

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

на правах рукописи

Павлинский Михаил Николаевич
ПОСТРОЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ КАРТЫ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ГАЛАКТИКИ
ПО ДАННЫМ ТЕЛЕСКОПА АРТ-П ПРОЕКТА «ГРАНАТ»

01.03.02 Астрофизика, радиоастрономия

диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент АН СССР,
проф. Р. А. Сюняев

Москва, 1991

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Введение	3
Глава 1. Разработка Астрономического Рентгеновского Телескопа АРТ-П	14
Глава 2. Наземная и полётная калибровка телескопа АРТ-П	39
Глава 3. Построение рентгеновской карты области Галактического центра телескопом АРТ-П	58
Глава 4. Новые рентгеновские источники: GRS1741.9-2853, GRS1758-258, GRS1734-292, GRS1736-297 и GRS1747-312, обнаруженные в области центра Галактики телескопом АРТ-П	70
Глава 5. Рентгеновское излучение ядра Галактики Sgr A и кандидата в чёрные дыры 1E1740.7-2942	84
Глава 6. Рентгеновские всплески из области Галактического центра, зарегистрированные телескопом АРТ-П	94
Заключение	106
Литература	108

В В Е Д Е Н И Е

Исторически сложилось, что центр нашей Галактики изучен достаточно слабо, поскольку Солнечная система расположена на периферии галактического диска и нас разделяет ~ 8 кпк межзвездного газа и пыли. Эта пыль с характерным размером несколько микрон вызывает ослабление света в оптическом диапазоне примерно на 30 звёздных величин (Беклин и Негебауэр 1968, [1]). К счастью, радио и инфракрасное излучение с $\lambda \geq 2$ мкм, рентгеновское и гамма-излучение с $E \geq 2$ кэВ проникают сквозь межзвездную среду. Именно это обстоятельство позволило в течении последних десяти лет с развитием всеволновых обсерваторий совершить качественный скачок в познании центра нашей Галактики.

Центральная область Галактики. В обычной трактовке в центральной области Галактики выделяют три области: первая, имеющая радиус 4 кпк, интересна особенностями кинематики и распределения газа, вторая область, радиусом ~ 600 пк включает в себя звездный балдж с массой $4 \cdot 10^9 M_{\odot}$ и околоядерный газовый диск с массой $6 \cdot 10^8 M_{\odot}$ и, наконец, окрестность центра с радиусом в несколько парсек называемая ядром. Чтобы несколько сузить вопрос, назовем характерный масштаб о котором пойдет речь, это угловая минута и поле зрения в несколько градусов. При расстоянии 8.5 кпк до центра Галактики это означает, что речь идет о размерах ~ 2.5 пк и ~ 150 пк, т.е. о ядре Галактики и ближайшем его окружении.

Как уже говорлось выше, центральная область Галактики скрыта от нас мощным слоем пыли, непрозрачным в оптическом и прозрачным в ИК, радио, рентгеновском и гамма - диапазоне. Данные радионаблюдений, показали, что среди источников радиоизлучения в Галактическом центре выделяются три: Стрелец А Западный (Sgr A West), Стрелец А

восточный (Sgr A East) и Стрелец B2 (Sgr B2). Последние два являются молекулярными облаками с массами $10^6 M_{\odot}$, радиусами 20 пк и расстоянием от центра 100-200 пк. Источник Sgr A West совпадает с динамическим центром Галактики и имеет размер ~10 пк. Эту область принято называть ядром Галактики.

Данные в ИК диапазоне (наблюдения линии NeII 12.8 мкм) показали, что с приближением к центру скорость движения газовых облаков возрастает со 150 км/с на расстоянии 2 пк до 300 км/с на расстоянии 0.4 пк. Данная динамика объясняется некоторыми специалистами существованием в центре Галактики массивной ($10^6 M_{\odot}$) черной дыры.

В сантиметровом диапазоне длин волн методами межконтинентальной радиоинтерферометрии на волне 3.8 см было обнаружено «ядрышко» с границами ~0.001" (менее 10 а.е.), генерирующее мощное нетепловое радиоизлучение, светимость в радиодиапазоне составила 10^{33} эрг/с, а его яркостная температура 10^{10} К. При этом светимость единицы объема излучающей области почти не уступает объемной светимости квазаров.

Рентгеновская карта. Рентгеновский диапазон (от нескольких кэВ до нескольких десятков или даже сотен кэВ) позволяет наряду с ИК и радио-диапазоном заглянуть за плотные молекулярные облака вглубь центра Галактики. Первые наблюдения зоны Галактического центра были выполнены на специализированном спутнике UHURU в 1970 г. На спутнике были установлены пропорциональные счетчики с эффективной площадью ~700 см² в диапазоне энергий 2-10 кэВ, поле зрения ограничивалось щелевым коллиматором $0.5^{\circ} \times 5^{\circ}$. Спутник вращался с периодом 12 минут, что позволяло, зная ориентацию спутника в каждый момент времени, различать фон и источники. Первые же наблюдения области Галактического центра показали, что там находится сравнительно слабый протяженный (или группа источников) рентгеновский источник с

интенсивностью 40 отс/с на 700 см^2 и угловыми размерами порядка одного градуса (см. Келлог и др. 1971 [2]).

Позднее, на спутнике Ariel-5 зарегистрировали источник A1742-294 и транзиентный источник A1742-289, в бокс ошибок которого ($\sim 1.2^\circ$) попадал Центр Галактики Sgr A (West) (Элис и др. 1975 [3], Брандуарди и др. 1975 [4]). Постоянный источник A1742-294, который наблюдался во всех сеансах наблюдений, был локализован прибором с вращающимся модуляционным коллиматором, установленным на борту спутника SAS-3 (Жерниган и др. 1978 [5]) и спутником Ariel-5 (Вильсон и др. 1977 [6], Проктор и др. 1978 [7]). Кроме того, на SAS-3 были зарегистрированы первые три рентгеновских всплеска из области Галактического центра (Льюин и др. 1976 [8]). В 1978 году двумя ракетными пусками была предпринята попытка картографирования области Галактического Центра с высоким угловым разрешением (Крудас и др. 1978 [9], Проктор и др. 1978 [7]). В каждом полете было зарегистрировано пять точечных источников, но только два из них A1742-294 и GX 0.2-0.2 наблюдались в двух наблюдениях.

