

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

Бороздин Константин Николаевич

НАБЛЮДЕНИЯ
РЕНТГЕНОВСКИХ НОВЫХ И РАДИОИСТОЧНИКОВ
СО СВЕРХСВЕТОВЫМ РАЗЛЕТОМ КОМПОНЕНТ
ПРИБОРАМИ МОДУЛЯ МИР-КВАНТ;
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

01.03.02 Астрофизика, радиоастрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
академик РАН Р.А.Сюняев

Москва
1995

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ЧАСТЬ 1. НАБЛЮДЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПРИБОРАМИ МОДУЛЯ “КВАНТ”	11
Глава 1. Астрофизическая обсерватория на модуле “Квант” орбитальной космической станции “Мир”	11
1.1. Модуль “Квант”: восемь лет на орбите	11
1.2. Рентгеновский спектрометр ПУЛЬСАР X-1.	13
1.3. Телескоп с теневой маской ТТМ	16
Глава 2. Наблюдения рентгеновских новых приборами модуля “Квант”	23
2.1. Рентгеновская Новая 1989 г. в Лебеде	23
2.2. Рентгеновская Новая 1991 г. в Персее	27
2.3. Рентгеновская Новая 1993 г. в Парусах	29
2.4. Рентгеновская новая 1993 г. в Змееносце.	33
2.5. Сравнение наблюдательных проявлений рентгеновских новых.	37
Глава 3. Наблюдения радиоисточников со сверхсветовым видимым разлетом компонент рентгеновским телескопом ТТМ.	50
3.1. Рентгеновский транзиентный источник GRS1915+105	50
3.2. GRO J1655-40 - рентгеновская Новая 1994 г. в Скорпионе	52
3.3. Общие наблюдательные проявления рентгеновских источников GRS1915+105 и GRO J1655-40	54

Глава 4. Новые рентгеновские источники KS1947+300 и KS1730-312.	63
4.1. Рентгеновский транзиентный источник KS1947+300 в созвездии Лебеда.....	63
4.2. Яркий транзиентный источник KS1730-312 в созвездии Скорпиона.	65
Заключение к части I	75
ЧАСТЬ 2. ПЕРСПЕКТИВЫ НАБЛЮДЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРАНЗИЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИБОРАМИ ОБСЕРВАТОРИИ “СПЕКТР-РЕНТГЕН-ГАММА” ...	78
Глава 5. Рентгеновский монитор всего неба МОКСЕ.	79
5.1. Описание рентгеновского монитора МОКСЕ.	80
5.2. Оценка возможностей прибора МОКСЕ.....	83
Глава 6. Брэгговский спектрометр рентгеновского телескопа СОДАРТ ...	88
6.1. Описание прибора “Брэгговский спектрометр”	89
6.2. Слагаемые спектрального разрешения объективного брэгговского спектрометра.	90
6.3. Параметры брэгговских монокристаллов.	92
6.3.1. Кристаллы фтористого лития.	92
6.3.2. Кристаллы RbAP.....	93
6.3.3. Кристаллы кремния и многослойные структуры.	94
6.4. Система вращения панели спектрометра.	95
6.5. Рентгеновская калибровка зеркальных систем телескопа СОДАРТ..	97
6.6. Возможности исследования источников рентгеновского излучения прибором “Брэгговский спектрометр”.	100
Заключен ие к части II.....	106
ЛИТЕРАТУРА.....	109

ВВЕДЕНИЕ

С древних времен звездное небо считалось эталоном постоянства и вечности. Переменные звезды были и остаются редкими исключениями на общем неизменном фоне. Вспышки Новых и Сверхновых звезд происходили настолько редко и производили такое сильное впечатление, что упоминания об этих событиях заносились в летописи. Совсем другое впечатление производит наблюдение неба в рентгеновских лучах, ставшее возможным в последние три десятилетия в связи с успехами космонавтики. Рентгеновские источники, как правило, обладают более или менее ярко выраженной переменностью. Существует целый класс рентгеновских объектов - транзиентные источники, которые неожиданно вспыхивают, светят некоторое время и гаснут, чтобы через какое-то время вспыхнуть снова - или не вспыхнуть уже никогда.

Быстрые и резкие перемены, периодические или необратимые изменения в явлениях природы всегда вызывают повышенный интерес наблюдателей. Транзиентные источники привлекали и продолжают привлекать внимание астрофизиков. Уже в 1967 г. наблюдалась вспышка источника Cen X-2 [1], в 1969 г. - Cen X-4 [2], в 1971 - двух источников, 1543-47 и 1735-28 [3] - все эти источники в максимуме блеска сравнивались с наиболее яркими источниками рентгеновского неба. Источники этого класса получили название рентгеновские новые по аналогии с оптическими новыми звездами. К 1974 г. после полета спутника УХУРУ было известно уже 13 источников этого класса [4]. Выяснилось, что данные источники находятся в нашей Галактике и представляют собой двойные системы с оптической компонентой позднего спектрального класса; средняя частота вспышек была определена равной 1.5 источника/год. Недостаток качественных данных о поведении рентгеновских новых в различных диапазонах энергии не позволял делать в то время какие-либо выводы о природе компактной компоненты этих систем.

Первой рентгеновской новой, которая была достаточно подробно изучена, стал источник A0620-00 [5] (Новая в Единороге 1975 г.). По данным спутника Ariel-5 поток от этого источника в диапазоне 3-6 кэВ в максимуме блеска в 4 раза превышал поток от ярчайшего в другое время источника рентгеновского неба Sco X-1 и в 60 раз - поток от Крабовидной туманности [6]. Особое внимание A0620-00 привлек после того, как Мак-Клинтон и Ремиллард [7] по оптическим наблюдениям этой двойной системы после спада рентгеновской светимости показали, что компактный компонент двойной системы является кандидатом в черные дыры.

Черные дыры, возникшие как экзотическое следствие общей теории относительности [8, 9, 10], считались первоначально принципиально ненаблюдаемыми, т.к. никакое излучение не может покинуть черную дыру. Однако, в 1964 г. Я.Б.Зельдович показал [11], что в случае вхождения черной дыры в двойную систему, притяжение этого массивного объекта может вызывать перетекание вещества со звезды-компаньона с формированием вращающегося аккреционного диска. При этом горячая плазма аккреционного диска излучает в рентгеновском диапазоне [12]. В ходе дальнейших исследований действительно были обнаружены источники рентгеновского излучения, отождествленные с двойными системами с аномально массивными компактными объектами. Первым и наиболее известным из таких объектов стал Суг X-1, отождествленный с двойной системой, в состав которой входит голубой сверхгигант HDE 226868 и массивный компактный объект [13]. Интересно, что теория не предсказывает определенных особенностей в спектре излучения, возникающего вокруг черной дыры; однако, некоторые явления, такие как пульсации или рентгеновские всплески, ассоциируемые с нейтронными звездами, не должны наблюдаться в случае черных дыр. Наиболее надежным аргументом в пользу наличия в системе черной дыры остается измерение массы компактного объекта. При этом из оптических наблюдений определяется оптическая функция масс системы:

$$f(M) = \frac{(M_K \cdot \sin i)^3}{(M_P + M_K)^2} = \frac{P \cdot (V_K \cdot \sin i)^3}{2\pi G}, \text{ где } M_P - \text{масса рентгеновской компоненты}$$

двойной системы, M_K - масса звезды-компаньона, i - угол наклона орбиты по отношению к лучу зрения, P - орбитальный период, $V_K \cdot \sin i$ - проекция

полуамплитуды скорости оптического компонента. Зависящая только от измеряемых величин P и $V_K \cdot \sin i$, функция масс представляет собой абсолютное минимальное значение для массы компактного объекта, не зависящее от предположений о расстоянии до двойной системы и массе оптической компоненты. Теоретические выкладки, основанные на общей теории относительности, показывают, что принимая во внимание все неопределенности в деталях теории, можно принять $3M_{\odot}$, как жесткий верхний предел на массу нейтронной звезды. В случае A0620-00 функция масс системы оказалась равной $f(M)=3.18 \pm 0.16 M_{\odot}$ [7]. Это дало основание для заключения, что релятивистский объект в этой системе является черной дырой, а не нейтронной звездой. Впоследствии еще по крайней мере для двух рентгеновских новых - GS2023+338 [14] и GS1124-68 функция масс системы превысила $3M_{\odot}$. Для остальных рентгеновских новых доказательства присутствия черной дыры в системе не столь очевидны. Тем не менее класс рентгеновских новых, вероятно, является наиболее многочисленным в Галактике классом двойных звездных систем, включающим в себя черные дыры.

За время активной работы в космосе комплекса рентгеновских приборов на модуле "Квант" орбитальной космической станции "Мир", с 1987 по конец 1994 гг., обзорными приборами спутников GINGA, "Гранат" и GRO было обнаружено 7 источников, классифицированных как рентгеновские новые: GS2000+25 = рентгеновская Новая 1988 г. в Лисичке [15], GS2023+338 = рентгеновская Новая 1989 г. в Лебеде [16], GRS1124-648 = рентгеновская Новая 1991 г. в Мухе [17, 18], GRO J0422+32 = рентгеновская Новая 1992 г. в Персее [19], GRS1009-45 = рентгеновская Новая 1993 г. в Парусах [20], GRS1716-249 = рентгеновская Новая 1993 г. в Змееносце [21, 22], GRO J1655-40 = рентгеновская Новая 1994 г. в Скорпионе [23]. Приборы модуля "Квант" проводили наблюдения шести из этих источников за исключением рентгеновской новой в Мухе. В данной работе представлены результаты, полученные при наблюдении этих источников спектрометром ПУЛЬСАР X-1 в 1989-1992 гг. и телескопом ТТМ в 1992-1994 гг.

В 1994 г. сенсационные результаты принесли наблюдения в радиодиапазоне двух транзиентных рентгеновских источников GRS1915+105 и GRO J1655-40. Оказалось, что эти объекты не только являются переменными радиоисточниками,

но и выбрасывают облака релятивистских электронов, перемещающихся в плоскости неба со сверхсветовыми видимыми скоростями [24, 25]. Эффект наблюдаемых сверхсветовых движений был предсказан М.Рисом в рамках специальной теории относительности еще в 60-х годах [26]. Этот эффект был впоследствии обнаружен при наблюдениях многих квазаров и активных ядер галактик [27]. GRS1915+105 и GRO J1655-40 оказались первыми источниками такого типа в нашей Галактике.

Многие наблюдательные свойства рентгеновских источников GRS1915+105 и GRO J1655-40 подобны свойствам других ярких рентгеновских транзиентов, вспыхивающих время от времени в Галактике. В соответствии с современными представлениями источником энергии для этих объектов является аккреция, связанная с перетеканием вещества с нормальной звезды на релятивистскую в тесной двойной системе. В случае квазаров и радиогалактик общепринято считать, что центральная машина излучающего объекта представляет собой сверхмассивную черную дыру с массой 10^7 - $10^8 M_{\odot}$. Сходство процессов, происходящих в GRS1915+105 и GRO J1655-40, с процессами в квазарах определяется тем, что в обоих классах объектов не исследованные до конца процессы приводят к выбросу электронных облаков с релятивистскими скоростями. Таким образом, GRS1915+105 и GRO J1655-40 становятся естественным связующим звеном между релятивистскими объектами звездной массы и сверхмассивными черными дырами. При этом особую актуальность приобретает вопрос о природе релятивистских компонент двойных систем в этих объектах.

Представленные в данной работе результаты получены автором в результате работы на протяжении семи лет в отделе Астрофизики высоких энергий Института космических исследований РАН. Хочется выразить благодарность многим людям, работавшим все эти годы рядом с автором, вклад которых в эту работу трудно переоценить. Прежде всего необходимо отметить огромное влияние, оказанное научным руководителем диссертации, создателем и руководителем отдела Астрофизики высоких энергий, научным руководителем рентгеновских обсерваторий РЕНТГЕН на модуле "Мир-Квант" и "Спектр-Рентген-Гамма", академиком РАН Р.А.Сюняевым. Автор особенно признателен также

Н.Л.Александровичу, В.А.Арефьеву, Н.Н.Блинову, В.В.Боркусу, А.А.Вихлинину, М.Р.Гильфанову, С.А.Гребеневу, В.В.Ефремову, А.С.Каниовскому, А.В.Кузнецову, С.В.Лаврову, И.Ю.Лапшову, Т.В.Литвиновой, О.Лященко, М.Л.Маркевичу, Н.Ю.Паппе, С.Ю.Сазонову, Д.К.Степанову, Л.Г.Титарчуку, А.Г.Финогенову, Е.М.Чуразову, С.Н.Юнину за совместную работу и полезные дискуссии. Большой вклад в продолжение работы модуля "Квант", справившего недавно свой восьмой юбилей на орбите вносят А.В.Прудкогляд, В.Г.Родин, Е.А.Рязанова и большой коллектив НПО "Энергия" и Центра управления полетами. Предварительной обработкой данных "Кванта" занимается в последнее время А.Н.Ананенкова; программное обеспечение для предварительной обработки написано А.Тихоновым. Совместная работа с А.Я.Грудским и Ф.Е.Кристенсенем помогла автору разобраться в основах рентгеновской спектроскопии с высоким разрешением. Приятно упомянуть также о хороших рабочих отношениях, сложившихся в рамках подготовки проекта "Спектр-Рентген-Гамма" с В.Д.Аксененко, К.Блэком, М.В.Бунтовым, Х.Вибики, С.П.Гальцевым, М.А.Гореловым, Е.А.Григорьевой, Г.Ефимовым, Ж.Зандом, Н.И.Колесовой, Г.Костлоу, И.Р.Кремневым, Р.Льюисом, К.Моссом, Б.С.Новиковым, К.Оме, В.Предгорски, О.Ю.Стеколыщиковым, В.К.Сысоевым, М.Л.Тарасенко, М.В.Терентьевым, П.Фредриксенем, Б.Хелсби, А.Хорнstrupом, Е.Б.Цукерманом, И.В.Чулковым, Г.Шноппером. Работа над диссертацией была бы невозможной без поддержки семьи, прежде всего жены Лены, вынесшей основное бремя забот по поддержанию жизнедеятельности семьи при хроническом отсутствии мужа, а также психологически поддерживавшей меня все это время. Хочется поблагодарить также моих родителей и сестру, оказывавших на меня стимулирующее моральное давление.

Диссертация состоит из введения и двух частей, посвященных соответственно результатам модуля "Квант" и разработке приборов проекта "Спектр-Рентген-Гамма". Первая часть работы посвящена результатам, полученным приборами ПУЛЬСАР X-1 и ТТМ модуля "Квант". Она состоит из четырех глав и заключения.

В первой главе приводятся краткое описание модуля "Квант", особенности проведения экспериментов на космической станции "Мир", описываются приборы ПУЛЬСАР X-1 и ТТМ, особенности их работы, основные принципы обработки данных. Спектрометр ПУЛЬСАР X-1 чувствителен к жесткому диапазону

рентгеновского излучения от 30 до 800 кэВ. Для получения спектра источника GS2023+338 была проведена калибровка энергетической шкалы спектрометра по фоновым линиям спектра, значительно переработано программное обеспечение. Телескоп с теневой маской ТТМ регистрирует рентгеновское излучение в диапазоне от 2 до 27 кэВ и способен строить рентгеновское изображение в поле зрения $15^\circ \times 15^\circ$ с угловым разрешением около 2 угл.мин. Приведены оценки точности наведения приборов модуля "Квант" по положению ярких источников в поле зрения прибора ТТМ.

Во второй главе приведены результаты наблюдений модулем "Квант" в 1989-1995 гг. четырех рентгеновских новых: GS2023+338, GRO J0422+32, GRS1009-45 и GRS1716-249. В спектре GS2023+338 по данным прибора ПУЛЬСАР X-1 обнаружена жесткая компонента рентгеновского излучения вплоть до энергии около 400 кэВ. В июле 1989 г. рентгеновское излучение от GS2023+338 значительно ослабло по сравнению с июньскими наблюдениями. GRO J0422+32 имел в августе-сентябре 1992 г. по данным ТТМ степенной спектр в диапазоне 2-27 кэВ с наклоном степени $\alpha = -1,5$ и без значимого поглощения. В спектре GRS 1009-45 обнаружена яркая мягкая компонента, которая может быть аппроксимирована чернотельным законом с $kT \approx 0,5$ кэВ. По данным ТТМ проведена локализация источника. Спектр GRS1716-249 оказался полностью подобен спектру GRO J0422+32 - наклон степенной аппроксимации в диапазоне 2-27 кэВ был равен $\alpha = -1,5$. Неожиданностью стала повторная вспышка этого источника осенью 1994 - весной 1995 гг. Обсуждаются особенности проведенных наблюдений, полученных спектров и временного поведения каждой рентгеновской новой.

В третьей главе приводятся результаты наблюдений источников с видимым сверхсветовым разлетом радиокомпонент GRS1915+105 [28], и GRO J1655-40. Спектры источников, полученные прибором ТТМ, показали наличие яркой мягкой компоненты, описываемой законом излучения черного тела с эффективной температурой $kT = 1,1 \pm 0,1$ кэВ. Ряд общих наблюдательных свойств GRS1915+105 и GRO J1655-40 позволяют выделить их в отдельную группу рентгеновских источников.

В четвертой главе приведены результаты наблюдений двух транзиентных источников рентгеновского излучения, открытых прибором ТТМ. Источник KS1947+300 был обнаружен во время наблюдений рентгеновской Новой GS2023+338 летом 1989 г.; KS1730-312 был обнаружен во время наблюдений области Центра Галактики в сентябре 1994 г. Ряд наблюдательных особенностей источника KS1730-312 позволяют отнести его к классу рентгеновских новых.

В заключении к первой части приводится обзор данных, полученных при наблюдениях рентгеновских новых и других транзиентных источников приборами модуля "Квант".

Во второй части описаны приборы МОКСЕ и "Брэгговский спектрометр", входящие в состав научной аппаратуры проекта "Спектр-Рентген-Гамма".

Пятая глава содержит описание рентгеновского монитора всего неба МОКСЕ обсерватории "Спектр-Рентген-Гамма". Приводятся основные параметры монитора, проводится его сравнение с аналогичными приборами других проектов. Обсуждаются возможности монитора по детектированию и локализации ярких рентгеновских транзиентов.

Шестая глава посвящена разработке прибора "Брэгговский спектрометр" телескопа СОДАРТ. Приведены результаты измерений параметров монокристаллов, испытаний системы вращения панели. Описана калибровка зеркальных систем телескопа на синхротронном пучке. На основании экспериментальных результатов проведена оценка возможностей диагностики горячей плазмы и измерения смещения рентгеновских линий в спектрах.

В заключении ко второй части кратко суммируется содержание второй части диссертации, обсуждаются возможности аппаратуры обсерватории "Спектр-Рентген-Гамма", других проектов по наблюдению транзиентных рентгеновских источников.

ЧАСТЬ 1. НАБЛЮДЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПРИБОРАМИ МОДУЛЯ “КВАНТ”

Глава 1. Астрофизическая обсерватория на модуле “Квант” орбитальной космической станции “Мир”

1.1. Модуль “Квант”: восемь лет на орбите.

В начале 80-х годов Институт космических исследований АН СССР выступил с инициативой разработки астрофизического модуля для советской орбитальной космической станции “Салют-7”. В проекте приняли участие астрофизики четырех западноевропейских стран (Великобритании, Нидерландов, ФРГ и Швейцарии) и Европейское космическое агентство. Были разработаны и изготовлены четыре рентгеновских прибора, перекрывающих совместно широкий диапазон энергий от 2 до 800 кэВ. 12 апреля 1987 г., после неудачной стыковки и выхода космонавтов на поверхность станции для проведения ремонтных работ, астрофизический модуль “Квант” был со второй попытки подстыкован к советской космической станции нового поколения “Мир”.

Приборы жестко закреплены на модуле орбитальной станции и нацелены на одну и ту же точку небесной сферы. Чтобы навести приборы на заданный рентгеновский источник, вся космическая станция должна быть развернута. Для этого на модуле “Квант” были установлены 6 гиродинов; по два в каждом направлении. Для питания гиродинов на станции была установлена дополнительная панель солнечных батарей.

В состав научной аппаратуры модуля “Квант”, предназначенной для проведения исследований космических источников рентгеновского излучения, входят следующие приборы:

1. Телескоп с теневой маской ТТМ (COded Mask Imaging Spectrometer COMIS) [1] - единственный прибор в составе обсерватории, способный строить

рентгеновское изображение. В состав телескопа входил звездный датчик для определения наведения приборов комплекса. ТТМ/COMIS был создан в кооперации Лаборатории космических исследований в Утрехте (Нидерланды) и Бирмингемского университета (Великобритания).

2. Рентгеновский спектрометр ГЕКСЕ (High Energy X-ray Experiment HEXE) [2] разработан отделением Института Макса Планка в Гаршинге и Тюбингемским университетом (ФРГ). Прибор состоит из четырех идентичных детекторов типа "фосвич", собранных из кристаллов NaI/CsI и чувствительных к рентгеновскому излучению в диапазоне от 15 до 200 кэВ с энергетическим разрешением 30% (ПШПВ) на энергии 60 кэВ. Поле зрения детектора $1^\circ.6 \times 1^\circ.6$ ограничено качающимся коллиматором, который поворачивается на угол $2^\circ.3$ с двухминутными интервалами для измерения рентгеновского фона. Прибор может работать с временным разрешением 0.3 или 25 мс.

3. Газовый сцинтилляционный пропорциональный счетчик (ГСПС) был разработан Европейским космическим агентством в институте ESTEC (Нидерланды) для проведения спектроскопии рентгеновских источников в диапазоне 2-100 кэВ [3]. Энергетическое разрешение 10.5% (ПШПВ на 6 кэВ), эффективная площадь на той же энергии 170 см^2 . Временное разрешение 1.25 или 2.50 мс. Поле зрения $2^\circ.3$.

4. Рентгеновский спектрометр ПУЛЬСАР X-1 был поставлен Институтом космических исследований АН СССР. Этот прибор чувствителен к жесткому диапазону рентгеновского излучения от 30 до 800 кэВ.

В ноябре 1989 г. наблюдения модуля "Квант" были временно прерваны, поскольку конфигурация станции "Мир" была изменена, и два дополнительных модуля, "Квант-2" и "Кристалл", были последовательно подстыкованы к станции с интервалом в полгода. В октябре 1990 г. наблюдения были возобновлены. Для переориентации станции в новой конфигурации потребовалось увеличить число гиродинов до 10. С конца 1991 г. наблюдения стали проводиться достаточно регулярно, однако ввиду более жестких ограничений на ориентацию станции среднее количество сеансов, проводимых за год в 1992-1994 гг., было значительно меньше, чем в 1988-1989 гг.

Высота орбиты станции "Мир" около 350 км, наклонение 57 градусов, орбитальный период 90 мин. В высоких широтах и при пересечении Бразильской аномалии фон заряженных частиц так велик, что может привести к повреждению рентгеновских детекторов, поэтому для проведения наблюдений используется только экваториальный участок орбиты. Выбор мишеней для наблюдений ограничен, так как для обеспечения достаточного энергоснабжения ориентация панелей солнечных батарей по отношению к Солнцу должна быть близка к оптимальной. Сеансы наблюдений рентгеновских источников приборами модуля "Квант" имеют продолжительность 14-26 минут. В первые годы работы проводилось до 7-8 сеансов наблюдений в сутки. В дальнейшем, после подстыковки новых модулей, усложнение конфигурации станции наложило более жесткие ограничения на количество сеансов, проводимых в течение суток. В результате в последние годы удается проводить в лучшем случае 1-2 сеанса наблюдений в день. Станция "Мир" - многоцелевая, и проведение астрофизических наблюдений часто вступает в конфликт с другими задачами станции. Несмотря на все эти ограничения, к апрелю 1995 г. приборы "Кванта" провели 2896 сеансов наблюдений.

1.2. Рентгеновский спектрометр ПУЛЬСАР X-1.

Рентгеновский спектрометр ПУЛЬСАР X-1, изготовленный ИКИ АН СССР, НПО "Каспий" г.Баку и ОКБ ИКИ г.Фрунзе, является наиболее "жестким" прибором обсерватории РЕНТГЕН. Он способен регистрировать рентгеновское излучение в диапазоне 30-800 кэВ.

Прибор состоит из пяти одинаковых сцинтилляционных детекторов. Четыре детектора, предназначенные для спектроскопии ярких рентгеновских источников, имеют неподвижные свинцовые коллиматоры с квадратными ячейками, ограничивающими поле зрения до $3^\circ \times 3^\circ$ ПШПВ. Пятый детектор имеет неколлимированное поле зрения, служит для регистрации гамма-всплесков и представляет собой, по существу, отдельный прибор.

Каждый детектор представляет собой сборку двух сцинтилляторов по схеме "фосвич", где роль основного играет цилиндрическая пластина кристалла NaI(Tl)

толщиной 30 мм и диаметром 200 мм, а роль защитного - такая же по форме и размерам пластина CsI(Tl). Между ФЭУ и кристаллом CsI(Tl) расположен световод из свинцового стекла ТФ1 толщиной 30 мм. Сборка кристаллов закрыта сверху сцинтилляционным пластиковым колпаком, включенным в схему антисовпадений для режекции фоновых заряженных частиц. Наибольшей чувствительностью спектрометр обладает в диапазоне 100-300 кэВ. Временное разрешение прибора 5.5 или 11 с.

Большие трудности для жестких экспериментов модуля "Квант" создает высокий, переменный по времени и спектру, уровень фона заряженных частиц. В процессе наблюдений средняя фоновая загрузка одного детектора ПУЛЬСАРА X-1 составляла 30-50 событий в секунду. Вниманием к проблеме фона объясняется особенность установки детекторов спектрометра ПУЛЬСАР X-1 на станции: два детектора были установлены соосно с приборами ТТМ, ГЕКСЕ и ГСПС для наблюдения источников жесткого рентгеновского излучения, а два других - отвернуты в сторону для одновременного вычитания фона. Предполагалось, что при наземной обработке спектр источника будет получаться после вычитания спектра фона, регистрируемого отвернутым детектором, из суммарного спектра, регистрируемого детектором, направленным на источник. При эксплуатации прибора оказалось, однако, что каждый детектор имеет собственную энергетическую шкалу и чувствительность, поэтому данные, полученные с фоновых детекторов, не могут быть использованы при обработке данных детекторов, наведенных на источник. В дальнейшем технические неисправности вынудили отключить один из детекторов; в другом фоновом детекторе обнаружилась сильная электронная наводка, искажающая форму спектра - таким образом, полезные данные давали только два детектора, установленные по главной оптической оси.

Для вычитания фона в этих условиях был предложен режим "с качаниями", при котором в течение первых 4 минут каждого сеанса наблюдений приборы обсерватории наводились в точку, отстоящую на 4 градуса в сторону от исследуемого источника рентгеновского излучения, потом станция разворачивалась и наблюдала источник в течение 4.5 минут, после чего снова разворачивалась и т.д. (см. рис.1.1) При наземной обработке скорость счета,

полученная каждым детектором спектрометра в каждом энергетическом канале, аппроксимировалась функцией вида:

$$f(t) = \begin{cases} P_n(t) & \text{- для точек наведения на фон,} \\ P_n(t) + S & \text{- для наведения на источник,} \end{cases}$$

где $P_n(t)$ - полином n -ой степени, S - постоянная величина, соответствующая средней скорости счета от источника. Аппроксимирующая

функция $f(t)$ выбиралась так, чтобы величина $\chi^2 = \frac{\sum (f(t_i) - c(t_i))^2}{\sigma^2(c(t_i))}$, где $c(t_i)$ -

число отсчетов в данный момент времени, была минимальной. При аппроксимации полиномом задача сводится к системе линейных уравнений и имеет аналитическое решение. Некоторую трудность представлял выбор степени аппроксимирующего полинома, так как для разных энергетических каналов в зависимости от интенсивностей и скоростей распада фоновых линий в данном диапазоне энергий зависимость фоновой засветки от времени имела различный вид и могла быть аппроксимирована полиномами различных степеней. При этом аппроксимация полиномами 1-ой или 2-ой степеней позволяла получить результаты с меньшими погрешностями, но не всегда адекватно описывала изменение фона от времени. В качестве компромиссного решения в случае GS2023+338 интенсивность источника определялась как средневзвешенное значение интенсивностей, полученных при аппроксимации данных полиномами степеней от 1 до 3, причем для определения весов использовались значения χ^2 , полученные при применении соответствующего полинома. Это позволило получить в результате достаточно гладкий спектр, хорошо согласующийся с данными прибора ГЕКСЕ. Большие усилия были приложены, чтобы автоматизировать процесс очистки данных от сбоев и вычитания фона. В результате при получении спектра GS2023+338 удалось избавиться от необходимости визуального контроля и коррекции данных, неизбежно вносящих субъективный элемент в получаемые результаты. Эта работа показала, что для таких экспериментов, как ПУЛЬСАР X-1 на модуле "Мир-Квант", требующих особой тщательности при обработке получаемых данных из-за большого количества сбоев и тяжелых фоновых условий, возможно получение объективной информации.

Первоначально матрица отклика детектора была построена по результатам наземной калибровки, проведенной Степановым и др. [4] В ходе космического эксперимента выяснилось, что коэффициент усиления детектора немного “плывет” со временем, что приводит к изменению энергетической шкалы прибора. Этот эффект корректировался на основании положения фоновых линий в спектре. В спектре фона прибора удалось выделить два комплекса линий в районе 200 кэВ и 500 кэВ (рис. 1.3). Энергии линий определялись главным образом на основе работы Юнга [5], который решал сходную задачу применительно к данным эксперимента НЕАО-4. Результаты калибровки шкалы детекторов, полученные на основании положения фоновых линий в спектре, проверялись при наблюдениях Крабовидной туманности, служившей естественным калибровочным источником (рис. 1.2). Было получено хорошее согласие со спектром, описываемым степенным законом с наклоном $\alpha = -2.1$. Другим критерием верности полученных результатов стало согласие данных приборов ГЕКСЕ и ПУЛЬСАР X-1 в диапазоне энергий 30-150 кэВ.

К началу работы автора с данными прибора ПУЛЬСАР X-1 в 1989 г. программное обеспечение для наземной обработки данных было написано А.С.Каниовским [6], Д.К.Степановым и С.Н.Юниным. В ходе работы оно было переработано автором диссертации с использованием данных наведения, получаемых с телескопа ТТМ, а не со звездного датчика, измененным подходом к аппроксимации фона и учетом калибровки прибора по фоновым линиям в спектре. Летняя калибровка и обработка данных прибора ПУЛЬСАР X-1 проводилась автором вместе с В.А.Арефьевым. Спектр источника GRO J0422+32 был получен совместно с А.С.Каниовским.

1.3. Телескоп с теневой маской ТТМ.

Оптическая конструкция телескопа ТТМ построена на основе простой системы, для которой размер маски равен размеру детектора. Такая система значительно уступает системе с полным кодированием апертуры по возможностям восстановления протяженных источников, но обеспечивает максимально возможное в условиях модуля “Квант” угловое разрешение около 2 угл.мин. при

расстоянии от детектора до маски около 2 м. Основные параметры телескопа приведены в табл. 1.1.

Корпус телескопа, служит одновременно как коллиматор, предотвращающий попадание рентгеновских фотонов, не прошедших через маску, на детектор. Он представляет собой жесткий цилиндр диаметром 44 см. Маска и детектор крепятся к корпусу с двух сторон. Звездный датчик крепится сбоку к корпусу детектора.

Рисунок маски основан на псевдослучайной последовательности, организованной в виде матрицы 255 x 257 элементов 1x1 мм². Доля открытой площади маски составляет 41%. Прозрачность закрытых элементов маски менее 1% для фотонов с энергией ниже 18 кэВ и растет до 12% на 24 кэВ и до 30% на 30 кэВ.

Для калибровки во время космического эксперимента, поддерживающая окно структура содержит 5 радиоактивных источников Fe-55 (6 кэВ; общая скорость счета 7.74 отсч./с на 31.03.1988) и один источник Cd-109 (22 кэВ; 0.28 отсч./с).

В первые месяцы работы выявились проблемы с управлением высоковольтного питания у прибора ТТМ. К августу 1987 г. получение научных данных с прибора ТТМ стало невозможным из-за отказа высоковольтного

Таблица 1.1. Основные параметры телескопа ТТМ.

площадь маски	255 x 257 мм ²
площадь детектора	256 x 256 мм ²
расстояние детектор-маска	1846 мм
число элементов маски	255 x 257 (размером 1x1 мм ²)
поле зрения	15.8° x 15.8°
угловое разрешение вдоль главной оптической оси	1.86 угл.мин.
чувствительная площадь	500 см ²
эффективный диапазон энергий	2-30 кэВ
пространственное разрешение детектора по осям X, Y	менее 0.5 мм для диапазона 2-10 кэВ
энергетическое разрешение детектора	18% на 6 кэВ 20% на 22 кэВ
временное разрешение	0.1 с
скорость счета без ухудшения характеристик	до 1000 отсч./с

преобразователя [7]. Несмотря на то, что ТТМ не был изначально предназначен для проведения ремонтных операций в космосе, руководители проекта со стороны ИКИ предложили заменить детектор на запасной. Ремонт прибора удалось осуществить со второй попытки 20 октября 1989 г. Наблюдения начались на следующий день и показали полный успех процедуры. Звездный датчик телескопа ТТМ вышел из строя в марте 1988 г.; попытка его ремонта в октябре 1989 г. оказалась неудачной.

Программное обеспечение для обработки данных прибора ТТМ в ИКИ было написано М.Р.Гильфановым и Е.М.Чуразовым. Впоследствии автором данной работы и Н.Л.Александровичем были внесены некоторые изменения и дополнения, касающиеся, главным образом, определения наведения по группе ярких источников, поиска слабых источников по их расстояниям от известных источников, определения эффективности прибора ГЕКСЕ для заданного источника, локализации источников, суммирования полей, тайминга источников и видов спектров, используемых при аппроксимации. Однако, основа программного обеспечения осталась неизменной. Обработка данных ТТМ проводилась автором начиная с 1990 г. Впоследствии к этой работе подключились В.А.Арефьев и Н.Л.Александрович. Большинство представленных в данной работе результатов получены в тесном взаимодействии с В.В.Ефремовым и А.С.Каниовским, проводившим обработку данных спектрометра ГЕКСЕ.

После выхода из строя звездного датчика наведение станции определяется по данным телескопа ТТМ. Оценки стабилизации станции показали, что стабилизация лучше, чем ожидалось [8], поэтому определение среднего значения наведения за сеанс достаточно для решения большинства практических задач. Такое определение возможно, если в поле зрения ТТМ попадает два или более ярких рентгеновских источников с известными координатами (в случае двух источников необходимо использовать дополнительную информацию, чтобы правильно идентифицировать источники).

На основании данных ТТМ была проведена оценка точности наведения приборов модуля на заданный объект. Точность наведения оценивалась по расстоянию яркого рентгеновского источника от точки номинального наведения

вблизи центра поля зрения ТТМ. В расчет принимались только источники, значимость регистрации которых превышала 10 стандартных отклонений. Для таких источников их положение в "небе ТТМ" определяется с точностью не хуже 1 угл.мин. Распределение точности наведения для 154 проанализированных сеансов представлено на рис.1.2. Среднее значение ошибки наведения оказалось равным 25 ± 8 угл.мин. Такая точность недостаточна для решения многих научных задач проекта.

Таким образом, ТТМ практически ничего не потерял от поломки звездного датчика при наблюдениях густонаселенных областей неба, таких как область Галактического Центра, где в его поле зрения всегда попадает достаточно ярких рентгеновских источников, чтобы однозначно определить наведение модуля. В таких областях неба возможно суммировать результаты наблюдений и проводить поиск слабых источников. Возможно также проводить наблюдения одиночных источников, достаточно ярких для того, чтобы их можно было выделить за один сеанс, но суммирование полей вокруг таких источников невозможно. В то же время ТТМ оказался способен обеспечивать другие приборы комплекса необходимой им информацией о наведении и в случае одного источника в центре поля зрения, используя тот факт, что относительное расположение приборов постоянно и, таким образом, по положению источника в поле зрения ТТМ однозначно определяется его положение в поле зрения ГЕКСЕ и ПУЛЬСАРА X-1. Это позволило точно определять эффективность ГЕКСЕ и ПУЛЬСАРА X-1 при получении спектров одиночных ярких рентгеновских источников.

