактического фона в гамма-диапазоне также может использоваться спектрометр *SPI*. Прибор обладает сходным полем зрения ($35^\circ \times 35^\circ$), как у *IBIS/ISGRI*, но существенно лучшей чувствительностью на энергиях выше 200-300 кэВ, благодаря применению толстых германиевых детекторов. Однако спектрометр имеет плохое угловое разрешение ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$), что сильно затрудняет учёт вклада от точечных источников на энергиях, где их поверхностная плотность достаточно велика.

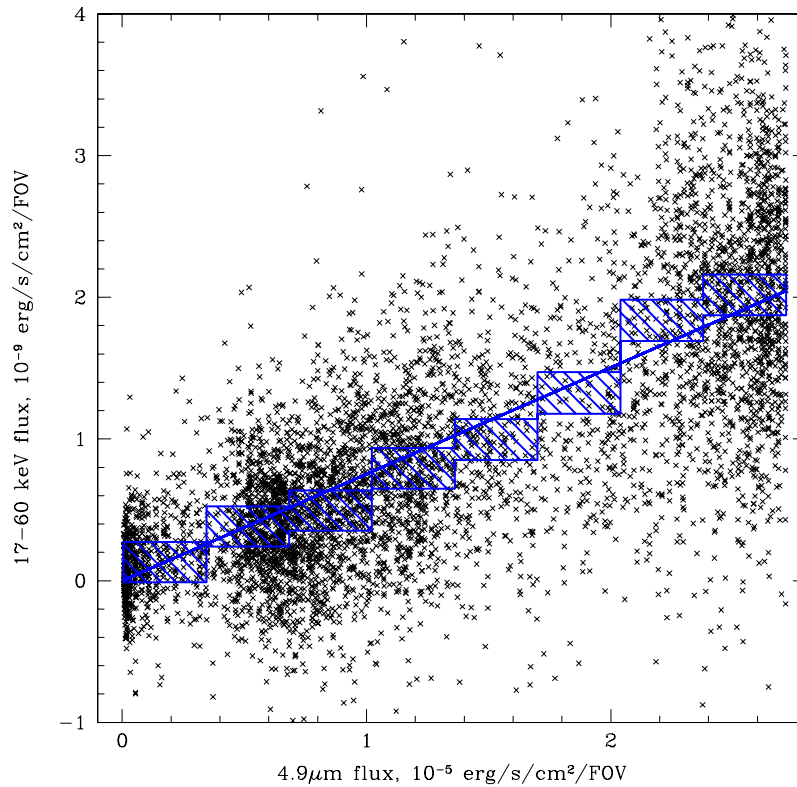


Рис. 2.13 Зависимость значения поверхностной яркости ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне 17–60 кэВ от значения поверхностной яркости Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне на длине волны 4.9 мкм. Каждая точка на рисунке соответствует индивидуальному наведению обсерватории. Значение по оси абсцисс – измеренный поток в ИК, по оси ординат – поток ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне энергий, собранный полем зрения телескопа *IBIS*. Разброс значений по оси ординат совместим со статистической и систематической неопределенностями измерения потока ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне. Значения рентгеновского потока, усредненные по интервалам в ИК диапазоне, показаны синими прямоуголиками. Полувысота прямоугольников показывает неопределенность измерения потока ГРФ в данной работе. В большинстве случаев, в этой неопределенности преобладают систематические ошибки модели инструментального фона детектора (~ 10 мКраб). Аппроксимация зависимости линейной моделью показана сплошной прямой. Коэффициент пропорциональности $F_{17-60\text{кэВ}}/F_{4.9\text{мкм}} = (7.52 \pm 0.33) \times 10^{-5}$.

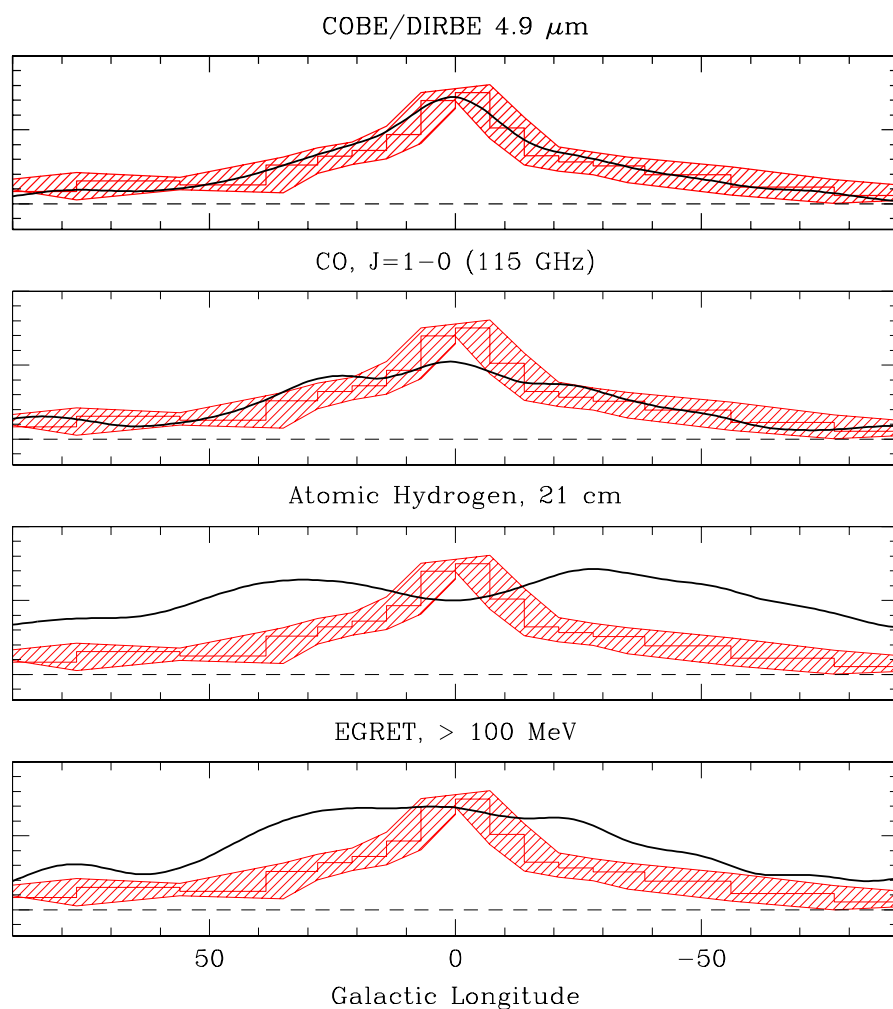


Рис. 2.14 Сравнение распределения поверхностной яркости ГРФ в полосе энергий 17–60 кэВ (красная гистограмма с заштрихованной областью) с поверхностными яркостями излучений, рождаемых межзвездной средой Галактики. *Сплошная кривая, сверху вниз:* поверхностная яркость Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне на длине волны 4.9 мкм, распределение излучения молекулярного газа (радиоизлучение CO, 115 ГГц), нейтральный водород (линия 21 см.) и профиль поверхностной яркости Галактики на энергиях выше 100 МэВ, по данным телескопа EGRET обсерватории имени Комптона (см. Рис. 2.2). Все профили поверхностных яркостей были свернуты с функцией отклика телескопа *IBIS* как коллиматора. Нормировка профилей (кроме первого) была выбрана произвольно из соображений удобства сравнения.

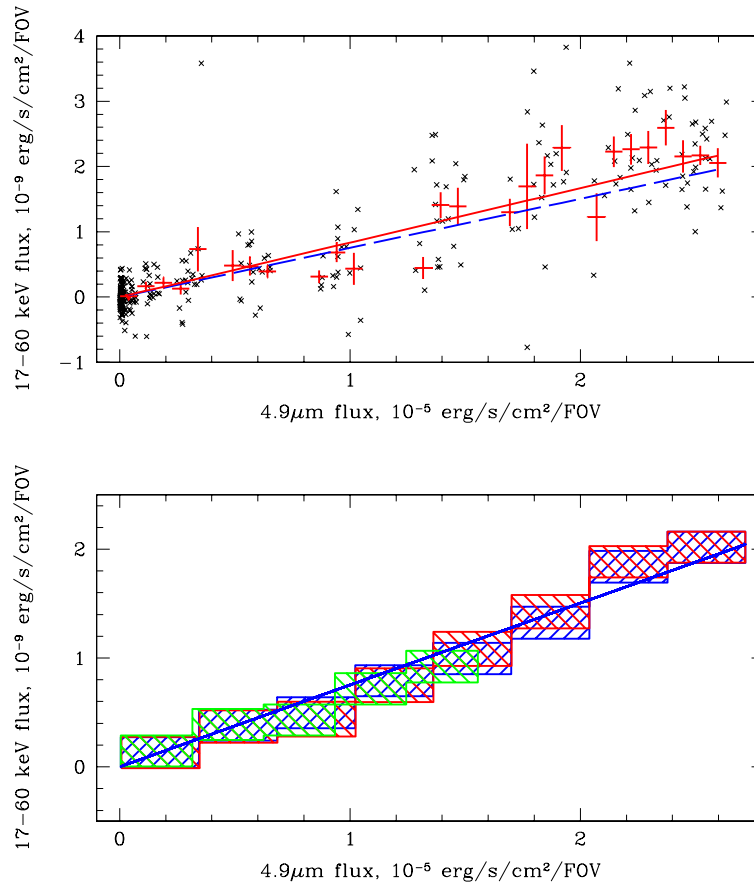


Рис. 2.15 **Верхняя панель:** Точки показывают зависимость потока Галактики в излучении ГРФ (*IBIS/ISGRI*, 17–60 кэВ) от потока в инфракрасном диапазоне (*COBE/DIRBE*, 4.9 мкм). Измерения потока ГРФ в жестком рентгеновском диапазоне проводились по данным быстрых перенаведений поля зрения телескопа *IBIS* вдоль галактического меридиана через центр Галактики (“качающийся коллиматор”, модель фона детектора “2”, §2.2.1). Значение ГРФ в каждом наведении представлено точкой на рисунке. Рентгеновский поток, усреднённый в интервалах ИК потока, показан красными точками. Коэффициент линейной пропорциональности $(8.44 \pm 0.28) \times 10^{-5}$ (красная линия). Синяя заштрихованная прямая показывает линейную модель $F_{17-60\text{кэВ}}/F_{4.9\text{мкм}} = 7.52 \times 10^{-5}$, полученную на всём наборе данных (с использованием модели фона “1”). На **нижней панели** показана зависимость жесткого рентгеновского потока ГРФ (усреднённого в интервалах ИК потока) и инфракрасного потоков, используя весь набор данных, для разных областей Галактики: галактический центр/балдж ($|l| < 10^\circ$, красные прямоугольники) и диск ($|l| > 20^\circ$, зелёные прямоугольники). Для сравнения синим цветом показаны результаты, полученные по всей Галактике.

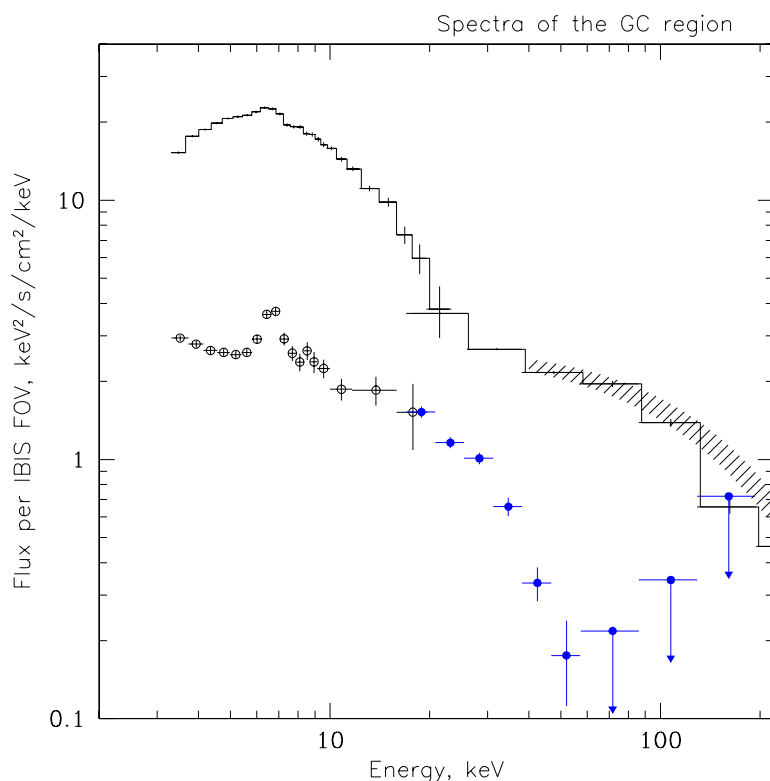


Рис. 2.16 Спектр области галактического Центра в диапазоне энергий 3–200 кэВ для прибора с полем зрения $\sim 15^\circ \times 15^\circ$. Точки на энергиях выше 17-ти кэВ получены по данным эксперимента *IBIS/ISGRI*. Стрелки изображают 2σ – верхние пределы на поток в соответствующем энергетическом канале. Точки в полосе энергий 3–20 кэВ получены прибором *PCA* обсерватории *RXTE* (наблюдения галактического балджа 15-го марта 1999 г.). Нормировка была выбрана таким образом, чтобы совместить спектр со спектром, полученным *IBIS/ISGRI* на энергии 20 кэВ. Спектр фонового излучения Галактики показан кружками, *RXTE/PCA* – открытыми, и *IBIS/ISGRI* – закрытыми, соответственно. Суммарный поток от ярких точечных источников представлен гистограммой. Заштрихованная область – аппроксимация спектра галактического Центра, измеренного прибором *OSSE* гамма-обсерватории им. Комптона (1991 – 2000 гг.). Спектр приведен с вычетом вклада от позитронного континуума [95] и нормировкой, позволяющей совместить спектры *OSSE* и *IBIS/ISGRI* на энергии 30-40 кэВ.

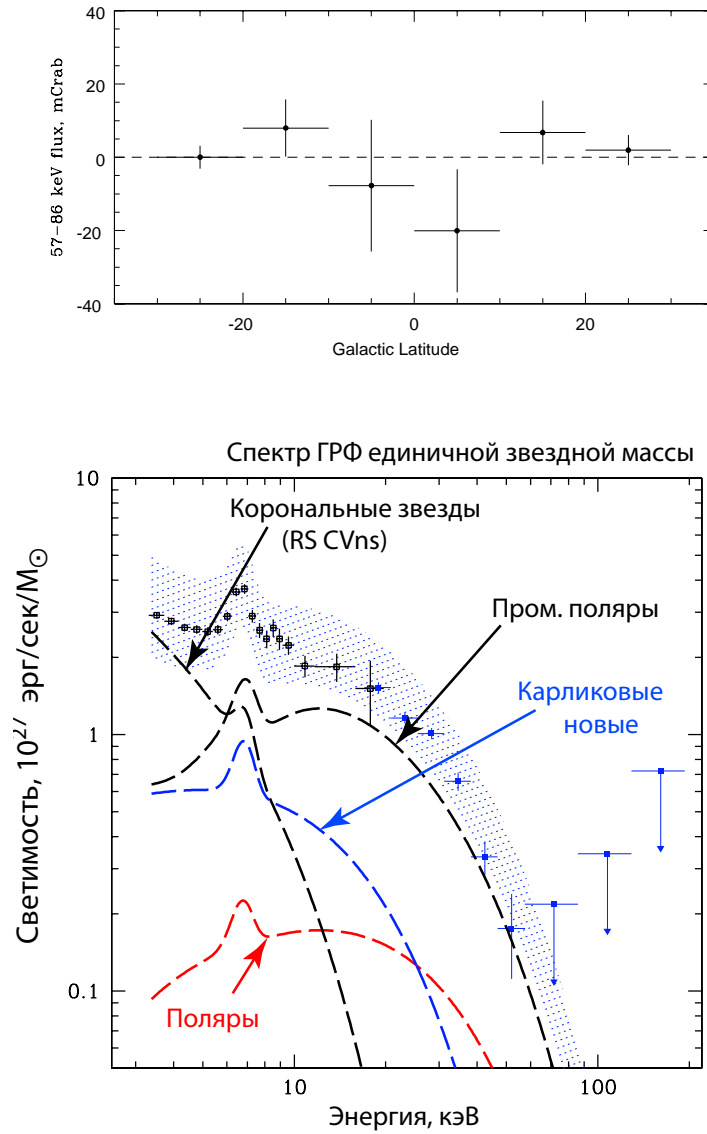


Рис. 2.17 **Верхняя панель:** Профиль поверхностной яркости фонового излучения Галактики по галактической широте в диапазоне энергий 57–86 кэВ. Как видно из рисунка, только верхний предел на излучение ГРФ может быть получен в этом диапазоне энергий. **Нижняя панель:** Широкополосный спектр единичной звёздной массы Галактики по данным обсерваторий *RXTE* и *ИНТЕГРАЛ*. Синие точки спектра получены в данной работе (*IBIS/ISGRI*). Выделенная область показывает композитный спектр, составленный из типичных спектров представителей классов источников, сложенных с весом соответствующим их вкладу в ГРФ [215]. Вклад отдельных классов источников показан штриховыми кривыми.