В 1979 г. на обсерватории EINSTEIN с помощью телескопа косого падения была получена достаточно подробная карта области Галактического центра в диапазоне энергий 0.5- 4.5 кэВ. В зоне $\sim 1.0^\circ \times 1.0^\circ$ с помощью IPC (позиционно-чувствительного пропорционального счетчика) были обнаружены двенадцать рентгеновских источников (с угловым разрешением $\sim 1'$) (Ватсон и др. 1981 [10]), включая и A1742-294 на краю поля зрения. Два важных открытия были сделаны по данным обсерватории EINSTEIN, первое - регистрация жесткого рентгеновского источника 1E1742.5-2859 (1E - соответствует первому каталогу обсерватории EINSTEIN), местоположение которого совпадало с точностью одна минута дуги с

ром Галактики и второе - открытие диффузного рентгеновского излучения, распределенного асимметрично вокруг Галактического центра. Энергетический спектр 1E1742.5-2859 описывался тепловым спектром с $kT \approx 5$ кэВ и $N_H L \approx 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и светимостью $1.5 \cdot 10^{35} \text{ эрг/с}$ в диапазоне энергий 0.5-4.5 кэВ. При последующей обработке данных Герц и Гриндли (Герц и Гриндли 1984 [11]) нашли еще один интересный источник 1E1740.7-2942.

В 1985 году в двух полетах МТКК ШАТТЛ, с разницей в несколько недель, наблюдалась область Галактического центра двумя приборами SPARTAN 1 (Каваи и др. 1988 [12]) и XRT (Скиннер и др. 1987 [13]).

SPARTAN 1, построенный на базе двух пропорциональных счетчиков, площадью 660 см^2 каждый, с узким щелевым коллиматором $5' \times 3'$, покрывал диапазон энергий от 1 до 15 кэВ. После многократного сканирования в разных направлениях узкой щелью коллиматора была восстановлена картинка Галактического центра, содержащая четыре ярких источника: три уже известных - A1742-294, 1E1740.7-2942, 1E1743.1-2843 и один новый - SP1744.2-2959, всего лишь в пять раз слабее (в диапазоне энергий 2-10 кэВ) яркого источника A1742-294.

Через шесть недель после завершения научной программы SPARTAN 1 область Галактического центра наблюдал рентгеновский телескоп XRT, в котором использовался оригинальный метод получения рентгеновского изображения с помощью пространственной модуляции первичного потока фотонов от источника. Данный метод получил название - метод кодированной апертуры. Впоследствии он нашел широкое применение в области жестких энергий. Оптическая схема телескопа подразумевает использование позиционно-чувствительного детектора и кодирующей маски, расположенной над детектором. В телескопе XRT детектором служила многопроволочная пропорциональная камера (МПК), площадью $\sim 1024 \text{ см}^2$, наполненная газовой смесью на основе ксенона, рабочий

диапазон составлял 3-30 кэВ. Телескоп, состоящий из двух МПК и двух масок, имеющих разные по размерам затеняющие элементы, позволял исследовать Галактический центр с разным угловым разрешением «грубым» ~12 мин. дуги и «тонким» ~3 мин. дуги. Поле зрения было одно и то же и составляло $\sim 6^\circ \times 6^\circ$.

Наблюдения были непродолжительными, полное время экспозиции не превысило 7 часов, но этого было достаточно, чтобы получить достаточно подробную информацию о Галактическом Центре.

1. В области $2^\circ \times 2^\circ$ в группе рентгеновских источников вокруг центра Галактики доминирует известный источник A1742-294, отстоящий на ~30 мин. дуги от Sgr A. В диапазоне энергий 4.25-15 кэВ его доля составляет ~37% от общего потока, излучаемого центральной областью радиусом $\sim 1.3^\circ$. Интенсивность источника была такой же, что и при наблюдениях спутниками Ariel-5, SAS-3 и в двух ракетных полетах.

2. В области $6^\circ \times 6^\circ$ в диапазоне энергий 19-30 кэВ доминирует источник 1E1740.7-2942, отстоящий от Ядра Галактики на ~50 мин. дуги.

3. Светимость источника 1E1742.5-2859 = Sgr A в диапазоне энергий 3-30 кэВ составила лишь $6.2 \cdot 10^{35}$ эрг/с (предполагая расстояние 10 кпк), в то время как ряд экспериментов указывал на существование интенсивного переменного и жесткого (~15-150 кэВ) рентгеновского излучения из области Галактического центра (Денис и др. 1980 [14], Найт и др. 1985 [15], Матьюсон 1982 [16]). Данные HEAO-1 A-4 (Денис и др. 1980 [14]) говорили о том, что источник, находящийся в пределах $\sim 2^\circ$ зоны вокруг центра Галактики является одним из самых ярких на небе в диапазоне энергий 80-180 кэВ. Низкая светимость Sgr A, не позволяющая объяснить существование яркого жесткого источника в центре Галактики, и доминирующее значение на

энергиях $E \geq 20$ кэВ источника 1E1740.7-2942, отстоящего на 50 мин. дуги от Sgr A позволили сделать предположение, что за жесткое излучение из области Галактического центра ответственен источник 1E1740.7-2942, а не Sgr A. С ним же можно связать и регистрируемое переменное аннигиляционное излучение в районе 511 кэВ (Левенталь и др. 1978 [17], 1886 [18], Риглер и др. 1981 [19], 1985 [20]) и сильный континуум, простирающийся до 2 МэВ.

4. В области $6^\circ \times 6^\circ$ было найдено четыре новых источника SLX1732-304, SLX1735-269, SLX1737-282 и SLX1744-299. Один из них - SLX1732-304 был идентифицирован с шаровым скоплением Terzan 1, которое до этого не было известно как рентгеновский источник, но с которым связывали две рентгеновские вспышки, зарегистрированные в 1981 г. спутником НАКУСНО (Макишима и др. 1981 [21]). Другой источник - SLX1744-299 совпал с источником SP1744.2-2959, наблюдавшимся прибором SPARTAN 1 несколько раньше.