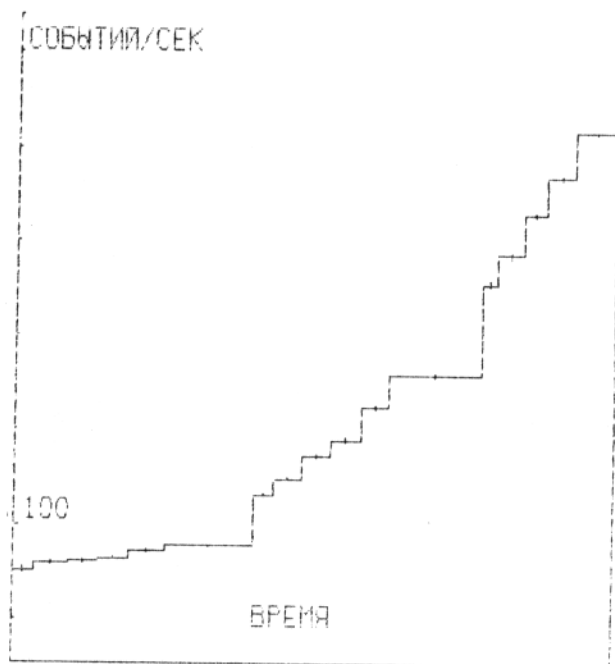
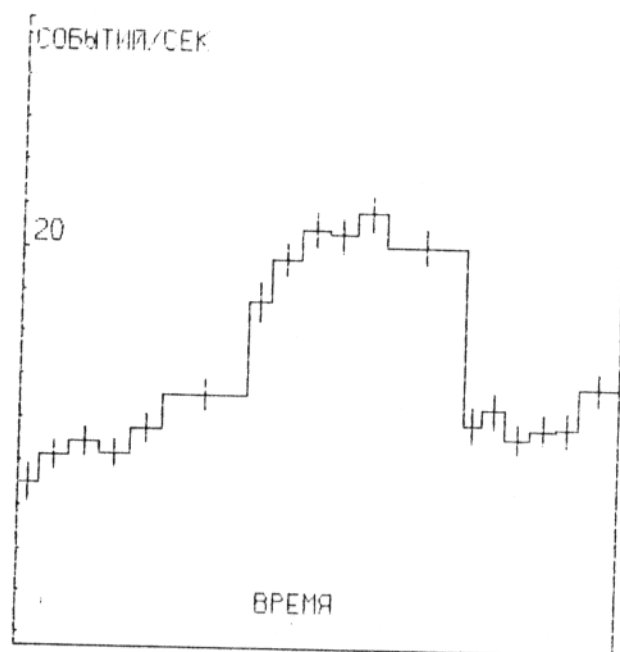


Рис. 1.1. Скорость счета в приборе ПУЛЬСАР X-1 в районе экватора (вверху) и при приближении к высоким широтам (внизу). Каждая точка соответствует ~ 30 с. Средний участок на в обоих случаях соответствует наблюдениям источника, крайние - фона.

PULSAR X-1

CRAB

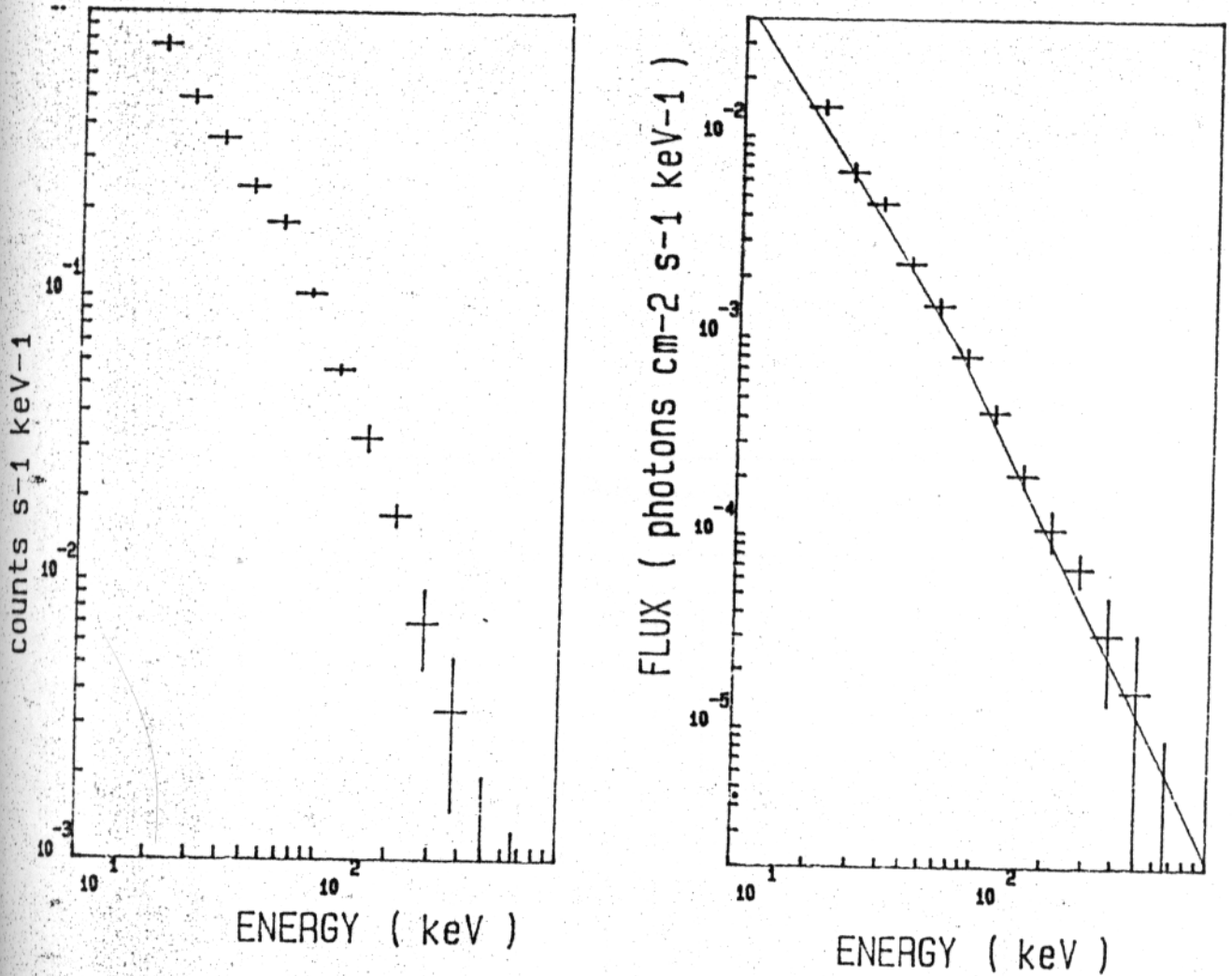


Рис. 1.2. Спектр рентгеновского источника в Крабовидной туманности, полученный прибором ПУЛЬСАР X-1. На левой панели кресты соответствуют отчетам детектора, на правой - восстановленному потоку от источника. Сплошной линией показана степенная аппроксимация спектра.

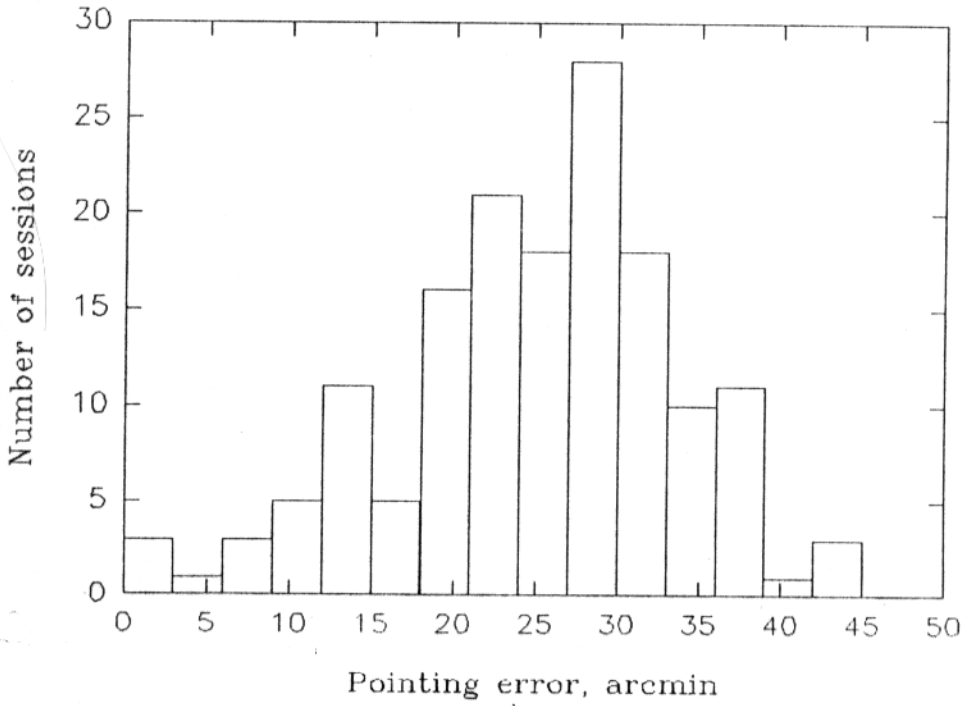
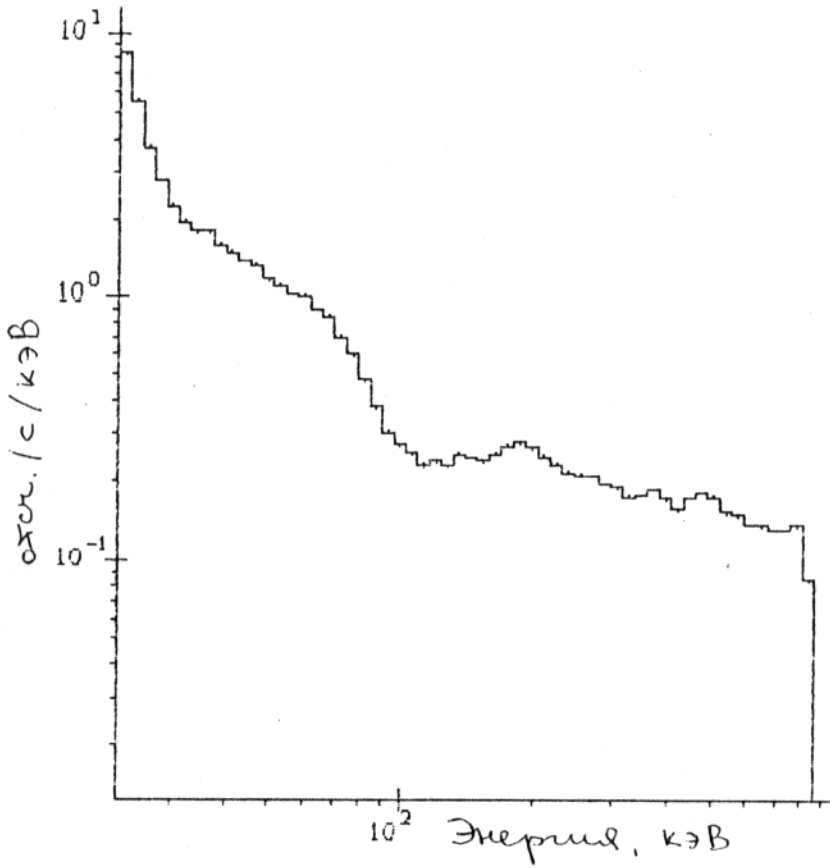


Рис. 1.3. Типичный спектр фона прибора ПУЛЬСАР X-1.

Рис. 1.4. Распределение ошибки наведения приборов модуля "Квант" (по данным телескопа ТТМ).

Глава 2. Наблюдения рентгеновских новых приборами модуля “Квант”

2.1. Рентгеновская Новая 1989 г. в Лебеде.

Рентгеновская Новая 1989 г. в Лебеде = GS2023+338 была обнаружена 19 мая 1989 г. всенаправленным монитором японского рентгеновского спутника GINGA [16]. К 28 мая поток излучения от источника в стандартном рентгеновском диапазоне 2-10 кэВ достиг величины 17 Краб [37]. После достижения максимума поток рентгеновского излучения от источника спадал квазиэкспоненциально с характерным временем порядка 40 дней. При этом была зафиксирована сильная нерегулярная рентгеновская переменность в диапазоне 2-30 кэВ и аномально сильное переменное поглощение на низких энергиях [38].

Рентгеновский источник был отождествлен с переменной звездой V404 Cyg, достигшей в конце мая 1989 г. величины $B=15$ по сравнению с $B=21$ согласно картам Паломарского обзора неба [39]. Обнаружилось, что V404 Cyg является повторной оптической Новой, достигавшей яркости 12.5 звездных величин в 1938 году [40] и имевшей вспышки также в 1956 и, возможно, в 1979 гг. [41] Спад рентгеновской светимости источника в 1989 г. сопровождался сходным поведением оптической компоненты. Это позволяет предположить, что оптическое излучение возникает при переработке рентгеновского излучения в веществе, окружающем компактный объект [42].

В ходе наблюдений на VLA был обнаружен мощный переменный радиоисточник в пределах 1 угл.сек от V404 Cyg [43]. Однако, объект V404 Cyg лежал на 5 угл.мин вне зоны ошибок, полученной для GS 2023+338. После наблюдений этой области модулем “Квант” удалось добиться локализации объекта с точностью до 25 угл.сек; при этом звезда V404 Cyg оказалась на расстоянии всего 0.4 угл.мин от центра зоны ошибок ТТМ [44]. Локализация GS2023+338 телескопом ТТМ была возможной благодаря присутствию в поле зрения ТТМ известных источников Cyg X-1 и Cyg X-3 (рис. 2.1).

Таблица 2.1. Циклограмма наблюдений источника GS 2023+338.

Дата наблюдений 1989 г.	Номера сеансов	Продолжитель- ность, мин	Приборы
08.06	2011, 2013, 2014	66	ТТМ, ГЕКСЕ
09.06	2023 - 2026	88	ТТМ, ГЕКСЕ
10.06	2028 - 2034	126	ТТМ, ГЕКСЕ, ПУЛЬСАР X-1
15.06	2066 - 2068	42	ТТМ, ГЕКСЕ
06.07	2095 - 2098	72	ТТМ, ГЕКСЕ
07.07	2100 - 2103	88	ТТМ, ГЕКСЕ
08.07	2105 - 2110	108	ТТМ, ГЕКСЕ, ПУЛЬСАР X-1
09.07	2112, 2114-2117	90	ТТМ, ГЕКСЕ, ПУЛЬСАР X-1
10.07	2119 - 2123	108	ТТМ, ГЕКСЕ
11.07	2125 - 2130	114	ТТМ, ГЕКСЕ
19.08	2146 - 2151	114	ТТМ, ГЕКСЕ

Приборы модуля "Квант" провели несколько серий наблюдений источника GS 2023+338 за период с 8 июня по 19 августа 1989 г. (табл. 2.1). Приборы ТТМ, ГЕКСЕ и ПУЛЬСАР X-1 зафиксировали излучение от источника в диапазоне от 2 до ~500 кэВ. Полученные спектры можно разделить на три временных периода: июньский, июльский и августовский.

В табл. 2.2 приведены наилучшие параметры двухстепенной аппроксимации спектра в июне и июле. Поиск наилучшей аппроксимации производился по данным всех трех приборов. Спектр, полученный в июне, имеет наивысшую интенсивность и наиболее богат деталями. В жестком диапазоне 20-400 кэВ по данным приборов ГЕКСЕ и ПУЛЬСАР X-1 имеется излом спектра на энергии около 60 кэВ : ниже этой энергии степенная аппроксимация дает наклон спектра $\alpha = 1.3$, при более высоких энергиях $\alpha = 2.1$. По данным прибора ПУЛЬСАР X-1 не обнаруживается экспоненциального завала спектра, характерного для излучения тепловой природы, вплоть до энергий ~500 кэВ (см. рис. 2.2).

Спектр июля имеет более низкую интенсивность и меньшее число деталей. Следует отметить ужесточение спектра на фоне спада интегрального потока и отсутствие экспоненциального завала до энергий ~300 кэВ по данным ПУЛЬСАРА X-1 (рис.2.2). Наблюдения, проведенные в августе приборами ГЕКСЕ и ТТМ,

показали, что интенсивность рентгеновского излучения от источника продолжала падать наряду с дальнейшим уплощением и упрощением спектра. Августовский спектр может быть аппроксимирован простым степенным законом с показателем степени $\alpha = 1.6$ (рис. 2.3).

Наличие нескольких изломов в июньском спектре свидетельствует о многокомпонентной природе спектра и о том, что его происхождение не связано с нетепловыми механизмами, которые работают, например, в известном источнике в Крабовидной туманности. С другой стороны, жесткий спектр излучения, зарегистрированный прибором ПУЛЬСАР X-1, и отсутствие экспоненциальных завалов до энергий в несколько сотен кэВ весьма трудно объяснить в случае аккреции на нейтронную звезду. Дело в том, что при аккреции на нейтронную звезду со слабым магнитным полем, рентгеновские фотоны высокой энергии из высокотемпературного пограничного слоя попадают в сравнительно холодную атмосферу нейтронной звезды, где их энергия рассеивается в процессе комптонизации на холодных электронах. Фотоны могут быть поглощены также при фотоионизации тяжелых элементов. Электроны, получившие энергию от высокоэнергичных фотонов, в дальнейшем термализуются в атмосфере звезды, порождая излучение теплового спектра с характерной температурой порядка килоэлектронвольта. При прохождении таких сравнительно низкочастотных фотонов через горячие слои температура последних снижается за счет комптонизации, а эффективная температура излучения увеличивается. Как показывают точные расчеты [45] при этом появление степенных спектров на

Таблица 2.2. Параметры аппроксимации рентгеновского спектра источника GS 2023+338 двухстепенным законом.

Параметр	Дата наблюдений	
	10.06.89	10-11.07.89
α_1 (при $E < E'$)	1.3 ± 0.2	1.4 ± 0.2
α_2 (при $E > E'$)	2.1 ± 0.2	1.7 ± 0.2
Энергия слома E' , кэВ	61 ± 2	57 ± 9
Параметр поглощения $N_{\text{H}}L$, $\times 10^{22}$	2.0 ± 0.5	0.9 ± 0.1
Нормировка I	0.856 ± 0.003	0.255 ± 0.003
$\chi^2/\text{ст.св.}$	2.4	2.1

энергиях, превышающих несколько десятков кэВ, маловероятно.

В отличие от изложенной картины аккреции на нейтронную звезду, при аккреции на черную дыру возможна ситуация со значительным недостатком низкочастотных фотонов для комптонизации; в результате вероятно возникновение плазмы с электронной температурой в десятки и сотни кэВ и формирование степенных спектров излучения до энергий в сотни кэВ [46, 47, 48].

В 1991 г., когда интенсивность рентгеновского излучения от компактного объекта упала, и оно перестало вносить определяющий вклад в оптическое излучение, была измерена кривая радиальной скорости звезды-компаньона [14]. Это позволило определить орбитальный период системы, равный 6.5 дням и функцию масс системы $f(M) = 6.26 \pm 0.31 M_{\odot}$, что сразу сделало источник GS2023+338 наиболее вероятным кандидатом в черные дыры из всех ранее наблюдавшихся рентгеновских источников. Расстояние до источника было оценено равным 1.5-3 кпк [49]. При этом рентгеновская светимость, зарегистрированная приборами модуля КВАНТ ($11 \cdot 10^{36} \cdot d^2$ эрг/с), была существенно меньше эддингтоновского предела ($L_{\text{э}} \approx 1.5 \cdot (M/M_{\odot}) \approx 10^{39}$ эрг/с для звезд массой $6.5 M_{\odot}$). Однако, принимая во внимание данные прибора GINGA [38], можно предположить, что в максимуме блеска светимость источника была равна критической.

От ранее известных рентгеновских источников - кандидатов в черные дыры - GS2023+338 отличается, прежде всего, отсутствием мягкой чернотельной компоненты в спектре, характерной для спектров рентгеновских двойных малой массы и приписываемой тепловому излучению аккреционного диска. До GS2023+338 спектр без такой компоненты был обнаружен в случаях "жесткого" состояния двух кандидатов в черные дыры, излучающих постоянно: Cyg X-1 и GX339-4; в то же время оба эти источника наблюдались и в сверхмягком состоянии с яркой тепловой компонентой. Различие в характере рентгеновского излучения от GS2023+338 и Cyg X-1 (транзиентный и постоянный источники соответственно) может объясняться различной природой их оптических компаньонов. В случае Cyg X-1 высокий темп аккреции может постоянно

поддерживаться за счет сильного звездного ветра от голубого сверхгиганта HD 226868 массой $\sim 20 M_{\odot}$. В случае же GS2023+338 звезда-карлик позднего спектрального класса V404 Cyg способна выбросить достаточно большое количество вещества только во время редких вспышек.

2.2. Рентгеновская Новая 1991 г. в Персее.

Рентгеновская Новая GRO J0422+32 была открыта 5 августа 1992 г. всенаправленным монитором BATSE на спутнике GRO [19]. К 8 августа поток от источника в три раза превысил поток от Крабовидной туманности в диапазоне 20-300 кэВ. Телескопы OSSE/GRO и СИГМА/"Гранат" обнаружили аномально жесткий спектр излучения этого объекта [50, 51]. Оптические данные подтвердили, что источник представляет собой тесную двойную систему с оптической компонентой малой массы. Оптическое излучение аккреционного диска доминирует над излучением оптического компонента во время рентгеновской вспышки.

Наблюдения источника приборами модуля "Мир"- "Квант" были разбиты на две серии 29.08.92-2.09.92 (5 сеансов наблюдений) и 16.09.92-17.09.92 (5 сеансов). Продолжительность одного сеанса колебалась в пределах от 14 до 26 мин (табл. 2.3).

Приборы обсерваторий GRO и "Гранат" давали информацию о спектре источника GRO J0422+32 на энергиях, превышающих 15 и 8 кэВ соответственно, оставляя вопрос о наличии мягкой компоненты открытым. Наблюдения телескопа ТМ показали, что данный источник, как и GS 2023+338, не имеет в спектре

Таблица 2.3. Циклограмма наблюдений источника GRO J0422+32.

Дата наблюдений 1992 г.	Номера сеансов	Продолжительность, мин
29.08	2441	18
30.08	2443	18
31.08	2445	18
01.09	2447	18
02.09	2449	18
16.09	2460, 2461, 2462	78
17.09	2463, 2463	44

сильной мягкой компоненты.

Спектр, зарегистрированный прибором ТТМ в стандартном рентгеновском диапазоне (см. рис. 2.4), может быть аппроксимирован степенным законом с наклоном $\alpha=1.5$, что совпадает с наклоном спектра наиболее известного кандидата в черные дыры Суг Х-1 в его низком жестком состоянии. На энергиях свыше 100 кэВ данные приборов ГЕКСЕ и ПУЛЬСАР Х-1 не противоречат предположению о наличии экспоненциального завала спектра, свидетельствующего о тепловой природе излучения (рис. 2.5, 2.6).

Скорее всего, спектр формируется в результате комптонизации низкочастотных фотонов на горячих электронах аккреционного диска. Хорошо известно, что тормозной механизм имеет низкую эффективность в аккреционном диске [46]. Более того, зарегистрированный телескопом ТТМ спектр источника в области низких энергий не соответствует спектру, который мог бы образоваться за счет тормозного механизма в однотемпературном приближении. В целом спектр в диапазоне 2-300 кэВ может быть удовлетворительно описан в рамках модели комптонизированного диска [52] с параметрами $T_e = 29 \pm 1$ кэВ и $\tau = 1.99 \pm 0.05$ (см. табл. 2.4).

В спектре GRO J0422+32 не зарегистрировано значимого поглощения и линии железа. По данным прибора ТТМ верхний предел (3 стандартных отклонения) на

Табл. 2.4. Аналитическая аппроксимация спектра рентгеновской Новой GROJ0422+32.

Дата наблюдений 1992 г.	Диапазон энергий	Вид аппроксимации	Параметры	$\chi^2/\text{ст.св.}$
29.08-2.09	2-20 кэВ	степенная	$\alpha = 1.5 \pm 0.1$ $N_{\text{HL}} < 6 \cdot 10^{21}$	1.0
	2-500 кэВ	комptonизированный диск	$T_e = 28 \pm 1$ кэВ $\tau = 2.00 \pm 0.05$	1.5
16-17.09	2-20 кэВ	степенная	$\alpha = 1.5 \pm 0.1$ $N_{\text{HL}} < 7 \cdot 10^{21}$	1.7
	2-500 кэВ	комptonизированный диск	$T_e = 30 \pm 1$ кэВ $\tau = 1.97 \pm 0.07$	1.8
29.08-17.09	2-20 кэВ	степенная	$\alpha = 1.5 \pm 0.05$ $N_{\text{HL}} < 5 \cdot 10^{21}$	1.8

поглощение в области мягких энергий соответствует $N_H L = 5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$, а на поток в линии железа 6.7 кэВ верхний предел равен 0.01 фот./см²/с.

Эволюция светимости за период с 29 августа по 17 сентября 1992 г. в целом согласуется с характерным временем 44 ± 2 дня, определенным по данным спутника "Гранат" [53]. В течение всего периода наблюдений не было зафиксировано существенных изменений формы спектра источника (рис. 2.6, 2.9). Светимость источника в диапазоне 3-150 кэВ за первую серию наблюдений составляла $L \sim 7 \cdot 10^{36} \cdot d^2$ эрг/с.

После уменьшения рентгеновского потока по оптической кривой блеска была проведена оценка функции масс системы. Оказалось, что она лежит в пределах от 2.9 до 6.8 M_\odot [54]. Следовательно, компактный объект в GRO J0422+32, так же как и в рентгеновских новых A0620+00, GS2023+338, GRS1124-68, является кандидатом в черные дыры.

2.3. Рентгеновская Новая 1993 г. в Парусах.

Рентгеновская Новая GRS 1009-45 была открыта прибором WATCH на спутнике "Гранат"[55] 12 сентября 1993 г. Источник быстро увеличил свою яркость в диапазоне прибора WATCH (8-20 кэВ) до 0.7 Краб. Рентгеновская Новая GRO J1014-45 = GRS 1009-45 была также зафиксирована прибором BATSE обсерватории гамма-лучей GRO [56].

Приборы модуля "Мир-Квант" провели наблюдения этого источника в сентябре-ноябре 1993 г (табл. 2.5). В сентябре-октябре остро стоял вопрос об оптическом отождествлении рентгеновского объекта GRS1009-45. Для этого необходимо было локализовать источник лучше, чем это позволяют сделать мониторы всего неба BATSE/GRO и WATCH/"Гранат". Кодированная апертура телескопа ТТМ позволяет локализовывать рентгеновские источники при условии известной ориентации модуля "Квант". При этом наведение может быть определено с достаточной точностью при наличии в поле зрения двух или более ярких источников с известными координатами (см. Гл.1). В случае GRS 1009-45 ближайший яркий источник - рентгеновский пульсар Vela X-1 - находится на

Таблица 2.5. Циклограмма наблюдений источника GRS1009-45.

Дата наблюдений 1993 г.	Номера сеансов	Продолжительность, мин	Приборы
29.09	2676	14	ТТМ, ГЕКСЕ
30.09	2678	14	ТТМ, ГЕКСЕ
1.10	2680	18	ТТМ, ГЕКСЕ
2.10	2682	14	ТТМ, ГЕКСЕ
24.10	2703	22	ТТМ, ГЕКСЕ
25.10	2704, 2705	44	ТТМ, ГЕКСЕ
26.10	2707	22	ТТМ, ГЕКСЕ
27.10	2708, 2709	44	ТТМ
28.10	2710, 2711	44	ТТМ, ГЕКСЕ
30.10	2712, 2713	44	ТТМ, ГЕКСЕ
31.10	2714, 2715	36	ТТМ, ГЕКСЕ
6.11	2717	18	ТТМ, ГЕКСЕ
7.11	2718, 2719	28	ТТМ, ГЕКСЕ
8.11	2720, 2721	28	ТТМ, ГЕКСЕ
11.11	2723	18	ТТМ, ГЕКСЕ
13.11	2724	18	ТТМ, ГЕКСЕ
15.11	2725	18	ТТМ, ГЕКСЕ

расстоянии 13° и не попадает в поле зрения ТТМ, когда GRS 1009-45 находится в его центре.

Первоначально координаты рентгеновской Новой были определены на основании номинального наведения модуля "Квант" и положения источника в поле зрения прибора ТТМ. Это позволило оценить положение GRS 1009-45 с точностью около 30 угл.мин по результатам наблюдений 29/30 сентября и 1 октября 1993 г.

Для более точной локализации источника 27 октября были проведены два сеанса наблюдений, во время которых телескоп был наведен так, чтобы в его поле зрения $15^\circ \times 15^\circ$ одновременно попали два источника: GRS 1009-45 и известный рентгеновский пульсар Vela X-1. По расположению источников в поле зрения прибора ТТМ определялось расстояние между ними. Областью вероятного нахождения GRS 1009-45 оказывается при этом кольцо, ограниченное двумя концентрическими окружностями, в центре которых находится Vela X-1. Различие радиусов окружностей отражает погрешность определения положения источников детектором телескопа ТТМ.

По совокупности данных источник был локализован внутри кольцевого сектора длиной $\sim 1^\circ$ (30 угл.мин. в каждую сторону от центра) и шириной ~ 2 угл.мин. Впоследствии спутник ASCA произвел более точную локализацию, по результатам которой рентгеновский источник был отождествлен со звездой 15-й величины ($m_B = 19^m$ до вспышки) [57]. Результаты локализации GRS1009-45 прибором ТММ представлены на рис. 2.7. Здесь же приведены области вероятного нахождения источника по данным приборов WATCH [20], BATSE [22] и ASCA [58], а также результат оптической идентификации.

Первые же наблюдения модуля "Квант", проведенные 28 сентября, показали, что источник имеет в спектре интенсивную мягкую и переменную жесткую компоненты [59]. Жесткая компонента дает гораздо меньший вклад в общую светимость источника, чем мягкая. Этим объясняется тот факт, что в жестком рентгеновском диапазоне интенсивность источника часто была ниже порога детектирования прибора BATSE, в то время как в стандартном рентгеновском диапазоне телескопа ТММ яркость источника в сентябре-октябре превышала 0.5 Краб.

Спектр, полученный по данным приборов ТММ и ГЕКСЕ во время первых наблюдений в сентябре, можно описать с помощью чернотельного приближения в диапазоне 2-10 кэВ и степенного в диапазоне 10-100 кэВ. Такая аппроксимация дает спектральный индекс $\alpha = -2.53$ и температуру мягкой компоненты $kT = 0.52$ кэВ (Каниовский и др., 1993). Спектр GRS1009-45 в диапазоне 2-100 кэВ подобен спектру рентгеновских новых с сильным мягким избытком: в Лисичке (1988) = GS2000+25 [60] и в Мухе (1991) = GRS1124-684 [61].

По данным телескопа ТММ можно сделать вывод о наличии в спектре жесткой компоненты, однако мягкий энергетический диапазон прибора не позволяет определить форму и наклон жесткого хвоста. Поэтому при аппроксимации спектра, полученного прибором ТММ, чернотельным законом в сочетании с жесткой степенной компонентой для всех сеансов использовалось степенное приближение со спектральным индексом $\alpha = -2.53$, полученное по наблюдениям ГЕКСЕ в первых сеансах. Параметры чернотельного спектра и отношение его

интенсивности к интенсивности степенного спектра на энергии 5 кэВ для каждого сеанса приведены в табл.2.6.

Изменения потока излучения от источника в диапазонах 2-10 кэВ и 10-27 кэВ показаны на рис.2.8. Зависимость жесткости (отношения потока в диапазоне 10-30 кэВ к потоку в диапазоне 2-10 кэВ) от полного потока в диапазоне 2-30 кэВ представлена на рис.2.9.

Суммарные спектры источника, полученные в сентябре-октябре (29.09-31.10) и ноябре (6-13.11) 1993 г. представлены на рис.2.10. Из этого рисунка и табл.2.6 видно, что уменьшение яркости источника сопровождалось снижением температуры чернотельной компоненты спектра при сохранении жесткой

Таблица 2.6. Параметры спектров источника GRS1009-45.

Сеанс	Дата наблюдений 1993 г.	кТ, кэВ	Поток на 5 кэВ, 10^{-10} эрг/с/см ² /кэВ	R [*])	χ^2
2676	29.09	0.57 ± 0.03	8.78 ± 0.52	1.68 ± 0.60	2.2
2678	30.09	0.60 ± 0.02	8.32 ± 0.27	1.12 ± 0.23	1.3
2680	1.10	0.50 ± 0.01	5.38 ± 0.16	0.87 ± 0.15	1.0
2703	24.10	0.44 ± 0.01	4.50 ± 0.15	1.98 ± 0.28	1.8
2704	25.10	0.51 ± 0.01	5.42 ± 0.17	1.93 ± 0.32	1.4
2705	25.10	0.52 ± 0.02	6.38 ± 0.25	2.71 ± 0.56	2.3
2707	26.10	0.50 ± 0.01	5.42 ± 0.19	1.98 ± 0.35	0.8
2710	28.10	0.50 ± 0.01	3.77 ± 0.12	1.20 ± 0.21	2.4
2711	28.10	0.49 ± 0.01	3.51 ± 0.11	0.83 ± 0.16	1.3
2712	30.10	0.51 ± 0.01	3.93 ± 0.12	0.95 ± 0.18	1.4
2713	30.10	0.51 ± 0.01	4.25 ± 0.13	1.13 ± 0.20	2.7
2714	31.10	0.50 ± 0.02	4.68 ± 0.22	1.35 ± 0.36	0.8
2715	31.10	0.48 ± 0.01	4.08 ± 0.14	1.80 ± 0.31	1.1
2717	6.11	0.46 ± 0.01	1.46 ± 0.06	0.36 ± 0.23	0.9
2718	7.11	0.42 ± 0.01	1.47 ± 0.07	0.56 ± 0.29	1.2
2719	7.11	0.50 ± 0.02	1.78 ± 0.08	0.51 ± 0.26	0.7
2720	8.11	0.40 ± 0.02	1.15 ± 0.09	1.01 ± 0.84	0.8
2721	8.11	0.45 ± 0.02	1.68 ± 0.10	1.06 ± 0.49	1.5
2723	11.11	0.45 ± 0.01	1.39 ± 0.06	0.93 ± 0.33	1.4
2724	13.11	0.45 ± 0.01	1.35 ± 0.06	1.10 ± 0.36	1.3
2725	15.11	0.44 ± 0.01	2.06 ± 0.09	3.43 ± 0.70	1.2

*) Параметр R задает отношение потока чернотельной компоненты спектра к степенной на энергии кТ=5 кэВ.

компоненты. Некоторое несоответствие между спектрами, полученными ТТМ и ГЕКСЕ, может объясняться различным временем интегрирования для этих приборов, что обусловлено необходимостью качаний коллиматора для прибора ГЕКСЕ.

Светимость источника по данным телескопа ТТМ в диапазоне 2-27 кэВ составила в конце октября $1.5 \cdot 10^{36} \cdot d^2$ эрг/с, а в ноябре $8.1 \cdot 10^{35} \cdot d^2$ эрг/с, где d - расстояние до источника в килопарсеках. Отношение потока энергии в оптическом диапазоне к рентгеновскому составляет $\sim 10^{-3}$ и показывает, что мы имеем дело с маломассивной рентгеновской системой, параметры которой подобны параметрам других рентгеновских новых.

2.4. Рентгеновская новая 1993 г. в Змееносце.

Источник GRS 1716-249 = GRO J1719-24 был независимо открыт приборами СИГМА [21] и WATCH на спутнике "Гранат" [20] и прибором BATSE на спутнике GRO [22]. Источник быстро увеличил свой блеск с 0.1 Краб до 3 Краб в диапазоне прибора СИГМА. Он был локализован телескопом СИГМА с точностью до 1 угл. мин, после чего оптические наблюдения на 0.9-м телескопе в Ла Сильве привели к отождествлению рентгеновского источника со звездой 17-й величины (до вспышки $m_B = 21^m$) [62]. Согласно наблюдениям на VLA [63] положение объекта совпадает также со слабым переменным радиоисточником. Это ставит его в один ряд с такими известными кандидатами в черные дыры, как Лебедь X-1, 1E1740.7-2942, GRS1758-258 и рентгеновскими новыми в созвездиях Мухи (GRS1124-684) и Лебеда (GS2023+338), также связанными с переменными слабыми радиоисточниками.

В табл.2.7 перечислены сеансы наблюдений данного источника модулем "Мир-Квант". Из-за ограничений по наведению источник GRS1716-249 не всегда был в центре поля зрения. В этих случаях наблюдение этого источника проводилось только телескопом ТТМ.

Определение положения этого источника по данным телескопа ТТМ было значительно легче, чем в случае GRS1009-45, благодаря наличию сразу

нескольких ярких известных рентгеновских источников в поле зрения телескопа. Полученные результаты (эпоха 1950 г.) :

$$\alpha=17^{\text{h}}16^{\text{m}}29^{\text{s}}.4, \delta=-24^{\circ}57'33'' \text{ (ошибка } 0.7 \text{ угл.мин.)}$$

согласуются с локализацией, проведенной по данным приборов СИГМА на "Гранате" [21], BATSE на GRO (22) и ASCA [64] и с оптическим отождествлением [62].

Первые наблюдения модуля "Квант" 26 и 27 сентября были проведены, когда рентгеновская Новая в созвездии Змееносца быстро увеличивала свой блеск сразу после вспышки. В дальнейшем кривая блеска в диапазоне свыше 10 кэВ соответствовала данным телескопа СИГМА обсерватории "Гранат" в более жесткой области, однако в мягком диапазоне энергий 2-10 кэВ наблюдалась более сильная переменность (см. рис. 2.8), не зарегистрированная приборами, чувствительными к жесткому рентгеновскому излучению.