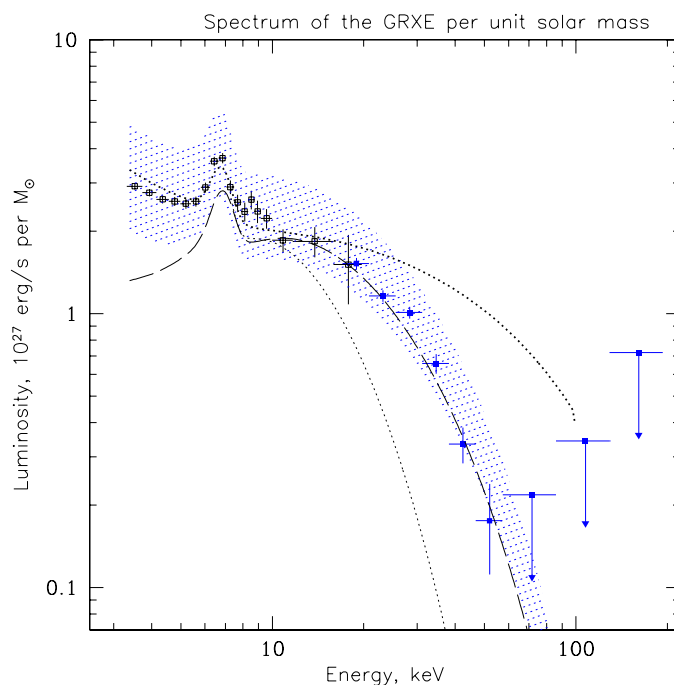


Рис. 2.18 Широкополосный спектр ГРФ единичной звёздной массы по данным обсерваторий *RXTE* и *ИНТЕГРАЛ* (см. подпись к Рис. 2.17). Штриховой кривой показан модельный спектр ГРФ, в котором для спектров промежуточных полярных звезд использовался модельный спектр излучения белого карлика с массой $0.5M_{\odot}$. Форма спектра в области малых энергий является приближенной, из-за большой неопределенности относительного вклада в ГРФ коронально-активных звезд и катаклизмических переменных. Для сравнения, на рисунке приведены модельные спектры для излучения промежуточных полярных звезд с белыми карликами с массой 0.3 и 1.0 массы Солнца (пунктирные кривые).

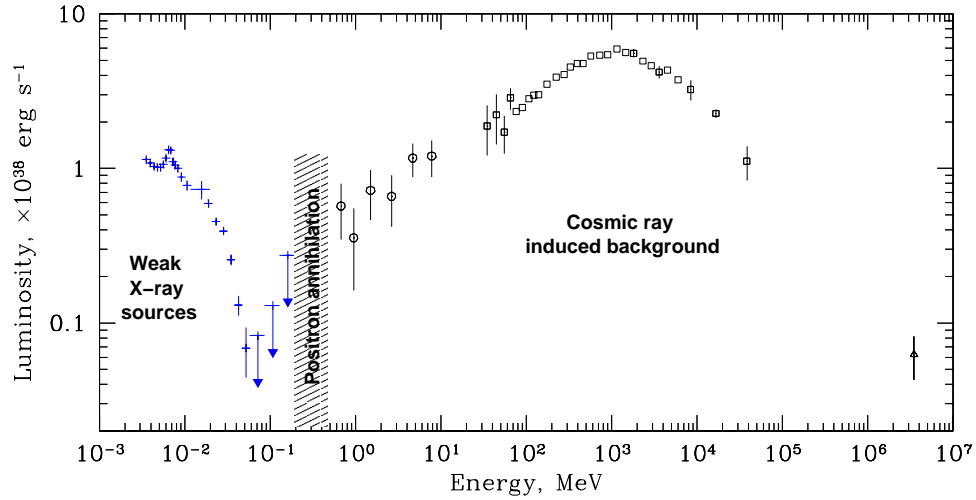


Рис. 2.19 Широкополосный спектр Галактики в “фоновых” компонентах в диапазоне энергий 3 кэВ – 4 ТэВ. В области энергий 3–100 кэВ фоновое излучение образуется в результате суперпозиции излучения слабых компактных источников, таких как коронально активные звёзды и катаклизмические переменные. В гамма-диапазоне излучение образуется в результате взаимодействия частиц космических лучей с веществом межзвёздной среды: 1) распад π_0 -мезонов, 2) обратное комптоновское рассеяние фотонов видимого и инфракрасного диапазонов, а также фотонов реликтового излучения на релятивистских электронах, 3) тормозное излучение электронов космических лучей. Спектр ГРФ единичной звёздной массы (Рис. 2.18) был отмасштабирован на массу Галактики $3.9 \times 10^{10} M_{\odot}$. Нормировка спектра в γ -диапазоне посчитана принимая во внимание полную светимость Галактики на энергиях > 100 МэВ, определенную в работе [24] $L_{>100\text{МэВ}} = 2 \times 10^{39}$ эрг s^{-1} . Относительные доли разных компонент излучения Галактики не являются постоянными, а варьируются в зависимости от места в Галактике. Измерения в гамма-диапазоне по данным CGRO/OSSE и CGRO/EGRET были взяты из работ [95], точки в ТэВ-диапазоне получены экспериментом Milagro [4, 176]. Заштрихованная область показывает область преобладания излучения позитронного континуума в Центре Галактики.

Часть 3

Космический Рентгеновский Фон

3.1 Введение

Обнаружение фонового излучения в рентгеновском диапазоне – Космического Рентгеновского Фона (КРФ), было одним из первых открытий рентгеновской астрономии (Джаккони и др., 1962, [59]). Однородность поверхностной яркости КРФ сразу стала указанием на его внегалактическое происхождение. В последующие несколько десятков лет и до настоящего времени определение природы фонового излучения Вселенной и его детальное изучение, является одной из важнейших задач рентгеновской астрофизики, а также важнейшим инструментом для получения информации о космологической эволюции Вселенной.

Практически сразу же после открытия КРФ стало ясно, что скорее он является результатом суперпозиции излучения большого числа точечных источников, чем излучением “горячей” межгалактической среды (см., например обзор Сетти и Риса, 1970 [218]). Действительно, при наличии такого количества горячей межгалактической плазмы во Вселенной ее оптическая толщина по комптоновскому рассеянию была бы достаточной для того, чтобы существенно исказить спектр микроволнового/реликтового фона, что не наблюдается.

Фоновое излучение Вселенной было обнаружено в широком диапазоне энергий, начиная от долей кэВ, до гамма-диапазона, на энергиях МэВ-ГэВ. Одно из наилучших измерений КРФ в области рентгеновского и жесткого рентгеновского диапазона было проведено на спутнике HEAO1 в полосе энергий 3-400 кэВ [141, 76].

Максимум энергии излучения КРФ приходится на диапазон энергий 20-40 кэВ. Однако, в этом диапазоне энергий угловое разрешение и чувствительность существующих инструментов недостаточны для того, чтобы разрешать значимую долю фонового излучения на отдельные источники, и, следовательно, в этом диапазоне практически невозможно изучение излучения объектов на больших красных смещениях.

Усилия разрешить фоновое излучение на точечные источники успешно предпринимались в области мягкого рентгеновского диапазона <10 кэВ.

Значительный прогресс был достигнут на спутниках EINSTEIN, ROSAT и на обсерваториях последнего поколения Чандра и XMM-Newton. На данный момент установлено, что подавляющая доля потока внегалактического фона на энергиях ниже 5-ти кэВ образуется в результате излучения активных ядер галактик [69] на различных красных смещениях, излучение в которых образуется при аккреции вещества на сверхмассивную ($\gtrsim 10^6\text{--}10^9 M_\odot$) чёрную дыру. Около 80% потока КРФ в полосе энергий 2-6 кэВ и 50-70% в диапазоне 6-8 кэВ было разрешено на излучение отдельных активных ядер галактик (см. обзор в [29]). На энергиях выше 10 кэВ, где наблюдается основное энерговыделение КРФ, чувствительность телескопов не позволяет разрешить больше нескольких процентов от общего потока. Однако, ожидается, что излучение АЯГ преобладает в фоновом излучении вплоть до энергий как минимум нескольких сотен кэВ.

Глубокие (высококчувствительные) обзоры, проведённые обсерваториями Чандра и XMM-Newton, дали большое количество информации по космологической эволюции АЯГ и росту сверхмассивных чёрных дыр во Вселенной. В частности, было обнаружено уменьшение средней светимости АЯГ с одновременным увеличением их общего числа при переходе от больших красных смещений к малым [8]. Другой важный результат связан с открытием большого числа поглощённых АЯГ на средних и больших красных смещениях. Однако, при всех успехах глубоких обзоров, невозможно построить картину эволюции АЯГ и роста сверхмассивных черных дыр без отправной точки на красном смещении $z=0$ (ближняя Вселенная), которую можно получить лишь исследованием всего неба. Для того, чтобы максимально избавиться от эффектов селекции по величине колонки фотопоглощения (АЯГ с большими значениями колонки поглощения в спектре с меньшей вероятностью будут задетектированы в обзоре при одной и той же “внутренней”, до фотопоглощения, светимости), неизбежно присутствующих в прошлых обзорах неба, например, обсерватории ROSAT, необходимо провести обзор неба именно в жестком рентгеновском диапазоне.

В обзоре всего неба в диапазоне 3–20 кэВ, полученным по данным сканирующих наблюдений обсерватории *RXTE*, было обнаружено около ста активных ядер галактик на высоких галактических широтах $|b| > 10^\circ$ [186, 210]. По результатам обзора была получена функция светимости близких ($z \lesssim 0.1$) АЯГ и распределение источников по колонке поглощения. Несмотря на то, что данный обзор был проведен в диапазоне более высоких энергий, чем обзоры на спутниках Чандра и XMM-Newton, он все еще подвержен сильному влиянию эффектов селекции по величине колонки поглощения при $N_H \gtrsim 10^{23} \text{ см}^{-2}$.

Подсчет внегалактических источников в некоторых участках неба в жестком рентгеновском диапазоне энергий был проведен в серии работ [106, 14, 15]. Основной недостаток этих обзоров заключается в том, что они покрывали только небольшие участки неба и выборка источников в та-

ких обзорах не являлась статистически “чистой”. Из-за того, что большая часть АЯГ, обнаруженных в данных обзорах, являлась целью проведенных наблюдений, очень трудно получить несмещенные оценки объемных и поверхностных плотностей АЯГ, основываясь на таких наблюдениях. С этой точки зрения, обзор всего неба, представленный в данной работе, обладает важнейшим преимуществом: он позволяет получить статистически чистую выборку источников на всем небе, и, следовательно, получить несмещенные оценки свойств популяции близких АЯГ.

Изучение свойств популяции АЯГ на малых красных смещениях является ключевым ингредиентом в вопросе космологической эволюции АЯГ, а также позволяет получить крупномасштабную структуру распределения массы в ближней Вселенной.

В числе задач, решение которых планировалось достичь, анализируя полученный обзор неба, можно перечислить следующие:

- Получить распределение поверхностной плотности АЯГ по небу, оценить вклад излучения близких (ярких) АЯГ в полное излучение КРФ,
- Построить функцию светимости близких АЯГ, максимально свободную от эффектов селекции по величине колонки фотопоглощения в спектре,
- Получить информацию о крупномасштабной анизотропии объемной плотности АЯГ, которая может быть связана с наблюдаемой неравномерностью в распределении видимой массы в ближней (<100 Мпк) Вселенной.

3.2 Кривая подсчетов АЯГ

Среди источников обзора, обнаруженных на статистически значимом уровне детектирования, 131 объект идентифицирован как активное ядро галактики. На карте неба, усредненной по всем наблюдениям, 94 источника детектируются на уровне значимости выше 5σ , среди них 86 АЯГ и 8 блазаров. Последние являются особым классом источников, излучение которых сильно сколламировано в нашем направлении, поэтому в дальнейшем мы не будем их рассматривать в ходе изучения популяции АЯГ (кроме того, их объемная плотность очень мала по сравнению с объемной плотностью обычных АЯГ).

Каталог также содержит 40 объектов неопределенной в настоящее время природы. Относительная доля таких источников сильно уменьшается при рассмотрении внегалактических полей ($|b| > 5^\circ$) до 6-ми (при соответствующем числе АЯГ 69).

Чувствительность полученного обзора не является величиной, независящей от направления на небе, поэтому для получения кривой подсчетов АЯГ необходимо учесть чувствительность наблюдений. Используя зависимость площади покрытия обзора от величины предельного потока $A(f)$, изображенную на Рис. 1.5, можно получить кумулятивную кривую подсчетов следующим способом:

$$N(> f) = \sum_{f_i > f} A(f_i)^{-1}. \quad (3.1)$$

На Рис. 3.1 показана кумулятивная кривая подсчетов внегалактических источников ($|b| > 5^\circ$), в диапазоне энергий 17–60 кэВ, исключая источники с неизвестной природой. Кумулятивная кривая подсчетов может быть также выражена через соответствующую дифференциальную форму dn/df , которая определяет число источников на единицу площади, с потоками внутри интервала df :

$$N(> f) = \int_f^\infty \frac{dn}{df} df. \quad (3.2)$$

Дифференциальная функция подсчетов обычно описывается степенным законом:

$$\frac{dn}{df} = C \times f^{-\alpha}, \quad (3.3)$$

который, может быть преобразован в интегральную форму:

$$N(> f) = \frac{C}{\alpha - 1} \times f^{-\alpha+1}. \quad (3.4)$$

Параметры кумулятивной кривой подсчетов (3.4) были определены, используя метод максимального правдоподобия [43] и карту чувствительности обзора. Полученное значение для наклона составляет $(1 - \alpha) = 1.62 \pm 0.15$, с нормировкой $C/(\alpha - 1) = (5.7 \pm 0.7) \times 10^{-3}/\square^\circ$ на потоке 1 мКраб.

Отметим, что в рамках данной работы также было проведено измерение поверхностной плотности внегалактических источников, используя лишь часть полного набора данных (глубокий обзор области неба в районе скопления галактик Волосы Вероники [106]). Используя наблюдения с общей экспозицией порядка 0.5 млн. секунд, в поле $45^\circ \times 45^\circ$ было задетектировано 5 АЯГ со значимостью более 4.5σ . Интегральная кривая подсчетов аппроксимировалась степенным законом с наклоном $3/2$. Поверхностная плотность источников в диапазоне 20–50 кэВ, выше потока 10^{-11} эрг см^{-2} с^{-1} (~ 1 мКраб) составила $(1.4 \pm 0.5) \times 10^{-2}/\square^\circ$, что несколько выше значения полученного для внегалактических источников в текущем обзоре. Различие поверхностной плотности АЯГ для разных участков небесной сферы может быть связано с крупномасштабной структурой ближней Вселенной. Этот вопрос будет детально исследован в §3.4.

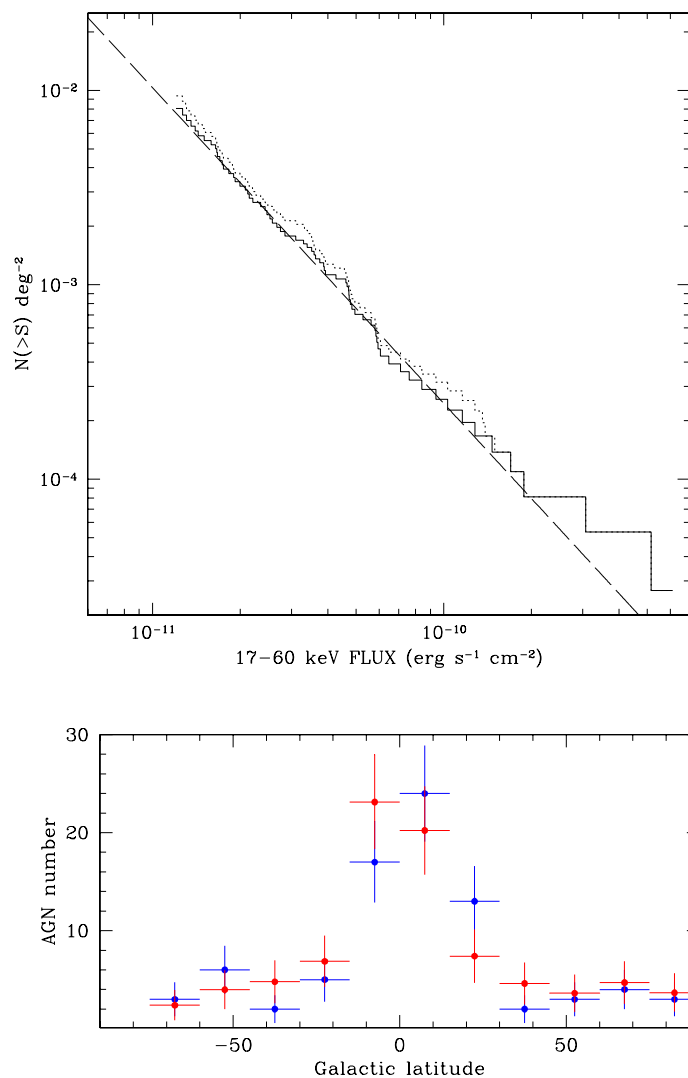


Рис. 3.1 **Верхняя панель:** кумулятивная кривая подсчетов внегалактических источников в диапазоне энергий 17–60 кэВ (исключая блазары) показана сплошной гистограммой. Кривая подсчетов была скорректирована на карту чувствительности обзора. Величина степенной индекса кривой подсчетов составляет 1.62 ± 0.15 , что согласуется со значением для равномерного распределения источников в евклидовом пространстве 1.5. Поверхностная плотность источников составляет $5.7 \pm 0.7 \times 10^{-3} / \square^\circ$ объектов с потоком выше 1 мКраб. Аппроксимация степенным законом показана штриховой линией. Для сравнения, показана кумулятивная кривая подсчетов внегалактических источников, включая блазары (пунктирная гистограмма). **Нижняя панель:** ожидаемое и измеренное число внегалактических источников (красные и синие точки, соответственно) в поясах $15^\circ \times 360^\circ$ по галактической широте. Ошибки демонстрируют неопределенность оценки нормировки кумулятивной кривой подсчетов.