5. Область диффузного рентгеновского излучения оказалась в 5-10 раз больше по размерам, чем область, наблюдавшаяся обсерваторией EINSTEIN. Общая светимость диффузного излучения соответствовала значению $\sim 8.3 \cdot 10^{36}$ эрг/с (10 кпк).

Большой прогресс в построении рентгеновской карты Галактического центра, особенно в области относительно жестких энергий до 30 кэВ, достигнутый телескопом с кодированной апертурой XRT, стимулировал широкое использование в рентгеновской астрономии подобных приборов.

В 1987 г. на модуле КВАНТ (станция МИР) был запущен на орбиту второй, после XRT, телескоп с кодированной апертурой - ТТМ, разработанный в кооперации ученых из Нидерландов (лаборатория космических исследований г. Утрехт), Англии (школа физики и космических исследований при университете г. Бирмингем) и ИКИ АН СССР

(Бринкман и др. 1985 [22], Занд и др. 1989 [23]). Поле зрения телескопа равнялось $16^{\circ} \times 16^{\circ}$ по основанию диаграммы направленности, угловое разрешение 2 мин. дуги, диапазон энергий - 2-30 кэВ, энергетическое разрешение - 18% на 6 кэВ, эффективная площадь - 200 см². Обзор Галактической плоскости, выполненный телескопом ТТМ (Сюняев и др. 1989 [23], Занд и др. 1989 [24], Патерсон и др. 1989 [25]) еще раз подтвердил преимущество использования телескопов, строящих рентгеновское изображение с большой точностью. Телескопом ТТМ было открыто несколько новых рентгеновских источников KS1731-261, KS1724-356, KS1632-477, KS1739-304 и др. Было зарегистрировано и локализовано с точностью ~1 мин. дуги несколько рентгеновских всплесков от KS1731-261 (Сюняев и др. 1989 [24]), построена рентгеновская карта области Галактического центра. Вместе с тем оказалось, что чувствительность прибора ТТМ при исследовании области Галактического центра была ниже, чем у XRT. Главным фактором, снижающим чувствительность телескопа, было большое поле зрения $\sim 16^{\circ} \times 16^{\circ}$, в результате чего в поле зрения попадал целый ряд сравнительно мягких и очень ярких источников, таких как GX3+1, GX5-1, GX9+1 и т.д. (Сюняев и др. 1991 [27]). В центральной области радиусом $\sim 1^{\circ}$ телескоп ТТМ зарегистрировал только два известных источника - A1742-2941 и 1E1740.7-2942, показав при этом еще раз, что на высоких энергиях доминирует излучение 1E1740.7-2942. Значимого потока от соседних источников SLX1744-299, 1E1743.1-2843 и Sgr A зарегистрировано не было.

Телескоп АРТ-П проекта «Гранат». Первого декабря 1989 г. ракетоносителем «Протон» была выведена на высокоапогейную орбиту (период 96 ч, наклонение 51.6° , апогей 200000 км, перигей 2000 км) международная астрофизическая обсерватория «Гранат» в

состав которой входило семь научных приборов, разработанных учеными СССР, Франции, Дании и Болгарии (рис. 1). Для обсерватории был использован последний, двадцать шестой по счету, межпланетный космический аппарат серии «Венера». Общая масса комплекса научной аппаратуры превышала 2000 кг.

Два прибора - рентгеновский телескоп АРТ-П (СССР) (Ямбуренко, Павлинский и др. 1989 [28], Павлинский и др. 1990 [29]) и гамма-телескоп Сигма (Франция) (Поль и др. 1990 [30]), на долю которых приходилось 80% ресурсов по массе и электропотреблению, выделяемых научным приборам на космическом аппарате «Гранат», предназначались для выполнения главной научной задачи миссии - длительном (24 часа и более) наблюдении источников рентгеновского и гамма-излучения в широчайшем диапазоне энергий от 3 до 1500 кэВ с угловым разрешением несколько угловых минут и временным разрешением порядка миллисекунды. Для решения этой задачи использовалась новая методика построения изображения в жестком диапазоне энергий, названная методом кодированной апертуры. Широта динамического диапазона (~500) достигалась перекрытием энергетических диапазонов двух приборов, а именно АРТ-П - 3-60 кэВ, Сигма - 30-1500 кэВ.

Основные характеристики телескопа АРТ-П: поле зрения - $3.6^\circ \times 3.6^\circ$ по основанию диаграммы направленности коллиматора, угловое разрешение - 5 мин. дуги, точность локализации - 1.5 мин. дуги, эффективная площадь - 290 см^2 (одного модуля), временное разрешение ~4 мс, энергетическое разрешение ~25% на 6 кэВ.

В общей сложности за два года функционирования на орбите обсерваторией «Гранат», соответственно и телескопом АРТ-П, было выполнено более 400 сеансов наблюдений различных галактических и внегалактических источников рентгеновского и гамма-излучения. Большое внимание было уделено исследованию источников Галактического

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ «ГРАНАТ»