Наблюдения телескопа ТТМ показали, что рентгеновская Новая GRS1716-249, также как и GS2023+338 и GRO J0422+32, не имеет яркой мягкой компоненты в спектре [65]. Спектр источника подобен спектру известного кандидата в черные дыры Лебеда X-1.

Спектр источника, приведенный на рис. 2.11, хорошо аппроксимируется степенным законом с наклоном около $\alpha = 1.5$ до энергий порядка 100 кэВ, при этом не наблюдается значимого мягкого поглощения в спектре источника. По данным ТТМ не зарегистрировано значимой линии железа 6.7 кэВ. Светимость

Таблица 2.7. Циклограмма наблюдений источника GRS1716-249.

Дата наблюдений (номера сеансов)	Источник в центре поля зрения	Продолжитель- ность, мин	Приборы
26.09 (2673)	GX1+4	26	ТТМ
27.09 (2675)	GX1+4	26	ТТМ
3.10 (2684, 2685)	1E1740.7-2942	44	ТТМ
7.10 (2686)	GRS1716-249	14	ТТМ, ГЕКСЕ
19.10 (2699)	1E1740.7-2942	18	ТТМ
24.10 (2702)	GRS1716-249	22	ТТМ, ГЕКСЕ

Таблица 2.8. Параметры спектров источника GRS1716-249 по данным прибора ТТМ.

Сеанс	Дата 1993 г.	α	$N_{\text{H}L}$, 10^{21} ат./ cm^2	χ^2	Поток на 5 кэВ, 10^{-10} эрг/с/см ² /кэВ
2673	26.09	-1.36 ± 0.27	5 ± 30	1.0	2.81 ± 0.40
2675	27.09	-1.64 ± 0.13	36 ± 16	1.3	7.24 ± 0.47
2684	3.10	-1.47 ± 0.25	-	0.6	8.66 ± 1.21
2685	3.10	-1.51 ± 0.23	10 ± 22	1.2	9.27 ± 1.14
2686	7.10	-1.46 ± 0.06	0.7 ± 5.6	1.1	8.28 ± 0.26
2699	19.10	-1.88 ± 0.25	47 ± 31	1.2	12.22 ± 1.46
2702	24.10	-1.46 ± 0.07	-	1.5	7.90 ± 0.32

источника в диапазоне 2-27 кэВ в октябре составляла $1.8 \cdot 10^{36} \cdot d^2$ эрг/с, где d - расстояние до источника в килопарсеках. В табл. 2.8 приведены параметры степенной аппроксимации спектра (спектральный индекс α , количество вещества на луче зрения $N_{\text{H}L}$, пересчитанное на атомы нейтрального водорода, нормировка на энергии 5 кэВ и параметр χ^2) для отдельных сеансов наблюдений.

Во время двух сеансов наблюдений (7 и 24 октября) источник находился в поле зрения прибора ГЕКСЕ. Для этих дней построены совместные спектры по данным ГЕКСЕ и ТТМ в широком энергетическом диапазоне. Параметры аппроксимации этих спектров в предположении тормозного и комптонизационного [52] характера излучения приведены в табл.2.9.

По данным приборов BATSE [66] и СИГМА [67] поток от рентгеновской Новой в Змееносце в течение первых месяцев после вспышки уменьшался чрезвычайно медленно с характерным временем спада ~ 300 дней, однако 9 декабря было зафиксировано резкое уменьшение потока, и вскоре источник перестал

Таблица 2.9. Параметры спектров источника GRS1716-249 по данным приборов ГЕКСЕ и ТТМ.

Дата 1993 г.	Вид аппроксимации	T, кэВ	α	N, 10^{21} ат/см ²	χ^2
7.10	комptonизация	22.4 ± 0.7	0.563 ± 0.016	9.3 ± 7.6	1.4
7.10	тормозной	111.3 ± 5.8	-	< 3.4	1.6
24.10	комptonизация	25.8 ± 0.66	0.668 ± 0.015	8.6 ± 5.6	1.4
24.10	тормозной	94.5 ± 4.4	-	< 0.7	3.0

детектироваться прибором BATSE [68]. Таким образом, GRS 1716-249 выделялся среди рентгеновских Новых аномально медленным спадом кривой блеска.

В сентябре 1994 г. источник GRS 1716-249 был неожиданно вновь обнаружен приборами СИГМА на "Гранате" [69] и ТТМ на "Кванте"[70]. ТТМ обнаружил источник лишь на пределе чувствительности. Средний поток по сумме сеансов, проведенных 31 августа, 1 и 23 сентября, составил 55 ± 15 мКраб. В то же время в жестком диапазоне 40-150 кэВ средняя величина потока по данным телескопа СИГМА была равна 110 мКраб. В жестком диапазоне 20-100 кэВ по данным прибора BATSE [71] источник постепенно разгорался (до 300 мКраб) на протяжении осени 1994 г., однако явного максимума блеска не было зафиксировано. Во время наблюдений этой области модулем "Квант" в 1995 г. (см. табл. 2.10) яркость GRS1716-249 в диапазоне 2-27 кэВ существенно увеличилась по сравнению с сентябрем предыдущего года. При этом спектр оказался более мягким, чем был в 1993 г. Таким образом, осенью 1994 - весной 1995 гг. произошла повторная вспышка источника GRS1716-249.

Таблица 2.10. Наблюдения GRS1716-249 телескопом ТТМ в конце 1994 - начале 1995 гг.

Дата наблюдений	Продолжительность, мин	Наклон степенной аппроксимации	Поток (2-27 кэВ), мКраб
31.08, 1.09, 23.09.94	70	2.0 ± 0.7	55 ± 15
16.02.95	26	2.3 ± 0.3	275 ± 25
2.04.95	52	2.8 ± 0.3	300 ± 20

*“Разве имя должно что-то значить ?”
Л.Кэрролл. Алиса в Зазеркалье.*

2.5. Сравнение наблюдательных проявлений рентгеновских новых.

В данной главе представлены результаты наблюдений приборами модуля “Квант” четырех рентгеновских новых - GS2023+338, GRO J0422+32, GRS 1009-45 и GRS 1716-249. Эти источники отличаются рядом специфических черт, позволяющих отнести их к одному классу рентгеновских источников.

1. Все источники этого класса не были известны в рентгеновской астрономии до своей вспышки - отсюда произошло само название рентгеновских новых.

2. Во время вспышки яркость источника в рентгеновском диапазоне резко возрастает, и за несколько дней источник становится одним из ярчайших на рентгеновском небе, сравниваясь по блеску с такими источниками, как Крабовидная туманность и Лебедь X-1.

3. После достижения максимума поток от источника уменьшается, как правило, по квазиэкспоненциальному закону. Характерное время уменьшения потока для рентгеновских новых лежит в пределах 25-45 дней [72, 38, 61, 53]. Рентгеновская Новая в Змееносце выделялась аномально большим временем спада ~300 дней. Продолжением особенностей во временном поведении этого источника стала его повторная вспышка в конце 1994 - начале 1995 гг.

4. Спадающая часть кривой блеска многих рентгеновских новых имеет своеобразный “скачок” яркости в рентгеновском диапазоне. Такой скачок был отмечен для A0620-00 [6], GRS1124-648[73], GRO J0422+32[74]

5. Характерной особенностью спектров всех рентгеновских новых является наличие жесткой компоненты, регистрируемой до энергий в сотни кэВ [60, 75, 76, 77]. Эта компонента подобна спектру кандидатов в черные дыры Cyg X-1 (в жестком состоянии) [78, 79, 80] и 1E1740.7-2942 [81, 82, 83].

6. Многие рентгеновские новые имеют мощную мягкую компоненту в спектре [84] с характерной температурой в предположении чернотельного спектра ~0.5

кэВ. Приборы модуля "Квант" регистрировали такую компоненту при наблюдениях рентгеновских новых GS2000+25 [85] и GRS 1009-45 [77]. Эта компонента напоминает аналогичную компоненту, наблюдавшуюся в спектрах кандидатов в черные дыры (в мягком состоянии) GX339-4 [86] и GRS1124-648 [61].

7. Все известные рентгеновские новые вспыхнули в двойных системах с оптической компонентой малой массы и позднего спектрального класса. Во время рентгеновской вспышки блеск оптической компоненты также увеличивается на несколько звездных величин.

8. Несколько рентгеновских новых наблюдалось в радиодиапазоне как слабые переменные радиоисточники. Это относится к рентгеновским новым GS2023+338, GRS1124-648 и GRS1716-249 [63]. В радиодиапазоне излучают также и другие кандидаты в черные дыры - Cyg X-1, 1E1740.7-2942, GRS1758-258 [87, 88].

9. Оптическая функция масс для рентгеновских новых A0620-00 [7], GS2023+338 [14], GRS1124-648 [89] превышает $3 \cdot M_{\odot}$; в рамках общепринятых теоретических представлений это означает, что компактный объект этих систем должен быть черной дырой. Оценки функции масс для GRO J0422+32 также достаточно высоки [54]. Остальные рентгеновские новые также могут рассматриваться как кандидаты в черные дыры на основе ряда общих наблюдательных свойств с перечисленными объектами.

7.07.1989 TTM/COMIS 2-27 keV

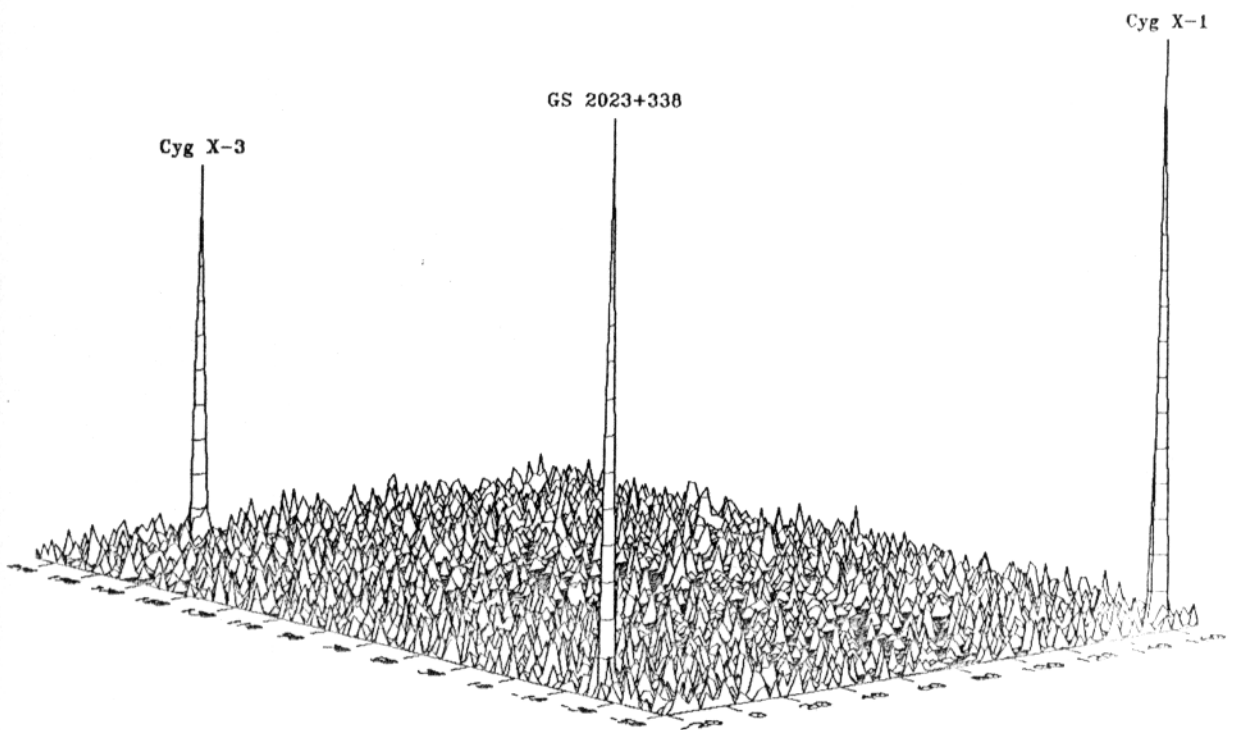


Рис. 2.1. Рентгеновское изображение в диапазоне 2-27 кэВ, полученное телескопом TTM 9 июня 1989 г. Отмечены положения источников Cyg X-1, Cyg X-3 и GS2023+338. Высота пиков соответствует значимости источника. Приведены координаты в пикселях TTM (1 пиксель равен 1.86 угл.мин.)

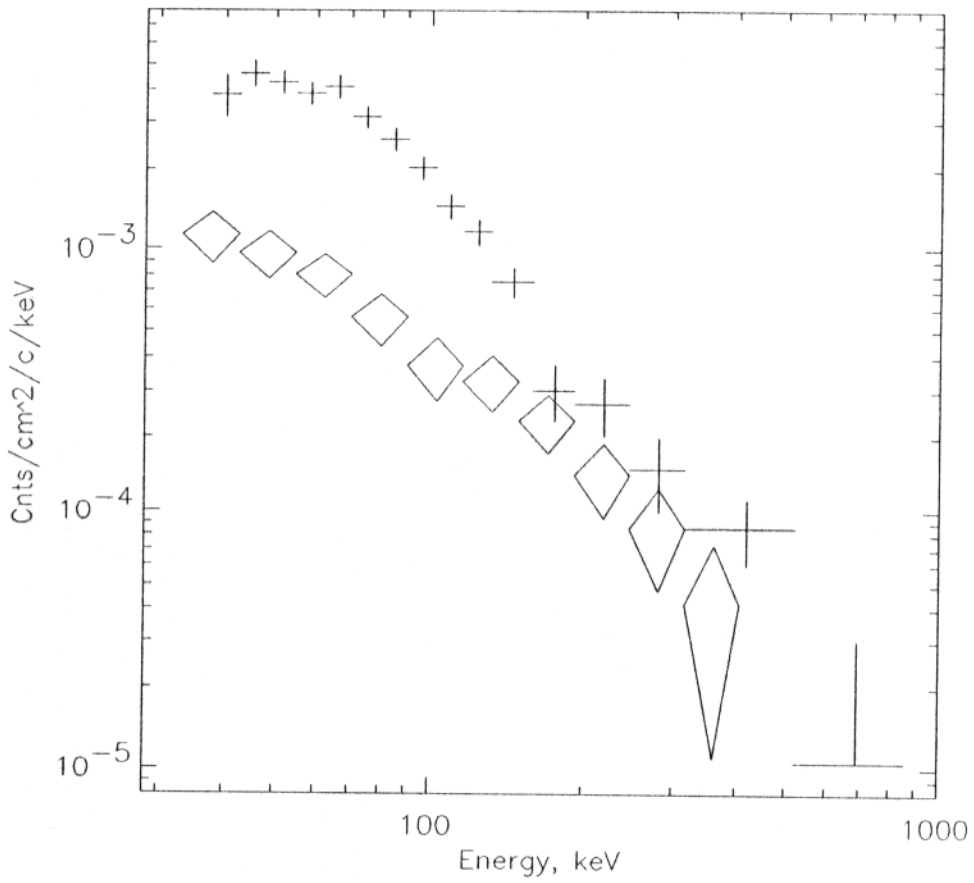


Рис. 2.2. Приборные спектры рентгеновской Новой GS2023+338, полученные спектрометром ПУЛЬСАР X-1 в июне (кресты) и июле (ромбы) 1989 г. Очевидно уменьшение потока от источника в диапазоне 40-400 кэВ с одновременным увеличением жесткости спектра в июле 1989 г.

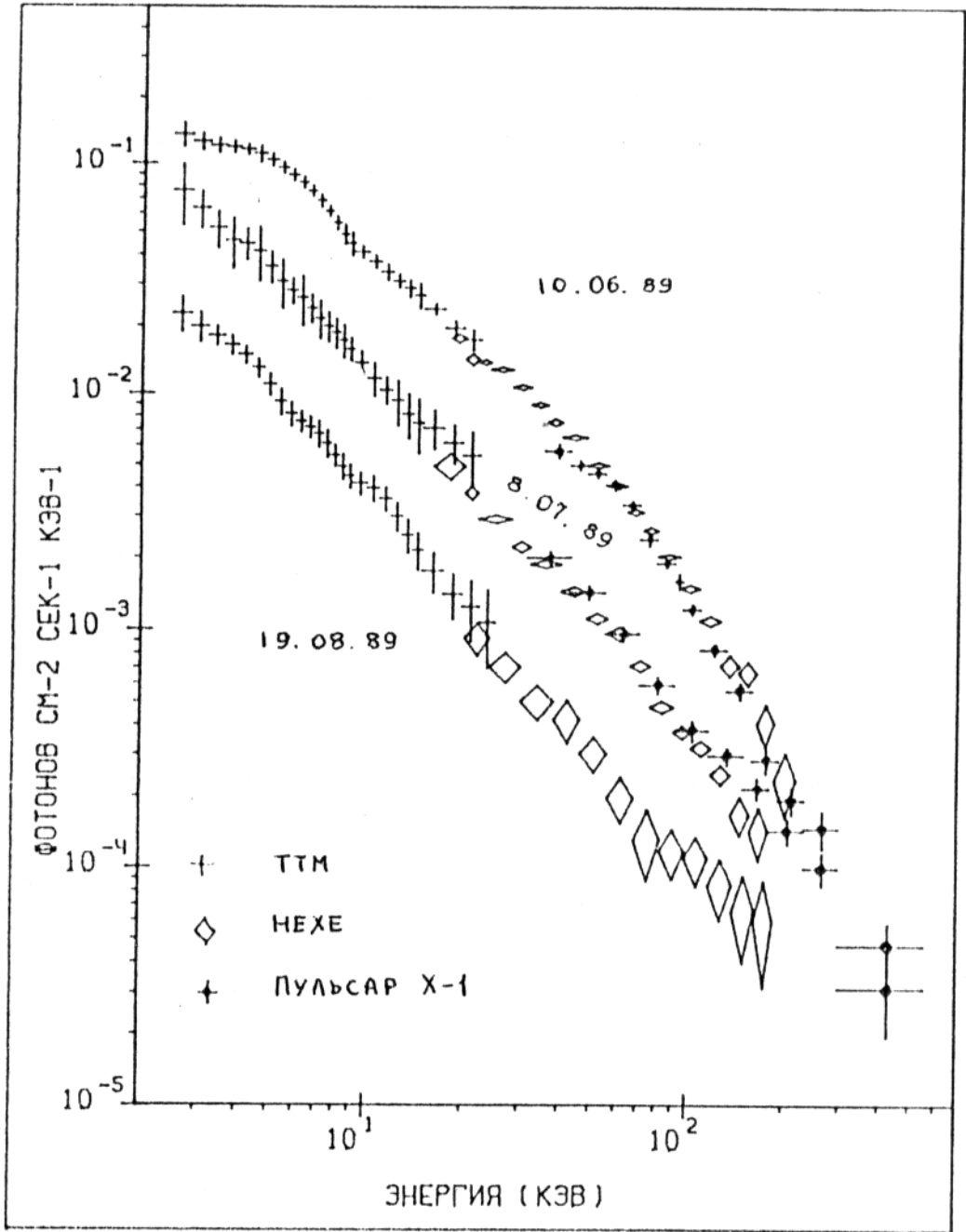


Рис. 2.3. Спектры источника GS2023+338 в июне, июле и августе 1989 г. в диапазоне 2-500 кэВ по данным приборов модуля "Квант". Данные прибора ТТМ показаны крестами, ГЕКСЕ - ромбами, ПУЛЬСАРА X-1 - крестами с точками.

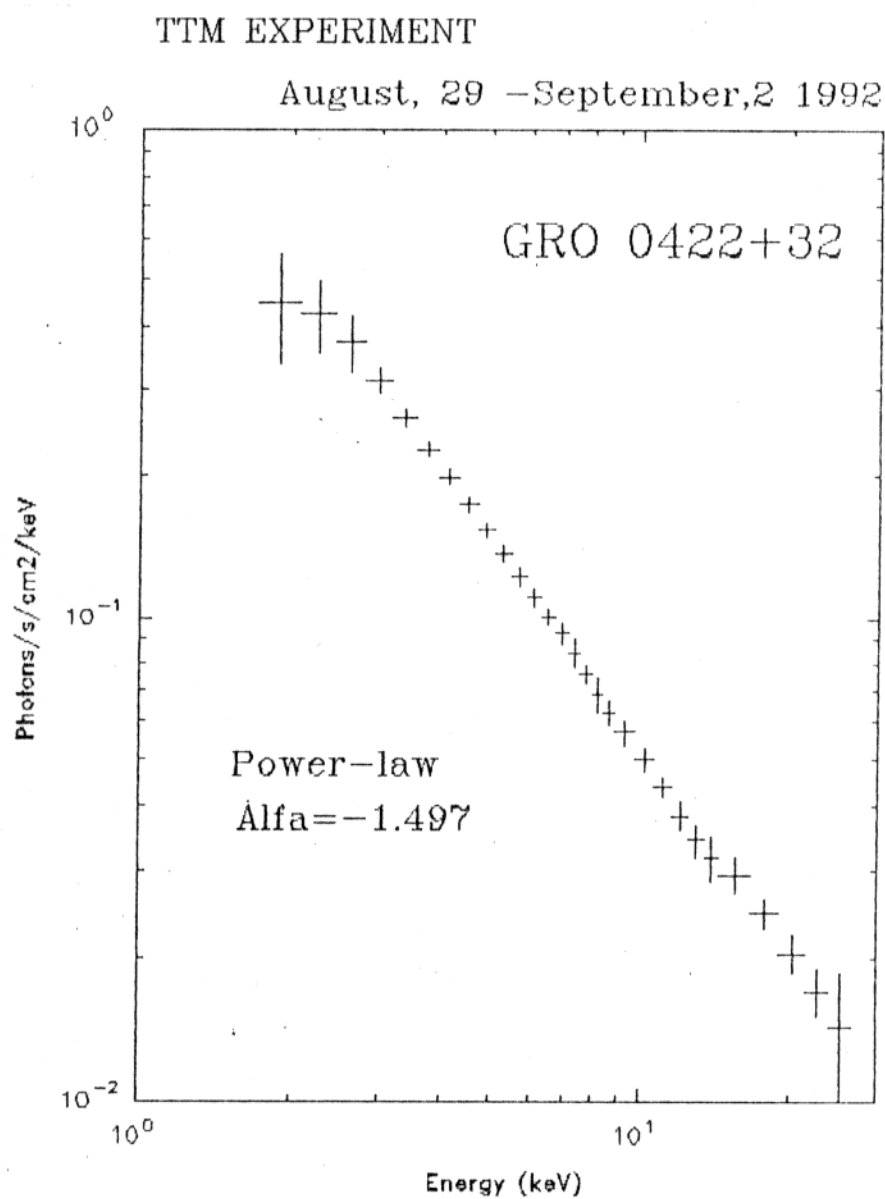


Рис. 2.4. Спектр источника GRO J0422+32 по данным прибора TTM 29.08-2.09.1992.

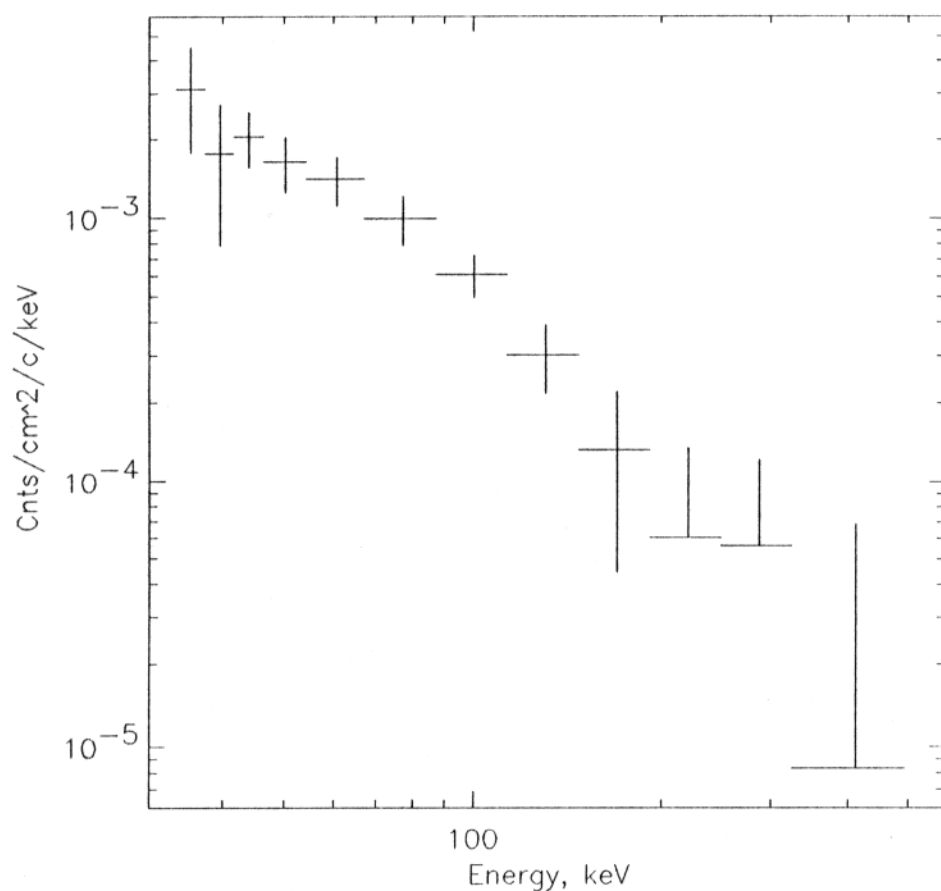


Рис. 2.5. Приборный спектр рентгеновской Новой GRO J0422+32, полученный спектрометром ПУЛЬСАР X-1 в конце августа - начале сентября 1992 г. Значимый поток от источника зарегистрирован до энергий ~150 кэВ.

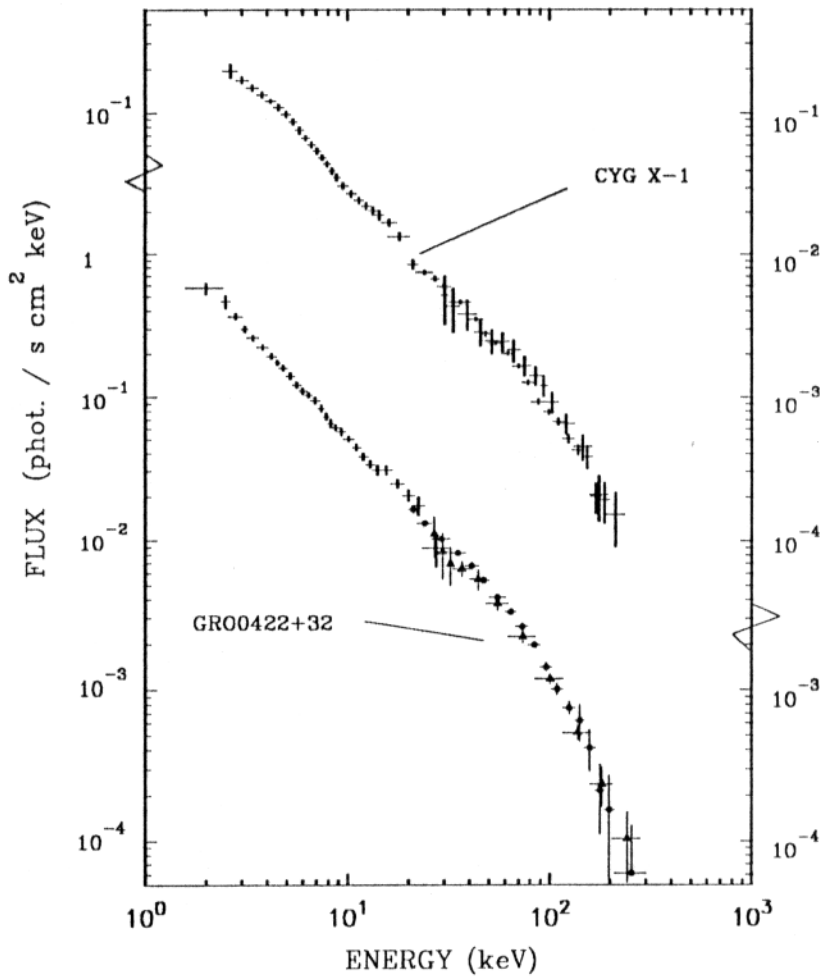


Рис. 2.6. Спектр рентгеновской Новой GRO J0422+32, полученный в сентябре 1992 года приборами модуля "Квант". Данные ТТМ показаны крестами, ГЕКСЕ - крестами с точками, ПУЛЬСАРА X-1 крестами с треугольниками. Для сравнения приведен спектр кандидата в черные дыры Cyg X-1, полученный теми же приборами. Координаты для Cyg X-1 изменены на два порядка для лучшего восприятия.

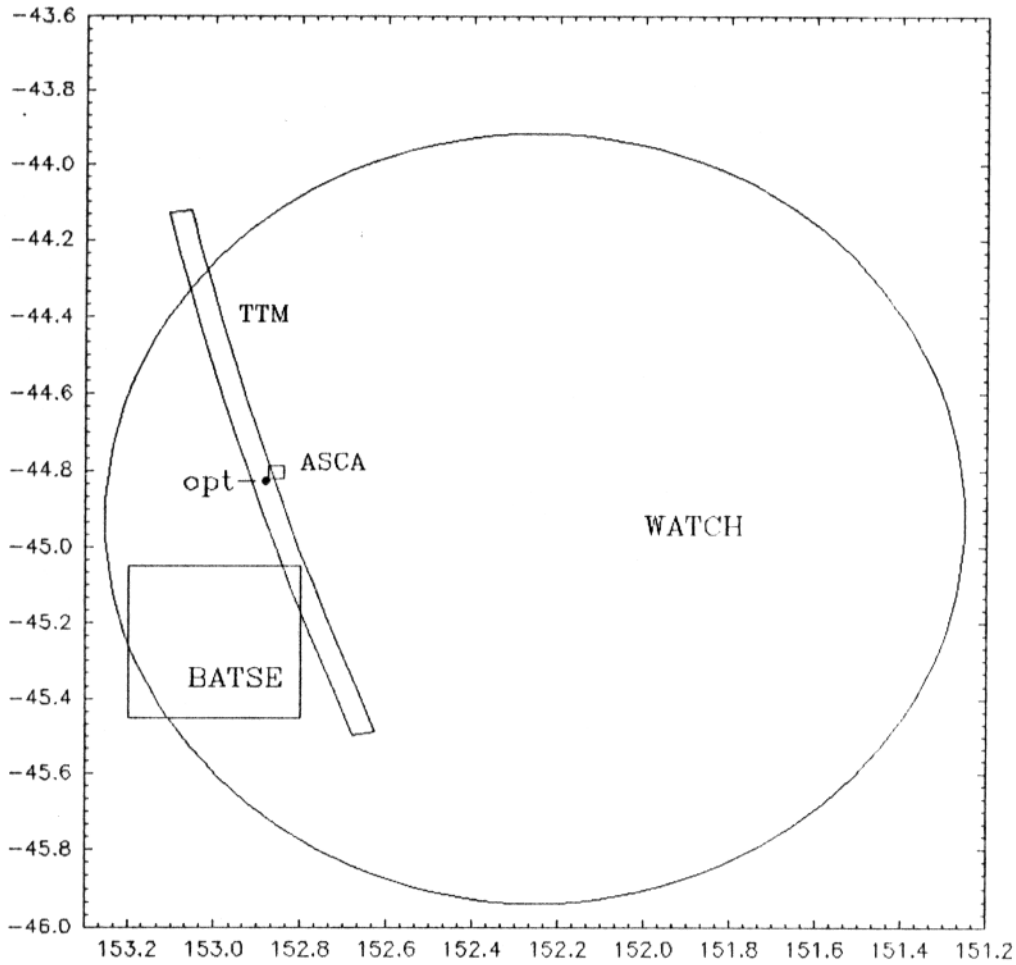


Рис 2.7. Локализация рентгеновской Новой в Парусах в октябре 1993 г. Показаны области локализации по данным приборов WATCH, BATSE, TTM, ASCA, а также результаты оптического отождествления. По осям отмечены небесные координаты (склонение и прямое восхождение на эпоху 1950 г.)

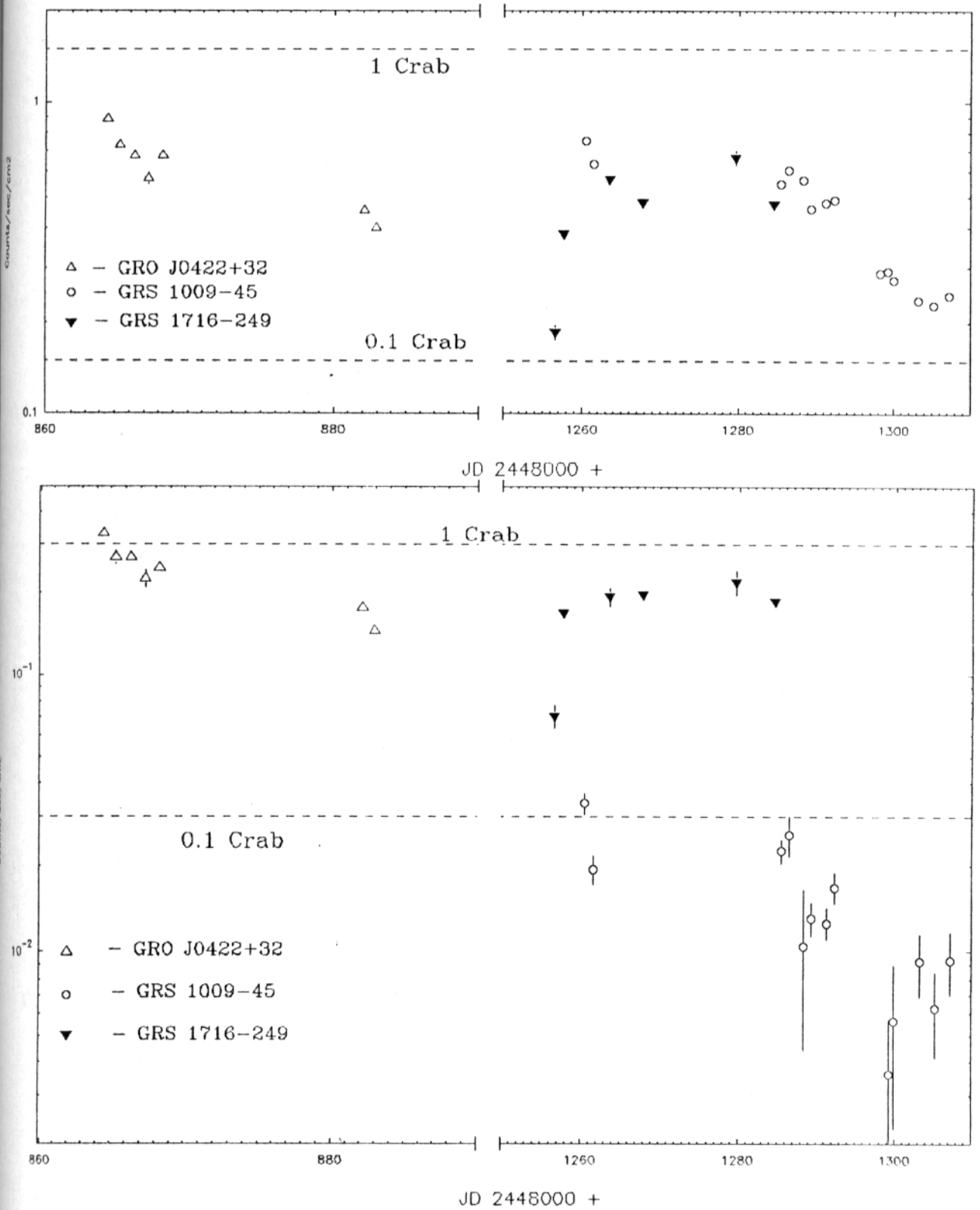


Рис. 2.8. Изменение потоков, зарегистрированных прибором ТТМ от рентгеновских новых GRO J0422+32, GRS1009-45 и GRS1716-249 в диапазонах 2-10 кэВ (вверху) и 10-27 кэВ (внизу). Потоки приведены в отсч./с/см², время - в юлианских днях.