Используя полученную кривую подсчетов, можно сделать обратную операцию: предполагая изотропное распределение источников по небу, можно оценить ожидаемое число внегалактических объектов, с потоком выше f_{lim} , в выбранной области неба. Для этого можно проинтегрировать дифференциальную кривую подсчетов (3.3) по потоку, принимая во внимание, соответствующую площадь покрытия $A(f)$ рассматриваемой области неба:

$$M(> f_{lim}) = \int_{f_{lim}}^{\infty} \frac{dN}{df} A(f) df. \quad (3.5)$$

Еще один способ получить предсказание плотности АЯГ в определенном направлении на небе – проинтегрировать функцию светимости АЯГ (3.7), представленную в следующей главе, предполагая их однородное и изотропное распределение. Ожидаемое число внегалактических источников в выбранной области неба Ω_0 , получается интегрированием функции светимости по соответствующему объему:

$$M_{expected} = \int_{\Omega_0} d\Omega \int_{R_{min}}^{R_{max}} R^2 dR \int_{4\pi R^2 f(\Omega_0)}^{\infty} \phi(L) dL. \quad (3.6)$$

Такой подсчет поверхностной плотности АЯГ будет в дальнейшем также использоваться при изучении анизотропии распределения АЯГ в ближней Вселенной (§3.4).

Результат описанной процедуры представлен на Рис. 3.1 (нижняя панель). Как видно из рисунка, ожидаемое число АЯГ в широтных полосах размерами $15^\circ \times 360^\circ$, согласуется на уровне ошибок с измеренным числом внегалактических источников.

Отметим, что АЯГ вблизи плоскости галактики ($|b| < 5^\circ$) не были учтены при построении функции светимости АЯГ, однако, их число также хорошо согласуется с ожидаемым. Число внегалактических источников в галактической плоскости ($|b| < 5^\circ$), оцененное по формуле (3.6) равно 18.4. Число обнаруженных активных ядер галактик в этой области составляет 16. Можно заключить, что измеренное и ожидаемое число источников согласуются между собой, принимая во внимание пуассоновую неопределенность количества источников. Таким образом можно предположить, что *основная доля источников с неизвестной пока природой, находящихся в области галактической плоскости, имеет галактическое происхождение.*

Следовательно, мы можем включить область плоскости Галактики в построение кривой подсчетов, не ожидая появления сильного смещения оценки параметров (3.4). В этом случае, число АЯГ в нашей подборке повышается до 83-х. Параметры кумулятивной кривой подсчетов определены как: $(1 - \alpha) = 1.50 \pm 0.13$ и $C/(\alpha - 1) = (5.4 \pm 0.6) \pm 10^{-3}/\square^\circ$ на потоке 1 мКраб.

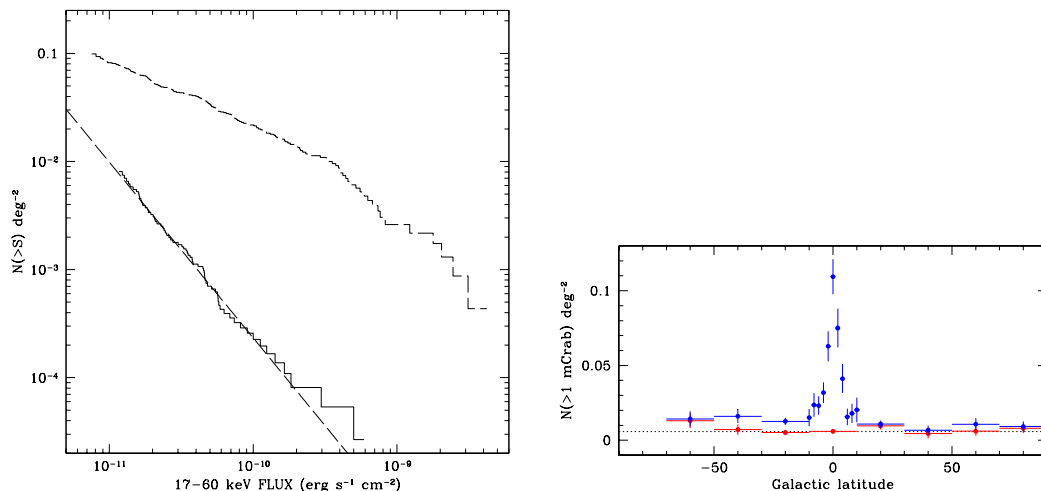


Рис. 3.2 **Справа:** кумулятивная кривая подсчетов в диапазоне энергий 17–60 кэВ, для всех источников в плоскости Галактики ($|b| < 5^\circ$, показана пунктирной гистограммой) в сравнении с аналогичной кривой внегалактических источников на высоких широтах ($|b| > 5^\circ$, сплошная гистограмма). Пунктирная линия изображает аппроксимацию кумулятивной кривой активных ядер галактик. **Слева:** поверхностная плотность галактических источников (синие точки) с потоком выше 1 мКраб в областях неба, ограниченных соответствующими интервалами по галактической широте. Красными точками показана аналогичная поверхностная плотность для внегалактических источников. Ошибки показывают неопределенность измерения нормировки кривой подсчетов. Пунктирной линией показана поверхностная плотность АЯГ, измеренная в области $|b| > 5^\circ$.

Поверхностная плотность объектов, обнаруженных ИНТЕГРАЛОм в галактической плоскости, значительно выше таковой, создаваемой АЯГ (см. Рис. 3.2). На Рис. 3.2 показана кумулятивная кривая подсчетов всех источников в области плоскости Галактики ($|b| < 5^\circ$), а также кривая подсчетов внегалактических источников, полученная в области, исключая галактическую плоскость (Рис. 3.1).

3.3 Функция светимости АЯГ

Для построения функции светимости близких АЯГ, мы использовали каталог источников из обзора всего неба, полученного в настоящей работе.

Для источников с красными смещениями $z \lesssim 0.01$ мы использовали информацию о расстоянии из близких галактик (NGC, Nearby Galaxies Catalogue [248]). Для более далеких расстояний считалось по величине красного смещения в стандартной космологической модели с параметрами

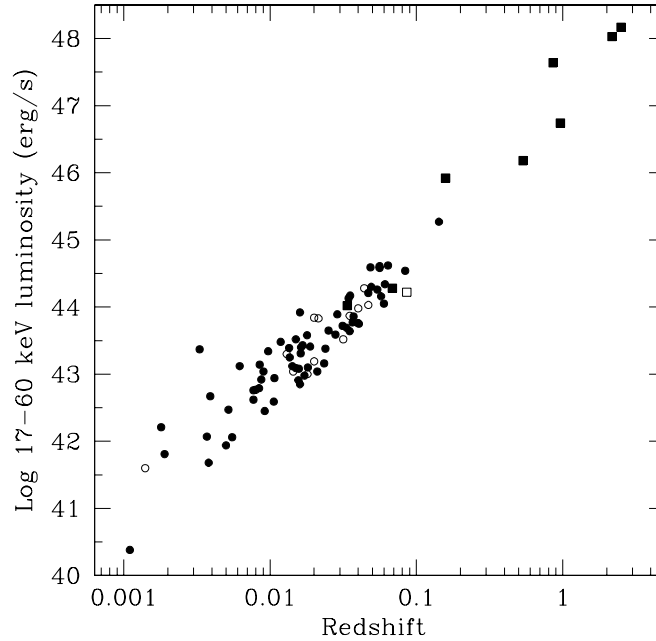


Рис. 3.3 Диаграмма светимость – красное смещение для активных ядер галактик из обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Кружки и квадраты отображают АЯГ с эмиссионными линиями и блазары, соответственно. Открытые кружки показывают положение на диаграмме АЯГ, находящихся в области галактической плоскости ($|b| < 5^\circ$).

$\Omega_m = 0.3$, $\Omega_\Lambda = 0.7$, и $H_0 = 75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Для четырех источников, не удалось найти информацию о расстоянии. Светимость источников с известным расстоянием определялась из потока, измеренного в диапазоне 17–60 кэВ (колонки 4 и 5 в Таблице 1.2).

Диаграмма светимость–красное смещение для выборки внегалактических источников показана на Рис. 3.3. Из нее видно, что большинство активных ядер галактик с эмиссионными особенностями в оптических спектрах (т.е. не блазары), расположены на $z < 0.1$. Исключением является источник IGR J09446–2636 на $z \approx 0.14$. Все блазары находятся на больших красных смещениях $z \sim 1\text{--}2.5$, светимость блазаров в предположении изотропного излучения – до $\sim 10^{48}$ эрг с^{-1} . Ввиду их сильно выраженных отличий от основной группы АЯГ, блазары были исключены из построения функции светимости.

Также была собрана информация о величине колонки фотопоглощения в спектрах источников. Для этой цели были использованы сведения из

литературы по этим объектам, либо результаты анализа наблюдений источников приборами ASCA/GIS, Einstein/IPC, RXTE/PCA, и Swift/XRT. Аппроксимация спектральных данных моделями проводилась при помощи пакета XSPEC v12 [7]. Рентгеновские спектры были аппроксимированы степенным законом $dN(E)/dE \propto E^{-\Gamma}$ с фотопоглощением с колонкой N_{H} . В модель также добавлялась эмиссионная линия железа на энергии 6.4 кэВ (в системе отсчета объекта), если она была необходима для получения удовлетворительного качества аппроксимации. Если качество спектров было неудовлетворительным для получения независимой оценки наклона степенного спектра, мы фиксировали наклон на общепринятом значении наклона для АЯГ: $\Gamma = 1.8$ (например, [201, 249]). Следует отметить, что мы не пытались оценить N_{H} , если это значение было меньше чем 10^{22} см^{-2} . Такие источники далее обозначаются как “непоглощенные”.

3.3.1 Распределение АЯГ по величине колонке поглощения

Одним из главных результатов, полученных из обзора всего неба, проведенного на обсерватории *RXTE* было построение распределения АЯГ по колонке внутреннего поглощения. Было показано, что доля сильно поглощенных АЯГ ($\log N_{\text{H}} > 22$) падает с увеличением светимости [210]. Основываясь на этом результате, мы разделили выборку АЯГ из обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ* на две части по граничной светимости $\log L_{\text{hx}} = 43.6$, где L_{hx} – светимость в диапазоне энергий 17–60 кэВ (здесь и далее, для удобства, приводится логарифм светимости и опускается размерность эрг/сек). Ввиду того, что типичное отношение светимостей АЯГ в обзорах *ИНТЕГРАЛа* и *RXTE* $\log(L_{\text{hx}}/L_{\text{x}}) \sim 0.1$ (это будет подробнее показано в §3.3.4) выбранное значение L_{hx} примерно соответствует граничной светимости, использованной в обзоре *RXTE* ($\log L_{\text{x}} = 43.5$). Граничная светимость $\log L_{\text{hx}} = 43.6$, также соответствует светимости излома функции светимости (§3.3.2). Результирующее число АЯГ малой и большой светимости составляет 42 и 24 объекта, соответственно¹.

На Рис. 3.4 показано полученное распределение АЯГ по величине колонки внутреннего поглощения, для двух наборов источников. Из рисунка хорошо видно, что $\sim 66\%$ близких АЯГ со светимостью $\log L_{\text{hx}} < 43.6$ являются поглощенными ($\log N_{\text{H}} > 22$), а соответствующая доля АЯГ большой светимости, составляет только $\sim 24\%$.

Распределения АЯГ, по колонке внутреннего поглощения обсерваторий *RXTE* и *ИНТЕГРАЛ*, согласуются между собой. Однако, на результаты *ИНТЕГРАЛа* (на энергиях выше 20-ти кэВ) практически не сказывается

¹Три источника из каталога, только недавно были идентифицированы как АЯГ, поэтому, они не присутствуют в текущем анализе.

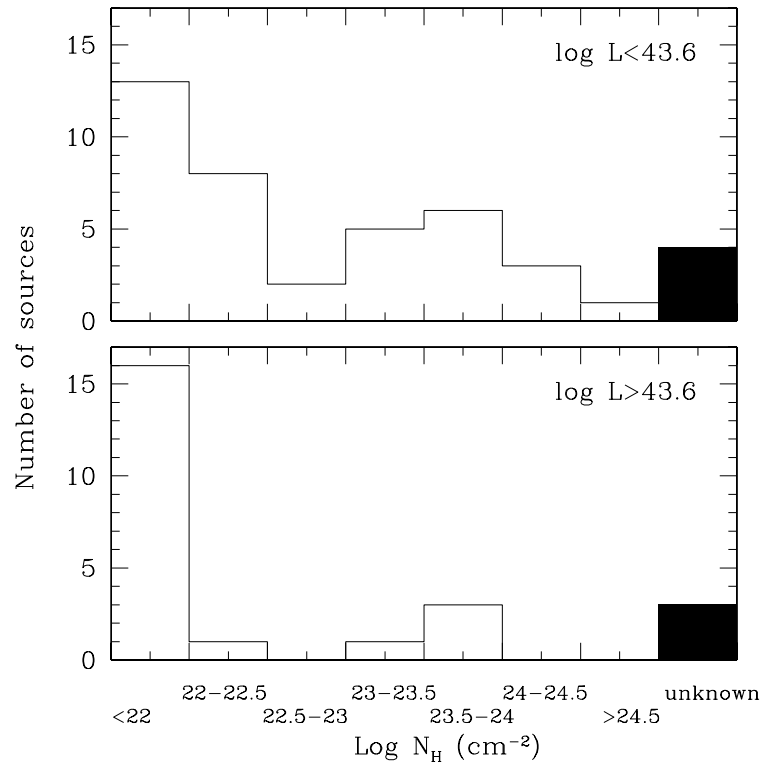


Рис. 3.4 Распределение АЯГ по величине колонки внутреннего фотопоглощения. На верхней и нижней панели показано распределение для АЯГ малой ($\log L_{\text{hx}} < 43.6$) и большой светимости, соответственно. Заполненная область показывает количество АЯГ с неизвестной величиной колонки поглощения.

наличие поглощения источников вплоть до экстремально поглощенных объектов $\log N_H \lesssim 24.5$.

Необходимо отметить, что интерпретация наличия небольшой доли АЯГ с очень большим поглощением, так называемых Комптоновски-толстых АЯГ, $\log N_H \gtrsim 24.5$ (Рис. 3.4) должна проводиться с большой осторожностью, поскольку величина потока АЯГ даже в жестком рентгеновском диапазоне в таком случае может быть подавлена под влиянием рассеяния в холодном веществе поглощающей области. Более подробно доля комптоновски-толстых АЯГ будет обсуждена в §3.5.

3.3.2 Функция светимости АЯГ

В данном параграфе функция светимости близких активных ядер галактик определяется в виде $\phi(L_{\text{hx}}) \equiv dN_{\text{AGN}}/d \log L_{\text{hx}}$. Сначала $\phi(L_{\text{hx}})$ была оценена в наборе интервалов по светимости, используя метод $1/V_m$ [234], т.е. суммированием значений $1/V_m(L_{\text{hx},i})$ для источников в каждом интервале по светимости; где $V_m(L_{\text{hx},i})$ – объем пространства, в котором источник со светимостью $L_{\text{hx},i}$ может быть задетектирован в обзоре. Измерение V_m производилось по известной зависимости площади покрытия обзора от величины предельного потока, которая показана на Рис. 1.5. Полный диапазон светимостей, покрытых в нашем обзоре $40 < \log L_{\text{hx}} < 45.5$. Полученная функция светимости показана на Рис. 3.5.

Как правило, функция светимости АЯГ хорошо аппроксимируется двумя степенными законами с гладким изломом на светимости L_* :

$$\phi(L_{\text{hx}}) = \frac{A}{(L_{\text{hx}}/L_*)^{\gamma_1} + (L_{\text{hx}}/L_*)^{\gamma_2}}. \quad (3.7)$$

Для оценки параметров функции светимости мы использовали метод максимального правдоподобия, где в качестве эstimатора правдоподобия L использовалось следующее значение:

$$L = -2 \sum_i \ln \frac{\phi(L_{\text{hx},i}) V_m(L_{\text{hx},i})}{\int \phi(L_{\text{hx}}) V_m(L_{\text{hx}}) d \log L_{\text{hx}}}, \quad (3.8)$$

где i пробегает по всем АЯГ в выборке.

Минимизацией L , была определена форма функции светимости: значение для излома L_* и параметры γ_1 и γ_2 . Оценка нормировки $\phi(L_{\text{hx}})$ была сделана из условия равенства предсказанного числа АЯГ и количества АЯГ, задетектированных в обзоре. Аппроксимация функции светимости показана сплошной кривой на Рис. 3.5. Значения параметров (3.7) с погрешностями измерений представлены в Таблице 3.1. Неопределенность значения нормировки A не приведена, т.к. этот параметр коррелирует со всеми остальными параметрами функции светимости. Аналитическая форма функции светимости, полученная методом максимального правдоподобия, хорошо согласуется с функцией светимости, полученной в интервалах методом $1/V_m$, что также подтверждается тестом Колмогорова–Смирнова (см. Таблицу 3.1).

3.3.3 Кумулятивная объемная плотность и светимость

Оценка объемной плотности активных ядер галактик в ближней Вселенной, может быть получена интегрированием функции светимости от ниж-

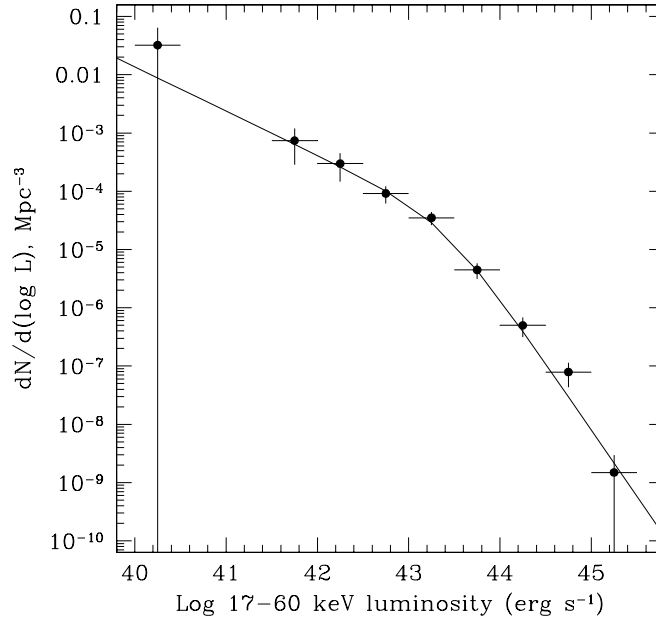


Рис. 3.5 Функция светимости близких АЯГ, полученная из обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ* в диапазоне энергий 17–60 кэВ (сплошные кружки с обозначенными 1σ ошибками). Сплошной кривой показана аналитическая аппроксимация функции светимости (3.7).