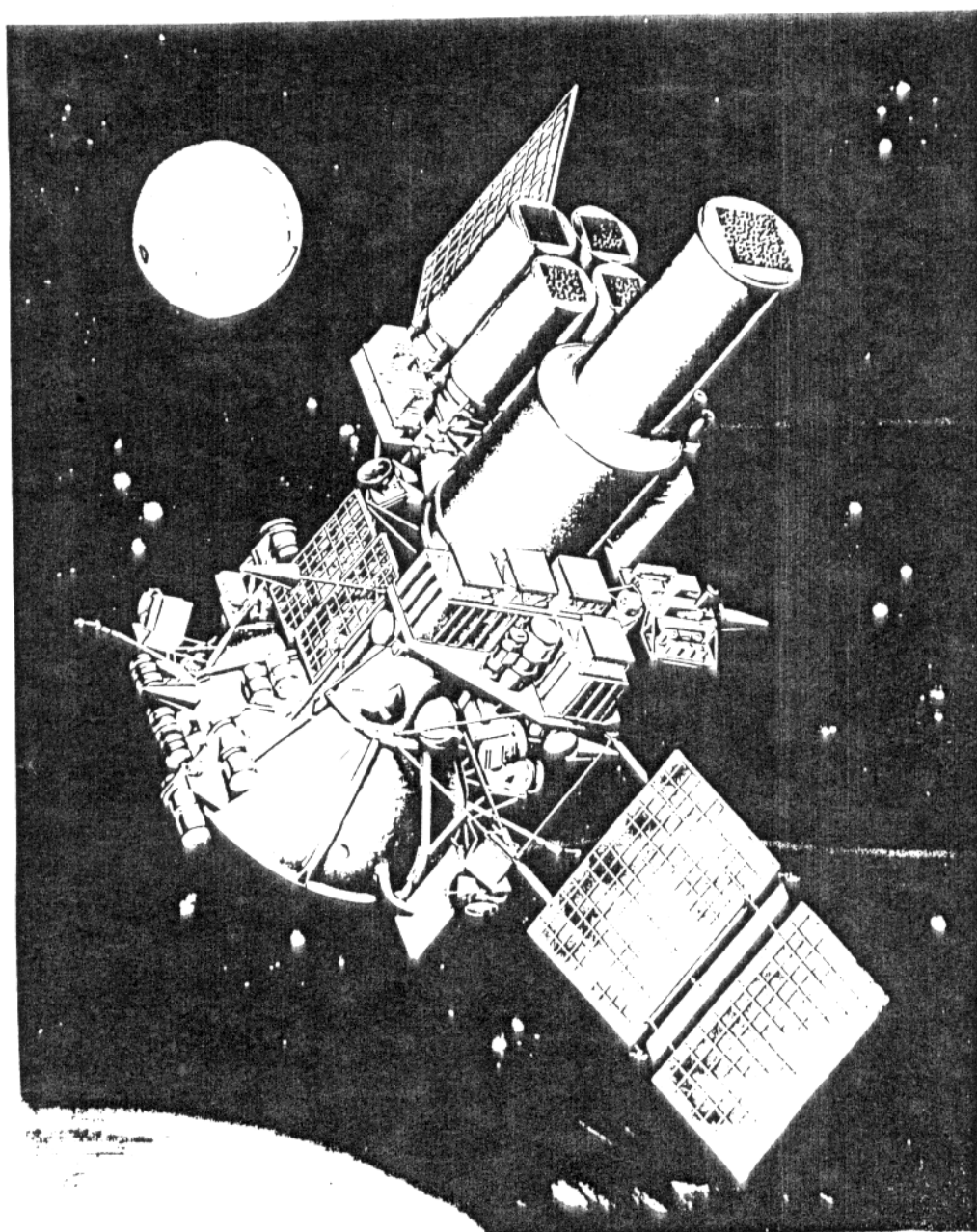


Рис. 1

балджа. Четырежды, с интервалом в полгода, проводилось детальное исследование области Галактического центра. Общее число сеансов, в которых наблюдалась зона Ядра Галактики размером несколько квадратных градусов, приближается к 30.

По результатам наблюдений области Галактического центра телескопом АРТ-П была построена подробная рентгеновская карта в различных диапазонах энергии, при этом, помимо известных источников таких как: 1E1740.7-2942, A1742-294, SLX1744-299, 1E1743.1-2843, Sgr A, GX3+1, SLX1732-304, SLX1735-269, было обнаружено пять неизвестных ранее рентгеновских источников: GRS1758-258, GRS1741.9-2953, GRS1734-292, GRS1736-297 и GRS1747-312, один из которых - GRS1758-258 вблизи известного источника GX5-1, имеет аномально жесткий спектр и может быть причислен к кандидатам в черные дыры.

В ходе первых же сеансов наблюдений телескопом АРТ-П области Галактического центра, выполненных 24 марта и 8 апреля 1990 г. было обнаружено, что светимость источника 1E1742.5-2859 = Sgr A в диапазоне энергий 3-30 кэВ составила $\sim 1.6 \cdot 10^{36}$ эрг/с (предполагая расстояние 8.5 кпк). Простое сравнение с данными телескопа XRT пятилетней давности в том же диапазоне энергий ($\sim 6.2 \cdot 10^{35}$ эрг/с при расстоянии 10 кпк) показали, что источник стал как минимум в 3.5 раза ярче. В дальнейших наблюдениях была зафиксирована переменность источника на фактор ~ 2 . Наблюдаемая переменность и низкая светимость, сравнимая со светимостью обычного компактного Галактического объекта может служить аргументом в пользу того, что регистрируемое излучение не связано со сверхмассивной черной дырой в ядре Галактики, если таковая существует.

Второй источник, который вызывал повышенный интерес, был 1E1740.7-2942, о котором уже было известно, что он самый жесткий в области Галактического центра и который считался постоянным. Этот

аргумент использовался для построения энергетического спектра (Кукком и др. 1991 г.) по данным прибора GRIP и XRT в широком диапазоне энергий 3-1000 кэВ, при этом, наблюдения приборов проводились в 1985 г. XRT и 1988 г. GRIP. Телескоп АРТ-П, благодаря продолжительным наблюдениям в течении двух лет, обнаружил сильную переменность (фактор ~5) источника 1E1740.7-2942.

Временное разрешение телескопа АРТ-П (4 мс), большая площадь детектора (600 см^2), энергетический диапазон 3-30 кэВ и локализации источников с точностью минуты дуги позволили подробно исследовать ренгеновские всплески из области Галактического центра. За два года наблюдений было зарегистрировано и локализовано с точностью угловой минуты около двух десятков барстеров. Источники всплесков были отождествлены с известными источниками A1742-294, SLX1744-299, GX3+1, GX354+0. Анализ восстановленных спектров всплесков подтвердил их близость к чернотельному излучению с температурой несколько кэВ. 9 октября 1990 г. был зарегистрирован всплеск от источника SLX1744-299, который радикально отличался от обычных всплесков своей мощностью ($\geq 10^{38}$ эрг/с) и продолжительностью, т.е. экспоненциальным спадом с характерным временем $\tau \approx 43$ с.

Разработка Астрономического Рентгеновского Телескопа АРТ-П.