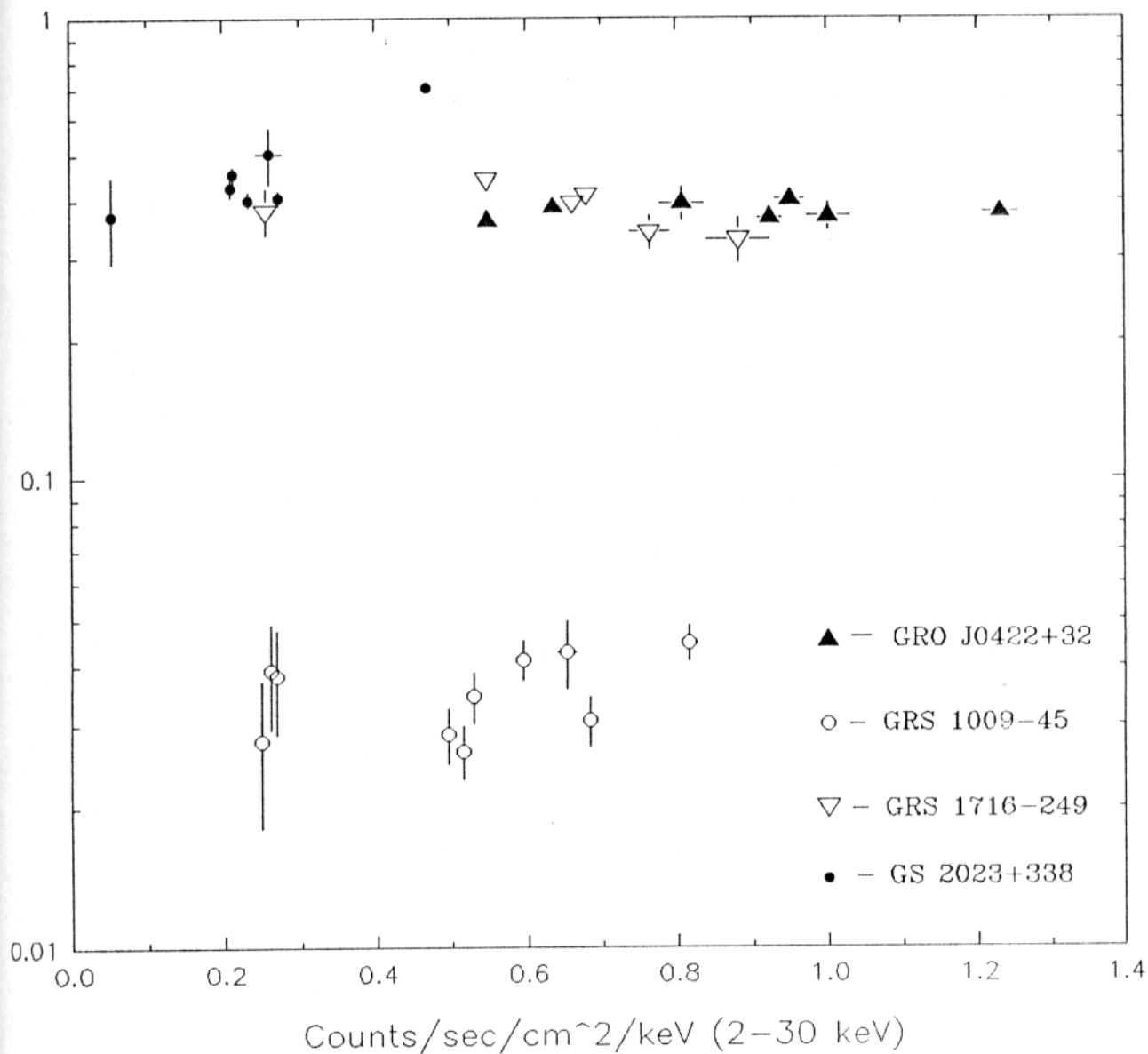


Рис 2.9. Зависимость жесткости (отношения потока в диапазоне 10-30 кэВ к потоку в диапазоне 2-10 кэВ) от полного потока в диапазоне 2-30 кэВ для рентгеновских Новых GS 2023+338, GRO J0422+32, GRS1009-45 и GRS1716-249. Поток приведен в отсч./с/см²/кэВ. Данные прибора ТТМ.

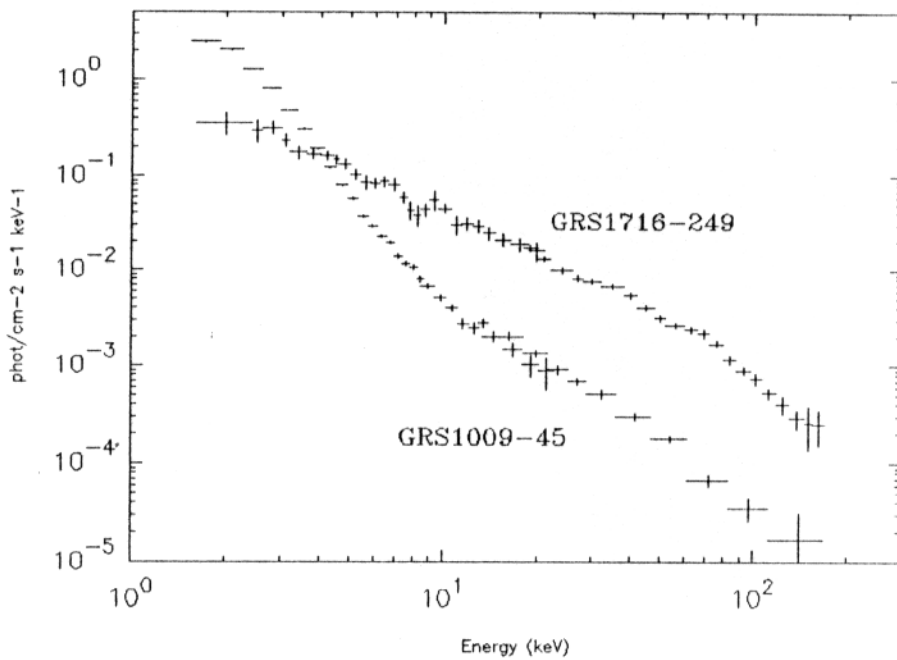
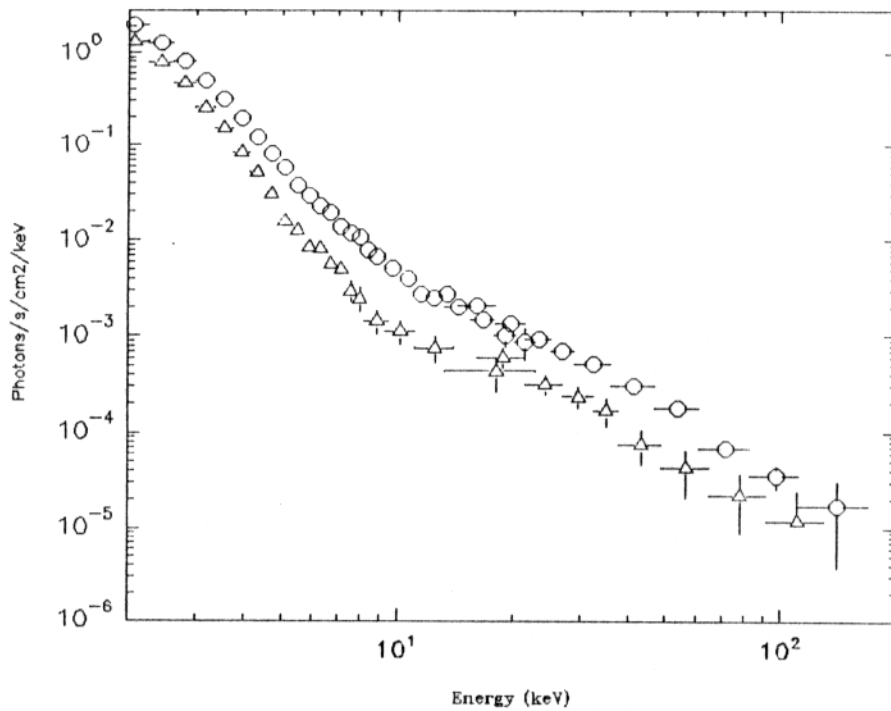


Рис 2.10. Спектр рентгеновской Новой в созвездии Парусов (1993) в сентябре-октябре (кружки) и ноябре (треугольники) 1993 г. Модуль “Квант”. Приборы ТТМ и ГЕКСЕ.

Рис.2.11. Спектры рентгеновских Новых (1993) в созвездиях Парусов и Змееносца, полученные модулем “Квант” (приборы ГЕКСЕ и ТТМ) осенью 1993 г.

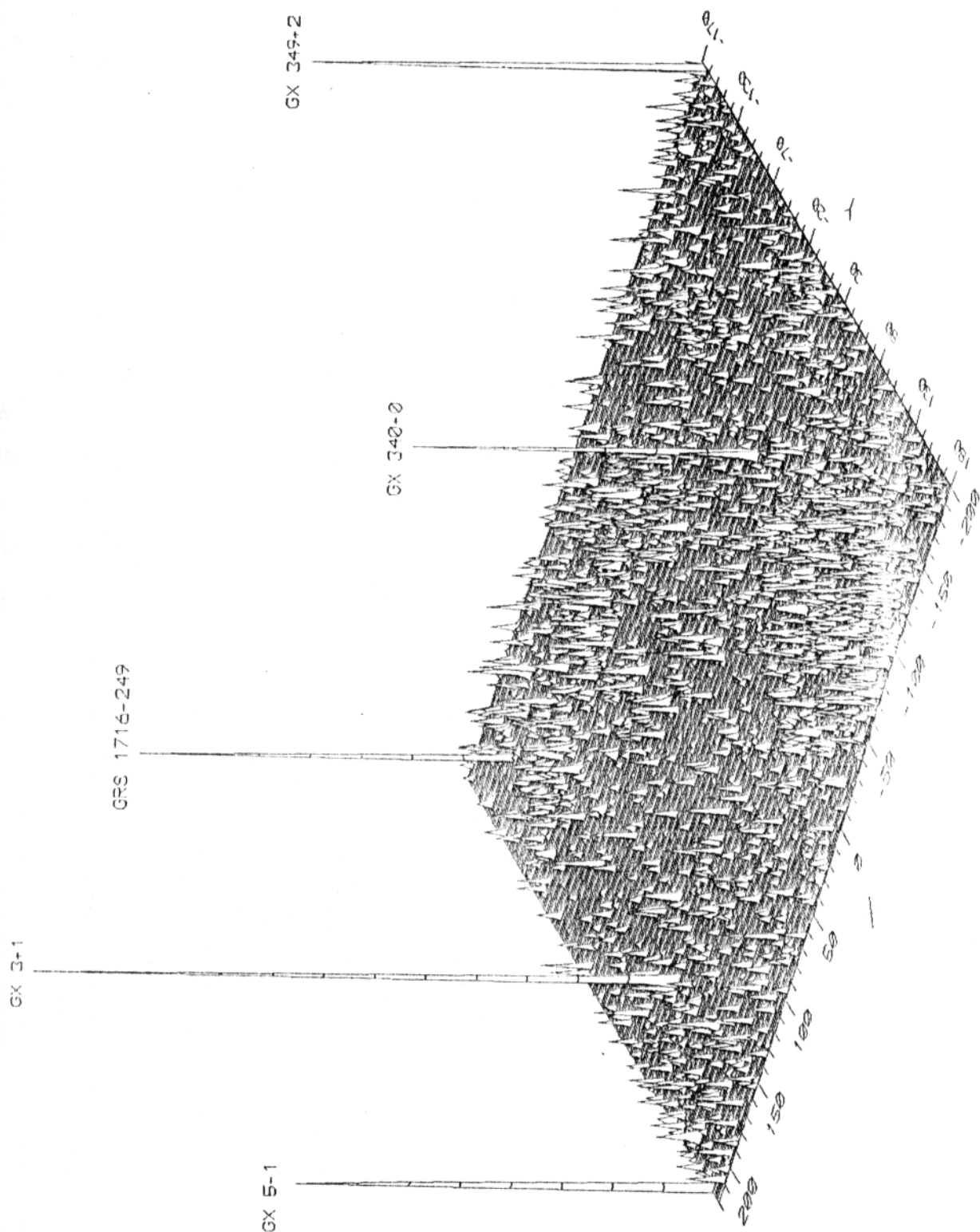


Рис. 2.12. Рентгеновское изображение области Галактического Центра в диапазоне 2-27 кэВ, полученное телескопом ТТМ 16 февраля 1995 г. Отмечены положения источников GX3+1, GX5-1, GX354+0, GX349+2 и GRS1716-249. Высота пиков соответствует значимости регистрации источника. Приведены координаты в пикселях ТТМ (1 пиксель равен 1.86 угл.мин.). Поток от рентгеновской Новой GRS1716-249 составлял 275 ± 25 мКраб.

Глава 3. Наблюдения радиоисточников со сверхсветовым видимым разлетом компонент рентгеновским телескопом ТТМ.

3.1. Рентгеновский транзиентный источник GRS1915+105.

Рентгеновский источник GRS1915+105 был открыт в августе 1992 г. прибором WATCH спутника "Гранат" [28]. Источник был отождествлен с переменным радио [90] и инфракрасным источником [91, 92]. Отождествить источник с каким-либо оптическим объектом не удалось; это связывается с большим межзвездным поглощением на луче зрения [93]. По усредненным значениям поглощения было оценено расстояние до GRS1915+105 - 12.5 кпк [24]. Таким образом, источник

Таблица 3.1. Наблюдения источников GRS1915+105 и GRO J1655-40 модулем "Квант" осенью 1994 - зимой 1995 г.г.

Дата	Источник в центре поля зрения ТТМ	Продолжительность, мин
8.09.94	GRS1915+105	26
10.09.94	GRS1915+105	26
11.09.94	GRS1915+105	26
12.09.94	GRS1915+105	26
24.09.94	GRO J1655-40	26
25.09.94	GRO J1655-40	26
29.09.94	GRO J1655-40	26
30.09.94	GRO J1655-40	52
1.10.94	GRO J1655-40	44
2.10.94	GRO J1655-40	44
4.10.94	4U1700-37	44
8.10.94	4U1700-37	18
9.10.94	4U1700-37	18
10.10.94	GRO J1655-40	18
11.10.94	4U1700-37	14
22.02.95	GRO J1655-40	22
24.02.95	GRO J1655-40	22

находится в противоположной Солнечной системе части Галактики, за Галактическим Центром. По наблюдениям мониторов BATSE (GRO), WATCH ("Гранат") и WATCH ("Eureca") за два года было зарегистрировано несколько вспышек в жестком рентгеновском диапазоне от GRS 1915+105 [94, 95]. Характерное время продолжительности вспышки составляло несколько недель, время между вспышками - несколько месяцев. После рентгеновской вспышки в марте 1994 г. был зафиксирован двойной радиоисточник,

компоненты которого разлетались со сверхсветовой видимой скоростью [24]. 27 сентября 1994 г. источник наблюдался в стандартном рентгеновском диапазоне со спутника ASCA [96]. Поток от источника составил ~500 мКраб в диапазоне 2-10 кэВ. Спектр был аппроксимирован степенным законом с показателем степени $\alpha = -2.2$ и параметром поглощения $N_{\text{H}}L = 4.3 \cdot 10^{22}$.

Серия наблюдений этого источника приборами модуля КВАНТ была проведена 8-12 сентября 1994 г. (Табл. 3.1). Поток от источника GRS1915+105 менялся в пределах от 300 до 580 мКраб в диапазоне 2-27 кэВ по данным прибора ТТМ. Если принять расстояние до источника равным 12.5 кпк, рентгеновская светимость в диапазоне 2-27 кэВ составляла до $2.5 \cdot 10^{38}$ эрг/с.

Спектр источника за первый день наблюдений удовлетворительно аппроксимировался чернотельным законом излучения с $kT = 1.1$ кэВ. В последующие дни спектр в диапазоне до 10 кэВ также соответствовал чернотельному, однако в области более высоких энергий наблюдался значимый жесткий эксцесс. Суммарный спектр в диапазоне 2-27 кэВ за все дни наблюдений представляет собой сумму двух компонент: тепловой с $kT = 1.1 \pm 0.1$ кэВ и жесткой степенной (рис. 3.1). Параметры аппроксимации спектра GRS1915+105 приведены в табл. 3.2. Поскольку недостаточная чувствительность прибора ТТМ в жестком диапазоне не позволяет достоверно измерять наклон жесткого степенного хвоста, для всех дней было выбрано одно и то же значение показателя степени $\alpha = -2.5$, наилучшим образом соответствующее виду суммарного спектра. Изменение соотношения между компонентами при неизменной характерной температуре чернотельного излучения свидетельствует о различной природе образования мягкой тепловой и

Таблица 3.2. Параметры двухкомпонентной аппроксимации спектра излучения GRS1915+105 с мягкой чернотельной и жесткой степенной компонентами (показатель степени -2.5)

Дата, 1994 г.	kT, кэВ	$N_{\text{H}}/10^{22}$	R*	$\chi^2/\text{ст.св.}$	Поток (2-27 кэВ), $\times 10^{-8}$ эрг/с/см ²
8.09	1.1 ± 0.1	3.3 ± 0.6	0.10 ± 0.07	25.1/25	0.72 ± 0.04
10.09	1.1 ± 0.1	3.7 ± 0.6	0.15 ± 0.08	30.0/25	0.66 ± 0.02
11.09	1.2 ± 0.1	4.7 ± 0.4	0.41 ± 0.09	37.5/25	1.33 ± 0.04
12.09	1.1 ± 0.1	4.6 ± 0.5	0.26 ± 0.07	23.8/25	1.01 ± 0.04

R* - отношение степенной компоненты к чернотельной на 5 кэВ

жесткой компонент спектра. Кроме переменности от одного дня наблюдений к другому, была отмечена также переменность жесткой компоненты в несколько раз за времена порядка минуты.

3.2. GRO J1655-40 - рентгеновская Новая 1994 г. в Скорпионе.

27 июля 1994 г. монитором BATSE обсерватории GRO было зафиксировано появление на рентгеновском небе нового транзиентного источника [23]. Поток от источника быстро рос и достиг значения 1.1 Краб в диапазоне энергий 20-100 кэВ. Источник, получивший название GRO J1655-40 и классифицированный как рентгеновская Новая, был вскоре отождествлен с оптической Новой 14-й визуальной величины и сильным переменным радиоисточником [97]. 19 августа радиоисточник разделился на две компоненты [98]. В дальнейшем от GRO J1655-40 были зафиксированы повторные вспышки в жестком рентгеновском диапазоне 20-100 кэВ [99, 100, 101], сопровождавшиеся образованием новых радиокомпонент [102, 103]. Расстояние до источника на основании данных о поглощении в линии H I составляет 3-5 кпк [25]. Если принять расстояние до источника равным 4 кпк, видимая скорость разлета компонент составляет $\beta = 1.5 \pm 0.4$

Список сеансов наблюдений рентгеновской Новой GRO J1655-40 модулем "Квант" приведен в табл. 3.1. Наблюдения телескопом ТТМ проводились не только при наведении на GRO J1655-40, но и во время сеансов, когда в центре поля зрения находился источник 4U1700-37, расположенный на расстоянии 2.8° от GRO J1655-40 (рис. 3.2).

Переменность GRO J1655-40 по данным прибора ТТМ приведена в табл. 3.3. Поток от источника осенью 1994 г. менялся от 0.5 до 0.85 Краб на энергии 5 кэВ. Во время наблюдений, проведенных 22 и 24 февраля 1995 г. поток от источника составил 1.7 и 2.7 Краб соответственно. При расстоянии до источника 4 кпк максимальная светимость в диапазоне 2-27 кэВ составляла в сентябре-октябре 1994 г. $2.5 \cdot 10^{37}$ эрг/с; 22-24 февраля 1995 г. средняя светимость составила $5.6 \cdot 10^{37}$ эрг/с.

Таблица 3.3. Параметры аппроксимации спектра излучения GRO J1655-40 законом излучения черного тела с жесткой степенной компонентой (наклон -2.1)

Дата	kT, кэВ	R*	$\chi^2/\text{ст.св.}$	Поток (2-27 кэВ), $\times 10^{-8}$ эрг/с/см ²
24-25.09.94	1.1 ± 0.1	0.01 ± 0.04	29/26	0.81 ± 0.02
29-30.09.94	1.0 ± 0.1	0.04 ± 0.02	40/26	1.26 ± 0.04
1-2.10.94	1.1 ± 0.1	0.02 ± 0.02	38/26	1.10 ± 0.03
4.10.94	1.0 ± 0.1	0.06 ± 0.05	30/26	1.30 ± 0.05
8-9.10.94	1.1 ± 0.1	0.01 ± 0.05	44/26	1.08 ± 0.07
10-11.10.94	1.1 ± 0.1	0.03 ± 0.05	45/26	0.93 ± 0.04
22-24.02.95	1.0 ± 0.1	0.11 ± 0.04	29/26	2.94 ± 0.12

R* - отношение степенной компоненты к чернотельной на 5 кэВ

Наблюдения спутников ROSAT [104], ASCA [105] и модуля "Квант" показали, что в стандартном и мягком рентгеновских диапазонах поведение источника отличается от его переменности в жестком диапазоне (рис. 3.3). Так, наблюдения модуля "Квант" осенью 1994 г. проводились в период между вспышками в жестком рентгеновском диапазоне, тем не менее был зарегистрирован значительный поток в стандартном рентгеновском диапазоне [106]. Еще более сильный поток от GRO J1655-40 (см. табл. 3.3) был зарегистрирован телескопом ТТМ в феврале 1995 г. [107]. На рентгеновском изображении, полученном телескопом ТТМ 22-24 февраля (рис. 3.4), видно, что GRO J1655-40 намного превосходил по интенсивности соседние источники. В то же время по данным приборов BATSE на спутнике GRO и ГЕКСЕ на модуле "Квант" в жестком диапазоне энергий 20-100 кэВ в этот период яркость источника не превышала 50-60 мКраб (см. рис.3.6). Вспышка GRO J1655-40 в жестком рентгеновском диапазоне была зафиксирована BATSE через месяц после наблюдений модуля "Квант" [108].

Спектр излучения, полученный телескопом ТТМ от рентгеновской новой GRO J1655-40, оказался подобным спектру GRS1915+105 (см. рис. 3.5). Температура мягкой компоненты в предположении чернотельного спектра излучения также около 1 кэВ и не менялась за весь период наблюдений. Для наклона жесткой степенной компоненты было выбрано значение $\alpha=-2.1$ на основании данных прибора ГЕКСЕ, полученных в феврале 1995 г. [109]. Обращает на себя внимание, что во всех сеансах 1994 г. жесткая компонента в спектре по данным

ТТМ не значима. В феврале 1995 г. зафиксирована значимая, хотя и слабая, жесткая компонента, что согласуется с данными приборов WATCH ("Гранат"), ГЕКСЕ ("Квант") и BATSE (GRO). В отличие от GRS1915+105, в спектре GRO J1655-40 не наблюдалось значимого поглощения, что может объясняться существенным различием в расстояниях до объектов.

3.3. Общие наблюдательные проявления рентгеновских источников GRS1915+105 и GRO J1655-40.

Рентгеновские наблюдения обнаруживают ряд общих черт у источников GRS1915+105 и GRO J1655-40:

1. Оба источника были открыты как рентгеновские новые, т.е. рентгеновский поток от этих источников не детектировался ранее.

2. Временное поведение этих рентгеновских источников отличается от переменности большинства рентгеновских новых. Было зафиксировано несколько вспышек в жестком рентгеновском диапазоне, во время которых источники были одними из ярчайших на рентгеновском небе; характерная продолжительность вспышки составляет недели, периода между вспышками - месяцы. При этом общая продолжительность периода активности с повторяющимися вспышками составляет в случае GRS1915+105 уже около трех лет.

3. Спад жесткого рентгеновского излучения совпадает с образованием двухкомпонентных радиоисточников, движущихся с релятивистскими (видимыми сверхсветовыми) скоростями.

4. Характер поведения источников в мягком и стандартном рентгеновском диапазоне значительно отличается от переменности в жестком рентгеновском диапазоне. Наблюдения прибора ТТМ показали присутствие в спектрах этих источников яркой мягкой компоненты, описываемой чернотельным законом излучения с температурой ~ 1 кэВ (рис.3.7).

5. Радиосветимость объектов GRS1915+105 и GRO J1655-40 ничтожна по сравнению с рентгеновской. Так, для GRO J1655-40 поток энергии в радиодиапазоне во время вспышки составлял порядка $\sim 10^{-13}$ эрг/с/см², а поток энергии в

рентгеновском диапазоне (2-27 кэВ) в феврале 1995 г. по данным ТТМ составил $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ эрг/с/см². Это отличается от ситуации в активных квазарах, где значения энерговыделения в радио и рентгеновском диапазоне не различаются так сильно. В то же время чрезвычайно высокими оказываются оценки энергии, затрачиваемой на выброс наблюдаемых радиооблаков - выделение мощности при выбросе облака из GRS 1915+105 не менее $1.2 \cdot 10^{40}$ эрг/с [24], что в 500 раз превышает рентгеновскую светимость источника, полученную по данным ТТМ. Эта энергия сравнима с гравитационной энергией вещества, накапливаемой в стандартном аккреционном диске.

Таким образом, наблюдательные данные показывают, что источники GRS1915+105 и GRO J1655-40 можно выделить в особый класс объектов, отличающихся по ряду своих свойств от ранее изученных рентгеновских источников. Ясно, что как и в других галактических источниках, рентгеновское излучение связано с процессом перетекания вещества с оптической на релятивистскую звезду в тесной двойной системе. Дополнительные исследования необходимы для выяснения природы релятивистской компоненты, а также механизма выброса наблюдаемых релятивистских облаков.

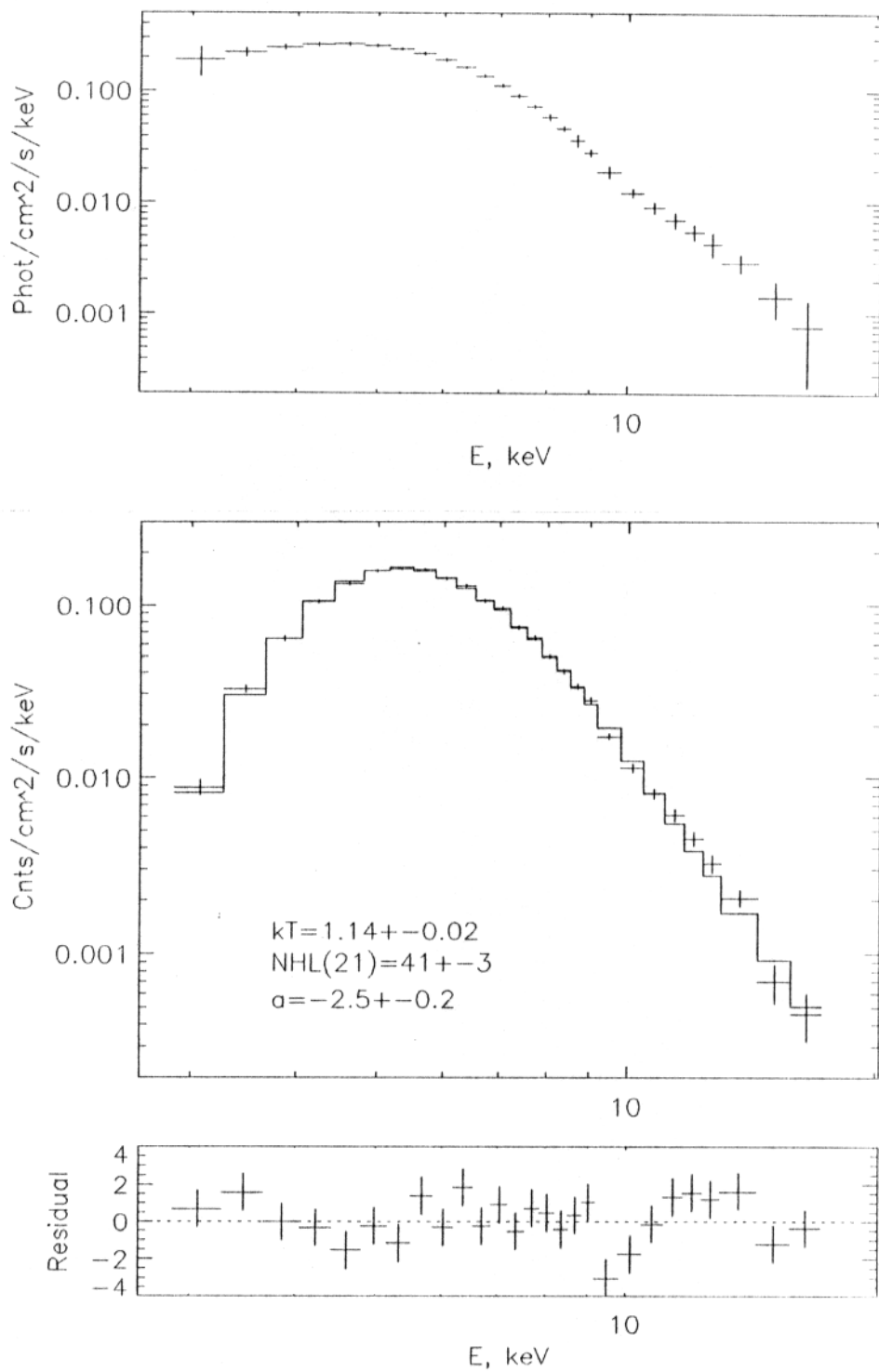


Рис.3.1. Спектр рентгеновского источника GRS1915+105, полученный телескопом ТТМ в сентябре 1994 г. На верхней панели представлен спектр источника в фот./см²/с/кэВ. На средней панели: крестами - приборный спектр (отеч./см²/с/кэВ), гистограммой - аналитическая двухкомпонентная аппроксимация с $kT=1.14$ кэВ для чернотельной компоненты и наклоном степени -2.5 для степенной компоненты. Внизу приведена разность между отсчетами в приборе и аппроксимацией, отнормированная на ошибку измерения в каналах.

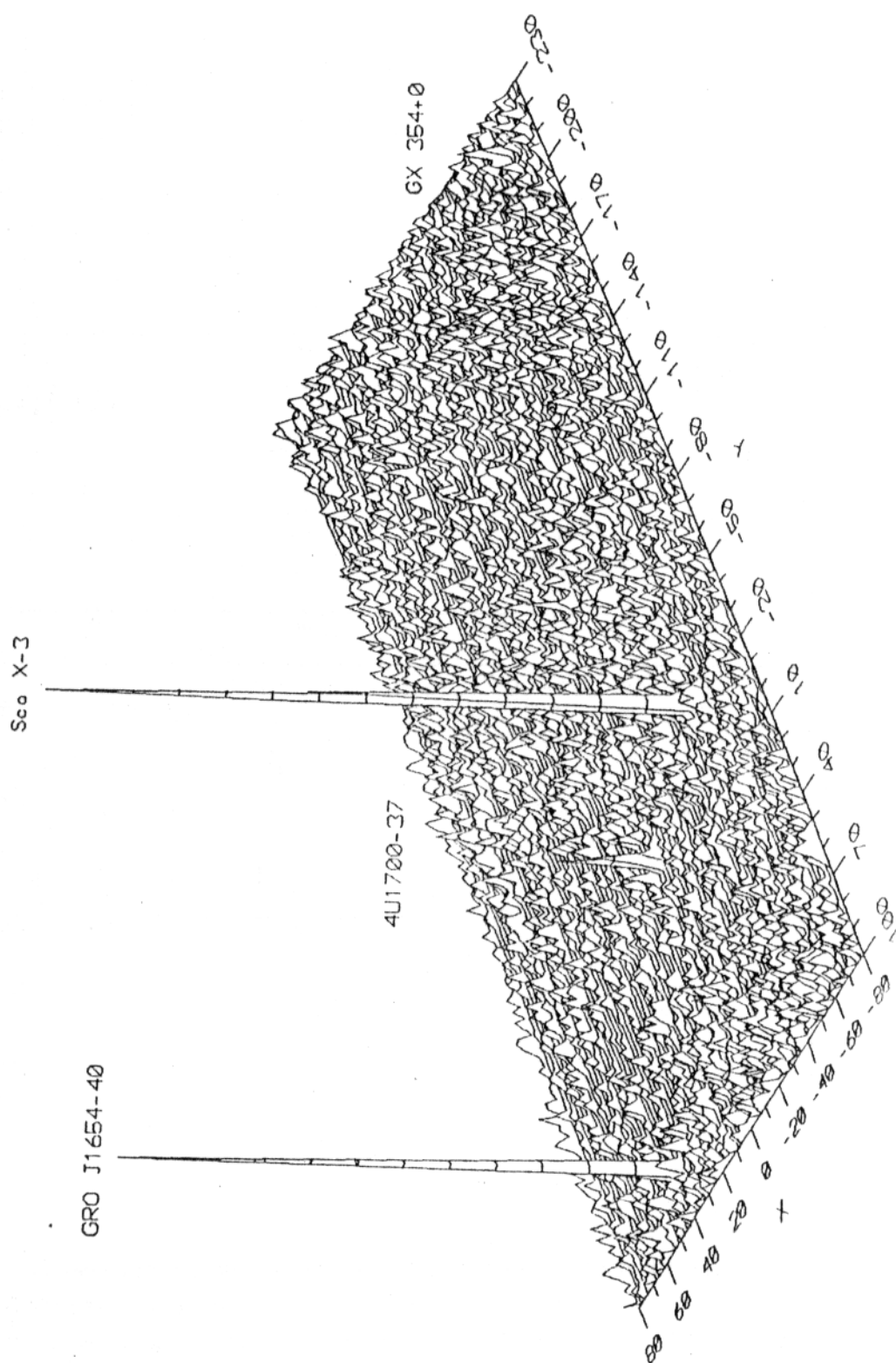


Рис. 3.2. Часть изображения области Галактического Центра, полученного телескопом ТТМ в октябре 1994 г. Отмечены пики, соответствующие положениям известных источников Sco X-3, 4U1700-37, GX354+0 и рентгеновской Новой GRO J1655-40. Высота пиков пропорциональна значимости регистрации источника в диапазоне 2-27 кэВ. Приведены координаты в пикселях ТТМ. Размер пикселя составляет 1.86 угл.мин.

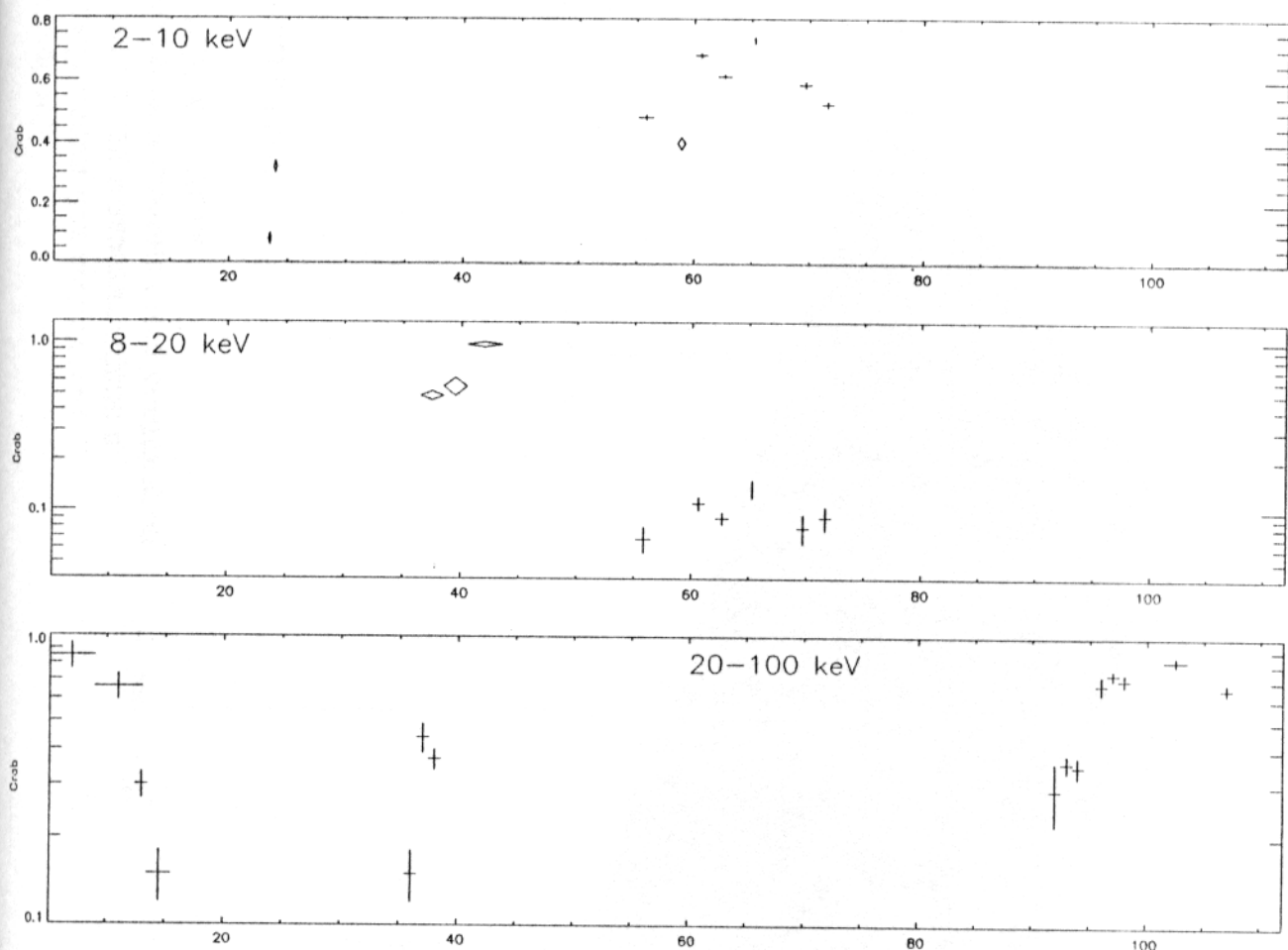


Рис.3.3. Переменность источника GRO J1655-40 осенью 1994 г. в диапазонах энергий 2-10 кэВ (верхняя панель), 8-20 кэВ (средняя) и 20-100 кэВ (нижняя). Для диапазона 2-10 кэВ представлены данные приборов ASCA (ромбы) и TTM (кресты). В диапазоне 8-20 кэВ приведены данные приборов WATCH (ромбы) и TTM (кресты). В диапазоне 20-100 кэВ приведены данные прибора BATSE. Поток везде приведен в единицах потока от Крабовидной туманности. Время отложено в днях после 1 августа 1994 г. Точки для приборов ASCA, WATCH и BATSE взяты из Циркуляров МАС (см. список литературы).