него предела $\log L_{\text{hx}} > 40$:

$$n(> 40) = \int_{40}^{\infty} \phi(L_{\text{hx}}) d \log L_{\text{hx}}, \quad (3.9)$$

полученное значение приведено в Таблице 3.1.

Следует отметить, что в значение интегральной объемной плотности АЯГ наибольший вклад дают АЯГ малой светимости. Из таких источников, в нашей выборке присутствует галактика NGC 4395 со светимостью $\log L_{\text{hx}} < 41$, следовательно величина объемной плотности таких объектов имеет очень большую погрешность. Для того, чтобы уменьшить погрешность измерения объемной плотности, также приведено значение объемной плотности источников со светимостью $\log L_{\text{hx}} > 41$.

Аналогичным образом можно оценить кумулятивную светимость единичного объема ближней Вселенной в излучении АЯГ со светимостями светимостей $\log L_{\text{hx}} > 40$:

Таблица 3.1 Параметры функции светимости АЯГ

Параметр	Значение и 1σ ошибка
$\log L_*$	43.40 (43.12 ÷ 43.68)
γ_1	0.76 (0.56 ÷ 0.94)
γ_2	2.28 (2.06 ÷ 2.56)
A (Мпк ⁻³)	3.55×10^{-5}
$n_{17-60 \text{ кэВ}}(> 40)$ (10 ⁻³ Мпк ⁻³)	9 (4 ÷ 18)
$n_{17-60 \text{ кэВ}}(> 41)$ (10 ⁻³ Мпк ⁻³)	1.4 (0.9 ÷ 2.0)
$\rho_{17-60 \text{ кэВ}}(> 40)$ (10 ³⁸ эрг с ⁻¹ Мпк ⁻³)	14.1 (11.8 ÷ 17.1)
$\rho_{17-60 \text{ кэВ}}(> 41)$ (10 ³⁸ эрг с ⁻¹ Мпк ⁻³)	12.4 (11.0 ÷ 14.0)
P_{KS}	> 0.9

$$\rho_{17-60 \text{ keV}}(> 40) = \int_{40}^{\infty} \phi(L_{\text{hx}}) L_{\text{hx}} d \log L_{\text{hx}}. \quad (3.10)$$

Результат представлен в Таблице 3.1, где также приведено значение $\rho_{17-60 \text{ keV}}(> 41)$.

3.3.4 Систематические погрешности

Полученная функция светимости имеет определенные систематические погрешности. Во первых, используемая выборка АЯГ может оказаться неполной из-за наличия 7-ми источников неизвестной природы на высоких галактических широтах $|b| > 5^\circ$. Предполагая, что для этих источников нет никаких предпочтений находиться в определенном интервале светимостей, можно предположить, что их возможная идентификация в будущем как АЯГ приведет к простому увеличению нормировки функции светимости не более, чем на $\sim 10\%$.

Другая сложность, которая может вызвать появление смещенных оценок в функции светимости, состоит в том, что 15 объектов из нашего набора АЯГ на $|b| > 5^\circ$ были мишенями специально спланированных наблюдений, следовательно их обнаружение не являлось случайным.

Для того, чтобы оценить величину эффекта, связанного с наличием мишеней наблюдений ИНТЕГРАЛа в анализируемом наборе АЯГ мы использовали следующие рассуждения. Предположим, что область неба S была покрыта наблюдениями с предельным потоком детектирования источников f_1 , в то время как полная площадь покрытия обзора S_0 . N источников было обнаружено с потоком в диапазоне $f_1 < f < f_2$, из которых N_t были обнаружены в наблюдениях, в которых они были мишенями. Тогда, истинная поверхностная плотность источников с потоком $f_1 < f < f_2$ должна находиться в пределах ($\rho_{\min} < \rho < \rho_{\max}$):

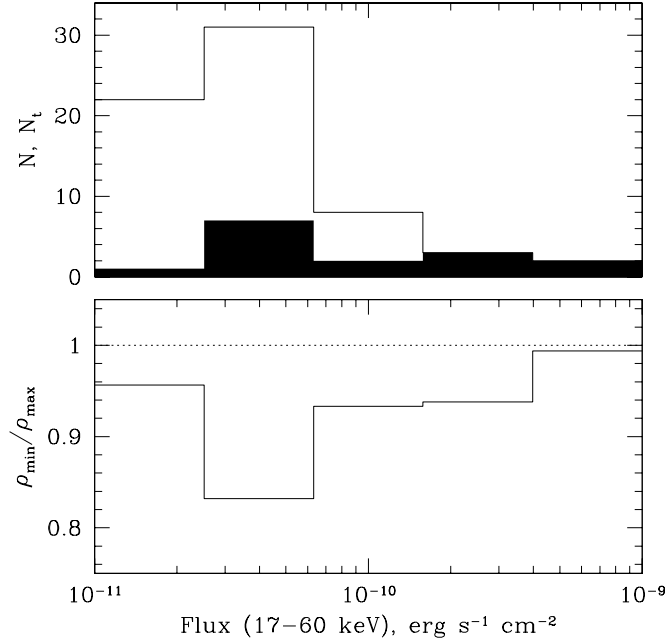


Рис. 3.6 *Верхняя панель:* Дифференциальное распределение значений потоков АЯГ из обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ* (сплошная гистограмма). *Нижняя панель:* Отношение минимальной и максимальной поверхностной плотности источников, в соответствии с уравнением (3.11).

$$\frac{N - N_t}{S} + \frac{N_t}{S_0} < \rho < \frac{N}{S}. \quad (3.11)$$

Функция светимости, полученная в предыдущей части, использовала значение ρ_{\max} . На Рис. 3.6 показано отношение ρ_{\min}/ρ_{\max} , как функция чувствительности обзора. Хорошо видно, что данный эффект относительно существенен на средних потоках ($\sim 2-6 \cdot 10^{-11}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$), где доля “целевых” АЯГ относительно высока, в то время как площадь покрытия относительно мала. Однако, даже в максимуме эффекта, он не превышает 17%. Это значение может быть принято как верхний предел на переоценку функции светимости из-за присутствия целевых наведений на АЯГ, присутствующих в выборке. Отметим, что покрытие “пустых” полей на небе, проведенных в 2005-2006 годах специально по заявке Отдела Астрофизики Высоких Энергий ИКИ РАН, позволило существенно уменьшить влияние систематических эффектов на статистические свойства выборки АЯГ.

Таким образом, можно сказать, что полная систематическая неопределенность функции светимости из-за неполноты каталога источников и

целевых наблюдений АЯГ составляет $\lesssim 10\%$ (учитывая тот факт, что два упомянутых эффекта компенсируют друг друга), что меньше чем статистическая неопределенность полученных значений.

Сравнение с функцией светимости в полосе энергий 3–20 кэВ

Интересно сравнить функцию светимости близких активных ядер галактик, полученной по данным ИНТЕГРАЛа, в полосе энергий 17–60 кэВ, с функцией светимости в смежном диапазоне 3–20 кэВ, построенной с помощью обзора обсерватории *RXTE*. Для этого необходимо знать, как соотносятся светимости АЯГ в этих диапазонах. Например, можно непосредственно сравнить светимости источников, которые были задетектированы в обоих обзорах. Было обнаружено 25 таких источников, результаты измерения потоков которых приведены на Рис. 3.7. Также приведено отношение L_x/L_{hx} как функция величины колонки поглощения N_{H} . Результаты измерений сравниваются с теоретическим ожиданием значения этого отношения, в предположении, что внутренний (непоглощенный) спектр АЯГ может быть представлен степенным законом с фотонным индексом $\Gamma = 1.8$ с компонентой, возникающей из-за комптоновского отражения жесткого излучения от холодного вещества аккреционного диска АЯГ (модель *reghav* пакета *XSPEC*, [140]). В моделировании предполагались разные величины нормировки отраженных компонент $R (\equiv \Omega/2\pi)$. Как и ожидалось (см. верхнюю панель 3.7) для большинства АЯГ $L_x < L_{\text{hx}}$, в основном из-за внутреннего фотопоглощения и (в меньшей степени) из-за наличия отраженной компоненты. Измеренное поведение отношения L_x/L_{hx} хорошо согласуется с ожидаемым трендом по величине N_{H} , причем можно говорить о том, что в данных присутствует указание на наличие отраженной компоненты, т.е. $R > 0$. Наблюдаемый значительный (на фактор ~ 2) разброс в данных относительно предсказанной зависимости может быть объяснен внутренней переменностью источников, т.к. наблюдения *RXTE* и *ИНТЕГРАЛ* разнесены на несколько лет.

Основываясь на результатах, показанных на Рис. 3.7 и принимая во внимание многочисленную литературу, описывающую широкополосные рентгеновские спектры сейфертовских галактик (см., например, [62, 170]), мы можем заключить, что в качестве простого описания вида внутреннего (до фотопоглощения) спектра близких АЯГ можно принять универсальный спектр, состоящий из степенного закона с наклоном $\Gamma = 1.8$ и отраженной компоненты с относительной амплитудой $R \sim 0.5-1$.

Далее, оценим среднее значение отношения светимостей $\langle L_x/L_{\text{hx}} \rangle$ для АЯГ низкой ($\log L_{\text{hx}} < 43.6$) и высокой ($\log L_{\text{hx}} > 43.6$) светимости, учитывая их наблюдаемое распределение по колонке поглощения N_{H} (Рис. 3.4). Для источников с низкой светимостью, $\langle L_x/L_{\text{hx}} \rangle = 0.79$ (0.67) при $R = 0.5$ (1). Большинство источников высокой светимости являются непоглощенными, для них соответствующие значения равны 0.96 (0.84). Используя

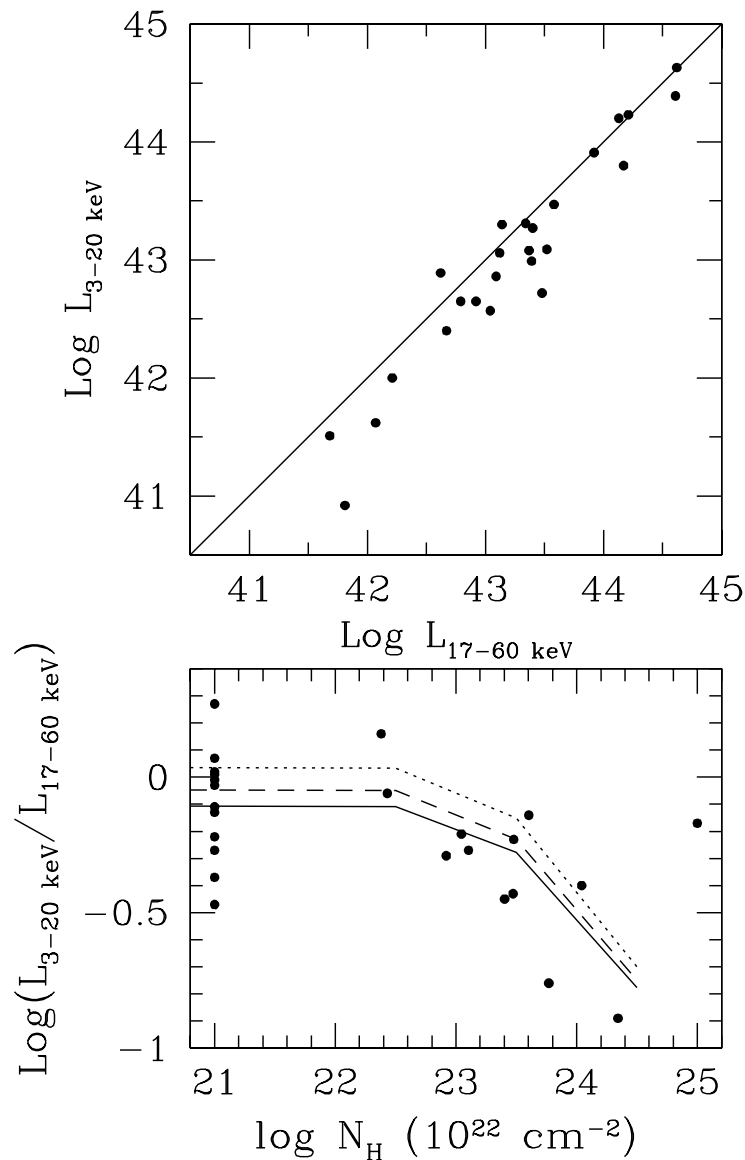


Рис. 3.7 **Верхняя панель:** Светимость активных ядер галактик задетектированных в обзорах всего неба обсерваторий ИНТЕГРАЛ (17–60 кэВ, ось абсцисс) и *RXTE* (3–20 кэВ, ось ординат). Сплошной прямой показана прямая пропорциональность между светимостями АЯГ в двух диапазонах. **Нижняя панель:** Отношение светимостей АЯГ в диапазонах 3–20 и 17–60 кэВ как функция величины колонки поглощения N_{H} (точки). Непоглощенные источники ($\log N_{\text{H}} < 22$) показаны со значением $\log N_{\text{H}} = 21$. Также показано ожидаемое отношение светимостей для непоглощенного степенного ($\Gamma = 1.8$) спектра с отраженной компонентой с относительной амплитудой $R = 0$ (линия с точками), $R = 0.5$ (пунктирная линия), и $R = 1$ (сплошная линия).

приведенные значения, можно заключить, что в первом приближении $\log\langle L_{\text{hx}}/L_x \rangle \approx 0.1$ в независимости от светимости, что в дальнейшем можно использовать для того, чтобы пересчитывать светимости из диапазона 3–20 в 17–60 кэВ.

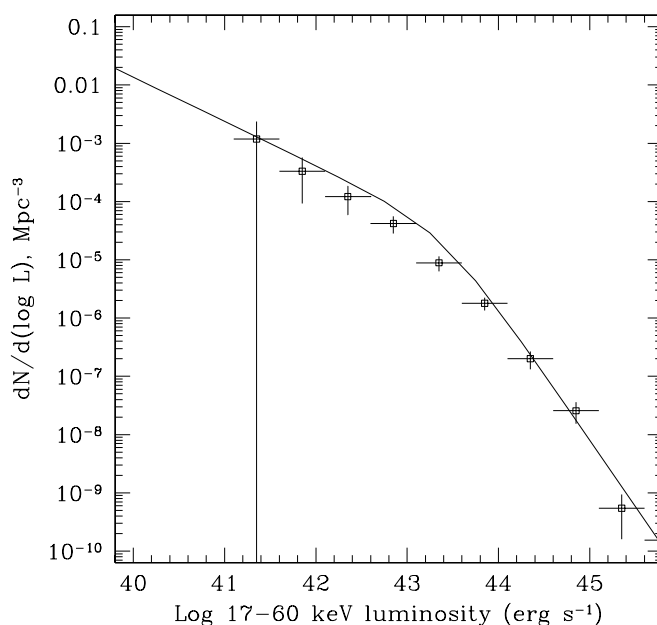


Рис. 3.8 Модель функции светимости АЯГ, полученная по данным ИНТЕГРАЛа (сплошная кривая) и функция светимости по данным обзора обсерватории *RXTGE* в полосе 3–20 кэВ [210], преобразованная в диапазон 17–60 кэВ (точки с ошибками).

3.3.5 Спектр Космического Рентгеновского Фона

В настоящее время, считается, что основной вклад в формирование внегалактического рентгеновского фона дают активные ядра галактик на различных красных смещениях. Такой вывод базируется, в основном, на том, что 80% общего потока КРФ на энергиях ниже ~ 8 кэВ, было разрешено на излучение от точечных источников [84]. Однако, основное энерговыделение КРФ находится на энергиях ~ 30 кэВ, где разрешено не более одного процента внегалактического фона при ультраглубоких обзорах обсерватории *ИНТЕГРАЛ* (и еще меньше – предыдущими обсерваториями, работающими в этом диапазоне энергий). Разрешение КРФ на точечные

источники в районе пика 30 кэВ будет одной из основных задач будущих рентгеновских обсерваторий. В настоящее же время мы можем попытаться ответить на вопрос - совместимо ли распределение АЯГ по величине колонки поглощения с распределением, необходимым далеким квазарам для формирования спектра КРФ?

Для ответа на этот вопрос была оценена относительная доля АЯГ с разной величиной колонки поглощения из распределения N_H (Рис. 3.4):

$$\begin{aligned}
 \log N_H < 22.0 &: & 0.37 \pm 0.10, \\
 22.0 < \log N_H < 22.5 &: & 0.20 \pm 0.07, \\
 22.5 < \log N_H < 23.0 &: & 0.05 \pm 0.04, \\
 23.0 < \log N_H < 23.5 &: & 0.13 \pm 0.06, \\
 23.5 < \log N_H < 24.0 &: & 0.16 \pm 0.07, \\
 24.0 < \log N_H < 24.5 &: & 0.07 \pm 0.05, \\
 \log N_H > 24.5 &: & 0.02 \pm 0.02.
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Относительные доли определялись с учетом того, что АЯГ низкой ($\log L_{\text{hx}} < 43.6$) и высокой ($\log L_{\text{hx}} > 43.6$) светимости дают вклад в излучательную способность единичного объема близкой Вселенной на уровне $\sim 90\%$ и $\sim 10\%$, соответственно. Приведенные погрешности учитывают только пуассоновскую неопределенность количества объектов. Систематические ошибки, связанные с отсутствием информации о колонке поглощения, не учитывались.