Разработка астрономического рентгеновского телескопа АРТ-П (Ямбуренко, Павлинский и др. 1989 [31], Павлинский и др. 1990 [29]) для международной обсерватории «Гранат» была начата в 1983 г. за два года до запуска на орбиту первого рентгеновского телескопа с кодированной апертурой XRT. Она велась на протяжении семи лет совместно специалистами ИКИ (г. Москва) и ОКБ ИКИ АН СССР (г. Бишкек). Основная задача разработчиков проекта «Гранат» состояла в подготовке обсерватории, охватывающей диапазон энергий от нескольких кэВ до тысячи кэВ, при этом, французские специалисты готовили гамма-телескоп «Сигма» (Поль и др. 1990 [30]) предназначенный для наблюдений в жестком диапазоне энергий 30 - 1500 кэВ, советские же специалисты готовили телескоп АРТ-П для наблюдений в рентгеновском диапазоне энергий 3 - 60 кэВ, что в конечном итоге обеспечивало динамический диапазон примерно три порядка (~ 500). Помимо решения задач спектрометрии и «тайминга» с миллисекундным разрешением перед телескопами ставилась наиболее сложная задача, заключающаяся в построении изображения выделенного участка небесной сферы с угловым разрешением несколько минут дуги.

Существовало несколько возможных вариантов построения рентгеновских телескопов, строящих изображение: с зеркалами косого падения, с вращающимся модуляционным коллиматором, с кодированной апертурой.

В области сравнительно мягких энергий неоспоримым преимуществом обладают телескопы с зеркалами косого падения, позволяющие фокусировать рентгеновский поток с больших площадей в несколько тысяч квадратных сантиметров в пятно диаметром несколько миллиметров и даже менее, что позволяет достигать рекордного соотношения источник/шум. Примером могут служить зеркальные телескопы,

установленные на обсерватории EINSTEIN (Джаконни и др. 1979 [32]), ROSAT (Трюмпер 1983 [33]) и находящиеся в стадии подготовки Японская миссия - ASTRO-D, Советская - Спектр-Рентген-Гамма, Европейская - XMM и Американская - AXAF (Вейскопф 1987 [34]). Отличительная черта этих миссий (особенно XMM и AXAF) - их огромная стоимость ($\sim 10^9$ \$), определяемая технологией изготовления систем зеркал с шероховатостью в несколько ангстрем, полупроводниковых фокальных детекторов (CCD матрицы), требуемым ресурсом работы $\sim 10-15$ лет и сложностью наземного оборудования для калибровки телескопов. Следует добавить к этому, что на момент начала разработки телескопа АРТ-П (1983 г.) был осуществлен только один полет с телескопом косого падения - это полет обсерватории EINSTEIN (1979 г.) с верхним пределом по энергии ~ 4.5 кэВ. В упомянутых же проектах AXAF и XMM (запуск - конец 90-х годов) предполагается достигнуть энергии 10 кэВ, в CRG (запуск - 1994-95 г.) $\sim 15-20$ кэВ.

В 70-х годах был накоплен большой опыт в построении изображения в жестком диапазоне энергий (до сотен кэВ) вращающимися модуляционными коллиматорами, установленными в апертуре прибора и модулирующими первичный поток рентгеновских квантов во времени (спутники SAS-3, Ariel-5). С развитием позиционно-чувствительных рентгеновских и гамма детекторов появилась возможность перейти к приборам с пространственной модуляцией рентгеновских квантов, что получило название «метод кодированной апертуры». Это направление казалось перспективным, поскольку решало вопрос непрерывного наблюдения источника (источников) и фона и не требовало модуляции потока рентгеновских квантов во времени какой-либо периодической функцией, что негативно могло повлиять на поиск периода или быстрой переменности в первичном излучении.

В те же годы появились работы (например: Дике 1968 [35], Алес

1968 [36], Гансон и Полихронопулос 1976 [37], Миямото 1977 [38], Фенимор и Кэннон 1978 [39], Проктор и др. 1978 [40]), в которых были сформулированы основные принципы метода кодированной апертуры в приложении к рентгеновской астрономии. Суть их сводилась к следующему (см. рис.2): маска (1), состоящая из последовательности случайно расположенных прозрачных и непрозрачных для рентгеновского излучения элементов, утапливается над позиционно-чувствительным детектором (4); поток квантов (2), приходящий от рентгеновского источника, кодируется маской и регистрируется детектором, при этом распределение скорости счета по разрешающим элементам детектора соответствует структуре маски (6); фон детектора (5) маской не кодируется; поддерживающая маску структура (3) выполняет роль коллиматора; информация, полученная на детекторе, декодируется на ЭВМ.

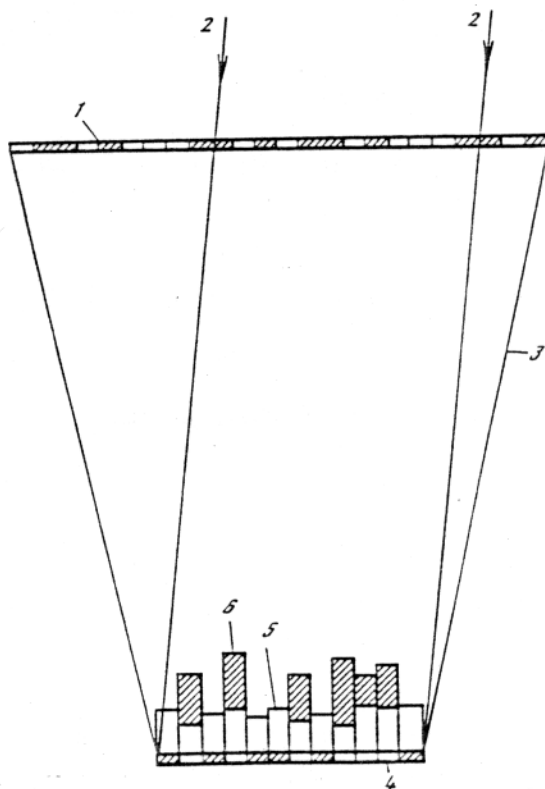


Рис. 2. Иллюстрация работы телескопа с кодированной апертурой
1 — маска, 2 — поток фотонов от источника, 3 — конструкция, поддерживающая маску, 4 — позиционно-чувствительный детектор, 5 — фон детектора, 6 — тень маски от источника

Результатом декодирования является изображение участка небесной сферы, содержащее наблюдаемые источники излучения. Возможность однозначного декодирования обусловлена тем, что для каждого направления прихода излучения формируется своя, отличная от других направлений, таблица кодировки (тенеграмма). При наличии в поле зрения нескольких источников на детектор проецируется тень, соответствующая суперпозиции различных таблиц кодировки, и вклад каждой зависит от интенсивности источника.