Изображение поля
 рентгеновской новой GRO J1655-40
 в энергетическом диапазоне 2-27 кэВ,
 полученное рентгеновским телескопом ГТМ
 модуля "МИР"- "КВАНТ"
 22-24 февраля 1995 г.

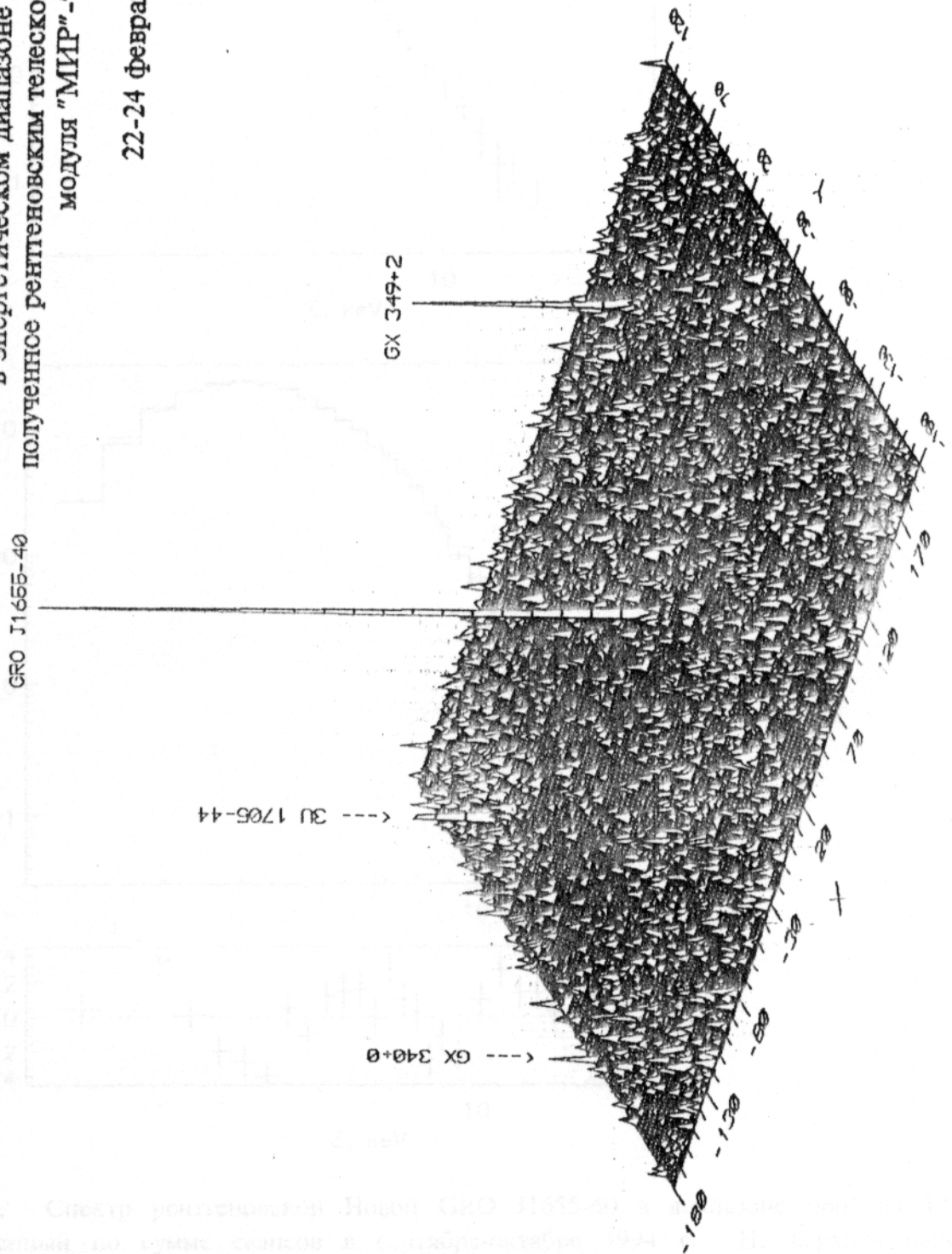


Рис. 3.4. Рентгеновское изображение области вокруг GRO J1655-40, полученное прибором ГТМ 22-24 февраля 1995 г. — Высота пиков соответствует значимости регистрации источников.

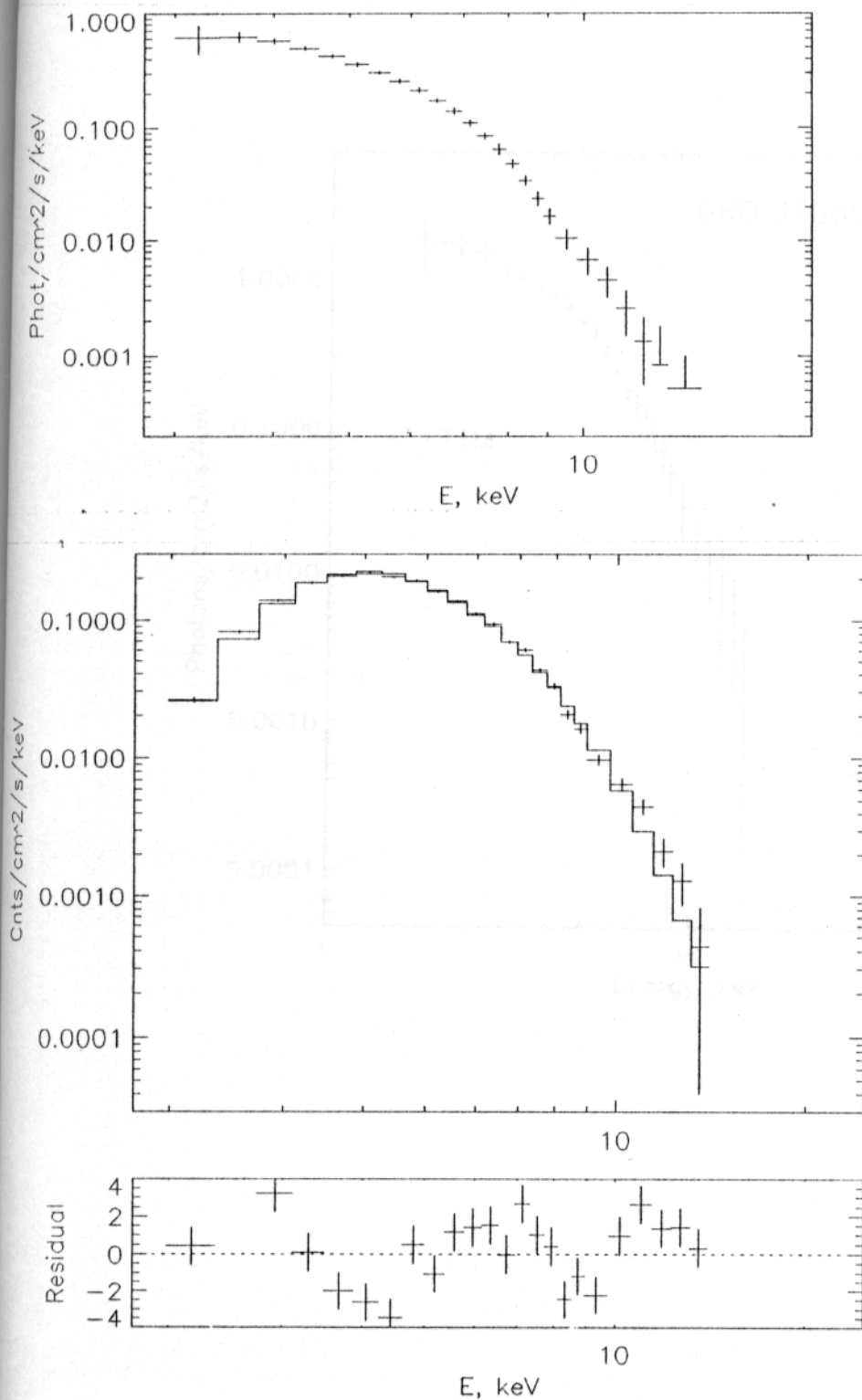


Рис.3.5. Спектр рентгеновской Новой GRO J1655-40 в диапазоне прибора ТТМ, построенный по сумме сеансов в сентябре-октябре 1994 г. На верхней панели представлен спектр источника в фот./см²/с/кэВ. На средней панели: крестами - приборный спектр (отсч./см²/с/кэВ), гистограммой - аналитическая двухкомпонентная аппроксимация с $kT=1.14$ кэВ для чернотельной компоненты и наклоном степени -2.5 для степенной компоненты. Внизу приведена разность между отсчетами в приборе и аппроксимацией, отнормированная на ошибку измерения в каналах.

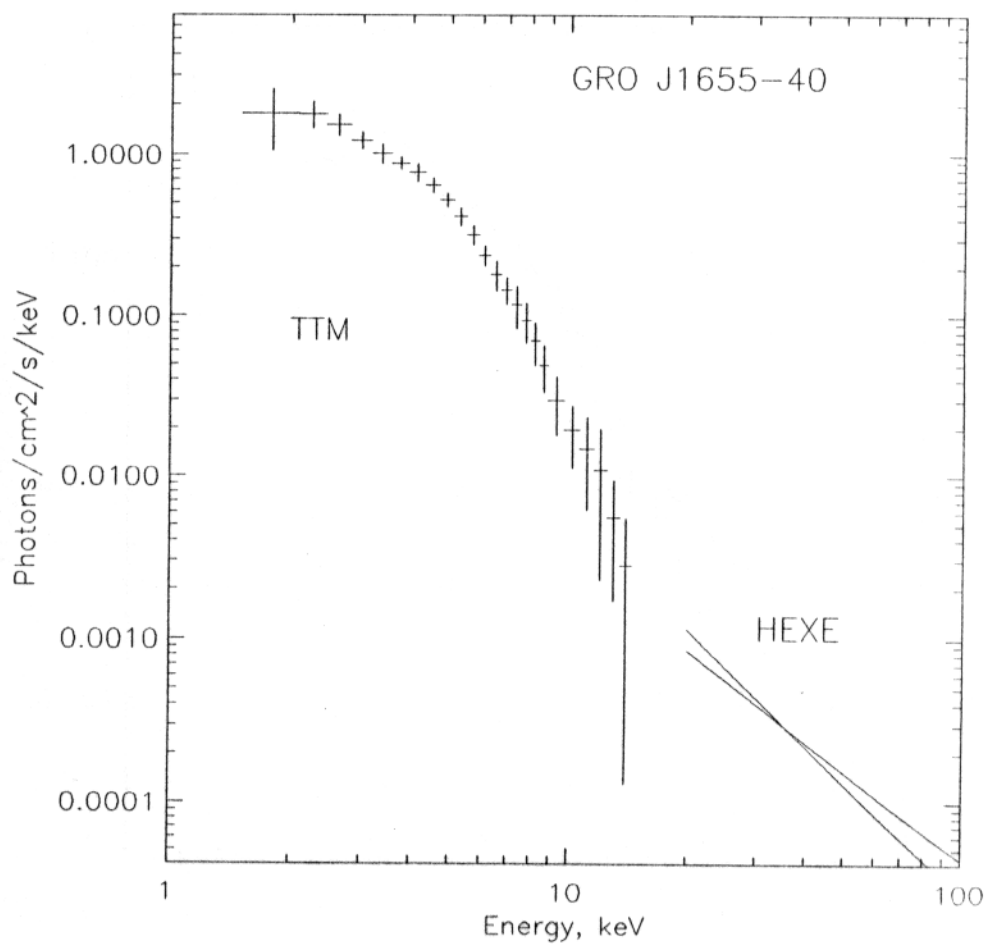


Рис.3.6. Спектр рентгеновской Новой GRO J1655-40 22 февраля 1995 г. по данным модуля "Квант". Крестами показан спектр источника, зарегистрированный прибором ТТМ (фот./см²/с/кэВ). Здесь же приведена степенная аппроксимация данных ГЕКСЕ (с учетом ошибки определения наклона).

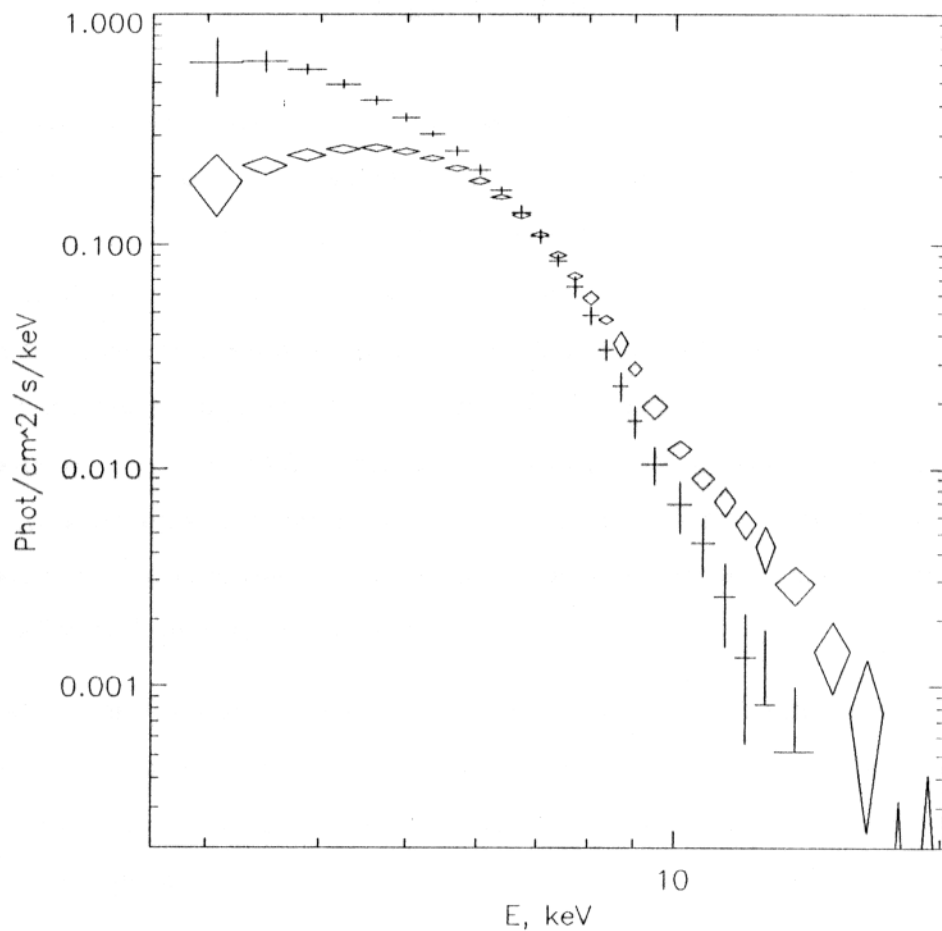


Рис.3.7. Спектры источников со сверхсветовым разлетом радиоконпонент GRS1915+105 (ромбы) и GRO J1655-40 (кресты) в диапазоне прибора TTM, построенные по сумме сеансов в сентябре-октябре 1994 г.

Глава 4. Новые рентгеновские источники KS1947+300 и KS1730-312.

Благодаря широкому полю зрения и координатной чувствительности рентгеновский телескоп с кодированной апертурой ТТМ способен обнаруживать новые источники рентгеновского излучения в тех случаях, когда они попадают в его поле зрения. За период 1987-1994 было обнаружено по меньшей мере одиннадцать таких источников, в том числе рентгеновский барстер KS1731-160 [110], транзиентный источник в созвездии Лебеда KS1947+300 [111] и несколько менее ярких источников [112]. KS в названиях этих источников означает KVANT SOURCE, т.е. источник, открытый приборами модуля "Квант"; последующие цифры обозначают экваториальные координаты источника. Большинство этих источников находятся вблизи Галактического Центра.

В данной главе представлены результаты наблюдений двух новых источников: KS1947+300, открытого во время наблюдений рентгеновской Новой GS2023+338, и KS1730-312, ряд наблюдательных особенностей которого напоминают признаки рентгеновских новых.

4.1. Рентгеновский транзиентный источник KS1947+300 в созвездии Лебеда.

Рентгеновский источник KS1947+300 был обнаружен 8 июня 1989 г. во время наблюдений поля зрения, включающего известный источник Лебедь X-1 и рентгеновскую Новую в созвездии Лебеда = GS2023+338 во время ее вспышки. Как было отмечено в Главе 1, наблюдения GS2023+338 приборами модуля "Квант" проводились в июне (8-10, 15), июле (6-11) и августе (19) 1989 г. Анализ данных, полученных в первый же день наблюдений 8 июня показал присутствие в поле зрения ТТМ наряду с известными источниками Лебедь X-1 и GS2023+338 нового рентгеновского источника, находящегося на расстоянии $5^{\circ}.4$ от Лебеда X-1 и $8^{\circ}.2$ от GS2023+338 (рис. 4.1). Поток от источника в диапазоне 2-27 кэВ составлял 70

± 10 мКраб. Координаты нового источника были определены на основании положений известных источников Лебедь X-1 и GS2023+338:

R.A.=19^h47^m35^s.2, Dec.=+30°04'47'' (на эпоху 1950 г.) с точностью локализации 30 угл.сек [113].

Поток от источника KS1947+300 уверенно детектировался телескопом ТТМ во время июньской серии наблюдений, в июле источник был зарегистрирован на пределе чувствительности прибора, а в августе источник не был найден вообще при достаточно низком верхнем пределе (3σ) 10 мКраб. Переменность источника во время наблюдений 1989 г. представлена на рис. 4.2. При дальнейших наблюдениях этого поля зрения значимого потока от источника не было зафиксировано. Таким образом, наши наблюдения пришлись на спадающую часть кривой излучения KS1947+300. В то же время отсутствие сообщений от других приборов, наблюдавших летом 1989 г. рентгеновскую Новую GS2023+338, прежде всего от монитора всего неба на спутнике GINGA, показывает, что вряд ли поток от источника в максимуме превышал ~ 100 мКраб.

По сумме наблюдений прибора ТТМ 8, 9 и 15 июня был построен спектр KS1947+300 в диапазоне 2-27 кэВ (рис. 4.3). Спектр удовлетворительно аппроксимируется степенным законом с показателем степени $\alpha = -1.7 \pm 0.3$, показателем поглощения (числом атомов водорода на луче зрения) $N_{\text{H}} \sim 3 \cdot 10^{22}$ см⁻² и плотностью потока энергии на 5 кэВ $F_E = (2.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-10}$ эрг/см²/с/кэВ.

Благодаря достаточно высокой точности локализации Гранкину и др. [114] удалось, используя данные 60-см телескопа Цейса Высокогорной Майданакской экспедиции АИ АН УзССР, отождествить KS1947+300 с голубой звездой ≈ 14.2 V. Цвета U-V и B-V оптического кандидата KS1947+300 с точностью до 0^m.02 совпадают с соответствующими цветами сверхгиганта V 1357 Cyg = Лебедь X-1. Если же кандидат - это обычная звезда O7V, то поглощение $A_V = 4^m$ и расстояние до нее 10-15 кпк. В этом случае рентгеновская светимость объекта, зарегистрированная телескопом ТТМ в июне 1989 г. составляет от $3 \cdot 10^{37}$ до 10^{38} эрг/с.

4.2. Яркий транзиентный источник KS1730-312 в созвездии Скорпиона.

Рентгеновский источник KS1730-312 был обнаружен во время наблюдений области Галактического Центра модулем "Квант" в сентябре 1994 г. В результате обработки данных, полученных 23 сентября, был зарегистрирован поток интенсивностью 70 ± 10 мКраб от неизвестного источника. На следующий день о регистрации потока от источника с теми же координатами в диапазоне 40-150 кэВ сообщила группа обработки данных телескопа СИГМА на спутнике "Гранат" [115]. Наблюдения этого участка неба модулем "Квант" были продолжены 26-28 сентября (см. табл. 4.1). Новая серия наблюдений с источником KS1730-312 в центре поля зрения планировалась на середину октября. К сожалению, в связи с перерасходом энергии на станции "Мир", эти наблюдения были отменены. Сеанс наблюдений этого участка неба удалось провести только 16 февраля 95 г. KS1730-312 был зафиксирован лишь на пределе чувствительности прибора, что свидетельствует об окончании вспышки. Во время предыдущей серии наблюдений, проведенной 6-15 мая 1994 г., поток от источника не был зарегистрирован (3σ верхний предел по сумме сеансов ~ 9 мКраб).

Таким образом, в конце сентября 94 г. была зарегистрирована вспышка источника KS1730-312. 16 февраля 95 г. поток от источника составил 20 ± 6 мКраб. Предполагая экспоненциальное ослабление блеска источника, характерное

для ярких рентгеновских транзиентов $F = F_0 \cdot \exp(-\frac{t}{\tau})$, можно оценить

характерное время ослабления потока $\tau = t / \ln(\frac{F_0}{F}) \approx 45$ дней для KS1730-312.

Эта оценка совпадает с соответствующими величинами для рентгеновских новых

Таблица 4.1. Наблюдения источника KS1730-312 модулем "Квант" в сентябре 1994 г.

Дата, 1994 г.	Продолжительность, мин	Поток (2-27 кэВ), $\times 10^{-8}$ эрг/с/см ²
23.09	26	0.23 ± 0.03
26.09	26	1.29 ± 0.07
27.09	26	1.27 ± 0.09
28.09	22	1.15 ± 0.07

(для GRO J0422+32, например, $\tau = 44 \pm 2$ дня [53]).

Координаты источника надежно определялись благодаря присутствию в поле зрения прибора ТТМ известных рентгеновских источников GX3+1, GX5-1, 4U1755-33, KS1731-260 и A1742-294 (указаны только источники, поток от которых превышал 7σ за один сеанс наблюдений). На рис. 4.4 представлено изображение части поля зрения телескопа ТТМ, просуммированное за сеансы 26-28 сентября. Как видно из рисунка, KS1730-312 был самым ярким источником в поле зрения прибора ТТМ в эти дни.

Источник был локализован с координатами:

R.A.=17^h33^m37^s.6; Dec.=-31°13'12" (эпоха 2000)

и точностью локализации около 0.5 угл.мин. Область локализации источника показана на рис. 4.5. Контурами ограничены области с вероятностью нахождения источника 0.5, 0.9 и 0.99.

Переменность источника в диапазонах энергии 2-10 кэВ и 10-27 кэВ представлена на рис. 4.6 Отметим существенное увеличение потока в диапазоне 2-27 кэВ с 75 мКраб 23 сентября до 550 мКраб 27 сентября [116]. В то же время по данным прибора СИГМА в жестком рентгеновском диапазоне 40-150 кэВ поток от источника спадал от 130 мКраб 23 сентября [115] до 40 мКраб 26-27 сентября [117]. Это свидетельствует о сдвиге максимума спектра рентгеновского излучения от источника в более мягкую область. Изменение формы спектра аналогично переходу из жесткого состояния в мягкое, наблюдавшееся у источников Лебедь X-1 [13] и рентгеновской новой в созвездии Мухи [61]. Жесткость источника (отношение потока фотонов в диапазоне 10-27 кэВ к потоку в диапазоне 2-10

Таблица 4.2. Параметры аппроксимации спектра излучения KS1730-312 степенным законом.

Дата	α	$N_{\text{HL}}/10^{22}$	χ^2
23.09	$1,9 \pm 0,4$	7 ± 8	0,8
26.09	$2,7 \pm 0,2$	$4,1 \pm 0,8$	0,9
27.09	$3,88 \pm 0,12$	$7,2 \pm 0,6$	1,0
28.09	$3,93 \pm 0,13$	$6,7 \pm 0,7$	0,9

кэВ), зарегистрированная 23 сентября, соответствует жесткости, характерной для жестких рентгеновских новых, наблюдавшихся модулем "Квант" (см. рис. 4.7); 27-28 сентября жесткость была близка к

значениям, характерным для рентгеновских новых с сильной мягкой компонентой в спектре GRS1009-45 и GRO J1655-40.

Наилучшие параметры аппроксимации спектра излучения источника степенным законом приведены в табл. 4.2 (α - показатель степени $F_E \sim E^{-\alpha}$, N_{HL} - параметр поглощения, число атомов водорода на луче зрения). Изменение формы аппроксимации спектра показано на рис. 4.9. Здесь же приведены данные прибора СИГМА для жесткого рентгеновского диапазона [115, 117]. Несмотря на значительные различия во временах интегрирования данных спутником ГРАНАТ и модулем "Квант", следует отметить хорошее взаимное соответствие спектров, полученных приборами ТТМ и СИГМА.

Поток от рентгеновского источника, обнаруженного телескопом ТТМ в созвездии Скорпиона на расстоянии $3^\circ.4$ от Центра Галактики, за несколько дней значительно увеличился в стандартном рентгеновском диапазоне с одновременным уменьшением потока в жестком рентгеновском диапазоне. Яркость источника в диапазоне 2-27 кэВ по данным наблюдений 26-28 сентября ставит его на первое место по этому показателю среди новых рентгеновских источников, открытых модулем "Квант" за 1987-1994 гг.

Ряд свойств, отмеченных у источника KS1730-312 напоминают соответствующие параметры рентгеновских новых:

1. Поток от KS1730-312 в стандартном рентгеновском диапазоне увеличился на порядок за несколько дней. Подобное поведение было отмечено, например, при наблюдениях телескопом ТТМ рентгеновской новой GRS1716-249 в первые дни после ее вспышки - 26-27 сентября 1993 г. [60]. К 16 февраля 1995 г. поток от источника упал по сравнению с максимумом в 25-30 раз, что соответствует времени ослабления блеска после максимума, характерному для рентгеновских новых.

2. Светимость источника в диапазоне 2-27 кэВ составила $1.5 \cdot 10^{36} \cdot d^2$ эрг/с (d - расстояние в кпк), что совпадает со светимостью рентгеновских новых GRS1009-45 и GRS1716-249 [77] в максимуме блеска. Принимая расстояние до KS1730-312 равным 8.5 кпк (в предположении, что источник находится вблизи Центра

Галактики), светимость источника по наблюдениям 26-28 сентября составляет $\sim 10^{38}$ эрг/с.

3. Спектр мягкой компоненты излучения KS1730-312 в максимуме блеска подобен спектру мягких рентгеновских новых, наблюдавшихся ранее модулем "Квант": Vul X-ray Nova (1988) = GS2000+25 [85] и Vela X-ray Nova (1993) = GRS1009-45 [60]. В то же время наблюдения прибора СИГМА свидетельствуют о наличии потока жесткого рентгеновского излучения, соответствующего светимости $\sim 3 \cdot 10^{35} \cdot d^2$ эрг/с (d - расстояние в кпк) [115]. Присутствие жесткого рентгеновского излучения в спектре является характерной чертой, присущей всем рентгеновским новым [61, 44, 76].

4. Во время наблюдений источника KS1730-312 приборами ТТМ и СИГМА был зафиксирован переход источника из жесткого спектрального состояния в мягкое (см. рис. 4.7). Такой переход наблюдался в 1991 г. приборами обсерватории ГРАНАТ для GRS1124-684 - рентгеновской новой в созвездии Мухи [61, 118].

Таким образом, совокупность наблюдательных данных позволяет сделать предположение о том, что источник KS1730-312 представляет собой рентгеновскую новую в созвездии Скорпиона, обнаруженную модулем "Квант" и обсерваторией "Гранат" в момент ее вспышки на рентгеновском небе. К сожалению, мы не имеем до сих пор данных о дальнейшем поведении этого источника, которые могли бы подтвердить или опровергнуть это предположение. За время наблюдений прибором ТТМ от источника не было зафиксировано рентгеновских всплесков излучения, однако мы не можем исключить возможности того, что KS1730-312 является рентгеновским барстером. Оптическое отождествление источника затруднено из-за сильного поглощения в галактической плоскости, которое делает область Галактического Центра практически невидимой в оптическом диапазоне.

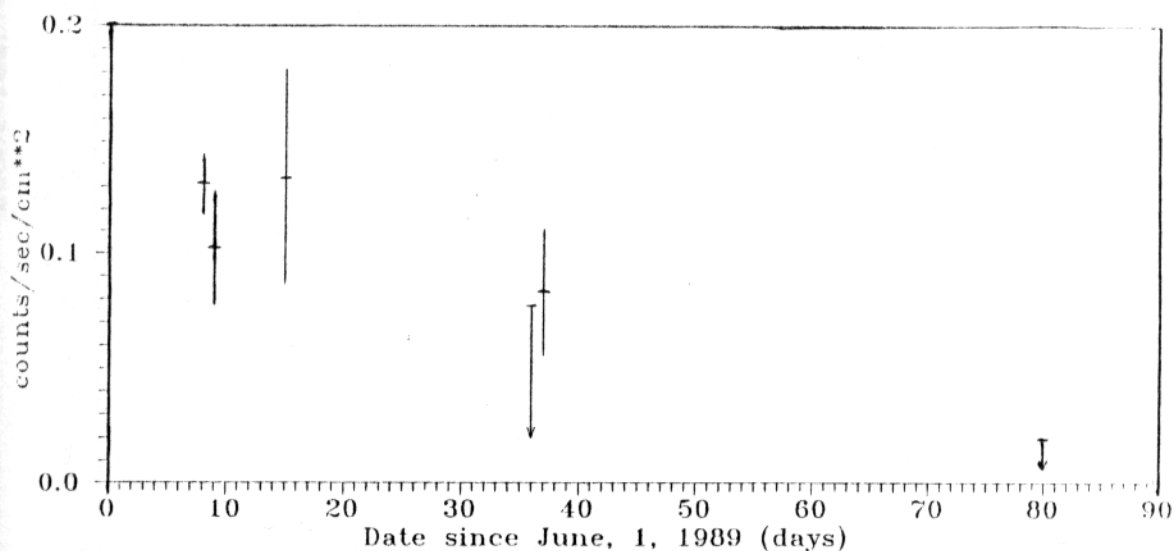
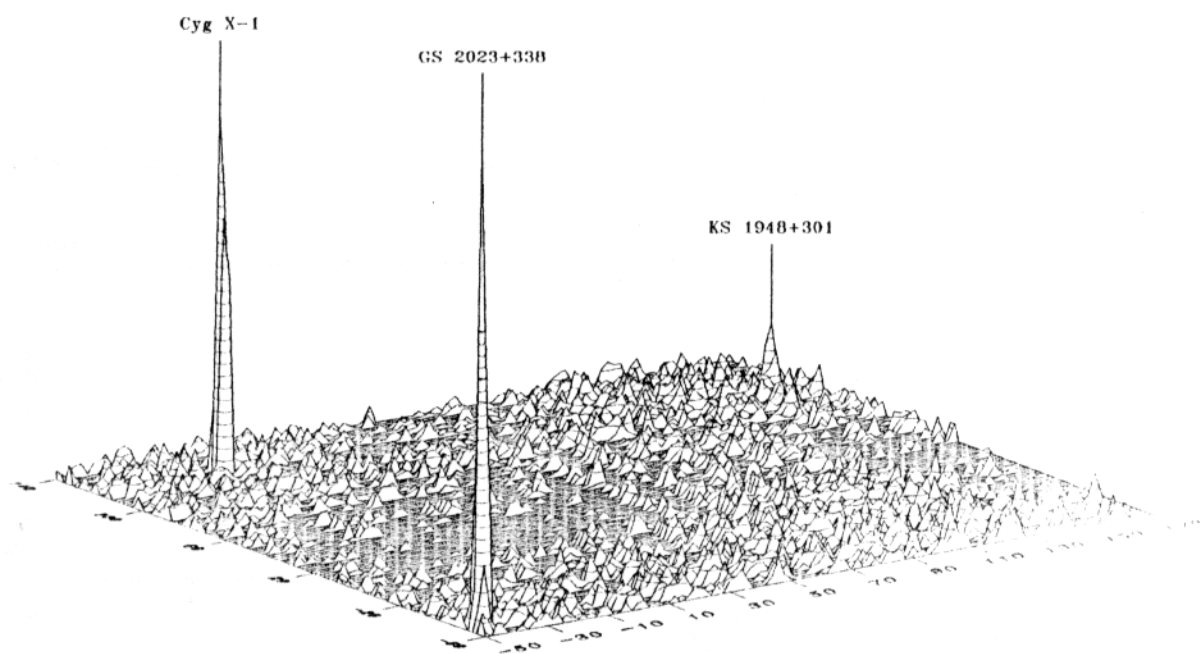
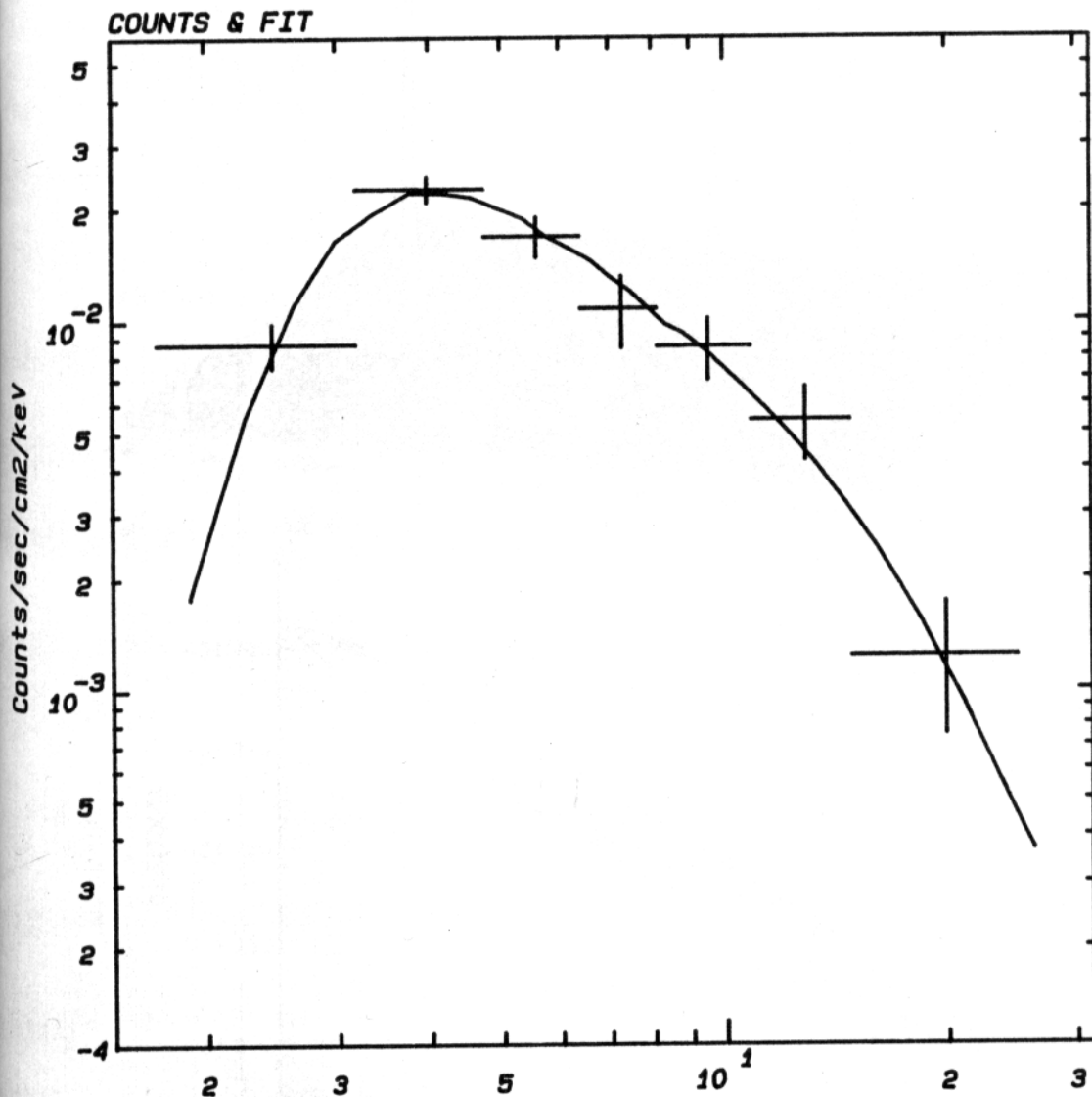


Рис 4.1. Часть рентгеновского изображения неба ($6^{\circ}.2 \times 6^{\circ}.8$), полученного телескопом ТТМ 8 июня 1989 г. Указаны положения известных источников Лебедь X-1 (поток в диапазоне 2-27 кэВ составляет 275 мКраб) и GS2023+338 (200 мКраб), а также нового источника KS1947+300 (70 мКраб). Высота пиков пропорциональна значимости детектирования источников во время наблюдений. По осям отложены координаты в пикселях ТТМ (1 пиксель = 1.86 угл.мин.).