Далее, был взят аналитический вид спектра АЯГ, состоящий из степенного закона с экспоненциальным завалом на энергиях $E_f = 200$ кэВ и отраженной компонентой с относительной амплитудой R :

$$\frac{dN_\gamma}{dE} = AE^{-\Gamma} \exp(-E/E_f) + Rf(E), \tag{3.13}$$

где $f(E)$ описывается в работе [140]. Были взяты параметры $\Gamma = 1.8$, $R = 0.5$ или $R = 1$ в качестве опорных значений.

Суммируя спектры с разными величинами колонок поглощения с весами, соответствующими их вкладу в полную излучательную способность единичного объема (3.12), был получен композитный спектр близких АЯГ (Рис. 3.9).

Следует отметить, что в данном случае не учитывался вклад от сильно поглощенных объектов ($\log N_H > 24.5$), который, как ожидается, не превышает $\sim 3\%$, при данном распределении N_H (Рис. 3.4), тем более, что спектр таких объектов может сильно отличаться от (3.13) в зависимости от геометрии поглощающей и отражающей области (см., например, [149]).

Композитный спектр, показанный на Рис. 3.9, был отнормирован с учетом излучательной способности единицы объема, создаваемой близкими

АЯГ (измеренной в данной работе), $\rho_{17-60 \text{ кэВ}} (> 40)$ (см. Таблицу 3.1). Следовательно, спектр на Рис. 3.9 представляет объемную излучательную способность всех близких АЯГ со светимостью $\log L_{\text{hx}} > 40$. Заштрихованная область на рисунке, отображает неопределенность формы композитного спектра, возникающая из-за погрешностей распределения N_{H} и величины $\rho_{17-60 \text{ кэВ}} (> 40)$.

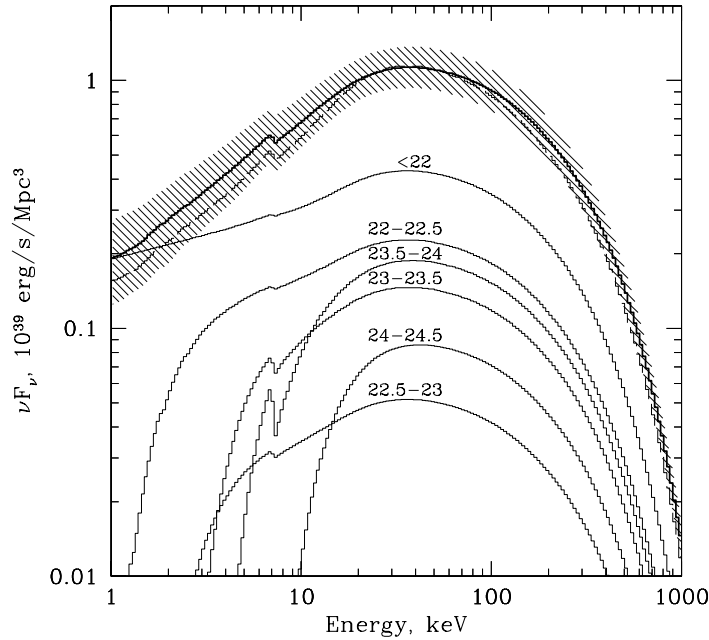


Рис. 3.9 Композитный спектр близких АЯГ, полученный для модельного спектра (3.13) с параметрами $\Gamma = 1.8$, $E_f = 200 \text{ keV}$, и $R = 0.5$ (толстая сплошная линия) и с учетом распределения N_{H} (Рис. 3.4). Спектр отнормирован с учетом излучательной способности единицы объема, создаваемой близкими АЯГ. Заштрихованная область отображает неопределенность в построении композитного спектра, возникающую из ошибок построения распределения N_{H} и величины $\rho_{17-60 \text{ кэВ}} (> 40)$. Также показан вклад источников с разной колонкой поглощения (кривые с подписями величины $\log N_{\text{H}}$) в композитный спектр. Штриховой гистограммой показан композитный спектр для случая $R = 1$.

Предположим теперь, что АЯГ на всех красных смещениях формируют спектр такой же формы, но с переменной нормировкой – кумулятивной излучательной способностью единичного объема. Тогда, интегральное излучение АЯГ, наблюдаемое на $z = 0$ будет иметь следующий спектр (см.,

например, [211]):

$$I(E) = \frac{c}{4\pi H_0} \int_0^\infty \frac{\epsilon(z)F((1+z)E)}{(1+z)[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda]^{1/2}} dz, \quad (3.14)$$

где $F(E)$ – композитный спектр, показанный на Рис. 3.9, и $\epsilon(z)$ – функция, описывающая эволюцию излучательной способности единицы объема Вселенной.

Определение эволюционной функции $\epsilon(z)$ проводится в глубоких обзорах на обсерваториях Чандра и ХММ-Newton. На Рис. 3.10 показана зависимость излучательной способности единицы объема от красного смещения в опорном диапазоне 2–8 кэВ, полученная в работе [9]. Излучательная способность $\epsilon(z)$ быстро эволюционирует на красных смещениях $z \lesssim 1.5$. Между $z \sim 0.2$ и $z \sim 1$ эволюция определена достаточно хорошо и ее можно описать степенным законом (z^α), где $\alpha \sim 3.2$. На красных смещениях $z \gtrsim 1$ эволюция определена значительно хуже, в основном из-за неполноты отождествления источников и сложности определения их красного смещения. Существует два возможных сценария эволюции излучательной способности единицы объема на $z \gtrsim 1$, которые определяются двумя наборами результатов измерений (см., Рис. 3.10), или соответствующих аппроксимаций:

$$e_1(z) \propto \begin{cases} (1+z)^{3.2}, & z \leq 1 \\ e_1(1)/z, & z > 1 \end{cases} \quad (3.15)$$

$$e_2(z) \propto \begin{cases} (1+z)^{3.2}, & z \leq 1 \\ e_2(1), & z > 1. \end{cases} \quad (3.16)$$

Свернув композитный спектр близких АЯГ (Рис. 3.9) с двумя эволюционными моделями были получены два варианта спектра КРФ (см. Рис. 3.11, толстые сплошные кривые). Заштрихованные области вокруг каждого спектра показывают неопределенность, полученную из суперпозиции ошибок определения $\rho_{17-60 \text{ keV}} (> 40)$ и распределения N_H . Для сравнения, на рисунке показан спектр внегалактического фона, недавно измеренный телескопами обсерватории ИНТЕГРАЛ, используя затмение фона Землей [37].

Как видно из Рис. 3.9, предсказанный интегральный спектр АЯГ хорошо согласуется как с нормировкой, так и с формой непосредственно измеряемого спектра внегалактического фона. Оба эволюционных сценария излучательной способности $\epsilon(z)$ в пределах погрешностей согласуются с наблюдаемым спектром КРФ. Следует отметить, что наши вычисления базировались на оценках интегральной излучательной способности единицы объема для светимостей $\log L_{\text{hx}} > 40$. Если использовать более низкие светимости АЯГ и обычных галактик, то нормировка интегрального спектра увеличится.

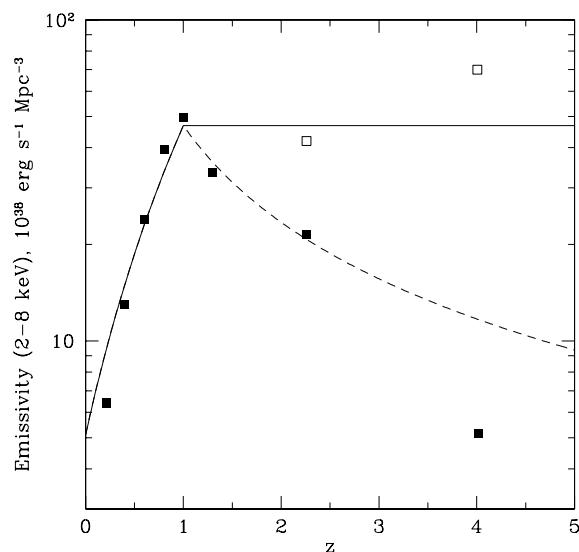


Рис. 3.10 Эволюция излучательной способности в опорном диапазоне энергий 2–8 кэВ единичного объема Вселенной с красным смещением по данным глубоких обзоров обсерватории Чандра (взято из работы [9]). Измерения, отмеченные только заполненными квадратами, используют спектроскопически отождествленные активные ядра галактик, открытыми квадратами показаны измерения, которые учитывают неполноту обзора. Мы предполагаем, что истинная эволюция заключена между двумя аналитическими функциями (3.15) и (3.16), показанные пунктирной и сплошной кривой, соответственно.

Таким образом, комбинация результатов, полученных из обзора всего неба, проведенного обсерваторией ИНТЕГРАЛ и глубоких внегалактических обзоров, могут естественным образом объяснить наблюдаемый спектр внегалактического рентгеновского фона. Полученные результаты согласуются с предположением, что основная эволюция АЯГ связана с изменением кумулятивной излучательной способности единичного объема Вселенной, а не с изменениями формы их спектров, если обозначить светимость АЯГ в единицах $L_{\text{hx}}/L_*(z)$.

3.4 Анизотропия распределения близких АЯГ

Распределение массы в ближней Вселенной не является однородным. Гравитационное взаимодействие материи за космологическое время образовало различные структуры, вплоть до размеров 100-200 мегапарсек (см.

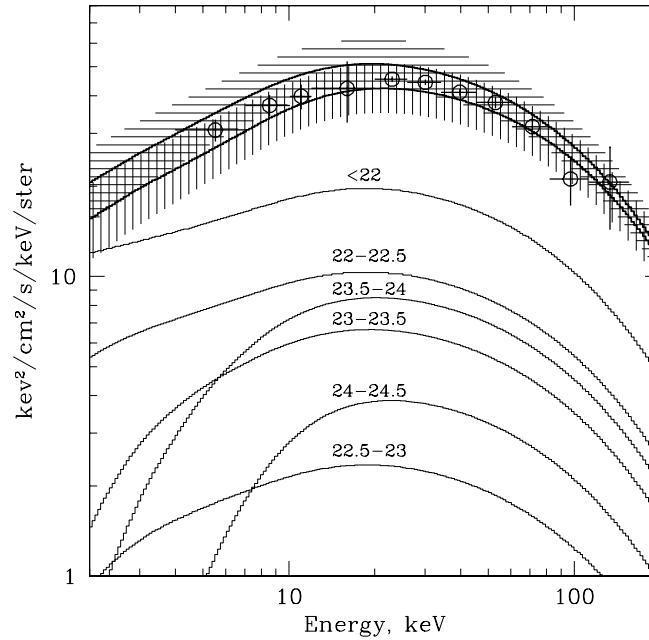


Рис. 3.11 Спектр внегалактического фона, предсказанный по композитному спектру близких АЯГ (Рис. 3.9, для $R = 0.5$) и эволюции объемной излучательной способности, измеренной обсерваторией Чандра (Рис. 3.10). Верхняя толстая кривая линия соответствует сценарию плоской эволюции светимости единичного объема Вселенной на $z > 1$, заштрихованная область отображает соответствующую неопределенность. Нижняя толстая сплошная линия соответствует эволюции $\propto 1/z$ на $z > 1$. Другие кривые показывают вклад АЯГ с разными величинами колонки поглощения (надписи показывают величину $\log N_{\text{H}}$). Точками показаны результаты измерений КРФ по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ [37].

Рис. 3.12). На больших масштабах вещество распределено более или менее равномерно, в то время как на меньших масштабах наблюдается высокая степень анизотропии. Контраст плотности может достигать порядка величины и более [181, 47, 10].

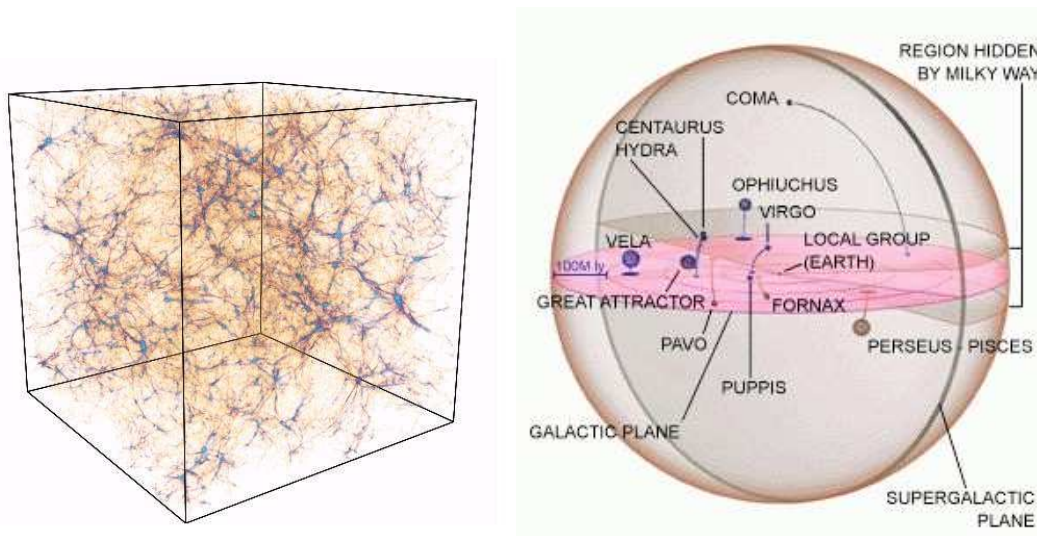


Рис. 3.12 **Слева:** объемная плотность вещества Вселенной на красном смещении $z = 0$ по результатам численных расчетов. Хорошо видны концентрации массы, “узлы” - скопления галактик и пустоты между ними. **Справа:** схема крупномасштабной структуры в ближней ($\lesssim 100$ Мпк) Вселенной. Показаны основные концентрации массы - скопление галактик в созвездии Девы, Персея, Волосы Вероники, “Великий аттрактор”.

Из наблюдений хорошо известно, что практически каждая галактика во Вселенной содержит центральную сверхмассивную чёрную дыру, которая может в разное время своей “жизни” стать активным ядром галактики - АЯГ [204, 97]. Следовательно, можно ожидать, что объемная плотность активных ядер галактик, проявляющих себя в рентгеновском диапазоне, должна быть пропорциональна объемной плотности галактик, или иначе – объемной плотности вещества во Вселенной.

Глубина обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ достаточна для того, чтобы исследовать крупномасштабную структуру ближней Вселенной – типичные АЯГ со светимостями $L_{\text{hx}} \sim L_*(z)$ детектируются в обзоре вплоть до расстояний 100 – 200 Мпк.

По результатам обзора неба были посчитаны объемные плотности жестких рентгеновских АЯГ в различных направлениях на небе. Из-за того, что число АЯГ в используемой выборке весьма ограничено, предполагалось, что объемная плотность АЯГ однородна вдоль луча зрения, но неизотропна по направлению.

Для того, чтобы оценить объемные плотности АЯГ было посчитано отношение поверхностной плотности АЯГ, находящихся внутри радиуса

D_{\max} , предсказанной по известной форме функции светимости АЯГ (см. предыдущую главу), к измеренному значению. Для каждой точки неба рассматривался объем, ограниченный конусом с углом полуоткрытия θ .

При выборе значения угла полуотраствора конуса θ необходимо было найти компромисс между улучшением углового разрешения получаемой карты и малым числом источников в исследуемых телесных углах. В результате было выбрано значение $\theta = 45^\circ$. Для того, чтобы увеличить чувствительность к контрасту объемной плотности АЯГ было выбрано максимальное расстояние $D_{\max} = 70$ Мпк [207].

В §3.2 было показано, что, скорее всего, бóльшая часть неидентифицированных источников ИНТЕГРАЛа в области галактической плоскости имеет галактическую природу. Поэтому для исследования анизотропии распределения АЯГ в подборку источников были включены так же АЯГ из области галактической плоскости.

Значения объемной плотности АЯГ для разных направлений на небе показаны на Рис. 3.13 (верхняя панель). Плотность выражена в единицах 2.0×10^{-4} Мпк $^{-3}$ на светимости $\log(L) > 42$ (§3.3.3). На карте хорошо видно увеличение объемной плотности АЯГ в областях справа и сверху карты и слева – снизу.

Статистическая значимость обнаруженной неизотропности может быть оценена при анализе значений плотности АЯГ в статистически независимых областях неба. Из-за широкого угла полуотраствора конуса θ , существует только 12 направлений на небе удовлетворяющих этому условию. Учитывая то, что значение количества АЯГ в определенном направлении на небе, предсказанное по их функции светимости, имеет пуассоновское распределение плотности вероятности ($P_x(n)$), можно определить эстиматор правдоподобия, как произведение плотностей вероятности того, что значение количества АЯГ в данной площадке на небе имеет данное значение: $L = \sum \log P_x(n)$. Вероятность того, что полученное распределение объемной плотности является выборкой изотропного распределения, равна 8.7×10^{-4} .

Однако, если мы примем во внимание, что области повышенной и пониженной объемной плотности коррелирует с крупномасштабной структурой ближней Вселенной, измеренной по данным оптических и инфракрасных обзоров [207], или скоплений галактик [96], то вероятность того, что обнаруженная анизотропия является случайной сильно упадет.