Формально весь алгоритм можно представить следующим образом:

а) процесс получения суперпозиции теней на детекторе описывается выражением

$$P = S * M + N,$$

где P - матрица отклика детектора, S - матрица изображения исследуемого участка небесной сферы, M - матрица кодирующей маски телескопа, N - матрица распределения собственного фона детектора, не зависящего от модулирующего эффекта маски и $*$ - оператор корреляции;

б) декодирование изображения производится путем кросс-корреляции матрицы P с матрицей G :

$$\hat{S} = P * G = (S * M) * G + N * G,$$

где $\hat{S}$ - изображение, полученное в результате декодирования.

Если матрицы M и G , подобраны так, что удовлетворяют двум условиям, таким, что кросс-корреляционная функция $M * G$ близка к дельта-функции и вклад фонового члена $N * G$ минимален, то восстановленное изображение будет наиболее близко к истинному распределению яркости по исследуемому участку небесной сферы, поскольку

$$\hat{S} = (S * M) * G + N * G = S * (M * G) + N * G = S + N * G.$$

В 1976 г. Гансон и Полихронопулос [37] сформулировали ещё одно требование. Они показали, что в случае, когда фон доминирует над

излучением источника, оптимальное соотношение сигнал/шум достигается при прозрачности маски 0.5, в рентгеновской же астрономии наиболее приемлем именно этот вариант, поскольку наблюдения слабого источника ведутся, как правило, в присутствии сравнительно большого фона заряженных частиц, даже если он режектируется схемами антисовпадений.

В конечном итоге, после анализа возможных вариантов был сделан выбор в пользу телескопа с кодированной апертурой. Оставалось решить два главных вопроса:

первый - какая оптическая схема телескопа предпочтительнее на данном космическом аппарате, т.е. в существующих ограничениях по массе, габаритам и энергопотреблению;

второй - выбор типа детектора, его разработка и изготовление.

Оптическая схема телескопа.

На рис. 3а, 3б и 3в представлено три возможных варианта построения телескопа с кодированной апертурой, в первом - маска по размерам равна детектору, во втором - детектор больше маски и в третьем - маска больше детектора. В первом случае маска будет работать полностью только тогда, когда параллельный поток рентгеновских квантов падает нормально на плоскость маски, при отклонении же от нормали будет сказываться эффект неполного кодирования. Для избежания эффекта неполного кодирования необходимо либо увеличивать размер детектора (рис. 3б) либо размер маски (рис. 3в).

Очевидно, что сконструировать маску больше детектора проще (см. рис. 3в), однако проблемы на этом не кончаются. Рассмотрим этот вариант более подробно. Пусть d - размер элемента маски, L - расстояние между маской и детектором, P - число элементов в базовой последовательности маски, тогда, если размер маски равен $2P \cdot d$, т.е. в маске дважды повторен рисунок базовой последовательности, то на

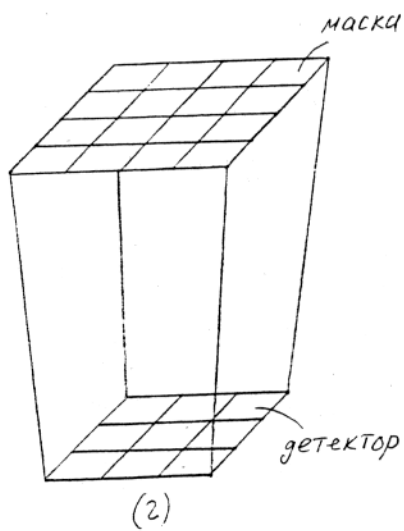
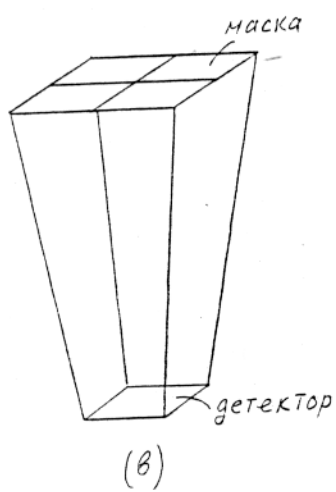
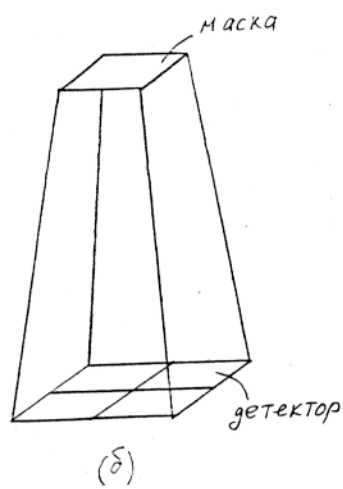
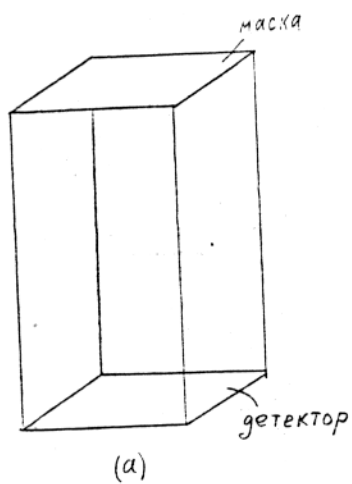


Рис. 3

детектор, в пределах зоны $\pm\alpha$, где $\alpha = \arctg(P \cdot d/2L)$, проецируется с циклическим сдвигом базовая последовательность маски, а в пределах зоны от $-\alpha_1$ до $-\alpha$ и от α до $+\alpha_1$, где $\alpha_1 = \arctg(3P \cdot d/2L)$ только часть базовой последовательности. Диаграмма направленности такого телескопа имеет трапециидальный вид (рис. 4), где зоне полного кодирования соответствует «плато», а зоне неполного кодирования - «крылья».