Рис. 4.2. Изменение потока от источника KS1947+300 в диапазоне 2-27 кэВ по данным, полученным телескопом ТТМ во время наблюдений в июне-августе 1989 г. В тех случаях, когда поток от источника не превышал три стандартных отклонения, отрезками со стрелками указаны верхние пределы (3σ) на поток.

TTM/COMIS

KS1947+300



KS1947+300 Averaged spectrum in June, 1989

Power law with absorption fit parameters:

Alfa = -1.72 ± 0.31 ($-2.03 : -1.42$)

NH_L = $(3.4 \pm 3.0) \times 10^{22}$ ($1.2 : 6.5$)

Chi.sq. = 28.9 for 26 d.o.f.

Рис. 4.3. Спектр отсчетов детектора от источника KS1947+300, по результатам наблюдений 8, 9 и 15 июня 1989 г. Сплошной линией показаны отсчеты, соответствующие степенной аппроксимации спектра с показателем степени $\alpha = -1.72$, числом атомов водорода на луче зрения $N_{\text{H}L} = 3.4 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и плотностью потока энергии на 5 кэВ $F_E = 2 \cdot 10^{-10} \text{ эрг/см}^2/\text{с/кэВ}$.

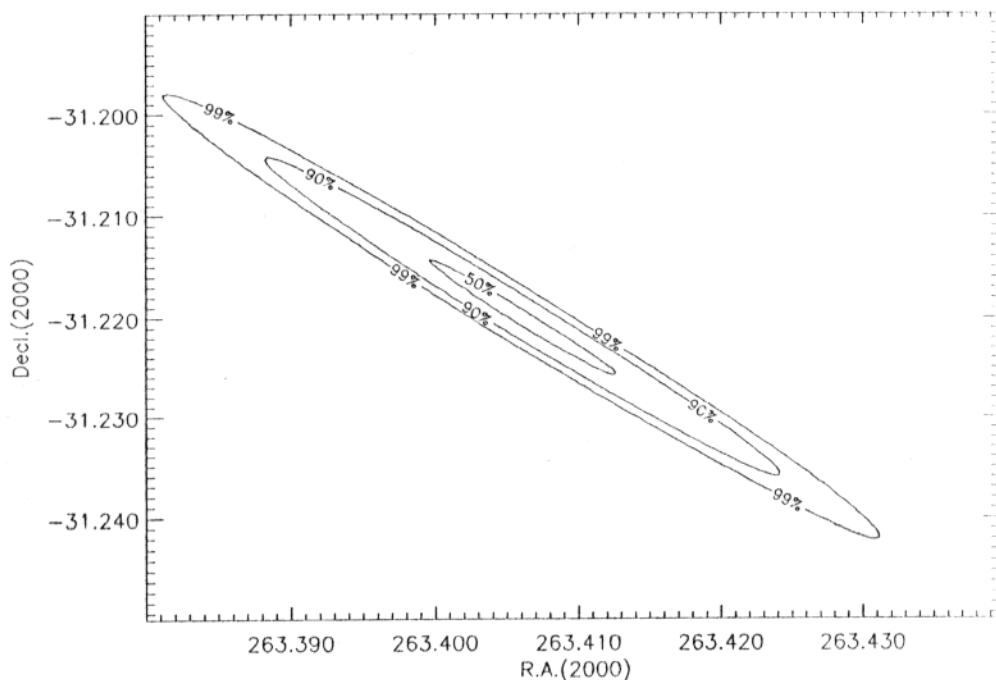
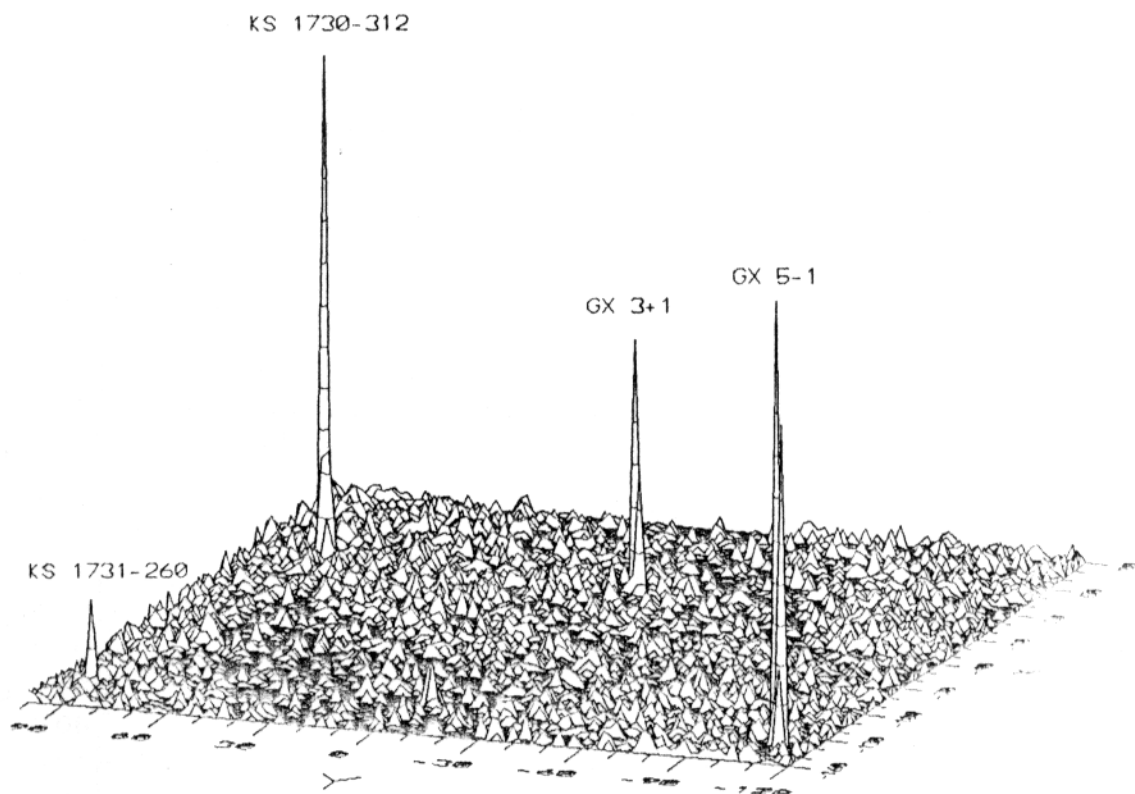


Рис. 4.4. Часть изображения области Галактического Центра, полученного телескопом ТТМ 26-28 сентября 1994 г. Отмечены пики, соответствующие положениям известных источников GX5-1, GX3+1, и источников, открытых телескопом ТТМ : KS1731-260 и KS1730-312. Высота пиков пропорциональна значимости регистрации источника в диапазоне 2-27 кэВ. Приведены координаты в пикселях ТТМ (1.86 угл.мин.).

Рис. 4.5. Область локализации источника KS1730-312 рентгеновским телескопом ТТМ. Контуры соответствуют вероятностям обнаружения источника 0.5, 0.9 и 0.99. Значения склонения и прямого восхождения по осям приведены на эпоху 2000 г.

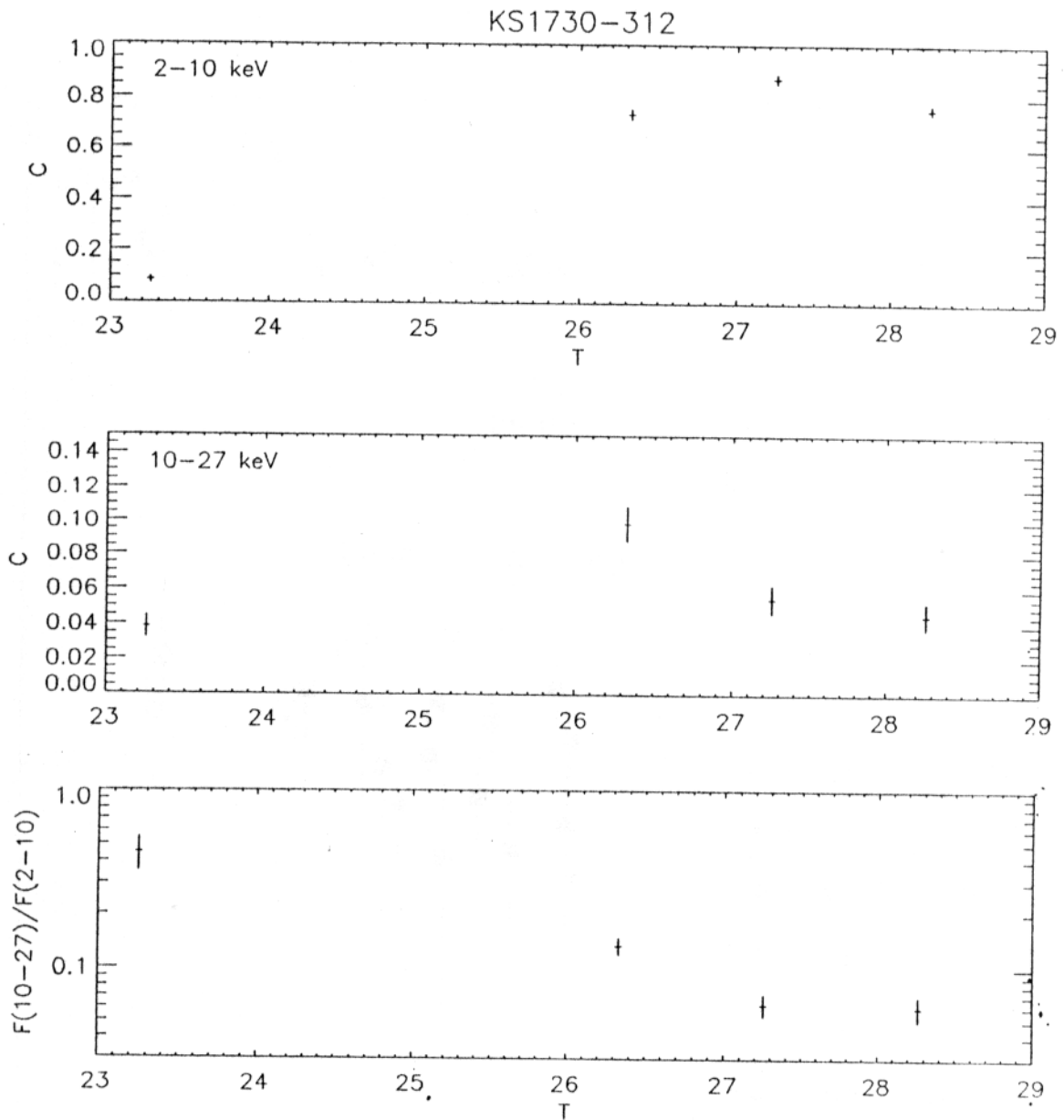


Рис. 4.6. Переменность источника KS1730-312 за 23-28 сентября 1994 г. в энергетических диапазонах 2-10 кэВ (вверху), 10-27 кэВ (посередине) и отношение потока в диапазоне 10-27 кэВ к потоку в диапазоне 2-10 кэВ (жесткость источника) - внизу. Потоки отложены в отсч./с/см², время - в днях сентября 1994 г.

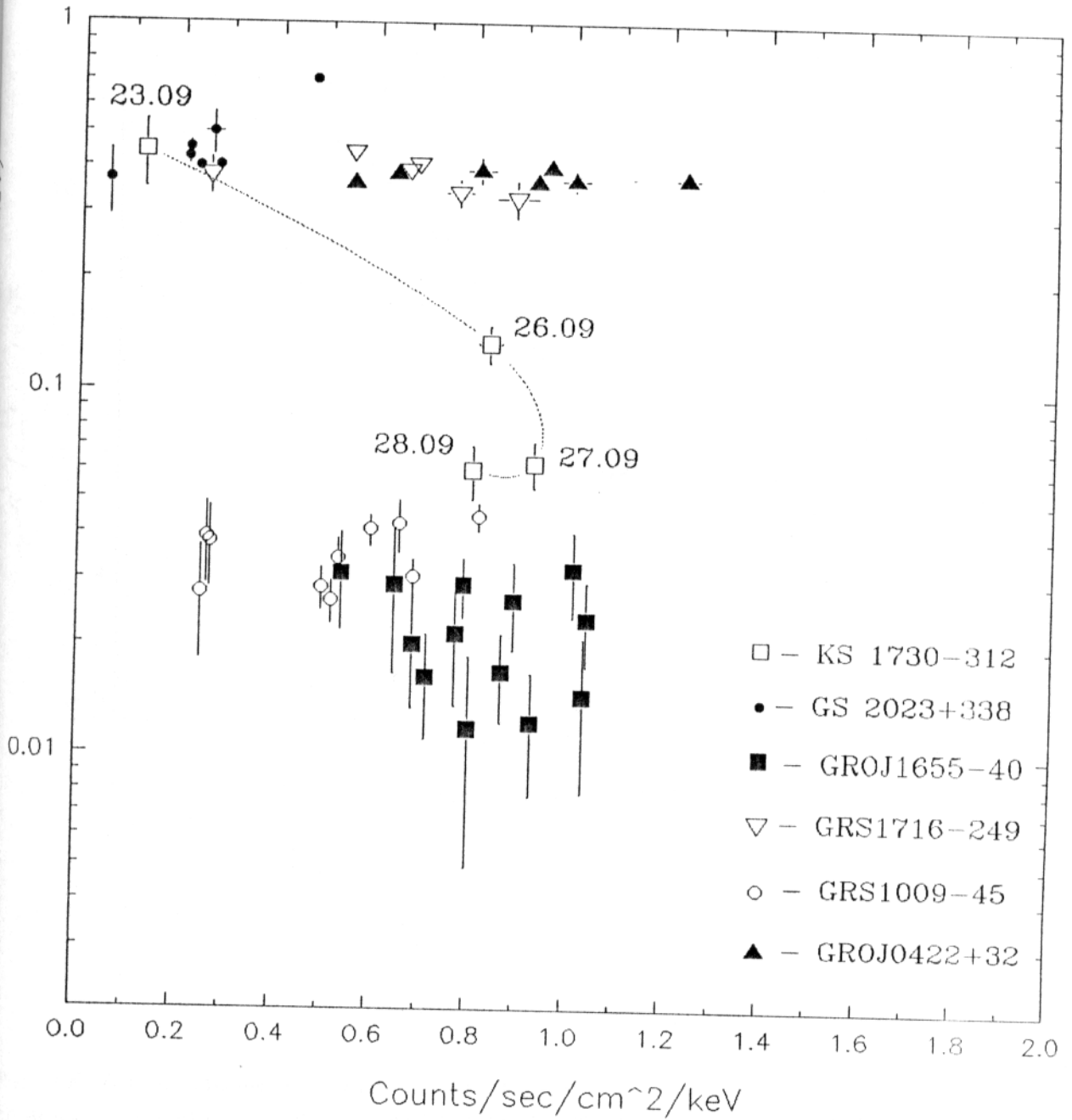


Рис. 4.7. Диаграмма светимость-жесткость для рентгеновских новых, наблюдавшихся модулем "Квант" в 1989-1994 г.г. Представлены данные телескопа ТТМ для источников GS 2023+338 (рентгеновская новая 1989 г. в созвездии Лебедя), GRO J0422+32 (рентгеновская новая 1992 г. в Персее), GRS1009-45 (рентгеновская новая 1993 г. в Парусах), GRS1716-249 (рентгеновская новая 1993 г. в Змееносце), GRO J1655-40 (рентгеновская новая 1994 г. в Скорпионе) и KS1730-312. Точки, соответствующие источнику KS1730-312, последовательно соединены штриховой линией

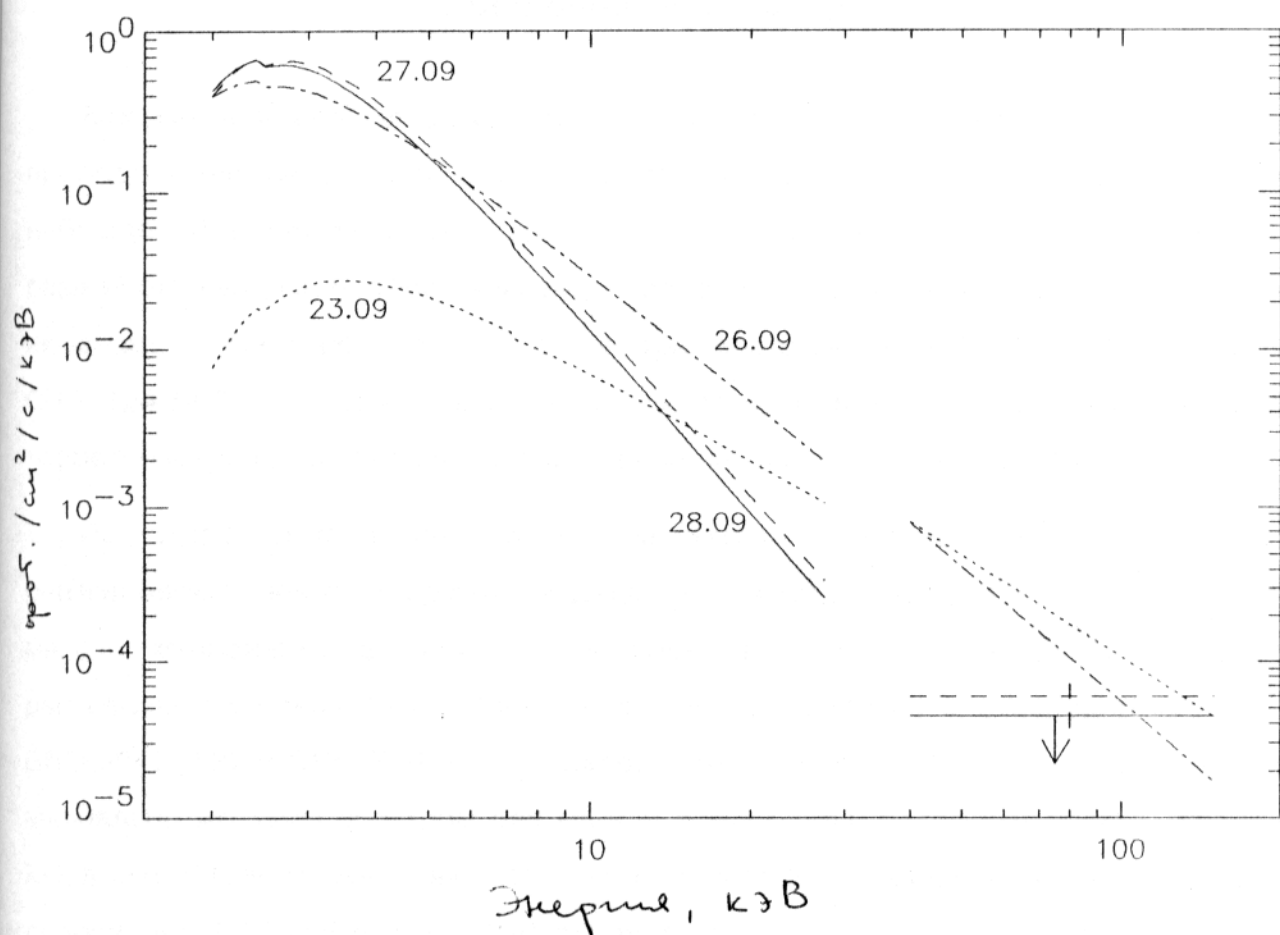


Рис. 4.8. Аппроксимация спектра источника KS 1730-312 за отдельные дни наблюдений степенным законом с учетом поглощения. Приведены данные за 23.09 (точки), 26.09 (штрих-пунктирная линия), 27.09 (штриховая линия) и 28.09 (сплошная линия). Представлены также данные прибора СИГМА спутника "Гранат" [115,117], соответствующие тому же периоду времени: 22-23.09 (точки), 24-25.09 (штрих-пунктирная линия), 26-27.09 (штриховая линия) и 28-30.09 (сплошная линия; приведен 2σ верхний предел на поток от источника). При этом времена интегрирования данных для приборов ТТМ и СИГМА существенно различаются.

*“И хитрили они, и хитрил Аллах,
а Аллах - лучший из хитрецов.”
Коран. Сура 3 (47).*

Заключение к части I

Важной для астрофизики высоких энергий задачей является определение природы релятивистского объекта в тесной двойной системе на основании наблюдений в рентгеновском диапазоне. Рентгеновские новые привлекают в рамках этой задачи особое внимание исследователей, так как этот класс объектов включает в себя по меньшей мере три системы -A0620-00, GS2023+338 и GRS1124-648 - со значениями оптической функции масс большими, чем верхний теоретический предел на массу стабильной нейтронной звезды [7, 14, 89].

По мере накопления данных меняются представления о свойствах рентгеновских новых и других кандидатов в черные дыры. Так, наличие яркой мягкой компоненты в спектре считалось признаком, характерным для всех рентгеновских новых [84]. После вспышки GS2023+338, а впоследствии также GRO J0422+32 и GRS1716-249, оказалось, что существуют рентгеновские новые с аномально жестким спектром без мягкой компоненты, подобным спектру Лебеда X-1 в его обычном “жестком” состоянии. В табл.Р.1 приведены потоки энергии в диапазонах 4-10 кэВ и 10-27 кэВ от шести рентгеновских новых, наблюдавшихся модулем “Квант” и спутником “Гранат” в 1988-1993 гг. Видно, что у трех из этих объектов основное энерговыделение происходило в диапазоне до 10 кэВ, в то время как у трех других - в более жестком диапазоне энергий.

В спектрах рентгеновских новых в Парусах, Мухе и Лисичке доминирует мягкая компонента, и светимость мягкой компоненты превышает светимость жесткой в несколько раз. Возможна интерпретация мягкой компоненты как излучения оптически толстого по истинному поглощению аккреционного диска [46] вокруг черной дыры. Интересно, что мягкая компонента, как правило, слабо переменна в этих источниках, а жесткая имеет более ярко выраженную переменность. Возможно, что в этих источниках, как и во многих других [119], жесткая компонента - результат корональной активности в аккреционном диске, при этом корональный нагрев, связанный с диссипацией магнитных полей или

Таблица Р.1. Потоки от рентгеновских новых 1988-1993 гг. в двух энергетических диапазонах.

Название	Поток в диапазоне 4-10 кэВ, 10^{-9} эрг/с/см ²	Поток в диапазоне 10-27 кэВ, 10^{-9} эрг/с/см ²
GRS1009-45 (Vel)	1.14	0.58
GRS1716-249 (Oph)	3.54	7.65
GROJ0422+32 (Per)	4.22	8.67
GS2023+338 (Cyg)	1.70	3.86
GRS1124-684 (Mus)	29	8.0
GS2000+25 (Vul)	55	4.6

конвективным движением, уносит малую часть энергии, выделяемой в аккреционном диске.

В случае рентгеновских новых в Лебеде, Персее и Змееносце мы, по видимому, имеем совсем другую картину: подобно Лебедю X-1, они находятся в состоянии с высокой температурой электронов и оптически тонким аккреционным диском относительно истинного поглощения $\sqrt{\tau_{\text{том}} \cdot \tau_{\text{ff}}} \ll 1$, где $\tau_{\text{том}}$ - оптическая толща по томсоновскому рассеянию, а τ_{ff} - оптическая толща по тормозному излучению [120, 121]. При этом жесткий спектр излучения формируется в процессе комптонизации фотонов на горячих электронах [52].

Наблюдения приборов "Кванта" и "Граната" дают основания считать, что два класса кандидатов в черные дыры с мягкими и жесткими спектрами встречаются одинаково часто. Кандидаты в черные дыры, постоянно излучающие в рентгеновском диапазоне (Лебедь X-1, 1E1740.7-2942 и GRS1758-258), более часто находятся в жестком состоянии. При этом источникам Лебедь X-1 и GX339-4 присуще бимодальное поведение, то есть переход из мягкого состояния в жесткое и обратно [86, 13]. Такой же переход наблюдался у рентгеновской Новой в Мухе [61]. Это позволяет предположить, что бимодальность является характерной чертой кандидатов в черные дыры.

Спектральные состояния, сильно отличающиеся по положению максимума энергосвечения, наблюдались также у рентгеновских источников GRS1915+105 и GRO J1655-40, привлекающих особое внимание благодаря своей способности выбрасывать время от времени релятивистские облака плазмы, что напоминает

процессы в квазарах и ядрах радиогалактик. Неоднократно они наблюдались в жестком состоянии со степенным спектром, регистрируемым вплоть до энергий в сотни кэВ. Во время наблюдений модуля "Квант" осенью 1994 и зимой 1995 гг. в спектрах этих источников была обнаружена яркая мягкая компонента с характерной температурой чернотельной аппроксимации $kT \sim 1.0 \div 1.1$ кэВ. Мы пытались сравнивать эти спектры со спектрами других источников, наблюдавшихся телескопом ТТМ и имеющим яркую мягкую компоненту. Для сравнения все спектры аппроксимировались двухкомпонентным приближением с мягкой чернотельной и жесткой степенной компонентой. Результаты представлены в табл.Р.2.

Таким образом, источники GRO J1655-40 и GRS1915+105 проявляют как черты, характерные для систем с черными дырами, так и имеют ряд специфических отличий. Дальнейшие наблюдения должны показать, следует ли относить эти объекты к рентгеновским новым - кандидатам в черные дыры, или они представляют собой особую группу рентгеновских источников.

Таблица Р.2. Характерная температура мягкой компоненты спектра для чернотельной аппроксимации

Источник	kT, кэВ
GX339-4 (мягкое состояние)	0.5-0.7
GRS 1009-45	0.4-0.6
GRS1915+105 и GRO J1655-40	1.0-1.1
GX 5-1	1.2-1.4
GX 3+1	1.5-1.7
Sco X-1	1.6-1.8

ЧАСТЬ 2. ПЕРСПЕКТИВЫ НАБЛЮДЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРАНЗИЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПРИБОРАМИ ОБСЕРВАТОРИИ "СПЕКТР-РЕНТГЕН-ГАММА"

Международная орбитальная астрофизическая обсерватория "Спектр-Рентген-Гамма" [148], запуск которой подготавливается ИКИ РАН в кооперации с НПО им.Лавочкина, другими предприятиями промышленности, группами астрофизиков из Великобритании, Германии, Дании, Израиля, Италии, Канады, США, Финляндии, Франции, Швейцарии и других стран, включает в себя ряд приборов нового поколения, беспрецедентных для рентгеновской астрофизики по чувствительности, угловому и энергетическому разрешению. Основные приборы обсерватории перекрывают диапазон энергий от 0.03 до 100 кэВ, способны строить рентгеновские изображения с разрешением до 10 угл.сек. Наличие брэгговского спектрометра в объективе рентгеновского телескопа СОДАРТ позволяет достичь рекордного энергетического разрешения.

Набор высококлассных инструментов позволит обсерватории решать фундаментальные задачи космологии и внегалактической астрономии, такие как определение постоянной Хаббла, определение красных смещений скоплений галактик, подсчеты сверхслабых далеких рентгеновских источников, исследование спектров квазаров и активных ядер галактик и др. В то же время большой интерес для галактической и звездной астрономии представляют возможности спектроскопии ярких источников со сверхтонким энергетическим разрешением, поляриметрических исследований, постоянного мониторинга всего неба в стандартном рентгеновском диапазоне.

Глава 5. Рентгеновский монитор всего неба МОКСЕ.

В состав обсерватории “Спектр-Рентген-Гамма” входит рентгеновский монитор всего неба МОКСЕ (MOXE - MOnitoring X-ray Experiment). Этот прибор разработан кооперацией в составе Лос-Аламосской национальной лаборатории (США), Центра космических исследований им. Годдарда (США) и Института космических исследований (Россия).

Научные задачи МОКСЕ типичны для монитора всего неба:

- регистрировать необычные явления, происходящие на рентгеновском небе, что позволяет своевременно провести наблюдения этих источников более чувствительными приборами;

- исследовать долговременное поведение всех достаточно ярких источников.

Опыт последних лет, в особенности важные результаты, полученные при помощи обзорных приборов спутников GINGA, “Гранат”, ASCA, GRO, подтверждает, что решение этих задач сохраняет свою актуальность для астрофизики высоких энергий. Достаточно сказать, что все рентгеновские новые были открыты при помощи мониторов всего неба.

При проектировании МОКСЕ была сделана попытка добиться необходимого результата наиболее простыми средствами и при относительно низких затратах на разработку и изготовление прибора. В результате из всех известных подходов к проектированию монитора всего неба был выбран вариант простой “камеры обскуры”, обладающий следующими преимуществами:

- постоянное перекрытие полного телесного угла;
- отсутствие движущихся частей;
- умеренные требования к разрешению детектора;
- отсутствие систематической корреляции между удаленными источниками, характерной для приборов с кодированной апертурой;

- низкая скорость счета детектора позволяет продлить его время жизни, сокращает потребности в объеме памяти и телеметрии.

5.1. Описание рентгеновского монитора МОКСЕ.

Прибор МОКСЕ состоит из семи блоков, включая шесть детекторов и центральный блок электроники. Каждый детектор регистрирует излучение с 1/6 части неба (одной грани куба) с некоторым перекрытием полей зрения соседних модулей, что гарантирует одновременный обзор всего неба. Рабочий энергетический диапазон детектора от 2 до 25 кэВ; верхний и нижний пороги дискриминаторов могут быть изменены при необходимости. Размер апертуры 1.6 см^2 был выбран таким, чтобы скорость счета, обусловленная рентгеновским фоном неба, была приблизительно равна фоновой скорости счета самого детектора. Для улучшения пространственного разрешения прибора апертура сделана в форме прямоугольника размером $2.556 \times 0.625 \text{ см}^2$. Прямоугольная форма апертуры обеспечивает лучшее разрешение источников для серии различных наведений спутника.

Ожидаемая полная скорость счета от 6 детекторов составляет около 260 отсч./с. Каждый зарегистрированный фотон кодируется отдельно. На запись одного события расходуется 24 бита; объем памяти составляет около 1 Гбит, что позволяет одновременное хранение информации, собранной за 30 часов наблюдений. Сброс информации будет производиться раз в сутки во время сеанса связи с наземной приемной станцией.

Отдельную проблему представляет высокий поток излучения от Солнца - ярчайшего рентгеновского источника. Так как МОКСЕ перекрывает все небо, то Солнце обязательно попадает в апертуру хотя бы одного из детекторов. Обсерватория "Спектр-Рентген-Гамма" имеет достаточно жесткие ограничения на положение Солнца в координатах космического аппарата - оно может находиться лишь в пределах области $20^\circ \times 80^\circ$, что составляет около 4 % от всего неба. Чтобы избежать перегрузки детекторов и забивания телеметрии солнечными событиями, часть поверхности трех из шести детекторов покрыта достаточно толстыми титановыми экранами. Эта пассивная защита дублируется программным

обеспечением, которое автоматически блокирует солнечные события или, для более высоких потоков, отключает высокое напряжение детекторов в случае попадания Солнца в апертуру. При этом поток от Солнца распознается по высокой скорости счета от данного участка детектора.

Схема детектора МОКСЕ представлена на рис. 5.1. Каждый из шести модулей включает в себя пропорциональную камеру, конус, щель апертуры, высоковольтный источник питания, предварительный усилитель и электронный блок управления. Вес модуля около 13.5 кг, размеры - 45x45x26 см². потребляемая мощность - 2.1 Вт.

Пропорциональная камера имеет собирающую площадь 32x32 см² и рабочую глубину газового слоя 1 см. Камера наполнена ксеноном с добавкой 5 % углекислого газа и герметично запаена. Три параллельные сетки (два катода и один анод) делят объем на четыре равные части. Каждая сетка состоит из параллельных проволочек из нержавеющей стали, натянутых с шагом 0.254 см между ними, с диаметром 75 мкм для катода и 13 мкм для анода. Сигналы с крайних секций и с нижнего слоя толщиной 1 см, имеющего собственный анод, формируют антисовпадательный сигнал. Для режекции фона заряженных частиц используются пятисторонняя схема антисовпадений и дискриминация высоты импульса.

Положения фотонов считываются схемами разделения зарядов с двух резистивных катодов, одного в каждом направлении. Отношение сигналов, считанных с двух концов одного из катодов, пропорционально положению фотона по данной координате, а сумма всех сигналов пропорциональна энергии поглощенного фотона.

Энергетическое разрешение детектора МОКСЕ стандартно для пропорционального счетчика, около 20 % (ПШПВ) на 6 кэВ. Пространственное и энергетическое разрешение будет постоянно калиброваться во время наблюдений при помощи маленького источника Fe-55, установленного в углу каждого из детекторов. Рабочий диапазон ограничен со стороны мягких энергий поглощением в двух бериллиевых пленках: окне апертуры толщиной 75 мкм и

входном окне детектора толщиной 100 мкм. Список основных параметров детектора МОКСЕ приведен в табл. 5.1.

Центральный модуль электроники весит 35 кг и потребляет 25 Вт. Он состоит из двух низковольтных источников питания, основного и резервного, блока электроники и блока памяти. Блок электроники производит усиление сигнала с детекторов, амплитудно-цифровое преобразование, отбор событий, прием и расшифровку команд, выдачу телеметрии. Летное программное обеспечение может быть модифицировано путем изменения значений около 1000 переменных во время сеансов связи. В то же время МОКСЕ способен функционировать полностью автономно, без необходимости подачи каких-либо команд с Земли.

Поскольку одной из основных задач прибора МОКСЕ является обнаружение необычных явлений на рентгеновском небе и своевременное оповещение о них, большое внимание уделяется наземной обработке данных. Основная задача, стоящая при обработке данных МОКСЕ, сформулирована как проведение стандартного анализа данных и выделение аномальных явлений в течение как можно более короткого времени после поступления данных, но не позже, чем за сутки - до следующего сеанса связи. Реализация этой задачи требует значительных усилий по написанию необходимого программного обеспечения.

Тепловая модель прибора МОКСЕ прошла автономные термовакуумные испытания с имитатором Солнца в вакуумной камере ИКИ в начале 1994 г. По

Таблица 5.1. Основные параметры детектора МОКСЕ.

Чувствительная площадь	32 x 32 см ²
Глубина чувствительного слоя	1 см
Площадь апертуры	1.6 см ²
Расстояние между апертурой и детектором	15 см
Поле зрения	93°.7 x 93°.7
Угловое разрешение	2°.4 x 9°.7
Пространственное разрешение	0.5 см на 3 кэВ
Энергетический диапазон	2-25 кэВ
Энергетическое разрешение	20 % на 6 кэВ
Количество энергетических каналов	16
Временное разрешение	до 4 мс
Фон детектора	10 отсч./с (3-10 кэВ)
Фон неба	6-7 отсч./с (3-10 кэВ)
Скорость счета от источника интенсивностью 1 Крб	1.2 отсч./с/см ²

результатам испытаний определены меры по поддержанию номинального температурного диапазона для каждого модуля МОКСЕ. Технологический образец успешно прошел электрические испытания в составе комплекса научной аппаратуры. Испытания прошли в ИКИ в декабре 1994 г. Поставка штатной модели ожидается осенью 1995 г.

5.2. Оценка возможностей прибора МОКСЕ.

Кроме энергетического и временного разрешения, возможности МОКСЕ как научного прибора зависят в основном от вида функции отклика и квантовой эффективности детектора. Функция отклика определяется сочетанием формы и размера апертуры, разрешения камеры и величины свободного пробега фотона в газе детектора. Последние два компонента зависят от энергии фотона и, следовательно, от вида спектра источника в диапазоне чувствительности прибора. Разрешение детектора улучшается почти линейно с ростом энергии, в то время как свободный пробег фотона увеличивается, что приводит к "размазыванию" функции отклика, особенно для больших углов падения фотонов.

Номинальное угловое разрешение, определяемое апертурой, равно $2^{\circ}.4 \times 9^{\circ}.7$ для источника в центре поля зрения. Эта величина уменьшается по мере продвижения к краям поля зрения, где, если пренебречь влиянием пробега фотона в газе детектора, оно достигает величины $1^{\circ}.1 \times 5^{\circ}.4$. При наличии данных, полученных при различных наведениях спутника "Спектр-РГ", величина пространственного разрешения определяется размером меньшей стороны апертуры. Из 497 пар источников, интенсивность которых превышает 1 мКраб, включенных в каталог всего неба НЕАО-1 [122], лишь 1% ближе друг к другу, чем $9^{\circ}.7$, и 0.002% ближе, чем $1^{\circ}.1$. Таким образом, наложение источников не является серьезной проблемой, за исключением густонаселенных участков неба, таких как область Галактического Центра [123, 124, 125].

Чувствительность любого прибора определяется продолжительностью наблюдений, эффективной площадью и уровнем фона. Для МОКСЕ несколько факторов определяют эффективную площадь. Во-первых, проекция апертуры равна 1.6 см^2 для источника в центре поля зрения и уменьшается к краям почти в

два раза. Во-вторых, поддерживающая решетка окна детектора затемняет часть апертуры. Расстояния между ребрами решетки выбрано так, чтобы засвечиваемая площадь изменялась не очень сильно при изменении угла падения излучения. Наконец, поля зрения детекторов имеют некоторое перекрытие, которое локально увеличивает эффективную площадь.