Полученное распределение объемной плотности АЯГ хорошо согласуется с известным распределением видимой массы в ближней Вселенной. Области повышенной плотности АЯГ на верхней карте совпадает с положениями больших концентраций массы: близкое сверхскопление в Деве (~ 18 Мпк, $\sim 1.2 \times 10^{15} M_\odot$ [55, 240]), и более массивный *Великий Атрактор* (~ 65 Мпс, $(1-5) \times 10^{16} M_\odot$, [136, 240]). Повышенная плотность АЯГ слева–снизу на верхней карте соответствует положению пояса сверхскопления Персей–Рыбы (~ 50 Мпк, $(7-9) \times 10^{15} M_\odot$, [79]).

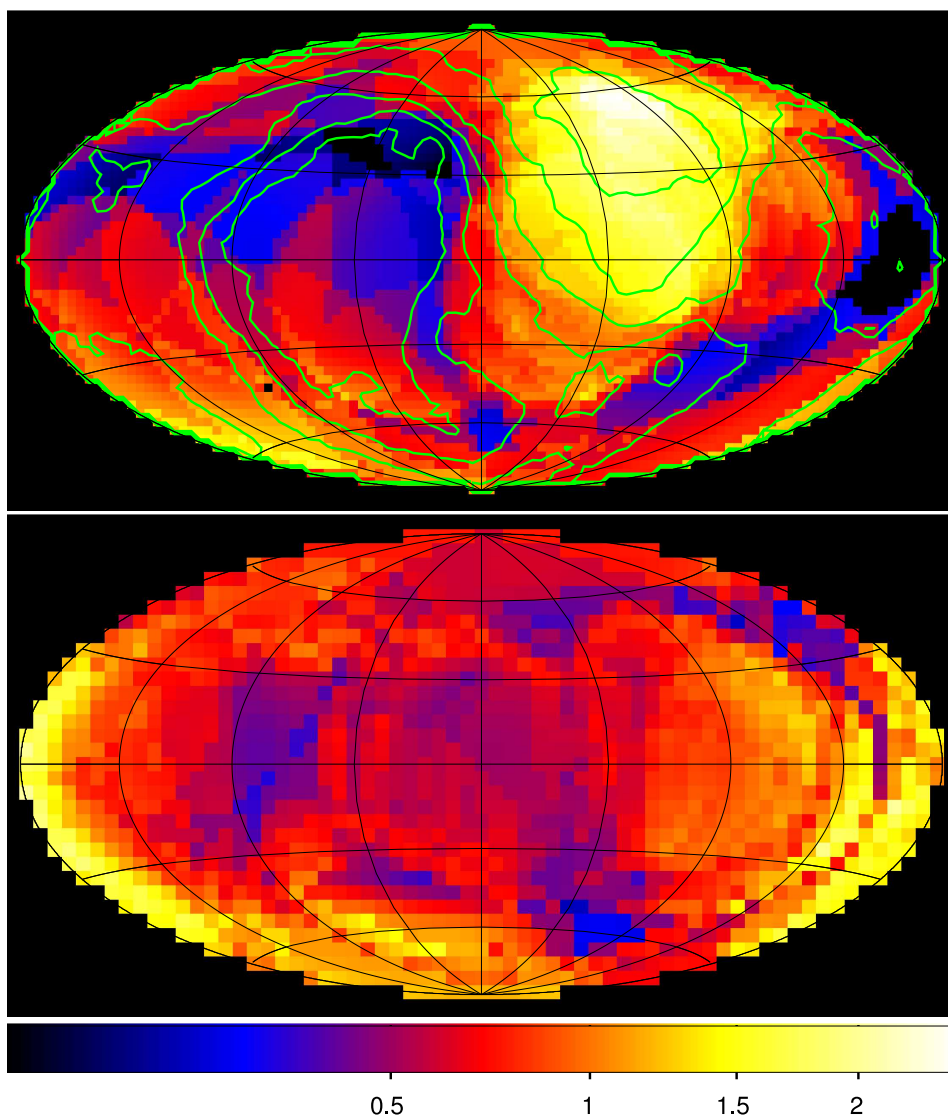


Рис. 3.13 **Верхняя карта** Распределение объёмной плотности активных ядер галактик на расстояниях меньше 70 Мпк. Карта представлена в галактических координатах в виде AITOFF проекции. Каждый элемент карты представляет объёмную плотность источников в телесном угле, образованным сферическим конусом с углом полураствора 45 градусов. Плотность АЯГ выражена в единицах 0.0002 источника со светимостью $L > 10^{42}$ эрг/сек на кубический Мпк. Контурными показана поверхностная плотность галактик из инфракрасного обзора IRAS, расположенных на расстояниях меньше 70 Мпк. Из рисунка видно хорошее согласие обнаруженной анизотропии АЯГ и распределения видимой массы в ближней Вселенной. **Нижняя карта** построена аналогично, но для источников, расположенных на расстояниях дальше чем 70 Мпк.

Для того, чтобы качественно продемонстрировать согласие обнаруженной анизотропии с крупномасштабной структурой ближней Вселенной, была сделана выборка галактик с расстояниями до $70h^{-1}$ и потоком $S_{60\mu\text{m}} > 1$ Ян из инфракрасного обзора всего неба обсерватории IRAS [226]. Обзор покрывает приблизительно 83% неба из-за так называемой “зоны избегания”, области галактической плоскости ($|b| \sim 5 - 10^\circ$), где оптическое излучение внегалактических объектов сильно поглощается и их идентификация сильно затруднена. Однако, поскольку обзор обсерватории ИНТЕГРАЛ покрывает все небо, то для простого качественного сравнения анизотропии объемной плотности АЯГ с пространственным распределением галактик из обзора IRAS было предположено, что “область избегания” заполнена галактиками с поверхностной плотностью, соответствующей средней поверхностной плотности галактик на расстояниях < 70 Мпк. Контуры одинаковой поверхностной плотности галактик из обзора IRAS, посчитанной в таких же конусах с $\theta = 45^\circ$, как и поверхностная плотность АЯГ из обзора ИНТЕГРАЛа, показаны на Рис. 3.13. Однако, следует отметить, что подобное сравнение является приближенным, и может быть использовано только для качественного сравнения. Более точная картина, может быть получена из детального исследования взаимного пространственного распределения АЯГ, излучающих в рентгеновском диапазоне, и видимой массы.

Из приведенной карты становится довольно очевидно, что оценка поверхностной плотности близких внегалактических источников в относительно небольшой области неба всегда будет смещенной. Это объясняет повышенное значение поверхностной плотности источников, полученное в работе [106], по относительно близким ($D \lesssim 70$ Мпк) активным ядрам галактик в области неба $\sim 45^\circ \times 45^\circ$ вокруг положения скопления галактик в созвездии Волосы Вероники (см. §3.2). Действительно, как видно из Рис. 3.13 (верхняя панель), эта поле покрывает область повышенной плотности АЯГ ($D \lesssim 70$ Мпк) в северной галактической полусфере (Рис. 3.13).

Для того, чтобы более наглядно продемонстрировать разницу в кривой подсчетов внегалактических источников в разных направлениях на небесной сфере, мы приводим Рис. 3.14. На рисунке показаны кривые подсчетов АЯГ, полученные в двух полусферах, ориентированных по и против направления движения местной группы галактик относительно реликтового излучения Вселенной (галактические координаты направления $l = 268^\circ, b = 27^\circ$ [115]), т.е. в направлении и против направления максимальной концентрации массы в ближней Вселенной [96]. В подсчете ярких источников ($S \gtrsim 10^{-10}$ эрг cm^{-2} s^{-1}) в разных полусферах виден контраст на уровне 11 : 1 при том, что на таком уровне чувствительности обзор ИНТЕГРАЛа покрывает все небо.

Формы функций светимости АЯГ, построенных для разных полусфер, согласуются между собой на уровне существующих неопределенностей, а также согласуются с формой функции светимости, построенной по все-

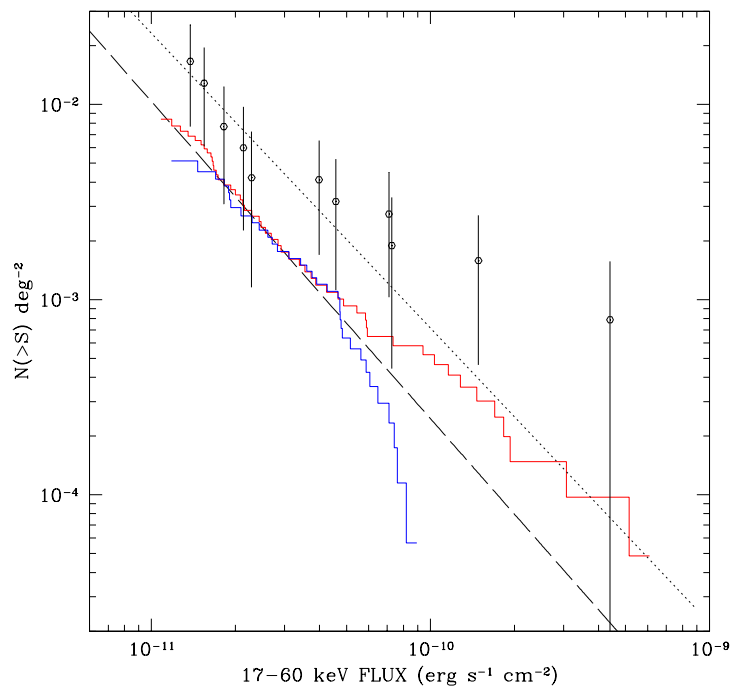


Рис. 3.14 Кривая подсчетов внегалактических источников (исключая блазары и скопления галактик), измеренная в разных участках неба: в положительном и отрицательном направлении на галактические координаты $l = 268^\circ$, $b = 27^\circ$ [115] (кривые показаны красными и синими точками, соответственно). Пунктиром показана аппроксимация кривой подсчетов, полученная по всему небу, исключая галактическую плоскость ($|b| > 5^\circ$, см. Рис. 3.1). Как видно из рисунка, на потоках выше $\sim 10^{-10}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$, наблюдается высокий контраст поверхностной плотности внегалактических источников в двух полушариях. Открытые точки с ошибками демонстрируют интегральную кривую подсчетов в области $45^\circ \times 45^\circ$ вокруг скопления галактик Волосы Вероники [106] в диапазоне энергий 20–50 кэВ. Поток был преобразован в диапазон 17–60 кэВ, предполагая спектр, подобный наблюдаемому у Крабовидной туманности. Линия с точками показывает соответствующую аппроксимацию $N \propto S^{-3/2}$

му небу. Из этого можно сделать вывод, что *обнаруженная анизотропия отражает изменение плотности АЯГ, а не вариации функции их светимости.*

Из Рис. 3.14 можно заключить, что наблюдаемая анизотропия в распределении АЯГ вызвана близкими источниками. Ожидается, что включение в расчеты плотностей источников на более далеких расстояниях будет уменьшать вариации поверхностной плотности галактик по небу [207]. Для демонстрации этого эффекта была построена карта объемной плотности АЯГ для расстояний $D > 70$ Мпк (Рис. 3.13, снизу). Как видно из карты, пространственное распределение АЯГ, находящихся на больших дистанциях является более однородным, чем распределение близких АЯГ (Рис. 3.13, сверху).

3.5 Заключение

В третьей части диссертационной работы по данным обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ* были исследованы важнейшие свойства популяции близких ($z \lesssim 0.1$) активных ядер галактик. Обзор был проведен в жестком рентгеновском диапазоне энергий 17–60 кэВ, что позволило детектировать источники без влияния эффекта селекции по величине колонки фотопоглощения вплоть до величины $N_{\text{H}} \sim 10^{24} \text{ см}^{-2}$, т.е. практически до объектов с Комптоновски- толстой оболочкой ($N_{\text{H}} > 1.5 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$).

- Одним из неожиданных результатов обзора являлось детектирование относительно небольшого числа сильнопоглощенных АЯГ, все из которых были известны ранее. Наблюдаемая доля таких объектов составляет около 10%. Эта оценка может увеличиться до $\sim 20\%$ только в случае, если все объекты, для которых в настоящее время величина колонки поглощения неизвестна, окажутся Комптоновски-толстыми. Таким образом, объекты с Комптоновски- толстой оболочкой являются редкими.
- Получены распределения АЯГ по величине колонки фотопоглощения в их спектре для источников малой ($\log L_{\text{hx}} < 43.6$) и большой ($\log L_{\text{hx}} > 43.6$) светимости. Доля поглощенных источников ($\log N_{\text{H}} > 22$) для источников малой и большой светимости составляет $\sim 70\%$ и $\sim 25\%$, соответственно. Это согласуется с результатами, полученными в обзоре всего неба обсерватории *RXTE* [210], а также при анализе обзора обсерватории *НЕАО-1* (2–10 кэВ) [235]. Аналогичная тенденция для АЯГ на больших красных смещениях была отмечена в работе [254].
- Построена функция светимости $\phi(L_{\text{hx}}) \equiv dN_{\text{AGN}}/d \log L_{\text{hx}}$ активных ядер галактик в ближней Вселенной ($z \lesssim 0.1$). Форма $\phi(L_{\text{hx}})$ хорошо согласуется с результатами, полученными на более низких энергиях, в частности, в диапазоне 3–20 кэВ [210] и 2–10 кэВ [235]. С помощью функции светимости была сделана оценка интегральной излучательной способности единицы объема ближней Вселенной для источников со светимостью $L_{\text{hx}} > 10^{41} \text{ эрг с}^{-1}$, как $\rho_{17-60 \text{ кэВ}}(> 41) = (12.4 \pm 1.5) \times 10^{38} \text{ эрг с}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$.

Таким образом, проведение обзора всего неба в жестком диапазоне энергий позволило сделать точный подсчет близких поглощенных и непоглощенных АЯГ. Эта новая информация интересна не только для простого подсчета числа АЯГ и излучательной способности единичного объема ближней Вселенной, она также нужна для уточнения космологической эволюции АЯГ от далеких красных смещений до $z = 0$ и изучения роста сверхмассивных черных дыр во Вселенной.

- В качестве примера использования результатов подсчета близких АЯГ для уточнения космологической эволюции этих объектов показано, что нормировка и форма спектра внегалактического фона согласуется с предположением о неизменности доли поглощенных объектов (для заданного $L_{\text{hx}}/L_*(z)$) начиная с $z \sim 1.5$, при изменяющемся значении светимости единичного объема Вселенной. Необходимо отметить, что настоящие выводы основаны на использовании модельного (хотя и реалистичного) спектра АЯГ. В качестве продолжения данной работы мы планируем провести подробный анализ формы спектра излучения близких АЯГ. Также нельзя исключить того, что спектры рентгеновского излучения близких сейфертовских галактик могут отличаться от спектров далеких квазаров, т.к. в простом приближении форма внутреннего (непоглощенного) спектра может зависеть от массы черной дыры, темпа аккреции [233], и вращения. Измерения точных спектров далеких квазаров будут возможны только с помощью будущих телескопов жесткого рентгеновского диапазона.
- Анализ пространственного распределения близких (<70 Мпк) АЯГ, обнаруженных в обзоре ИНТЕГРАЛа, впервые позволил задетектировать анизотропию объемной плотности рентгеновских АЯГ, которая, по всей видимости, связана с крупномасштабной структурой ближней Вселенной. Области повышенной плотности жестких рентгеновских АЯГ хорошо коррелируют с положением близких сверхскоплений – в созвездии Дева, Персей, Рыбы, а также с положением Великого Аттрактора.

Заключение

Основные выводы и результаты диссертационной работы:

1. Представлен каталог источников жесткого рентгеновского излучения из обзора всего неба, выполненного в данной работе по результатам наблюдений обсерватории *ИНТЕГРАЛ*. Чувствительность обзора на порядок величины превышает чувствительность последнего подобного обзора всего неба в жестком рентгеновском диапазоне энергий, проведенного обсерваторией НЕАО-1.
2. Показано, что распределение поверхностной яркости фонового излучения Галактики в диапазоне 17-60 кэВ пропорционально распределению ее поверхностной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне. Сделан вывод, что объемная излучательная способность Галактики в диапазоне энергий 17-60 кэВ пропорциональна плотности звезд, что подтверждает гипотезу формирования рентгеновского фона Галактики в результате сложения излучения слабых источников.
3. Получен спектр фонового излучения Галактики в диапазоне энергий 20-200 кэВ. Обнаружен резкий завал в спектре на энергиях выше 50-ти кэВ. Используя модель формирования фонового излучения Галактики в результате сложения излучения большого количества катаклизмических переменных малой рентгеновской светимости, сделана оценка средней массы аккрецирующих белых карликов в двойных звездных системах в Галактике.
4. Получена кривая подсчетов активных ядер галактик в диапазоне энергий 17-60 кэВ по данным обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ* до порога чувствительности 10^{-11} эрг/сек/см². Показано, что вклад АЯГ, детектируемых выше порога чувствительности, в полное излучение космического рентгеновского фона составляет порядка 1-го процента.
5. Используя результаты обзора всего неба обсерватории *ИНТЕГРАЛ*, построена функция светимости АЯГ на малых красных смещениях в диапазоне энергий 17-60 кэВ. Показано, что относительная доля поглощенных источников ($N_{\text{H}} > 10^{22}$ см⁻²) с малой светимостью

($L < 10^{43.6}$ эрг/сек) больше относительной доли поглощенных источников с большой светимостью. Полученное распределение поглощенных источников по величине колонки поглощения совместно с измеренной эволюцией кумулятивной излучательной способности единичного объема Вселенной с красным смещением позволяет успешно описать спектр КРФ в диапазоне энергий 5-200 кэВ.

6. Обнаружена анизотропия объёмной плотности АЯГ в ближней Вселенной ($D < 70$ Мпк). Распределение объёмной плотности АЯГ хорошо согласуется с известной крупномасштабной структурой распределения галактик в ближней Вселенной.