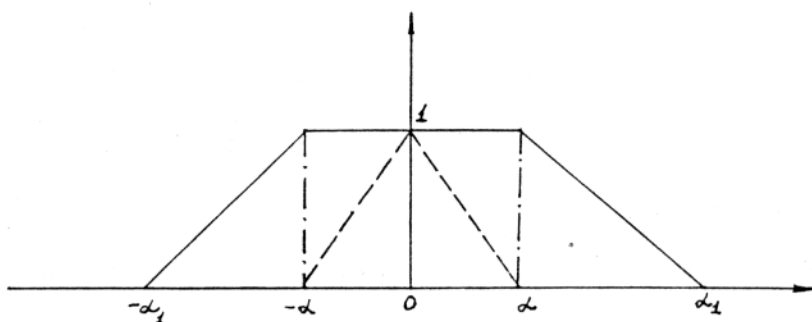


Рис. 4

Наличие зоны неполного кодирования усложняет задачу однозначного восстановления изображения. Решить эту проблему можно применением простого щелевого коллиматора, диаграмма направленности которого имеет простой треугольный вид. Необходимо просто подобрать коллиматор у которого величина основания треугольника равнялась бы величине плато (рис. 4 штриховая линия), т.е. $a/h = P \cdot d/2H$, где h - высота коллиматора, a - его шаг. Идеальным был бы коллиматор, у которого шаг равнялся элементу маски, т.е. $a = d$, тогда коллиматор не вносил бы искажений в восстановленное изображение, но реализовать на практике такой вариант не всегда представляется возможным, поскольку величина d может быть очень маленькой и надо учитывать, что толщина стенок не может быть бесконечно малой.

Угловое разрешение телескопа с кодированной апертурой определяется соотношением $\Delta\varphi = \arctg(d/L)$, т.е. чем меньше элемент

маски и больше расстояние между маской и детектором, тем выше разрешение. Ограничения на максимальный размер L связаны с допустимыми габаритами телескопа, а на минимальный размер d - с допустимым пространственным разрешением детектора, т.е. $d/\Delta x \approx 1$, где Δx - пространственное разрешение детектора.

Число элементов базовой последовательности маски P ограничено емкостью бортовой памяти. Поле полного кодирования телескопа равно $P \cdot \Delta \varphi$, т.е. если уменьшаем $\Delta \varphi$, то для сохранения поля зрения телескопа необходимо увеличивать P и следовательно увеличивать необходимый объем бортовой памяти который растет как P^2 . Как следствие увеличиваются габариты, масса и энергопотребление электронных блоков телескопа.

Поле зрения телескопа нельзя делать очень большим еще по одной причине. Предположим, что в поле зрения Ω , попадает N рентгеновских источников, тогда полная загрузка детектора в энергетическом интервале E , $E + \Delta E$ равна

$$N(E) = A \cdot \Omega \cdot \varepsilon(E) \cdot I_{XB} \Delta E + A \cdot B_p \cdot \Delta E + \sum_i A \cdot \eta_i \cdot \varepsilon(E) \cdot I_{xi} \Delta E,$$

где A - чувствительная поверхность детектора, $\varepsilon(E)$ - эффективность регистрации детектором кванта с энергией E , I_{XB} - поток рентгеновских квантов диффузного фона, B_p - количество заряженных частиц, пропускаемых на регистрацию системой режекции фона заряженных частиц, I_{xi} - поток от рентгеновских источников, η_i - прозрачность коллиматора для i - го источника.

Отношение сигнал/шум для j - го источника будет равно

$$\frac{S}{\sqrt{N}} = \frac{\eta_j \cdot I_{xj} \cdot \sqrt{A \cdot \varepsilon(E) \cdot \Delta E}}{\sqrt{\Omega \cdot I_{XB} + B_p + \sum_i \eta_i \cdot I_{xi}}},$$

т.е. при большом поле зрения чувствительность телескопа падает как

$\Omega^{-1/2}$, поскольку в области мягких энергий доминирует диффузный фон. К тому же есть опасность попадания в апертуру ярких рентгеновских источников при наблюдении густонаселенных областей.

В результате разработки оптической схемы телескопа АРТ-П необходимо было подобрать ряд параметров, таких как Ω , P , $\Delta\phi$, L удовлетворяющих существующим ограничениям, выбрать тип маски, т.е. матрицу M , решить вопрос об использовании коллиматора, т.е. определить, существуют ли такие a и h , при которых коллиматор не вносит искажений в восстановленное изображение и обеспечивает достаточную прозрачность. К этому надо добавить вопрос по эффективной площади детектора A и его пространственное разрешение Δx , которые взаимосвязаны, поскольку Δx ухудшается с увеличением A .

В 1977 г. Миямото [38] и в 1978 г. Фенимор и Кэннон [39] предложили использовать для маски, псевдослучайные последовательности, которые удовлетворяют трем условиям, упомянутым выше, т.е. для автокорреляционной функции

$$R_A(i, j) = \sum_i \sum_j A(i, j) \cdot A(i+k, j+1)$$

выполняются условия

$$\begin{cases} R_A(0, 0) \approx 0.5, & k=0, l=0; \\ R_A(k, l) \approx 0.25, & \text{при } k \neq l \neq 0. \end{cases}$$

т.е. « δ - образность», маска имеет 50% прозрачность и вклад фонового члена минимален. В первом случае это матрица Адамара, а во втором матрица URA (матрица избыточной однородности). В обоих случаях « δ - образность» выполняется только при условии полного кодирования. Матрица URA имела единственное преимущество перед матрицей Адамара только с точки зрения технологии изготовления, что и послужило аргументом в пользу её выбора для телескопа АРТ-П. Чтобы сохранить свойства автокорреляционной матрицы необходимо было обеспечить полное кодирование, т.е. использовать маску в два раза больше по размерам чем детектор, в этом случае «крылья» неполного кодирования

в диаграмме направленности можно было «отрезать» только коллиматором.

Надо сказать, что для телескопа АРТ-П предполагалось разработать многопроводную пропорциональную камеру - МПК, единственный возможный вариант позиционно-чувствительного детектора для энергетического диапазона 3-60 кэВ, с эффективной площадью несколько сот квадратных сантиметров и применимого в условиях космоса. Характерное пространственное разрешение МПК, которое несложно реализовать при рабочей поверхности $\sim 500-600 \text{ см}^2$ $\Delta x \sim 1 \text{ мм}$, т.е. минимальный размер элемента маски можно сделать того же порядка $d \sim 1 \text{ мм}$.