Фон детектора состоит из трех компонент:

1) фон детектора, т.е. фон, обусловленный заряженными частицами и энергичными фотонами, прошедшими через схему антисовпадений - ожидаемая скорость счета составляет 10 отсч./с для каждой камеры;

2) изотропный рентгеновский фон неба [126] - ожидаемая скорость счета 6-7 отсч./с на детектор;

3) вклад соседних источников - определяется плотностью источников в наблюдаемом поле зрения.

Таким образом, чувствительность МОКСЕ для разных участков неба различна. Для большей части неба предел чувствительности в диапазоне 3-10 кэВ близок к 5 мКраб за сутки наблюдений.

Система из шести детекторов способна осуществлять мониторинг всех неперекрывающихся источников интенсивностью свыше 1 мКраб с временным масштабом порядка недели. Переменность источников интенсивностью 10 мКраб может регистрироваться за времена порядка часа, для ярких (>100 мКраб) источников это время составляет ~1 мин.

Точность локализации источника прибором МОКСЕ зависит не только от интенсивности источника и уровня фона, но и в значительной степени от присутствия вблизи других ярких источников. Оценки точности локализации, проведенные Боркусом [127] на основе модели данных МОКСЕ, показывают, что для уединенного источника интенсивностью 100 мКраб возможна его локализация с точностью лучше, чем $0^{\circ}.5$ за 1 час наблюдений (см. рис. 5.2).

В табл. 5.2 приведены основные параметры шести мониторов всего неба, чувствительных к диапазону энергий 3-10 кэВ. МОКСЕ выделяется постоянным перекрытием всего неба, хорошей чувствительностью для периодов времени дольше 1 мин. и относительно высоким энергетическим разрешением. Несмотря на низкое угловое разрешение, МОКСЕ имеет блестящие возможности для регистрации относительно слабых и быстрых рентгеновских транзиентных источников [134], а также для постоянного мониторинга поведения большого числа постоянных источников для временных масштабов от минут до лет.

Табл. 5.2. Основные параметры мониторов всего неба, имеющих чувствительность в диапазоне 3-10 кэВ.

Название прибора	Период активной работы	Дежурн. цикл*	Угловое разреш., град.	Энерг. диапазон, кэВ / число каналов	Чувствит., мКраб / время набл., ч	Тип монитора*
Vela 5B XC [128]	1969-1979	$5 \cdot 10^{-4}$	6.1	3-12/1	400 / 56	С
Ariel V ASM [129]	1974-1980	10^{-2}	10	3-6/1	170 / 1.5	С
Ginga ASM [130]	1987-1991	$5 \cdot 10^{-4}$	0.2	2-20/16	50 / 48	С
Вотч Гранат [131]	1989-...	~1	2	6-180/9	100 / 1.5	О
XTE ASM [132]	1995(?)-	$5 \cdot 10^{-2}$	0.2	2-10/3	30 / 1.5	С
МОКСЕ СРГ [133]	1996(?)-	~1	2	2-25/16	7 / 1.5	О

* дежурный цикл определяется как отношение времени, затрачиваемого на наблюдение какого-либо положения на небе к времени, необходимому для обзора всего неба

♥ С - сканирующие мониторы, О - мониторы, постоянно обзорающие все небо

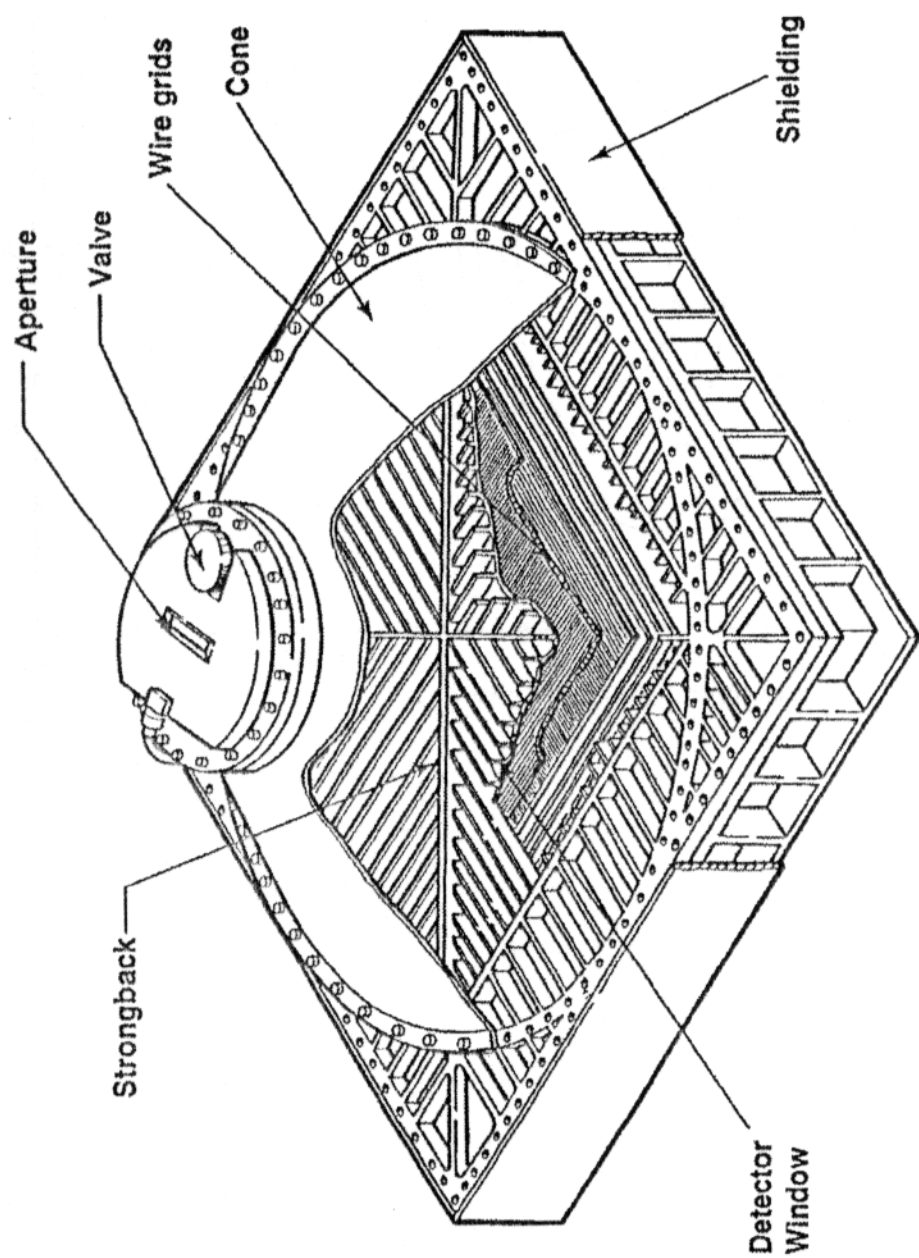


Рис. 5.1. Детектор МОКСЕ.

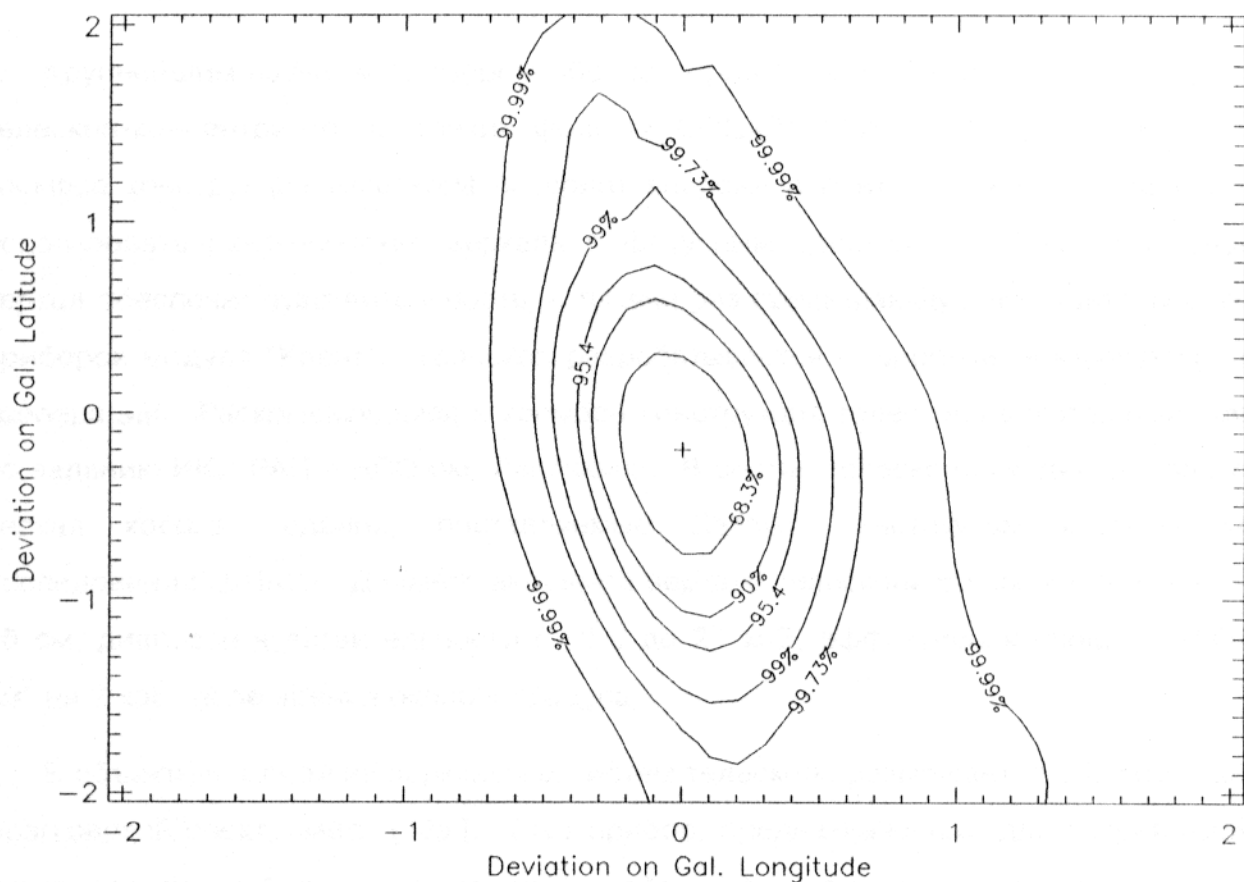


Рис. 5.2. Точность локализации единственного источника интенсивностью 100 мКрб за 1 час наблюдений прибором МОКСЕ. Результат восстановления модельного изображения.

Глава 6. Брэгговский спектрометр рентгеновского телескопа СОДАРТ.

Крупнейшим научным прибором обсерватории "Спектр-Рентген-Гамма" станет телескоп-концентратор на тонких фольгах СОДАРТ [135]. Раскрывающаяся в космосе конструкция телескопа позволит впервые в рентгеновской астрофизике использовать рентгеновские зеркала с фокусным расстоянием 8 м. Площадь зеркал обеспечит чувствительность, в тысячи раз превышающую чувствительность приборов модуля "Квант". Телескоп разрабатывается в широкой международной кооперации. Раскрывающаяся в космосе конструкция телескопа изготавливается по заданию ИКИ РАН в НПО им. Лавочкина. В состав телескопа входят два блока зеркал косого падения, поставляемые Датским институтом космических исследований (ДИКИ). Диаметр внешнего зеркала телескопа 60 см, внутреннего - 16 см, диапазон чувствительности от 0.2 до 20 кэВ, эффективная площадь 1500 см² на 2 кэВ, поле зрения около 1 градуса.

В объективе одной из зеркальных систем телескопа размещается объективный Брэгговский спектрометр [136]. Этот прибор, предназначенный для сверхтонкой спектроскопии небесных рентгеновских объектов, создается в кооперации ИКИ РАН, ДИКИ и Института внеатмосферной физики общества М.Планка (ФРГ). ИКИ поставил часть кристаллов для спектрометра и курирует разработку высокоточной системы вращения спектрометра, разрабатываемой НИЦ им. Бабакина. Кристаллы LiF(220) поставляются из ФРГ [137]. Датский институт отвечает за испытания кристаллов, изготовление панели и наклейку кристаллов на панель.

В фокальной плоскости устанавливаются движущиеся каретки (разработка НПО им. Лавочкина), позволяющие использовать сменные детекторы для регистрации излучения в фокусе телескопа. Две пары фокальных рентгеновских детекторов, строящих изображение в "мягком" и "жестком" диапазонах, поставляются ДИКИ [138]. Пропорциональная камера, строящая изображение [139], изготавливается в г.Бишкеке (Кыргызстан) по заказу ИКИ РАН. Кроме того, в состав фокальных детекторов телескопа входят российско-финский

твердотельный охлаждаемый спектрометр [140] и американский рентгеновский поляриметр [141].

6.1. Описание прибора "Брэгговский спектрометр".

Прибор "Брэгговский спектрометр" устанавливается в объективе одной из зеркальных систем рентгеновского телескопа СОДАРТ. Плоская алюминиевая панель, близкая по форме к окружности с размерами 610 x 650 мм², подвешивается внутри углепластиковой трубы. В стенке трубы вырезано отверстие для засветки панели рентгеновским излучением. Отверстие закрыто многоразовой крышкой, которая будет открываться только во время работы прибора "Брэгговский спектрометр".

На панель с двух сторон наклеиваются брэгговские монокристаллы, способные отражать рентгеновское излучение в различных диапазонах длин волн. С одной стороны будут наклеены кристаллы LiF(220) для исследования диапазона вблизи гелиеподобных линий железа, с другой стороны - кристаллы RbAP(001) для отражения в области линий кислорода и Si(111) - для исследования линий серы и аргона. Кристаллы кремния по предложению, впервые высказанному А.Я.Грудским [142], будут покрыты многослойными покрытиями для одновременного отражения мягкого рентгеновского излучения. Параметры кристаллов приведены в табл. 6.1.

Для получения рентгеновского спектра при помощи объективного брэгговского спектрометра необходимо изменять угол падения излучения на панель. В условиях космического эксперимента существуют два основных способа такого изменения: сканирование панелью и сканирование телескопом. При сканировании панелью положение концентратора и детектора относительно источника остаются неизменными, а вращается только панель с отражающими элементами. Применение этого метода ограничено полем зрения концентратора, составляющим $\sim 1^\circ$. Для того, чтобы просканировать более широкий диапазон углов, необходимо перенаведение всего телескопа, т.е. переориентация космического аппарата. Следует отметить, что поле зрения прибора "Брэгговский

спектрометр" не совпадает с полем зрения телескопа СОДАРТ и других приборов, установленных вдоль главной оптической оси.

6.2. Слагаемые спектрального разрешения объективного брэгговского спектрометра.

Принцип действия прибора основан на известном свойстве монокристаллических структур отражать падающее излучение только в том случае, если длина волны излучения и угол падения связаны между собой законом Брэгга:

$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda$, где $2d$ - постоянная кристаллической решетки, θ - угол падения излучения, $n = 1, 2, \dots$ - порядок отражения, λ - длина волны падающего излучения. При этом энергетическое разрешение спектрометра определяется неопределенностью угла падения $d\theta$:

$\frac{dE}{E} = \operatorname{ctg}(\theta) \cdot d\theta$, где $d\theta$ определяется как параметрами кристалла, так и параметрами прибора, телескопа, а также точностью наведения и стабилизацией спутника. Рассмотрим эту зависимость более подробно.

Ширина кривой отражения от данного монокристалла вблизи брэгговского угла определяется двумя параметрами: собственной или дарвиновской шириной отражения и мозаичностью. Дарвиновская ширина - это диапазон углов, внутри которого падающее излучение отражается от идеального монокристалла, она зависит от типа кристалла и энергии излучения. Мозаичность показывает, насколько данный кристалл отличается от идеального; это диапазон углов, в пределах которого отдельные микроблоки монокристалла разориентированы друг относительно друга. Полная кривая отражения от реального кристалла включает в себя вклады от обеих этих величин. При использовании набора кристаллов важную роль начинает играть разброс углов отражающих плоскостей между отдельными кристаллами, обусловленный непараллельностью верхней и нижней поверхностей кристалла, непараллельностью верхней поверхности кристалла и неточностью приклейки. Суммарный эффект для набора кристаллов аналогичен эффекту мозаичности для отдельного кристалла.

Непосредственное влияние на разрешение спектрометра оказывает точность установки угла панели, обеспечиваемая прецизионной системой поворота. При этом точность отработки отдельного угла при сканировании будет влиять на измерение ширины линии и расстояний между линиями в узком диапазоне углов, а абсолютная точность определения угла поворота панели определяет точность измерения абсолютной энергии линии.

На измерение энергии линии влияют также все другие неточности, связанные с относительным положением источника и панели: неопределенность наведения космического аппарата, неточность установки панели, термодформации структуры. Для определения ширины линии важны параметры стабилизации этих величин.

Поскольку отраженное от панели излучение будет попадать в апертуру телескопа под различными углами, для восстановления формы спектра чрезвычайно важно точное знание угловой зависимости отражающей способности зеркальных систем от угла падения излучения для данного диапазона энергий. Угловое разрешение зеркал не влияет непосредственно на энергетическое разрешение спектрометра для точечного источника, хотя и оказывает опосредованное воздействие, так как при увеличении размера пятна в фокальной плоскости телескопа отношение сигнал/шум уменьшается. Ширина отражения от зеркал непосредственно влияет на угловое и энергетическое разрешение прибора при исследованиях протяженных источников. То же самое относится к позиционному разрешению фокальных детекторов.

Таким образом, для достижения высокого спектрального разрешения с помощью прибора "Брэгговский спектрометр" необходимо соблюдение определенных, достаточно жестких требований ко всем элементам системы, начиная от кристаллов и заканчивая космическим аппаратом. Рассмотрим выполнение этих требований на основе результатов квалификационных испытаний.

6.3. Параметры брэгговских монокристаллов.

6.3.1. Кристаллы фтористого лития.

Кристаллы LiF(220) предназначены для спектроскопии гелиеподобных линий железа. Основной причиной, снижающей энергетическое разрешение этих кристаллов, является довольно сильная мозаичность. Для уменьшения средней мозаичности применяемых кристаллов были проведены измерения ширины кривой отражения для каждого из 441 изготовленных кристаллов с последующим штучным отбором лучших для штатной панели. Измерения проводились в Датском институте космических исследований при энергии падающего монохроматического излучения 8.028 кэВ (линия Cu-K_{α2}). Средняя ширина на половине высоты кривой отражения оказалась равной 2.3 угл.мин., что подтверждает высокое качество изготовленной партии кристаллов.

Другим параметром отбора была непараллельность тыльной поверхности кристаллов плоскостям кристаллической решетки, приводящая к уширению результирующей кривой отражения при наклейке многих кристаллов на панель. Эта величина оказалась для всей партии кристаллов лежащей в диапазоне ± 4 угл.мин. Для уменьшения этого параметра тыльная поверхность кристаллов была отшлифована, что позволило значительно уменьшить непараллельность. Кроме того, на основании данных измерения непараллельности можно развернуть все кристаллы в одну сторону, что позволяет уменьшить разброс значений - при этом центр кривой отражения немного смещается на известную величину, что не влияет на энергетическое разрешение прибора, но должно учитываться при анализе данных.

Перечисленные меры позволили добиться результирующей ширины средней кривой отражения для набора 212 кристаллов, предназначенных для штатной панели, равной 2.26 угл.мин., при смещении центра отражения на 0.7 угл.мин и максимальной отражательной способности (пик кривой отражения) равной 0.23. Ширина и максимум кривой отражения соответствуют энергии 8.028 кэВ, а смещение центра определяется чисто геометрическими причинами и не зависит от энергии. Для того, чтобы понять, какими будут параметры кривой отражения

для рабочего диапазона энергий, были проведены измерения выборки из 12 кристаллов на энергии 6.404 кэВ (линия Fe- $K_{\alpha 1}$). Эти измерения показали, что в среднем кривая отражения для линии Fe- $K_{\alpha 1}$ шире, чем для линии Cu- $K_{\alpha 2}$ в 1.33 раза; таким образом, можно ожидать полную ширину кривой отражения в рабочем диапазоне для LiF равной 3.0 угл.мин.

Был проанализирован также эффект влияния температурного расширения кристаллов на параметры кривой отражения. Проведенные измерения внутри рабочего диапазона температур 5-35°C показали, что ни ширина кривой отражения, ни отражательная способность не зависят от температуры в этих пределах, однако величина центрального брэгговского угла изменялась на 0.07 угл.мин./C.

Следующим эффектом, влияющим на полное энергетическое разрешение спектрометра, является ошибка наклейки кристаллов. Измерения, проведенные на тестовом участке панели с 8 кристаллами LiF, наклеенными по штатной технологии, показали, что изменение относительной непараллельности кристаллов друг относительно друга составило ± 0.2 угл.мин. Даже если эта величина для полной панели будет в 2-3 раза больше, это все еще не даст значительного вклада в суммарную величину разрешения. При этом требования по неплоскостности самой панели составляют ± 1 угл.мин.

6.3.2. Кристаллы RbAP.

В отличие от кристаллов LiF, для RbAP величина мозаичности пренебрежимо мала, основной вклад в энергетическое разрешение для этих кристаллов определяется большой дарвиновской шириной ~ 7 угл.мин. Различия в параметрах от кристалла к кристаллу незначительны, поэтому измерений всех или значительного числа кристаллов не требуется. Измерения 15 образцов, проведенные на накопительном кольце ускорителя БЕССИ (Берлин) для нескольких энергий в пределах 500-1000 эВ, перекрывающих рабочий энергетический диапазон кристаллов, показали значения энергетического

разрешения в пределах $E/dE = 700-1000$; максимальное значение кривой отражения $R = 4-15 \%$. Поскольку ширина кривой отражения для RbAP достаточно велика, и требования на непараллельность плоскостей составляли ± 1 угл.мин., данный параметр не дает заметного вклада в полное энергетическое разрешение кристаллов этого типа.

6.3.3. Кристаллы кремния и многослойные структуры.

Параметры отражения от идеальных кристаллов Si(111) вычисляются из динамической диффракционной теории. Как показывает опыт измерений для кристаллов Ge(111), подобных кристаллам кремния по строению кристаллической решетки, эти величины близки к расчетным. Непараллельность плоскостей в этом случае, как и для кристаллов фтористого лития, играет свою роль и должна быть измерена. Приведенные в табл. 6.1 значения рассчитаны, исходя из требований к непараллельности ± 1 угл.мин. Отражательная способность рассчитана с учетом поглощения в многослойных структурах.

Для многослойных структур, напыляемых поверх кристаллов кремния, непараллельность поверхностей кристалла Si не имеет значения. Важнейшей характеристикой этих структур является разброс толщин напыляемых слоев, поскольку суммарная толщина двух напыляемых слоев, или период структуры, соответствует в этом случае значению постоянной решетки для кристаллов. Выбранное значение периода структуры, равное $d = 39 \text{ \AA}$, обеспечивает одновременную спектроскопию в линиях серы при помощи кристаллов кремния и диапазона 60-65 А при помощи многослойных структур. Чтобы обеспечить энергетическое разрешение $E/dE=80$ необходимо, чтобы период структуры выдерживался с точностью $\pm 1 \text{ \AA}$.

Список параметров кристаллов брэгговского спектрометра приведен в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Параметры кристаллов и многослойных структур

	Брэгговские кристаллы			Многосл. структуры
	LiF(220)	Si(111)	RAP(001)	Cr/C
Период решетки $2d$, А	2.848	6.271	26.121	78
Исследуемые линии	Fe	S и Ag	O	
Центральный брэгговский угол, град.	41	50 и 39	57	50
Диапазон длин волн, А	1.7 ÷ 2.5	2.7 ÷ 5.4	15.4 ÷ 22.6	44 ÷ 71
Энергетический диапазон, кэВ	5.0 ÷ 7.4	2.3 ÷ 4.6	0.55 ÷ 0.81	0.18 ÷ 0.28
Количество на панели	212	36	148	36
Ширина кривой отражения на половине высоты, угл.мин.	3.0	1.6	7	40
Энергетическое разрешение, E/dE	1000	3200	770	80
Максимум кривой отражения, %	20	35	10	15

6.4. Система вращения панели спектрометра.

Подвес и система вращения панели прибора "Брэгговский спектрометр" разрабатывались НИЦ им.Бабакина на основе следующих требований к системе вращения, выдвинутых ИКИ РАН:

- максимально допустимое рассогласование между осью зеркальных систем и осью панели брэгговского спектрометра - 1 угл.мин.
- шаг вращения панели должен задаваться в пределах от 30 до 600 угл.сек.
- точность шага вращения от 10 до 30 угл.сек.
- абсолютная точность установки угла поворота панели - 1 угл.мин.

В состав системы вращения панели входят узлы подвеса, высокоточные шаговые двигатели (рабочий и резерв) и индукционные датчики угла поворота, включенные в систему по схеме обратной связи. Основные элементы системы изготавливаются в НПО "Азимут" (г. С.-Петербург).

Табл.6.2. Измеренные точности вращения панели брэгговского спектрометра.

Направление оси вращения	Модель панели	Метод задания входного угла	Абсолютная ошибка вращения панели, угл.сек.
Вертикальное	ГММ*	номинальное значение	± 25
	Панель ДИКИ	номинальное значение	± 25
	Панель ДИКИ	с компенсацией ошибки ведущего мотора	± 17.5
Горизонт.	Панель ДИКИ	номинальное значение	± 110
Вертикальное	Панель ДИКИ	номинальное значение	± 25
		с компенсацией ошибки ведущего мотора	± 17
		с компенсацией средней ошибки ведущего и ведомого моторов	± 10

Испытания системы вращения проходили в несколько этапов. После испытаний отдельных узлов и сборки системы, она была испытана в НПО им.Лавочкина с имитатором панели, соответствующим реальной панели по массе и габаритам. Проверка точностей движения производилась до и после вибронгружения системы. Следующим этапом после получения положительного результата в испытаниях с имитатором были испытания системы с панелью, изготовленной в ДИКИ. Эти испытания показали стабильность параметров системы до и после вибровоздействия, но полученные точности не соответствовали требованиям к системе.

Анализ показал, что возможной причиной неточности вращения может быть провисание панели, имеющей не слишком большую жесткость, под действием силы тяжести. Повторные испытания проводились с разворотом оси панели в вертикальное положение для того, чтобы исключить воздействие силы тяжести. Результаты, приведенные в табл. 6.2, показывают соответствие точности вращения выдвинутым требованиям. Более того, оказалось, что основной вклад в величину ошибки вносит систематическая погрешность, что дает возможность откалибровать эффект и внести соответствующие поправки. При этом может быть достигнута абсолютная точность поворота панели лучшая, чем 10 угл.сек. Учет

гистерезиса при повороте панели по и против часовой стрелки может позволить дополнительно снизить это значение.

6.5. Рентгеновская калибровка зеркальных систем телескопа СОДАРТ.

Установка для калибровки рентгеновского телескопа была собрана на базе синхротронного ускорителя в Дарсбери, предназначенного для проведения экспериментов с использованием синхротронного излучения. Для калибровки рентгеновских телескопов при атмосферном давлении (не в вакуумной камере) возможно использовать рентгеновское излучение с энергиями от 5 до 20 кэВ. Расстояние от кольца синхротрона до входного окна экспериментальной станции 35 м позволяет получить рентгеновский пучок, коллимированный лучше, чем 20 угл.с. [143].

Монохроматизация синхротронного излучения, т.е. выделение излучения заданной энергии из входного рентгеновского потока, происходит при отражении пучка последовательно от предварительного и основного монохроматоров, каждый из которых представляет собой монокристалл кремния. Монохроматическое излучение отражается затем от расширителя пучка, который представляет собой еще один монокристалл кремния, но с резко асимметричным сколом поверхности. Если для обычных (симметричных) кристаллов поверхности отражения параллельны поверхности самого кристалла, то для расширителя пучка угол между поверхностью кристалла и кристаллографическими плоскостями, от которых происходит отражение, очень велик и специально выбран таким, чтобы угол между поверхностью кристалла и брэгговским углом θ для данного кристалла и данной энергии фотонов составлял около $0,5^\circ$. При соблюдении этого условия падающее рентгеновское излучение отражается различными участками поверхности кристалла, что позволяет получить расширенный пучок более низкой интенсивности. В экспериментах было достигнуто расширение пучка на два порядка [3].

Применение расширителя пучка позволяет получить коллимированный рентгеновский пучок с сечением в виде широкого прямоугольника, высота которого определяется высотой входной щели, а ширина равна ширине входной

щели, умноженной на коэффициент расширения расширителя пучка. Для получения интегрального отражения от всего телескопа, необходимо освещать последовательно различные части его апертуры, путем вращения телескопа вокруг его оптической оси. Для равномерности засветки различных зеркал, как внутренних, так и наружных, перед телескопом устанавливается секторная щель, позволяющая засвечивать сектор апертуры телескопа, а не прямоугольник.

Для сокращения потерь интенсивности излучения большая часть оптического пути рентгеновских квантов проходила внутри откачанных труб, установленных до и после телескопа. Для определения эффективности отражения от зеркал телескопа проводились измерения прямого пучка, регистрируемого детектором без отражения. Изменения интенсивности падающего пучка регистрировались при помощи ионизационной камеры, установленной после расширителя пучка в режиме монитора.

Экспериментальная установка требует длительной юстировки, так как ее части должны быть сориентированы с точностями порядка единиц угловых секунд друг относительно друга. В состав установки входят 26 прецизионных шаговых двигателей, управляемых персональным компьютером и осуществляющих дистанционное управление движением всех основных узлов.

Описанная установка позволяет наиболее близко имитировать условия космического эксперимента на Земле, предоставляя уникальные возможности определения разрешающей способности и эффективности рентгеновского телескопа для заданных энергий падающего излучения.

Калибровка и исследование оптических свойств телескопа проводились для трех различных значений энергии фокусируемого излучения: 6,63; 8,84 и 11,05 кэВ. Отражение от внутренней, средней и наружной секций зеркал рассматривалось отдельно для анализа зависимости отражательной способности и углового разрешения различных секций телескопа от энергии падающего излучения.

Для анализа отражения от различных секторов телескопа проводилось вращение телескопа вокруг его оптической оси при сохранении положения падающего расширенного пучка секторальной формы. При шаге вращения

порядка половины градуса можно видеть отражение от различных участков сборки и оценить влияние, оказываемое элементами конструкции зеркального модуля и неточностью установки зеркал на параметры получаемого изображения.

Для исследования отражения рентгеновского излучения от источника, расположенного под углом к оптической оси, использовалось одновременное вращение модуля вокруг оптической оси и вокруг вертикальной оси. Вращение вокруг вертикальной оси проводилось как в положительном, так и в отрицательном направлении, что позволяло имитировать условия засветки для различных частей телескопа. При этом не было возможности изменять соответственно наклон телескопа, что также оказывает влияние на отражение от зеркал, но только как эффект второго порядка малости.

Поле зрения телескопа оценивалось при вращении телескопа вокруг вертикальной оси при отсутствии вращения вокруг оптической оси блока. Было получено также отражение от отдельных зеркал при использовании нерасширенного рентгеновского пучка.

Ширина кривой отражения от отдельного зеркала не превышает 1 угл.мин. Ширина суммарной кривой отражения определяется главным образом неточностью установки фольг, вызывающей размытие фокального пятна. Испытания квалификационного образца показали, что эти неточности привели к размазыванию пятна в фокальной плоскости до 6-8 угл.мин. Полученный опыт был использован при изготовлении штатных блоков зеркал. В апреле 1995 г. прошли испытания одного из штатных модулей. Было отмечено значительное улучшение параметров телескопа по сравнению с квалификационным образцом [144]. Обработка результатов калибровки еще не закончена, однако, по-видимому, значение диаметра сбора половины энергии будет близко к 3 угл.мин.

6.6. Возможности исследования источников рентгеновского излучения прибором "Брэгговский спектрометр".

Результаты проведенных экспериментальных работ по определению точностей систем прибора "Брэгговский спектрометр" показывают, что при наблюдениях точечного источника можно достичь спектального разрешения около 1000 в

области гелиеподобных линий железа, 2500 на линиях серы и аргона, 750 при спектроскопии линий кислорода.

На рис. 6.3 а-г представлены результаты моделирования спектроскопии области гелиеподобных линий железа при помощи кристаллов LiF(220) при энергетическом разрешении $E/dE=1000$ для различной температуры излучающей плазмы. Интенсивности линий излучения вычислены на основании работы Меве и др. [145]. Вклад рентгеновского континуума и статистический разброс данных не учитывался. Стрелками показаны положения центров линий : резонансной (R), интеркомбинационной (I), запрещенной (F) линий Fe XXV, а также сателлитов (s). Видно, что относительная интенсивность линий весьма чувствительна к температуре плазмы [146]. Спектрометр позволяет уверенно разрешать отдельные линии в этом диапазоне, так же как и в диапазонах гелиеподобных линий серы и кислорода (рис. 6.4).

При наблюдениях протяженных источников энергетическое разрешение для кристаллов LiF будет составлять около 700, для кристаллов Si - 1400, для кристаллов RbAP - снизится незначительно. Пространственное разрешение определяется параметрами телескопа.

Движение источника излучения вызывает известный эффект Допплера - изменение частоты принятого излучения:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta \cdot \cos \theta},$$
 где ν_0 - частота испущенного фотона, ν - частота

принятого фотона, β - отношение скорости приемника к скорости света, θ - угол между направлением движения источника и приемником. Эффект Допплера вызывает красное смещение удаленных объектов и температурное уширение спектральных линий. По доплеровскому смещению линий можно определить скорость излучающего объекта.

Смещение гелиеподобных линий железа в спектре источника SS433, выбрасывающего релятивистские струи вещества, было зафиксировано спутником "Asca" [147]. Измерение такого смещения с более высокой точностью будет возможно с помощью прибора "Брэгговский спектрометр".

Особенно привлекательна возможность измерения доплеровского смещения в случае выброса релятивистских облаков из источников, подобных GRS1915+105 и GRO J1655-40. Наблюдения разлета радиокомпонент для этих источников дают два уравнения, связывающих скорость разлета (в единицах скорости света) β , угол θ и расстояние до объекта d :

$$\beta \cdot \cos \theta = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1}, d = \frac{c \cdot \operatorname{tg} \theta \cdot (\mu - \mu_1)}{2\mu_2 \cdot \mu_1}, \text{ где } \mu_{1,2} - \text{видимые скорости}$$

[24] удаляющейся и приближающейся компонент соответственно. В случае определения величины смещения, появилась бы третья недостающая связь между параметрами, что дало бы новый метод решения фундаментальной задачи астрономии - определения расстояния до объектов.

При движении источника с околосветовыми скоростями, эффект Доплера вызывает значительное смещение линий, превышающее рабочий диапазон одного типа кристаллов. Благодаря наличию нескольких типов кристаллов в этом случае существует возможность регистрации линий кристаллом другого типа. Так для облака, выброшенного из источника GRS1915+105 ($\beta=0.92\pm 0.08$, $\beta \cdot \cos \theta = 0.323 \pm 0.016$), комплекс гелиеподобных линий железа в излучении удаляющейся от наблюдателя плазмы должен был сместиться в диапазон энергий 2-5 кэВ, что соответствует рабочему диапазону кристаллов кремния.

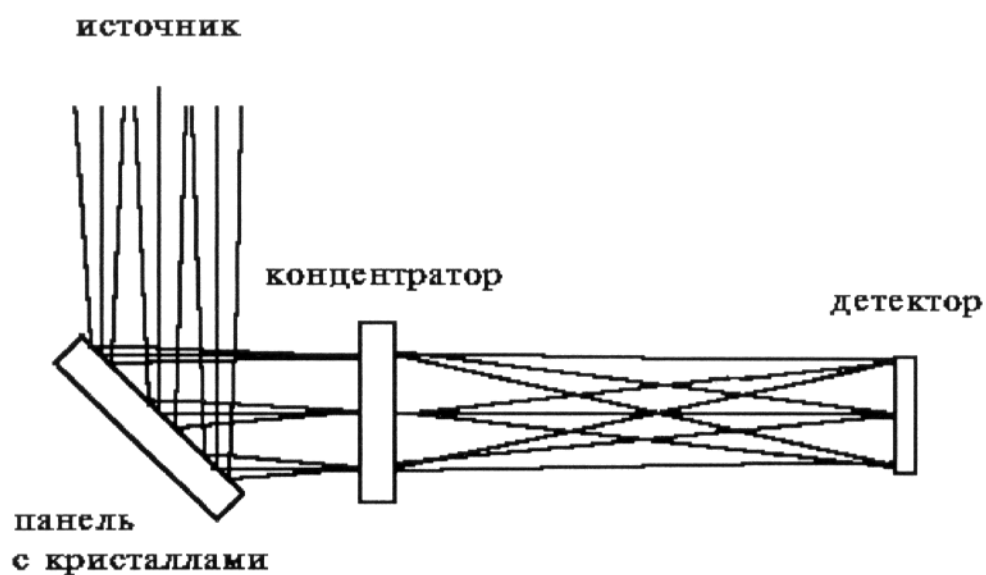


Рис. 6.1. Схема расположения основных элементов оптического тракта прибора “Брэгговский спектрометр”.