Литература

- [1] Aharonian F., et al., 2006, *Nature*, 439, 695
- [2] Aleksandrovich, N. L., Aref'ev, V. A., Borozdin, K. N., Syunyaev, R. A., & Skinner, G. K. 1995, *Astronomy Letters*, 21, 431
- [3] Aizu K., 1973, *PThPh*, 49, 1184
- [4] Atkins R., et al., 2005, *PhRvL*, 95, 251103
- [5] Augello, G., Iaria, R., Robba, N., et al. 2003, *Astrophysical Journal*, 596, L63
- [6] Ajello, M., Greiner, J., Kupcu, Yoldas, A., Tueller, J., Barthelmy, S., & Markwardt, C., 2006, *ATel* 864
- [7] Arnaud, K.A., 1996, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, eds. Jacoby, G. & Barnes, J., *ASP Conf. Series*, 101, 17
- [8] Barger, A. J., & Cowie, L. L. 2005, *Astrophysical Journal*, 635, 115
- [9] Barger, A.J., Cowie, L.L., Mushotzky, R.F., et al., 2005, *AJ*, 129, 578
- [10] Bahcall N. A., Burgett W. S., 1986, *ApJ*, 300, L35
- [11] Barlow, E. J., Bird, A., Clark, D., et al. 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 437, L27
- [12] Barlow, E. J., Knigge, C., Bird, A. J., Dean, A. J., Clark, D. J., Hill, A. B., Molina, M., & Sguera, V. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 372, 234
- [13] Bassani, L., De Rosa, A., Bazzano, A., Bird, A.J., Dean, A.J., Gehrels, N., et al., 2005, *Astrophysical Journal*, 634, L21
- [14] Bassani, L., Molina, M., Malizia, A., et al., 2006, *Astrophysical Journal*, 636, L65
- [15] Beckmann V., Soldi S., Shrader C. R., Gehrels N., Produit N., 2006, *Astrophysical Journal*, 652, 126

-
- [16] Bélanger G., et al., 2004, *Astrophysical Journal*, 601, L163
- [17] Bélanger G., Goldwurm, A., Renaud, M., et al. 2006, *Astrophysical Journal*, 636, 275
- [18] Bergeron P., Saffer R. A., Liebert J., 1992, *Astrophysical Journal*, 394, 228
- [19] Bergeron P., Liebert J., Fulbright M. S., 1995, *Astrophysical Journal*, 444, 810
- [20] Bikmaev, I.F., Sunyaev, R.A., Revnivtsev, M.G., & Burenin, R.A., 2006a, *Astron. Lett.*, 32, 221
- [21] Bikmaev, I.F., Sunyaev, R.A., Revnivtsev, M.G., & Burenin, R.A., 2006b, *Astron. Lett.*, 32, 588
- [22] Bird, A. J., Barlow, E. J., Bassani, L., et al. 2006, *Astrophysical Journal*, 636, 765
- [23] Bird A. J., Malizia A., Bazzano A., Barlow E. J., Bassani L., Hill A. B., Belanger G., Capitanio F., et al. 2006, astro, arXiv:astro-ph/0611493
- [24] Bloemen J. B. G. M., Blitz L., Hermsen W., 1984, *Astrophysical Journal*, 279, 136
- [25] Bloser P. F., Narita T., Jenkins J. A., Perrin M., Murray R., Grindlay J. E., 2002, *SPIE*, 4497, 88
- [26] Bouchet, L., Roques, J. P., Mandrou, P., Strong, A., Diehl, R., Lebrun, F., & Terrier, R. 2005, *Astrophysical Journal*, 635, 1103
- [27] Bodaghee, A., Walter, R., Zurita Heras, J., et al. 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 447, 1027
- [28] Brandt, S., Kuulkers, E., Bazzano, A., et al. 2005, *Astronomy Telegram*, 622, 1
- [29] Brandt, W. N., & Hasinger, G. 2005, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 43, 827
- [30] Brandt, S., Budtz-Jørgensen, C., & Chenevez, J. 2006, *Astronomy Telegram*, 778, 1
- [31] Burenin, R., Mescheryakov, A., Revnivtsev, M., Bikmaev, I., & Sunyaev, R. 2006a, *The Astronomer's Telegram*, 880, 1
- [32] Burenin, R., Mescheryakov, A., Sazonov, S., Revnivtsev, M., Bikmaev, I., & Sunyaev, R. 2006b, *Astronomy Telegram*, 883, 1

-
- [33] Bykov, A., Krassilshchikov, A., Uvarov, Yu., et al. 2004, *Astronomy & Astrophysics*, 427, L21
- [34] Bykov, A., Krassilshchikov, A., Uvarov, Yu., et al. 2006, *Astrophysical Journal Lett.*, 649, L21
- [35] Chelovekov, I., Grebenev, S., Sunyaev, R. 2006, *Astronomy Letters*, 32, 456
- [36] Churazov E., Sunyaev R., Sazonov S., Revnirtsev M., Varshalovich D., 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 357, 1377
- [37] Churazov et al., et al., 2006, *astro*, arXiv:astro-ph/0608250
- [38] Chernyakova, M., Lutovinov, A., Capitanio, F., Lund, N., & Gehrels, N. 2003, *Astronomy Telegram*, 157, 1
- [39] Chernyakova, M., Courvoisier, T., Rodriguez, J., Lutovinov, A. 2005a, *Astronomy Telegram*, 519, 1
- [40] Chernyakova, M., Lutovinov, A., Rodríguez, J., & Revnirtsev, M. 2005b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 364, 455
- [41] Cornelisse, R., Charles, P. A., & Robertson, C. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 366, 918
- [42] Courvoisier, T., Walter, R., Rodriguez, J., Bouchet, L., Lutovinov A. 2003, *IAUC* 8063, 1
- [43] Crawford, D. F., Jauncey, D. L., & Murdoch, H. S. 1970, *Astrophysical Journal*, 162, 405
- [44] Dickey J. M., Lockman F. J., 1990, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 28, 215
- [45] Dwek E., et al., 1995, *Astrophysical Journal*, 445, 716
- [46] Donato, D., Sambruna, R.M., & Gliozzi, M., 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 433, 1163
- [47] Davis M., Peebles P. J. E., 1983, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 21, 109
- [48] den Hartog, P., Hermsen, W., Kuiper, L., et al. 2004a, *Astronomy Telegram*, 261, 1
- [49] den Hartog, P., Kuiper, L., Corbet, R., et al. 2004b, *Astronomy Telegram*, 281, 1

- [50] den Hartog, P., Kuiper, L., Hermsen, W., et al. 2005, *Astronomy Telegram*, 394, 1
- [51] Ebisawa, K., et al. 2005, *Astrophysical Journal*, 635, 214
- [52] Erdoğdu, P., et al. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373, 45
- [53] Fenimore, E. E., Cannon T. M., 1981 *Applied Optics*, 20, 1858.
- [54] Forman, W., Jones, C., Cominsky, L., Julien, P., Murray, S., Peters, G., Tananbaum, H., & Giacconi, R. 1978, *Astrophysical Journal Suppl.*, 38, 357
- [55] Fouqué, P., Solanes, J. M., Sanchis, T., & Balkowski, C. 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 375, 770
- [56] Freitag M., Amaro-Seoane P., Kalogera V., 2006, astro, arXiv:astro-ph/0603280
- [57] Gänsicke, B. T., et al. 2005, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 361, 141
- [58] Gehrels N., Barthelmy S. D., Teegarden B. J., Tueller J., Leventhal M., MacCallum C. J., 1991, *Astrophysical Journal*, 375, L13
- [59] Giacconi R., Gursky H., Paolini R., Rossi B. 1962, *Phys.Rev.Lett.* 9, 439
- [60] Górski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J., Wandelt, B. D., Hansen, F. K., Reinecke, M., & Bartelmann, M. 2005, *Astrophysical Journal*, 622, 759
- [61] Gotz, D., Schanne, S., Rodriguez, J., Leyder, J.-C., von Kienlin, A., Mowlavi, N., & Mereghetti, S. 2006, *Astronomy Telegram*, 813, 1
- [62] Gondek, D., Zdziarski, A.A., Johnson, W.N., George, I.M., McNaron-Brown, K., Magdziarz, P., et al., 1996, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 282, 646
- [63] Grebenev, S. A., Ubertini, P., Chenevez, J., Orr, A., & Sunyaev, R. A. 2004a, *Astronomy Telegram*, 275, 1
- [64] Grebenev, S., Ubertini, P., Chenevez, J., et al. 2004b, *Astronomy Telegram*, 350, 1
- [65] Grebenev, S. A., Molkov, S. V., & Sunyaev, R. A. 2005a, *Astronomy Telegram*, 467, 1
- [66] Grebenev, S. A., Molkov, S. V., & Sunyaev, R. A. 2005b, *The Astronomer's Telegram*, 616, 1

-
- [67] Grimm, H.-J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 391, 923
- [68] Gros, A., Goldwurm, A., Cadolle-Bel, M., Goldoni, P., Rodriguez, J., Foschini, L., Del Santo, M., & Blay, P. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L179
- [69] Giacconi, R., et al. 2001, *Astrophysical Journal*, 551, 624
- [70] Giacconi R., Zirm A., Wang J. et al. 2002, *ApJS*, 139, 369
- [71] Gilfanov M., Revnivtsev M., Sunyaev R., Churazov E., 1998, *Astronomy & Astrophysics*, 338, L83
- [72] Gilfanov M., 2004, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 349, 146
- [73] Gottesman, S. R., Fenimore, E. E. 1989, *Appl. Opt.*, 28, 4344
- [74] Grindlay J. E., 2006, astro, arXiv:astro-ph/0605133
- [75] Güdel M., 2004, *A&ARv*, 12, 71
- [76] Gruber, D. E., Matteson, J. L., Peterson, L. E., & Jung, G. V. 1999, *Astrophysical Journal*, 520, 124
- [77] Halpern, J. P. 2006, *Astronomy Telegram*, 847, 1
- [78] Hannikainen, D., Rodriguez, J., Pottschmidt, K. et al. 2003, *IAUC 8088*, 1
- [79] Hanski, M. O., Theureau, G., Ekholm, T., & Teerikorpi, P. 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 378, 345
- [80] Hajdas W., Bühler P., Eggel C., Favre P., Mchedlishvili A., Zehnder A., 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L43
- [81] Hands A. D. P., Warwick R. S., Watson M. G., Helfand D. J., 2004, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351, 31
- [82] Harris M. J., Share G. H., Leising M. D., Kinzer R. L., Messina D. C., 1990, *Astrophysical Journal*, 362, 135
- [83] Heinke C. O., Grindlay J. E., Edmonds P. D., Cohn H. N., Lugger P. M., Camilo F., Bogdanov S., Freire P. C., 2005, *Astrophysical Journal*, 625, 796
- [84] Hickox, R.C., & Markevitch, M., 2006, *Astrophysical Journal*, 645, 95
- [85] Hunter S. D., et al., 1997, *Astrophysical Journal*, 481, 205

- [86] Huchra, J., et al. 2005, ASP Conf. Ser. 329: Nearby Large-Scale Structures and the Zone of Avoidance, 329, 135
- [87] in't Zand, J. J. M., & Heise, J. 2004, Astronomy Telegram, 362, 1
- [88] in't Zand, J. J. M. 2005, Astronomy & Astrophysics, 441, L1
- [89] Immler, S., Brandt, W.N., Vignali, C., Bauer, F.E., Crenshaw, D.M., Feldmeier, J.J., et al., 2003, AJ, 126, 153
- [90] Indebetouw R., et al., 2005, Astrophysical Journal, 619, 931
- [91] Ivanova, N., Heinke, C. O., Rasio, F. A., Taam, R. E., Belczynski, K., & Fregeau, J. 2006, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 372, 1043
- [92] Karasev, D., Lutovinov, A., Grebenev, S. 2007, Astronomy Letters, 33, 135
- [93] Keek, S., Kuiper, L., & Hermsen, W. 2006, The Astronomer's Telegram, 810, 1
- [94] Kennea, J., Pavlov, G.G., Bykov, A.M., Krassilchtchikov, A.M., Uvarov, Y.A., Lebrun, F., et al., 2006, ATel 788
- [95] Kinzer R. L., Purcell W. R., Kurfess J. D., 1999, Astrophysical Journal, 515, 215
- [96] Kocevski D. D., Ebeling H., 2006, Astrophysical Journal, 645, 1043
- [97] Kormendy, J. 2001, Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, 10, 69
- [98] Kormendy, J., & Richstone, D. 1995, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 33, 581
- [99] Koyama, K., Petre, R., Gotthelf, E. V., Hwang, U., Matsuura, M., Ozaki, M., & Holt, S. S. 1995, Nature, 378, 255
- [100] Koyama, K., Kinugasa, K., Matsuzaki, K., Nishiuchi, M., Sugizaki, M., Torii, K., Yamauchi, S., & Aschenbach, B. 1997, PASJ, 49, L7
- [101] Kniffen D. A., Bertsch D. L., Morris D. J., Palmeira R. A. R., Rao K. R., 1978, Astrophysical Journal, 225, 591
- [102] Knödseder, J., et al. 2005, Astronomy & Astrophysics, 441, 513
- [103] de Kool M., 1992, Astronomy & Astrophysics, 261, 188

- [104] Kraushaar W. L., Clark G. W., Garmire G. P., Borke R., Higbie P., Leong V., Thorsos T., 1972, *Astrophysical Journal*, 177, 341
- [105] Kretschmar, P., Mereghetti, S., Hermsen, W., et al. 2004, *Astronomy Telegram*, 345, 1
- [106] Krivonos, R., Vikhlinin, A., Churazov, E., Lutovinov, A., Molkov, S., & Sunyaev, R., 2005a, *Astrophysical Journal*, 625, 89
- [107] Krivonos, R., Molkov, S., Revnivtsev, M., Grebenev, S., Sunyaev, R., & Paizis, A. 2005b, *Astron. Telegram*, 545, 1
- [108] Krivonos, R., Revnivtsev, M., Sazonov, S., Churazov, E., & Sunyaev, R. 2006, *IAU Symposium*, 230, 455
- [109] Krivonos, R., Revnivtsev, M., Churazov, E., et al. 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 463, 957
- [110] Kuiper, L., Keek, S., Hermsen, W., Jonker, P. G., & Steeghs, D. 2006, *Astron. Telegram*, 684, 1
- [111] Kuulkers, E., Lutovinov, A., Parmar, A., et al. 2003, *Astronomy Telegram*, 149, 1
- [112] Kuulkers, E., Shaw, S., Paizis, A., et al. 2006, *Astronomy Telegram*, 874, 1
- [113] Kuiper, L., Hermsen, W., den Hartog, P. R., & Collmar, W. 2006, *Astrophysical Journal*, 645, 556
- [114] Launhardt R., Zylka R., Mezger P. G., 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 384, 112
- [115] Lahav, O., Lynden-Bell, D., & Rowan-Robinson, M. 1988, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 234, 677
- [116] Lahav, O., Fabian, A. C., Edge, A. C., & Putney, A. 1989, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 238, 881
- [117] Lebrun F., et al., 2004, *Nature*, 428
- [118] Levenson, N.A., Weaver, K.A., & Heckman, T.M., 2001, *ApJS*, 133, 269
- [119] Lewis, K.T., Eracleous, M., Gliozzi, M., Sambruna, R.M., & Mushotzky, R.F., 2005, *Astrophysical Journal*, 622, 816
- [120] Leventhal M., MacCallum C. J., Stang P. D., 1978, *Astrophysical Journal*, 225, L11

- [121] Lindqvist M., Habing H. J., Winnberg A., 1992, *Astronomy & Astrophysics*, 259, 118
- [122] Levine, A. M., et al. 1984, *Astrophysical Journal Suppl.*, 54, 581
- [123] Liu, Q. Z., van Paradijs, J., & van den Heuvel, E. P. J. 2000, *A&AS Suppl.*, 147, 25
- [124] Liu, Q. Z., van Paradijs, J., & van den Heuvel, E. P. J. 2001, *Astronomy & Astrophysics*, 368, 1021
- [125] Lubinski, P., Gadolle Bel, M., von Kienlin, A., et al. 2005, *Astronomy Telegram*, 469, 1
- [126] Lutovinov, A. A., & Revnivtsev, M. G. 2003, *Astronomy Letters*, 29, 719
- [127] Lutovinov, A., Walter, R., Belanger, R., et al. 2003a, *Astronomy Telegram*, 155, 1
- [128] Lutovinov, A., Shaw, S., Foschini, L., Paul, J. 2003b, *Astronomy Telegram*, 154, 1
- [129] Lutovinov, A., Rodriguez, J., Produit, N., Paul, J. 2003c, *Astronomy Telegram*, 151, 1
- [130] Lutovinov, A., Rodriguez, J., Budtz-Jorgensen, C., et al. 2004a, *Astronomy Telegram*, 329, 1
- [131] Lutovinov, A., Bel, M. C., Belanger, G., Goldwurm, A., Budtz-Jorgensen, C., Mowlavi, N., Paul, J., & Orr, A. 2004, *Astronomy Telegram*, 328, 1
- [132] Lutovinov, A., Rodriguez, J., Revnivtsev, M., & Shtykovskiy, P. 2005a, *Astronomy & Astrophysics*, 433, L41
- [133] Lutovinov, A., Revnivtsev, M., Gilfanov, M., et al. 2005b, *Astronomy & Astrophysics*, 444, 821
- [134] Lutovinov, A., Revnivtsev, M., Molkov, S., Sunyaev, R. 2005c, *Astronomy & Astrophysics*, 430, 997
- [135] Lutz D., et al., 1996, *Astronomy & Astrophysics*, 315, L137 , 293
- [136] Lynden-Bell, D., Faber, S. M., Burstein, D., Davies, R. L., Dressler, A., Terlevich, R. J., & Wegner, G. 1988, *Astrophysical Journal*, 326, 19
- [137] Malizia, A., Bassani, L., Stephen, J.B., Malaguti, G., & Palumbo, G.G., 1997, *ApJS*, 113, 311