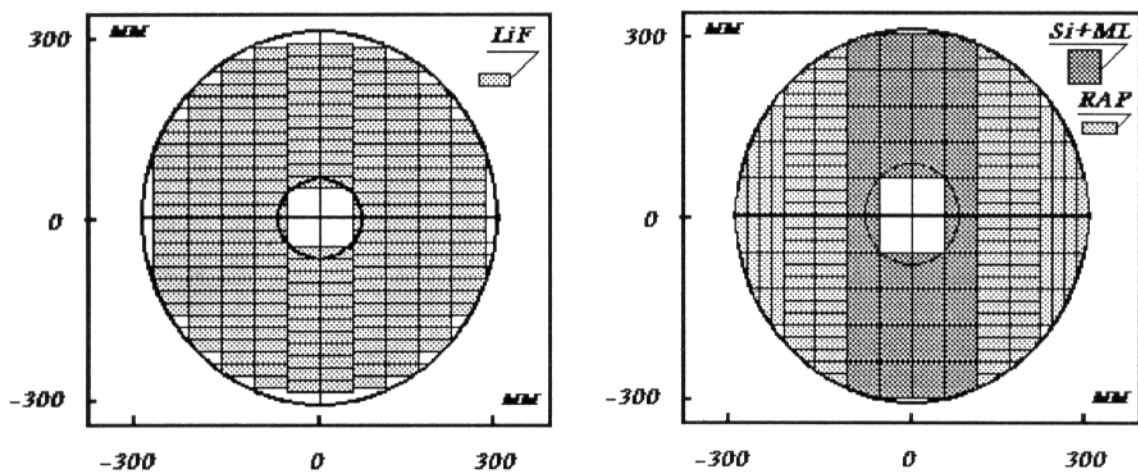
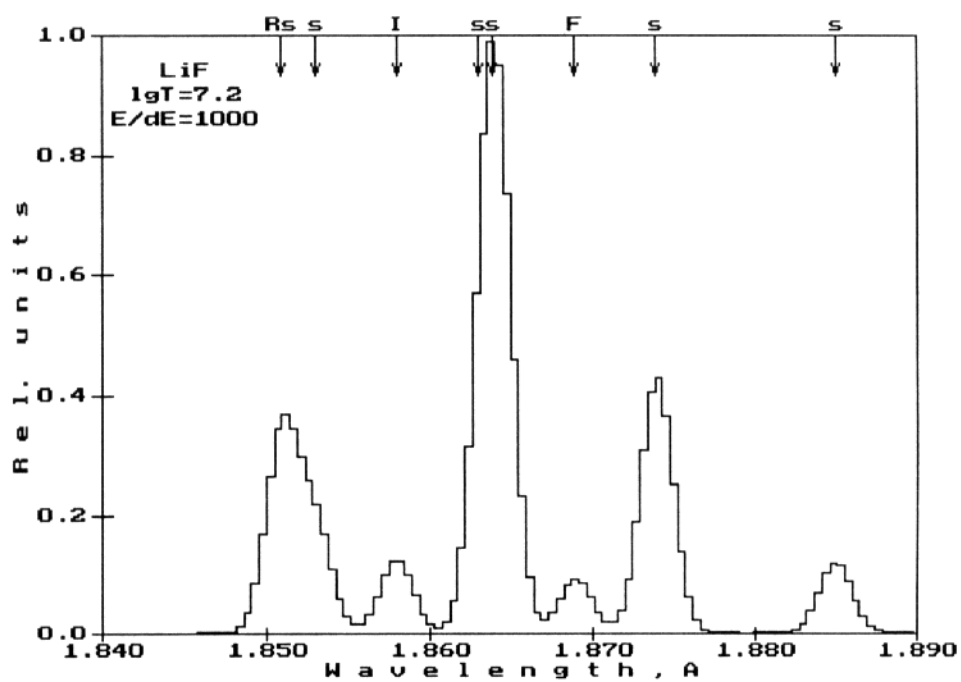


Рис. 6.2. Схема размещения кристаллов на панели (стороны А и Б).

а)



б)

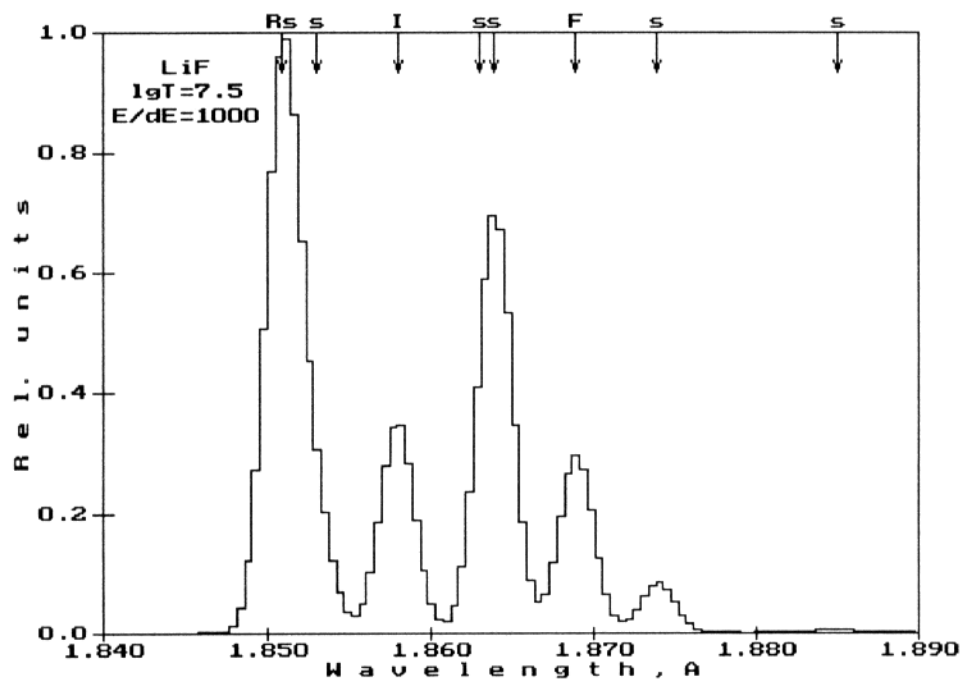
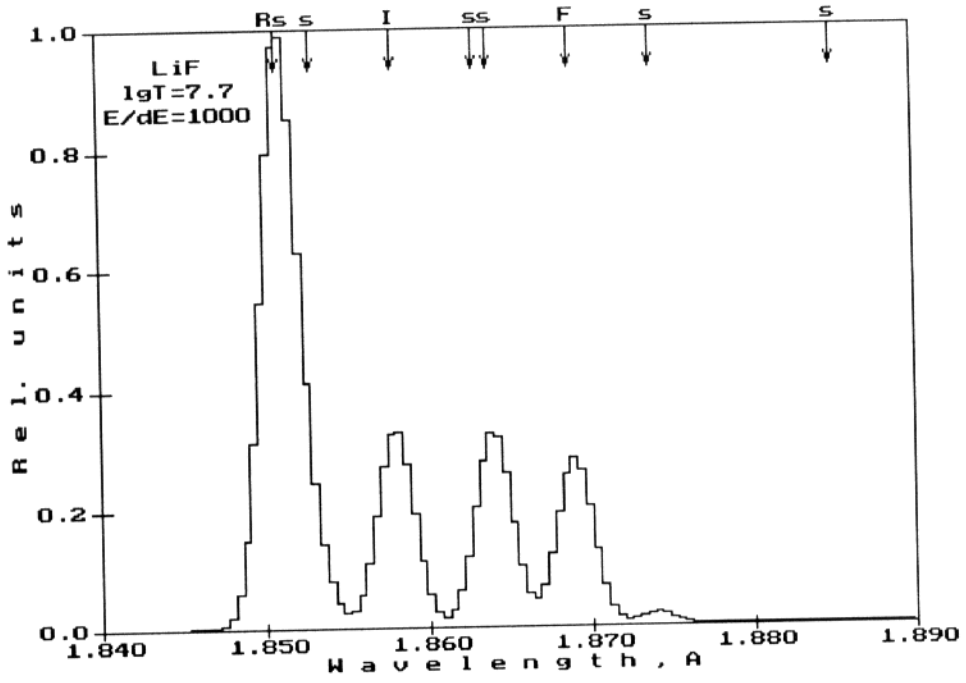


Рис. 6.3 а,б. Моделирование спектроскопии кристаллами LiF в области гелиеподобных линий железа для плазмы с lgT=7.2(а) и 7.5(б).

в)



г)

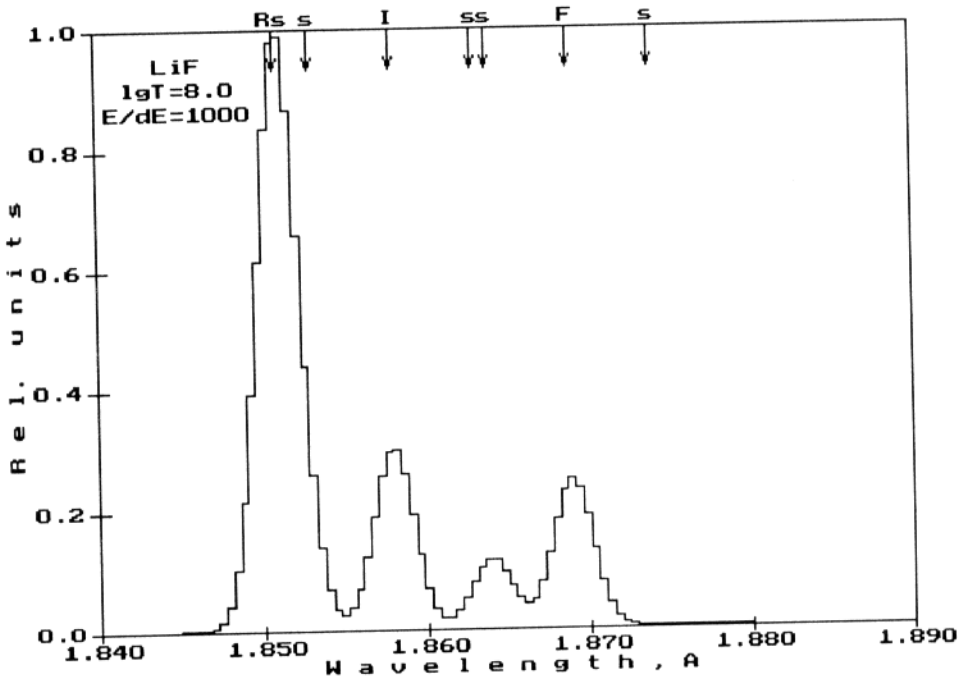


Рис. 6.3 в,г. Моделирование спектроскопии кристаллами LiF в области гелиеподобных линий железа для плазмы с $\lg T=7.7$ (в) и 8.0 (г).

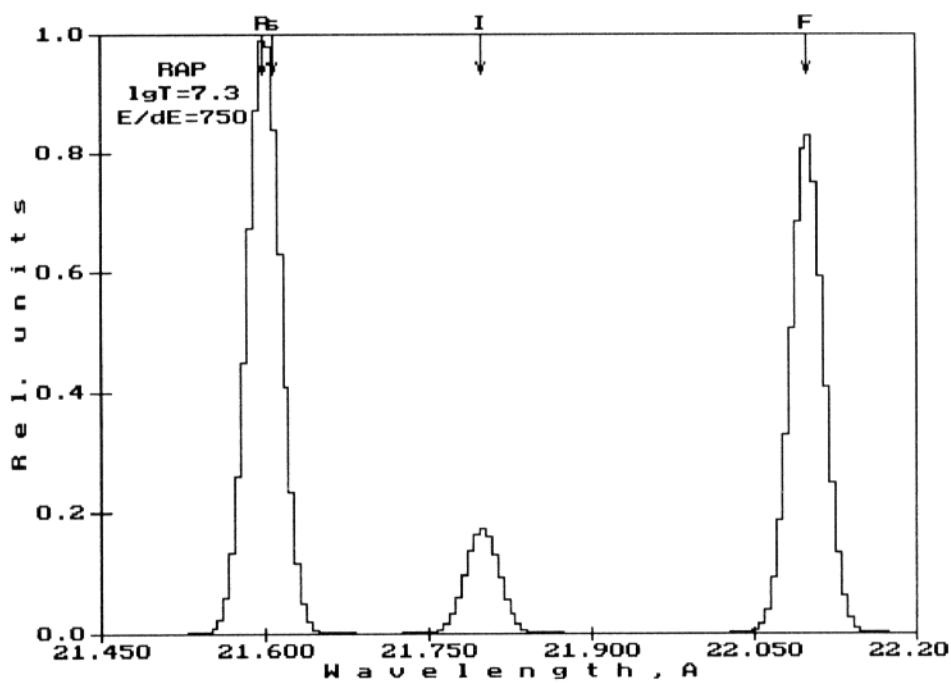
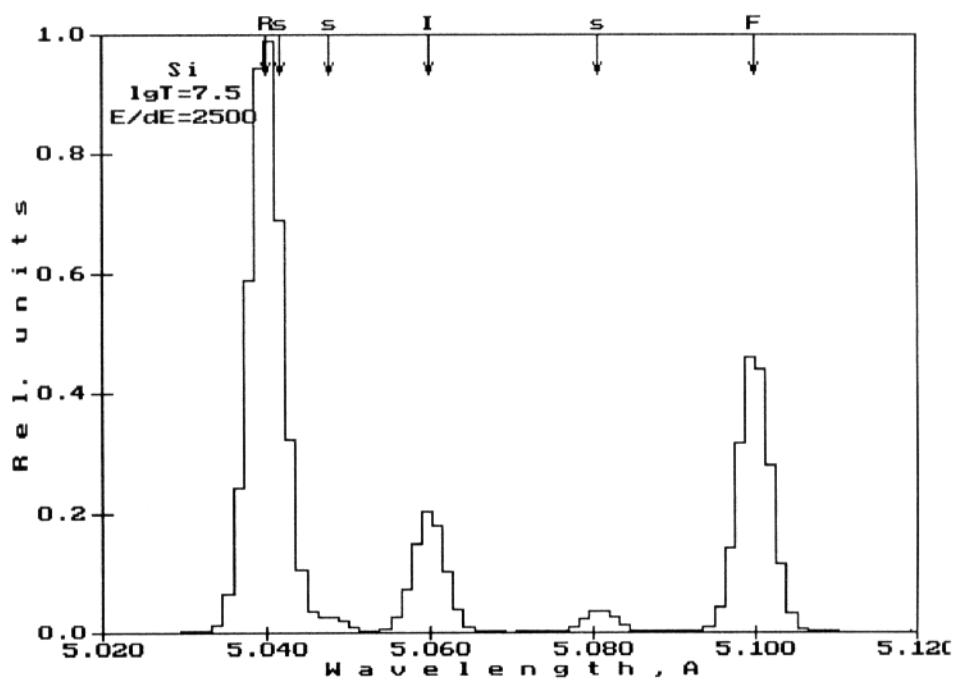


Рис. 6.4. Моделирование спектроскопии кристаллами Si в области гелиеподобных линий серы и кристаллами RbAP в области линий кислорода.

Заключение к части II.

Значительное место в исследованиях рентгеновских новых и других транзиентных источников занимают наблюдения, проводимые мониторами всего неба. Благодаря широкому полю зрения эти приборы оказываются способны регистрировать вспышки новых источников на рентгеновском небе и существенные изменения блеска известных источников. Случаи, когда новые яркие источники были обнаружены приборами с небольшим полем зрения являются скорее исключениями из общего правила.

Рентгеновский монитор всего неба МОКСЕ, который будет установлен на спутнике "Спектр-РГ", способен осуществлять постоянное перекрытие почти полной небесной сферы в энергетическом диапазоне от 2 до 25 кэВ. Высокая чувствительность (~5 мКраб за сутки наблюдений) монитора является беспрецедентной для приборов этого класса и позволит не только осуществлять постоянный мониторинг галактических рентгеновских объектов, но и уверенно регистрировать вспышки рентгеновских новых, быстрых и слабых транзиентных источников. Точность локализации достаточно ярких объектов $\sim 0^\circ.5$ достаточна для наведения на интересный объект более чувствительных приборов обсерватории. Важной для своевременного оповещения о текущем состоянии рентгеновского неба представляется проведение стандартного анализа данных прибора за времена \leq суток.

Брэгговский спектрометр рентгеновского телескопа СОДАРТ предназначен для тонкой спектрометрии космических источников рентгеновского излучения в нескольких спектральных диапазонах, разрешения гелиеподобных линий железа, кислорода, серы и аргона. Экспериментальные работы по определению параметров систем спектрометра показывают, что с помощью этого прибора можно достичь рекордного спектрального разрешения. Данные, полученные с помощью спектрометра, позволят существенно углубить и детализировать информацию о физическом состоянии плазмы в космических рентгеновских источниках. Такая информация не может быть получена с помощью

существующих на сегодняшний день астрофизических приборов, не обладающих достаточными чувствительностью и разрешением.

Регистрация линейчатого излучения плазмы позволяет определить с высокой точностью температуру источника излучения и концентрацию электронов. Сравнение интенсивности линий дает возможность определить, находится ли плазма в условиях термодинамического равновесия или в неравновесных условиях. Даже в условиях, далеких от термодинамического равновесия, линейчатое излучение дает информацию о температуре, плотности электронов и обилии элементов в плазме. Сочетание спектрального и пространственного анализа, которое может быть реализовано посредством спектрометра, позволит построить карты распределения температуры и плотности в протяженных источниках космического излучения.

Для удаленных источников достаточной интенсивности спектрометр в состоянии определять величину красного смещения линий в спектрах. Доплеровское смещение линий позволяет определять скорости движения горячей плазмы и в случаях близких источников, таких как, например, SS433. При околосветовых движениях, зарегистрированных в нашей Галактике при выбросе релятивистских облаков из GRS1915+105 и GRO J1655-40, для определения смещения линий возможно использование различных спектральных диапазонов. Эти данные, вместе с результатами радионаблюдений, могли бы позволить точно определить расстояние до этих объектов.

Обсерватории класса "Спектр-Рентген-Гамма" способны значительно обогатить наши представления о космических источниках рентгеновского излучения, в том числе о рентгеновских новых и других транзиентных источниках. В то же время, как показывает уже опыт спутников ASCA и ROSAT, эти наблюдения не могут проводиться постоянно в течение длительного времени, что связано как с обилием множества других важных для этих обсерваторий научных задач, так и с наличием, как правило, существенных ограничений на выбор мишеней для наблюдений, что будет существенно также и для "Спектр-Рентген-Гамма". В этих условиях важная роль в исследовании этих интересных источников будет по-прежнему принадлежать обзорным приборам, таким как монитор всего неба МОКСЕ, а также более простым инструментам, аналогичным по своим параметрам

приборам модуля “Квант” и спутника “Гранат”. Приборы этого класса составляют ядро научной аппаратуры европейского спутника SAX и американского XTE. Группа ученых ИКИ РАН выступила с предложением установить подобный комплекс приборов на один из модулей российской части международной космической станции “Альфа”.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harries J. // Nature, 1967, v.215, p.38.
2. Evans W., Belian R. and Conner J. // Astrophys.J. (Lett.), 1970, v.159, L57.
3. Matilsky T., Giacconi R., Gursky H. et al // Astrophys.J. (Lett.), 1972, v.174, L53.
4. Амнуэль П.Р., Гусейнов О.Х. и Рахманинов Ш.Ю. // Astrophys. and Space Sci., 1974, v.29, p.331.
5. Elvis M., Page C.G., Pounds K.A. et al. // Nature, 1975, v.257, p.656.
6. Kaluziński L.J., Holt S.S., Boldt E.A. and Serlemitsos P.J. // Astrophys.J., 1977, v.212, p.203.
7. McClintock J.E. and Remillard R.A. // Astrophys.J., 1986, v.308, p.110.
8. Schwarzschild K. // Sitzungsber Dtsch. Akad. Wiss. Berlin, Kl.Math.Phys.Tech., 1916, p.189.
9. Oppenheimer J.R. and Snyder H. // Phys. Rev., 1939, v.56, p.455.
10. Kerr R.P. // Phys.Rev.Lett., 1963, v.11, p.237.
11. Зельдович Я.Б. // Доклады АН СССР, 1964, т.155, с.67.
12. Зельдович Я.Б. // УФН, 1973, т.110, с.441.
13. Tananbaum H., Gursky H., Kellogg E. et al. // Astrophys.J. (Lett.), 1972, v.177, L5.
14. Casares J., Charles P.A., Naylor T. // Nature, 1992, v.355, p.614.
15. Makino F. // IAU Circ. 4587, 1988.
16. Makino F. // IAU Circ. 4782, 1989.
17. Lund N. and Brandt S. // IAU Circ. 5161, 1991.
18. Makino F. // IAU Circ. 5161, 1991.
19. Paciesas W.S., Briggs M.S., Harmon B.A. et al. // IAU Circ. 5580, 1992.
20. Лапшов И.Ю., Сазонов С.Ю., Сюняев Р.А. // IAU Circ. 5864, 1993.
21. Ballet J., Denis M., Gilfanov M. et al. // IAU Circ. 5874, 1993.
22. Harmon B.A., Zhang S.N., Paciesas W.S. et al. // IAU Circ. 5874, 1993.
23. Zhang S.N., Wilson C.A., Harmon B.A. et al. // IAU Circ. 6046, 1994.
24. Mirabel I.F. and Rodriguez L.F. // Nature, 1994, v.371, p.46.
25. Tingay S.J., Jauncey D.L., Preston R.A. et al // Nature, 1995, v.374, p.141.
26. Rees M.J. // Nature, 1966, v.211, p.468.
27. Porcas R.W. // in Superluminal Radio Sources (eds. J.A.Zensus & T.J.Pearson) Cambridge Univ.Press, 1987, p.12.

3. Castro-Tirado A.J., Brandt S. and Lund N. // IAU Circ. 5590, 1992.
3. Brinkman A.C., Dam J., Mels W.A., Skinner G.K., Willmore A.P. // in: Proc. Non Thermal and Very High Temperature Phenomena in X-ray Astronomy, eds. G.C.Perola and M.Salvati. Roma: Universita "La Sapienza", 1985. P.263.
3. Reppin C., Pietsch W., Truemper J., Kendziorra E., Staubert R. // in: Proc. Non Thermal and Very High Temperature Phenomena in X-ray Astronomy, eds. G.C.Perola and M.Salvati. Roma: Universita "La Sapienza", 1985. P.279.
1. Smith A. // in: Proc. Non Thermal and Very High Temperature Phenomena in X-ray Astronomy, eds. G.C.Perola and M.Salvati. Roma: Universita "La Sapienza", 1985. P.271.
2. Степанов Д.К., Чулков И.В., Юнин С.Н. // Препринт ИКИ АН СССР, 1988, Пр-1317.
3. Jung G.V. // Ph.D. Thesis. University of California, San Diego, 1986.
4. Каниовский А.С. // Кандидатская диссертация. ИКИ АН СССР, Москва, 1991.
5. In't Zand J.J.M. // Ph.D. Thesis, SRON, Utrecht, 1992.
3. Сюняев Р.А., Гильфанов М.Р., Чуразов Е.М. и др. // Письма в Астрон. журн., 1988, т.14, с.695.
7. Makino F. // IAU Circ. 4786, 1989.
3. Tanaka Y. // Proc. 23rd ESLAB Symp. on Two-Topics in X-ray Astronomy, eds. J.Hunt and B.Batrick, ESA SP-296, 1989, v.1, p.3.
3. Wagner R.M., Starrfield S., Cassatella A. // IAU Circ. 4783, 1989.
3. Duerbeck et al. // IAU Circ. 4783, 1989.
1. Richter G.A. // IBVS, 3362, 1989.
2. Wagner R.M., Starrfield S.G., Howell S.B. et al. // Astrophys.J., 1991, v.378, p.293.
3. Hjellming R.M. // IAU Circ. 4796, 1989.
4. Арефьев В.А., Бороздин К.Н., Чуразов Е.М. и др. // Proc. of 23rd ESLAB Symp. on Two-Topics in X-ray Astronomy, eds. J.Hunt and B.Batrick, ESA SP-296, 1989, v.1, p.255.
5. Сюняев Р.А. и Титарчук Л.Г. // Proc. 23rd ESLAB Symp. on Two-Topics in X-ray Astronomy, eds. J.Hunt and B.Batrick, ESA SP-296, 1989, v.1, p.627.
5. Шакура Н.И. и Сюняев Р.А. // Astron. and Astrophys., 1973, v.24, p.337.
7. Shapiro S.L., Lightman A.P. and Eardley D. // Astrophys. J., 1976, v.204, p.187.
3. Поздняков Л.А., Соболев И.М. и Сюняев Р.А. // in: Astroph. and Space Sci. Physics. Space Sci. Rev. Ed. by R.A.Sunyaev. Harwood Acad.Publishers, 1983, v.2, p.189.
3. Charles P.A., Casares J., Jones D.H.P. et al. // Proc. 23rd ESLAB Symp. on Two-Topics in X-ray Astronomy, eds. J.Hunt and B.Batrick, ESA SP-296, 1989, v.1, p.103.

50. Harmon B. A., Wilson R. B., Fishman G. J. et al. // IAU Circ. 5584, 1992.
51. Goldwurm A., Paul J., Mandron P. et al. // IAU Circ. 5589, 1992.
52. Сюняев Р. А., Титарчук Л. Г. // Astron. and Astrophys., 1980, v.86, p.121.
53. Вихлинин А. А., Финогонов А.В., Ситдииков А. Ф. и др. // IAU Circ. 5608, 1992.
54. Kato T., Mineshige S., Hirata R. // IAU Circ. 5704, 1992.
55. Лапшов И. Ю., Сазонов С. Ю., Сюняев Р. А. // IAU Circ. 5864, 1993.
56. Harmon B. A., Zhang S. N., Fishman G. J. et al. // IAU Circ. 5864, 1993.
57. Della Valle M., Benetti S. // IAU Circ. 5890, 1993.
58. Танака Y. // IAU Circ. 5888, 1993.
59. Каниовский А. С., Бороздин К. Н., Сюняев Р. А. // IAU Circ. 5878, 1993.
60. Сюняев Р. С., Каниовский А. С., Ефремов В. С. и др. // Письма в Астрон. журн., 1991, т.17, с.291.
61. Гребенев С. А., Сюняев Р. А., Павлинский М. Н. и др. // Письма в Астрон. журн. 1992, т.18, с.11.
62. Della Valle M., Mirabel I. F., Cordier B. // IAU Circ. 5876, 1993.
63. Mirabel I. F., Rodriguez L. F., Cordier B. // IAU Circ. 5876, 1993.
64. Танака Y. // IAU Circ. 5877, 1993.
65. Бороздин К. Н., Александрович Н. Л. и Сюняев Р. А. // IAU Circ. 5884, 1993.
66. Harmon B. A., Fishman G. J., Paciesas W. S. et al. // IAU Circ. 5900, 1993.
67. Гильфанов М. Р., Чуразов Е. М., Сюняев Р. А. и др. // Proc. 4th Annual Astroph. Conf. in Maryland, 1993.
68. Harmon B. A., Paciesas W. S. // IAU Circ. 5913, 1993.
69. Чуразов Е.М. и др. // IAU Circ. 6083, 1994.
70. Бороздин К.Н. и Александрович Н.Л. // IAU Circ. 6083, 1994.
71. Harmon B.A., Zhang S.N., Paciesas W.S. et al. // IAU Circ. 6104, 1994.
72. Kaluziński L.J., Holt S.S., Boldt E.A. and Serlemitsos P.J. // Astrophys.J., 1977, v.212, p.203-210.
73. Танака Y. et al. // in: Proc. Workshop on Nova Muscae, Lyngby, Ed.S.Brandt, p.51.
74. Harmon B.A., Fishman G.J. and Paciesas W.S. // IAU Circ. 5685, 1992.
75. Гильфанов М.Р., Чуразов Е.М., Сюняев Р.А. и др. // Astron.Astrophys. Suppl.Ser., 1993, v.97, p.303.
76. Сюняев Р.А., Каниовский А.С., Бороздин К.Н. и др. // Astron.Astrophys., 1993, v.280, L1.

77. Сюняев Р.А., Бороздин К.Н., Александрович Н.Л. и др. // Письма в Астрон.журн., 1994, т.20, с.890.
78. Сюняев Р.А. и Трюмпер И. (Sunyaev R.A., Truemper J.) // Nature, 1979, v.279, p.506.
79. Nolan P.L., Gruber D.E., Knight F.K. et al. // Nature, 1981, v.293, p.275.
80. Ling J.C., Mahoney W.A., Wheaton W.A. et al. // Astrophys.J.(Lett.), 1987, v.321, L117.
81. Сюняев Р.А., Бороздин К.Н., Гильфанов М.Р. и др. // Письма в Астрон.журн., 1991, т.17, с.126.
82. Сюняев Р.А., Гильфанов М.Р., Чуразов Е.М. и др.) // Письма в Астрон.журн., 1991, т.17, с.116.
83. Bouchet L., Mandrou P., Roques J.P. et al.) // Astrophys.J. (Lett.), 1991, v.283, L45.
84. Wait N.E. and Marshall F.E. // Astrophys.J., 1984, v.281, p.354.
85. Сюняев Р.А., Лапшов И.Ю., Гребенев С.А. и др. // Письма в Астрон.журн., 1988, т.14, с.771.
86. Гребенев С.А., Сюняев Р.А., Павлинский М.Н. и Деханов И.А. // Письма в Астрон.журн., 1991, т.17, с.985.
87. Mirabel I.F., Rodriguez L.F., Cordier B. et al. // Nature, 1992, v.358, p.215.
88. Rodriguez L.F., Mirabel I.F. and Marti J. // Astrophys.J.(Lett.), 1992, v.401, L15.
89. McClintock J.E., Bailyn C. and Remillard R. // Astrophys.J.(Lett.), 1992, v.399, L145.
90. Mirabel I.F., Rodriguez L.F. et al. // IAU Circ. 5773, 1993.
91. Mirabel I.F., Duc P.A., Marti J. et al. // IAU Circ. 5830, 1993.
92. Castro-Tirado A., Brandt S., Lund N. // IAU Circ.5830, 1993.
93. Mirabel I.F., Duc P.A., Rodriguez L.F. et al. // Astron. and Astrophys. 1994. V.282. L17.
94. Harmon B.A., Paciesas W.S., and Fishman G.J. // IAU Circ. 5619, 1992..
95. Brandt S., Castro-Tirado A.J. and Lund N. // IAU Circ. 5779, 1992..
96. Nagase F., Inoue H., Kotani T. et al. // IAU Circ.6094, 1994..
97. Campbell-Wilson D. and Hunstead R. // IAU Circ.6052, 1994..
98. Hjellming R.M. // IAU Circ.6060, 1994..
99. Paciesas W.S., Zhang S.N., Wilson C.A. et al.) // IAU Circ.6075, 1994..
- 100.Zhang S.N., Harmon B.A., Paciesas W.S. et al.) // IAU Circ. 6101, 1994.
- 101.Harmon B.A., Zhang S.N., Paciesas W.S. and Fishman G.J. // IAU Circ.6147, 1995..

102. Hjellming R.M. and Rupen M.P. // IAU Circ.. 6077, 1994.
103. Hjellming R.M. and Rupen M.P. // IAU Circ..6107, 1994.
104. Greiner J. // IAU Circ.6078, 1994.
105. Inoue H., Nagase F., Ishida M. et al. // IAU Circ. 6063, 1994..
106. Александрович Н.Л., Бороздин К.Н., Ефремов В.В. и Сюняев Р.А. // IAU Circ. 6087, 1994..
107. Александрович Н.Л., Бороздин К.Н. и Сюняев Р.А. // IAU Circ. 6143, 1995.
108. Wilson C.A., Harmon B.A., Zhang S.N. et al. // IAU Circ. 6152, 1995.
109. Каниовский А.С., частное сообщение
110. Сюняев Р., Гильфанов М., Чуразов Е. и др. // Письма в Астрон. журн. 1990. Т.16. С.136
111. Бороздин К., Гильфанов М., Сюняев Р. и др. // Письма в Астрон. журн. 1990. Т.16. С.804
112. In't Zand J.J.M., Patterson T.G., Brinkman A.C. et al. // Two topics in X-ray astronomy. Proc. 23rd ESLAB Symposium / Eds Hunt J., Battrick B. ESA SP-296. 1989. V.1. P.693.
113. Skinner G. // IAU Circ. №4850. 1989.
114. Гранкин К.Н., Шевченко В.С. и Якубов С.Д. // Письма в Астрон. журн., т.17, №11, с.991, 1991.
115. Чуразов и др. (Churazov E., Gilfanov M., Ballet J. and Jourdain E.) // IAU Circ. 6083, 1994.
116. Бороздин К.Н., Александрович Н.Л. и Сюняев Р.А. // IAU Circ. 6088, 1994.
117. Гильфанов и др. (Gilfanov M., Churazov E., Ballet J. and Jourdain E.) // IAU Circ. 6091, 1994.
118. Лапшов И.Ю., Дремин В.В., Сюняев Р.А. и др. // Письма в Астрон.журн. 1990, т.16, с.136.
119. Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., Чуразов Е.М. и др. // Письма в Астрон.журн., 1991, т.17, с.1059.
120. Илларионов А.Ф., Сюняев Р.А, // Астрон.журн., 1972, т.49, с.58.
121. Felten J.E., Rees M.J. // Astron.Astrophys., 1972, v.24, p.337.
122. Wood K.S. et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser., 1981, v.56, p.507
123. In't Zand J.J.M., Heise J., Brinkman A.C. et al. // Adv. Space Res., 1991, v.11, p.(8)187.
124. Pavlinsky M.N., Grebenev S.A. and Sunyaev R.A. // Astrophys. J., 1994, v.425, p.110.

125. Borozdin K.N., Alexandrovich N.L., Arefiev V.A. et al. // Submitted to Proc. 17th TEXAS Symp. on Relativistic Astrophys., Muenchen, Germany, Dec 12-17, 1994.
126. Marshall F.E., Boldt E.A. and Holt S.S. // *Astrophys. J.*, 1980, v.235, p.4.
127. Боркыс В.В. // MOXE Source Analyzing Library, LANL, 1994.
128. Priedhorsky W.C., Terrell J., Holt S.S. // *Astrophys. J.*, 1983, v.270, p.233.
129. Holt S.S. // *Astrophys. Space Sc.*, 1976, v.42, p.123.
130. Tsunemi H., Kitamoto S., Manabe M. et al. // *Publ. Astron. Soc., Japan*, 1989, v.41, p.391.
131. Brandt S., Lund N., and Rao A.R. // *Adv. Space Res.*, 1990, v.10, p.(2)329.
132. Bradt H.V., Swank J.H. and Rothschild R.E. // *Adv. Space Res.*, 1991, v.11, p.(8)243.
133. In't Zand J.J.M., Priedhorsky W.C., Moss C.E. et al. // *SPIE*, 1994, v.2279, p.458.
134. Лапшов И.Ю. // Кандидатская диссертация, ИКИ РАН, Москва, 1994.
135. Schnopper H.W. // *SPIE*, 1994, v.2279, p.412.
136. Шноппер Г.В., Оме К., Христенсен Ф.Е. и др. // Препринт ИКИ РАН, Пр-1888, 1994.
137. Halm I., Wiebicke H.-J., Geppert U. et al. // *SPIE*, 1993, v.2006, p.11.
138. Budtz-Joergensen C., Bahnsen A., Moehl-Madsen M. et al. // *SPIE*, 1994, v.2279, p.517.
139. Паппе Н.Ю., Белых А.В., Ямбуренко Н.С. и др. // Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1773, 1991.
140. Vilhu O., Huovelin J., Tikkanen T. et al. // *SPIE*, 1994, v.2279, p.532.
141. Lapshov I.Yu., Kaaret P.E., Novick R. // *SPIE*, 1994, v.2010, p.12.
142. Грудский А.Я. // Доклад на международном совещании по проекту СПЕКТР-РЕНТГЕН-ГАММА. Москва, 5-9 сентября 1989 г.
143. Christensen F.E., Hornstrup A., Frederiksen P., et al. // *SPIE*, 1993, v.2011, p.540.
144. Christensen F.E. // Private communication.
145. Mewe R., Gronenschild E.H.B.M. and van den Oord G.H.J. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, 1985, v.62, p.197.
146. Mewe R. // in: *Astrophysical and Laboratory Spectroscopy*, eds. R. Brown, J. Lang, Scottish Univ. Summer School in Phys., 1988, p.167.
147. Kotani T., Aoki T., Kawai N., et al. // *New Horizon of X-ray Astronomy*, eds. by F. Makino, T. Ohashi, Univ. Acad. Press, Tokyo, Japan, 1994, p.438.
148. Сюняев Р.А., Бороздин К.Н., Лапшов И.Ю., Терехов О.В. // Препринт ИКИ АН СССР, Пр-1632, 1990.