- [138] Malizia, A., Bassani, L., Stephen, J., et al. 2005, *Astrophysical Journal Lett.*, 630, L157
- [139] Mandrou P., Bui-van A., Vedrenne G., Niel M., 1980, *Astrophysical Journal*, 237, 424
- [140] Magdziarz, P., & Zdziarski, A.A., 1995, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 273, 837
- [141] Marshall, F. E., Boldt, E. A., Holt, S. S., Miller, R. B., Mushotzky, R. F., Rose, L. A., Rothschild, R. E., & Serlemitsos, P. J. 1980, *Astrophysical Journal*, 235, 4
- [142] Masetti, N., Palazzi, E., Bassani, L., Malizia, A., & Stephen, J.B., 2004, *Astronomy & Astrophysics*, 426, L41
- [143] Masetti, N., Bassani, L., Bird, A., Bassano, A. 2005, *Astron. Telegram*, 528,1
- [144] Masetti, N., Morelli, L., Palazzi, E., Stephen, J., Bazzano, A., Dean, A. J., Walter, R., & Minniti, D. 2006a, *Astronomy Telegram*, 783, 1
- [145] Masetti, N., Morelli, L., Palazzi, E., Galaz, G., Bassani, L., Bazzano, A., et al., 2006b, *Astronomy & Astrophysics*, 459, 21
- [146] Masetti, N., Pretorius, M.L., Palazzi, E., Bassani, L., Bazzano, A., & Bird, A.J, 2006c, *Astronomy & Astrophysics*, 449, 1139
- [147] Masetti, N., Bassani, L., Dean, A. J., Ubertini, P., & Walter, R. 2006d, *The Astronomer's Telegram*, 715, 1
- [148] Masetti, N., Bassani, L., Bazzano, A., Bird, A.J., Dean, A.J., Malizia, A., et al., 2006e, *Astronomy & Astrophysics*, 455, 11
- [149] Matt, G., Fabian, A.C., Guainazzi, M., Iwasawa, K., Bassani, L., & Malaguti, G., 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 318, 173
- [150] Markwardt, C.B., Tueller, J., Skinner, G.K., Gehrels, N., Barthelmy, S.D., & Mushotzky, R.F., 2005, *Astrophysical Journal*, 633, L77
- [151] Mukai K., Shiokawa K., 1993, *Astrophysical Journal*, 418, 863
- [152] Munro, M. P., et al. 2003, *Astrophysical Journal*, 589, 225
- [153] Munro, M. P., et al. 2004, *Astrophysical Journal*, 613, 326
- [154] Miyaji, T., & Boldt, E. 1990, *Astrophysical Journal Lett.*, 353, L3

- [155] Molkov, S., Mowlavi, N., Goldwurm, A., et al. 2003, *Astronomy Telegram*, 176, 1
- [156] Molkov S. V., Cherepashchuk A. M., Lutovinov A. A., Revnivitsev M. G., Postnov K. A., Sunyaev R. A., 2004, *AstL*, 30, 534
- [157] Molina, M., Bassani, L., Malizia, A., Stephen, J.B., & Bazzano, A., 2006, *ATel* 263
- [158] Moran, E.C., Eracleous, M., Leighly, K.M., Chartas, G., Filippenko, A.V., Ho, L.C., et al., 2005, *AJ*, 129, 2108
- [159] Morelli, L., Masetti, N., Bassani, L., et al., 2006, *Astronomy Telegram*, 785, 1
- [160] Nauenberg M., 1972, *Astrophysical Journal*, 175, 417
- [161] Neronov A., Chernyakova M., Courvoisier T. J. -, Walter R., 2005, astro, arXiv:astro-ph/0506437
- [162] Negueruela, I., Smith, D., Chaty, S. 2005, *Astronomy Telegram*, 470, 1
- [163] Negueruela, I., & Smith, D. 2006, *Astronomy Telegram*, 831, 1
- [164] Ottmann R., Schmitt J. H. M. M., 1992, *Astronomy & Astrophysics*, 256, 421
- [165] Oshima, T., Mitsuda, K., Ota, N., Yonehara, A., Hattori, M., Mihara, T., et al., 2001, *Astrophysical Journal*, 551, 929
- [166] Patterson, J. 1994, *PASP*, 106, 209
- [167] Palmer, D. M., Barthelmey, S. D., Cummings, J. R., Gehrels, N., Krimm, H. A., Marwardt, C. B., Sakamoto, T., & Tueller, J. 2005, *The Astronomer's Telegram*, 546, 1
- [168] Patel, S., Kouveliotou, C., Tennant, A., et al. 2004, *Astrophysical Journal*, 602, L45
- [169] Pavlinskii, M. N., Grebenev, S. A., & Syunyaev, R. A. 1992, *Soviet Astronomy Letters*, 18, 88
- [170] Perola, G.C., Matt, G., Cappi, M., Fiore, F., Guainazzi, M., Maraschi, L., et al., 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 389, 802
- [171] Politano M., 1996, *Astrophysical Journal*, 465, 338
- [172] Pfeffermann, E., & Aschenbach, B. 1996, *Roentgenstrahlung from the Universe*, 267

- [173] Plionis, M., & Kolokotronis, V. 1998, *Astrophysical Journal*, 500, 1
- [174] Produit, N., Ballet, J., Mowlavi, N. 2003, *Astronomy Telegram.*, 278, 1
- [175] Protheroe, R. J., Wolfendale, A. W., & Wdowczyk, J. 1980, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 192, 445
- [176] Prodanovic T., Fields B. D., Beacom J. F., 2006, astro, arXiv:astro-ph/0603618
- [177] Purcell W. R., et al., 1996, *A&AS*, 120, 389
- [178] Rea, N., Testa, V., Israel, G., et al. 2006, *Astronomy Telegram*, 713, 1
- [179] Reglero, V., S0410nchez, F., Rodrigo, J., Velasco, T., Gasent, J. L., et al., 2001, *Exploring the gamma-ray universe. Proceedings of the 4th INTEGRAL Workshop, 4-8 September 2000, Alicante, Spain.* Editor: B. Battrick, p. 619 - 622
- [180] Read, A.M., Saxton, R.D., Esquej, M.P., Freyberg, M.J., & Altieri, B, 2005, *Proc. 2005 EPIC XMM-Newton Consortium Meeting, MPE Report 288*, 137
- [181] Rees M. J., 1980, *IAUS*, 92, 207
- [182] Reeves, J.N., & Turner, M.J.L., 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 316, 234
- [183] Revnivitsev, M. G., Sazonov, S. Y., Gilfanov M. R., Sunyaev, R. A. 2003a, *Astronomy Letters*, 29, 587
- [184] Revnivitsev, M., Tuerler, M., Del Santo, M., et al. 2003b, *IAUC 8097*, 1
- [185] Revnivitsev, M., Chernyakova, M., Capitanio, F., et al. 2003c, *Astronomy Telegram*, 132, 1
- [186] Revnivitsev, M., Sazonov, S., Jahoda, K., & Gilfanov, M., 2004a, *Astronomy & Astrophysics*, 418, 927
- [187] Revnivitsev, M. G., Sunyaev, R. A., Gilfanov, M. R., Churazov, E. M., Goldwurm, A., Paul, J., Mandrou, P., & Roques, J. P. 2004, *Astronomy Letters*, 30, 527
- [188] Revnivitsev, M., Sazonov, S., Churazov, E., et al. 2004b, *Astronomy & Astrophysics*, 425, L49
- [189] Revnivitsev, M., Sunyaev, R., Varshalovich, D., et al. 2004c, *Astronomy Letters*, 30, 382

- [190] Revnivtsev M., Gilfanov M., Sunyaev R., Jahoda K., Markwardt C., 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, 329
- [191] Revnivtsev M., Sazonov S., Jahoda K., Gilfanov M., 2004, *Astronomy & Astrophysics*, 418, 927
- [192] Revnivtsev M. G., et al., 2004, *AstL*, 30, 382
- [193] Revnivtsev, M. G., Sazonov, S. Y., Molkov, S. V., Lutovinov, A. A., Churazov, E. M., & Sunyaev, R. A. 2006, *Astronomy Letters*, 32, 145
- [194] Revnivtsev, M., Sazonov, S., Gilfanov, M., Churazov, E., & Sunyaev, R. 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 452, 169
- [195] Revnivtsev, M., Molkov, S., & Sazonov, S. 2006, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 373, L11
- [196] Revnivtsev, M., Vikhlinin, A., & Sazonov, S. 2006, *ArXiv Astrophysics e-prints*, arXiv:astro-ph/0611952
- [197] Revnivtsev, M., Churazov, E., Sazonov, S., Forman, W., & Jones, C. 2007, *ArXiv Astrophysics e-prints*, arXiv:astro-ph/0702578
- [198] Reig, P., Negueruela, I., Papamastorakis, G., Manousakis, A., & Kougentakis, T. 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 440, 637
- [199] Renaud, M., Gros, A., Lebrun, F., Terrier, R., Goldwurm, A., Reynolds, S., & Kalemci, E. 2006a, *Astronomy & Astrophysics*, 456, 389
- [200] Renaud, M., Bélanger, G., Paul, J., Lebrun, F., & Terrier, R. 2006b, *Astronomy & Astrophysics*, 453, L5
- [201] Reynolds, C.S., 1997, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 286, 513
- [202] Risaliti, G., Elvis, M., & Nicastro, F., 2002, *Astrophysical Journal*, 571, 234
- [203] Risaliti, G., Elvis, M., Fabbiano, G., Baldi, A., & Zezas, A., 2005, *Astrophysical Journal*, 623, L93
- [204] Richstone, D., et al. 1998, *Nature*, 395, A14
- [205] Rodriguez, J., Domingo Garau, A., Grebenev, S., et al. 2004, *Astron. telegram*, 340, 1
- [206] Rodriguez, J., Cabanac, C., Hannikainen, D. C., Beckmann, V., Shaw, S. E., & Schultz, J. 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 432, 235

- [207] Rowan-Robinson M., et al., 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 314, 375
- [208] Sacher W., Schoenfelder V., 1984, *Astrophysical Journal*, 279, 817
- [209] Sakano M., Koyama K., Murakami H., Maeda Y., Yamauchi S., 2002, *ApJS*, 138, 19
- [210] Sazonov, S., & Revnivtsev, M., 2004, *Astronomy & Astrophysics*, 423, 469
- [211] Sazonov, S.Y., Ostriker, J.P., Sunyaev, R.A., 2004, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 347, 144
- [212] Sazonov, S.Y., Revnivtsev, M.G., Lutovinov, A.A., Sunyaev, R.A., & Grebenev, S.A., 2004b, *Astronomy & Astrophysics*, 421, L21
- [213] Sazonov, S., Churazov, E., Revnivtsev, M., Vikhlinin, A., & Sunyaev, R., 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 444, L37
- [214] Sazonov, S., Revnivtsev, M., Krivonos, R., Churazov, & Sunyaev, R., 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 462, 57
- [215] Sazonov S., Revnivtsev M., Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 450, 117
- [216] Sazonov, S., et al. in preparation
- [217] Schmitt J. H. M. M., Collura A., Sciortino S., Vaiana G. S., Harnden F. R., Rosner R., 1990, *ApJ*, 365, 704
- [218] Setti G., Rees M. J., 1970, *IAUS*, 37, 352
- [219] Skibo J. G., Ramaty R., 1993, *A&AS*, 97, 145
- [220] Skibo J. G., et al., 1997, *Astrophysical Journal*, 483, L95
- [221] Stecker, F. W. 1973, *Astrophysical Journal*, 185, 499
- [222] Stecker F. W., 1977, *Astrophysical Journal*, 212, 60
- [223] Strong, A. W., Diehl, R., Halloin, H., Schönfelder, V., Bouchet, L., Mandrou, P., Lebrun, F., & Terrier, R. 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 444, 495
- [224] Sugizaki M., Mitsuda K., Kaneda H., Matsuzaki K., Yamauchi S., Koyama K., 2001, *ApJS*, 134, 77
- [225] Suleimanov V., Revnivtsev M., Ritter H., 2005, *Astronomy & Astrophysics*, 435, 191

- [226] Saunders, W., et al. 2000, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 317, 55
- [227] Sguera, V., Bazzano, A., Bird, A., et al. 2006, *Astrophysical Journal*, 646, 452
- [228] Skinner, G. K. et al. 1987, *Astroph.Sp.Sci.*, 136, 337-349.
- [229] Smith, D. M., Heindl, W. A., Markwardt, C. B., Swank, J. H., Negueruela, I., Harrison, T. E., & Huss, L. 2006, *Astrophysical Journal*, 638, 974
- [230] Slane, P., Gaensler, B. M., Dame, T. M., Hughes, J. P., Plucinsky, P. P., & Green, A. 1999, *Astrophysical Journal*, 525, 357
- [231] Sunyaev, R., Lutovinov, A., Molkov, S., Deluit, S. 2003a, *Astronomy Telegram*, 181, 1
- [232] Sunyaev, R., Grebenev, S., Lutovinov, A., et al. 2003b, *Astronomy Telegram*, 192, 1
- [233] Shakura, N.I., & Sunyaev, R.A., 1976, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 175, 613
- [234] Schmidt, M. 1968, *Astrophysical Journal*, 151, 393
- [235] Shinozaki, K., Miyaji, T., Ishisaki, Y., Ueda, Y., & Ogasaka, Y., 2006, *Astrophysical Journal*, 131, 2943
- [236] Tanaka Y., Miyaji T., Hasinger G., 1999, *AN*, 320, 181
- [237] Tanaka Y., 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 382, 1052
- [238] Terrier R., et al., 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L167
- [239] Terrier R., Lebrun F., Belanger G. et al. 2004, *Proceedings of the 5th INTEGRAL Workshop, Munich 16-20 February 2004*. ESA SP-552, *astroph/0405207*
- [240] Tonry, J. L., Blakeslee, J. P., Ajhar, E. A., & Dressler, A. 2000, *Astrophysical Journal*, 530, 625
- [241] Tomsick, J., Lingenfelter, R., Walter, R., et al. 2003, *IAUC 8076*, 1
- [242] Tomsick, J., Lingenfelter, R., Corbel, S., Goldwurm, A., Kaaret, P. 2004, *Astronomy Telegram*, 224, 1
- [243] Tomsick, J., Chaty, S., Rodriguez, J., et al. 2006, *Astrophysical Journal*, 647, 1309

- [244] Toor, A., & Seward, F. D. 1974, *AJ*, 79, 995
- [245] Torres, M.A.P., Garcia, M.R., McClintock, J.E., Steeghs, D., Miller, J., Callanan, P.J., et al., 2004, *ATel* 264
- [246] Torres, M. A. P., et al. 2005, *Astronomy Telegram*, 551, 1
- [247] Tueller, J., Markwardt, C., Ajello, M., Beckmann, V., Belloni, T., Falcone, A., et al., 2006, *ATel* 835
- [248] Tully, R.B. 1988, *Nearby Galaxies Catalogue*, Cambridge University Press
- [249] Turner, T.J., George, I.M., Nandra, K., & Mushotzky, R.F., 1997, *ApJS*, 113, 23
- [250] Tueller, J., Barthelmy, S., Burrows, D., et al. 2005, *Astronomy Telegram*, 669, 1
- [251] Turler, M., Bel, M. C., Diehl, R., Westergaard, N.-J., McBreen, B., Williams, O. R., Grebenev, S. A., & Lutovinov, A. 2005, *The Astronomer's Telegram*, 624, 1
- [252] Ubertini P., et al., 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L131
- [253] Ubertini, P., Bassani, L., Malizia, A., et al. 2005, *Astrophysical Journal Lett.*, 629, L109
- [254] Ueda, Y., Akayama, M., Ohta, K., & Miyaji, T., 2003, *Astrophysical Journal*, 598, 886
- [255] Vedrenne, G., et al. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L63
- [256] Vallee J. P., 1995, *Astrophysical Journal*, 454, 119
- [257] Valinia A., Marshall F. E., 1998, *Astrophysical Journal*, 505, 134
- [258] Vignali, C., Comastri, A., Stirpe, G.M., Cappi, M., Palumbo, G.G.C., Matsuoka, M., et al., 1998, *Astronomy & Astrophysics*, 333, 411
- [259] Vignali, C., & Comastri, A., 2002, *Astronomy & Astrophysics*, 381, 834
- [260] Warwick R. S., Pye J. P., Fabian A. C., 1980, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 190, 243
- [261] Warwick R. S., Turner M. J. L., Watson M. G., Willingale R., 1985, *Nature*, 317, 218
- [262] Warwick R. S., Norton A. J., Turner M. J. L., Watson M. G., Willingale R., 1988, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 232, 551

- [263] Warner, B. 1995, *Astroph.Sp.Sci.*, 232, 89
- [264] Walter, R., Bodaghee, A., Barlow, E., et al. 2003, *Astronomy Telegram*, 229, 1
- [265] Walter, R., Zurita Heras, J., Bassani, L., et al. 2006, *Astronomy & Astrophysics*, 453, 133
- [266] Worrall D. M., Marshall F. E., Boldt E. A., Swank J. H., 1982, *Astrophysical Journal*, 255, 111
- [267] Winkler, C., Courvoisier, T., Di Cocco, G., et al. 2003, *Astronomy & Astrophysics*, 411, L1
- [268] Woudt, P.A., Kraan-Korteweg, R.C., Fairall, A.P., Boehringer, H., Cayatte, V., & Glass, I.S., 1998, *Astronomy & Astrophysics*, 338, 8
- [269] Zwickl R. D., Webber W. R., 1978, *JGR*, 83, 1157
- [270] Young, A.J., Wilson, A.S., Terashima, Y., Arnaud, K.A., & Smith, D.A., 2002, *Astrophysical Journal*, 564, 176