В этом случае объем оперативной памяти необходимый для хранения информации хотя бы в 10 цветах составлял бы величину $10 \cdot (250 \text{ мм} / 1 \text{ мм})^2 \approx 600 \text{ Кбайт}$. На телескоп АРТ-П было отведено: геометрическая зона $\sim 1600 \times 1000 \times 2000 \text{ мм}$, масса $\sim 400 \text{ кг}$ и энергопотребление $\sim 160 \text{ Вт}$, что позволяло разместить четыре детектора с четырьмя блоками электроники.

Существующая элементная база микропроцессора К580, которую предполагалось использовать в телескопе АРТ-П позволяла расширить оперативную память только до 64 Кбайт на детектор, т.е. в 10 раз меньше.

Поле зрения телескопа при размере детектора $\sim 250 \text{ мм}$ и расстоянии между маской и детектором в 1400-1500 мм получилось бы $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ (FWHM), т.е. при наблюдении центра Галактики в апертуру прибора попадал бы целый ряд ярких рентгеновских источников таких как GX3+1, GX5-1, GX4+1, GX9+1, которые существенно снизили бы чувствительность телескопа для центральных источников типа Sgr A, A1742-294, 1E1740.7-2942.

Выход был найден с применением так называемой «многомотивной» маски. Под «многомотивной» понимается маска, в которой число базовых

последовательностей больше четырех. На рис.3в показан вариант с маской, содержащей 4×4 мотива, размер детектора равен 3×3 мотива, при этом в пределах зоны полного кодирования на детектор проецируется всегда 3×3 мотива маски. Это позволяет в 9 раз уменьшить поле зрения телескопа при сохранении углового разрешения и эффективной площади детектора, что и было использовано в АРТ-П. Размер элемента маски был выбран 2×2 мм, число элементов маски 43×41 (в маске типа URA произведение двух простых чисел), число мотивов 4×4 , расстояние между маской и детектором 1320 мм, соответственно размер входного окна детектора 258×246 мм. Угловое разрешение при таких значениях d и L получалось равным 5.2 угл. мин., поле полного кодирования $\sim 3.6^\circ \times 3.6^\circ$.

Вопрос стоял по коллиматору, поскольку при такой конфигурации необходимо было изготовить структуру с ячейкой 2×2 мм, высотой 63 мм, непрозрачную для рентгеновского излучения до 60 кэВ и выполняющую еще одну важную функцию - компенсирующую внутреннее давление газа на тонкое входное бериллиевое окно МПК, т.е. выдерживающую нагрузку в ~ 1000 кг. Решить данный вопрос с точки зрения технологии было очень сложно.

Предложили следующее решение (Любарский и др. 1987 [41]) - сделать коллиматор с ячейкой не $d \times d$, а $3d \times 3d$, т.е. 6×6 мм, высотой 190 мм. Такой вариант не вносит искажений в проецируемую на детектор тень маски. Поясним это на рис.5, пусть маска состоит из 4-х мотивов, детектор по размерам равен 3-м мотивам, число элементов в базовой последовательности маски - 7. Поток фотонов падает под некоторым углом β . При шаге коллиматора $3 \times d$, получается, что во всех трех мотивах коллиматор будет затенять, в первом мотиве - 1, 4, 7, во втором - 3, 6 и в третьем - 2 и 5, т.е. полный набор элементов от 1 до 7. Если просуммировать три мотива на детекторе поэлементно, то получится одинаковая прозрачность коллиматора $2/3$ для всей

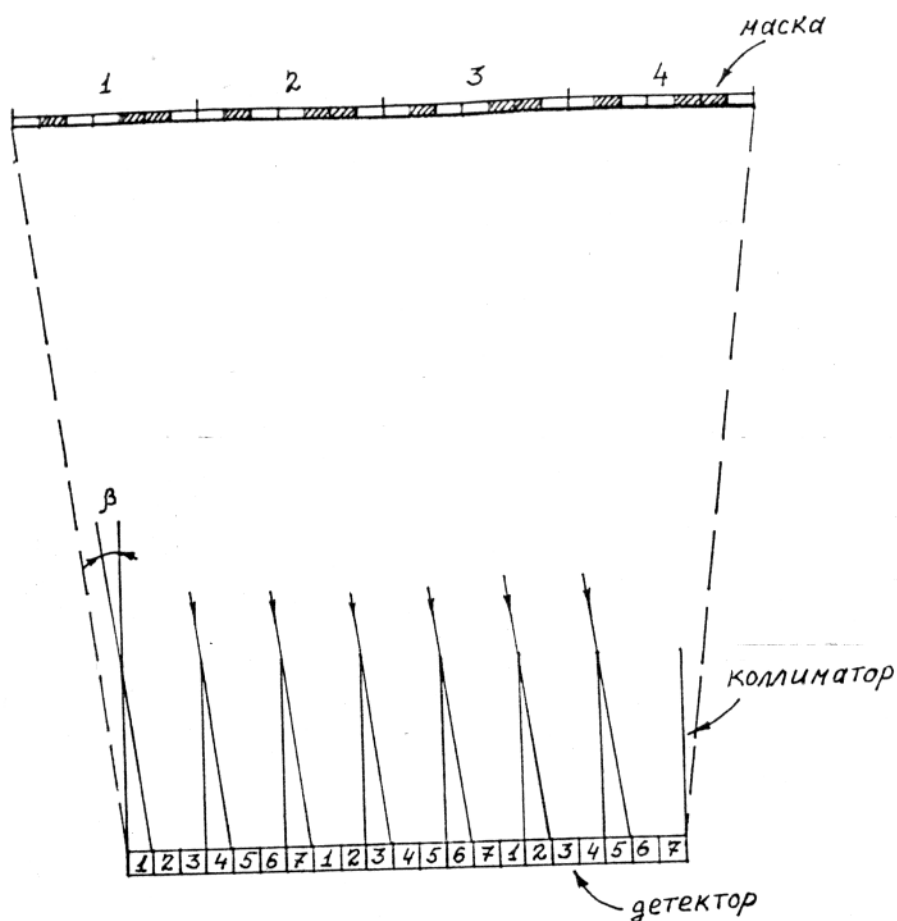


Рис. 5

последовательности. Равное затенение коллиматором всех элементов последовательности при любом угле падения излучения обеспечивается только в случае когда число элементов в базовой последовательности маски выражается простым числом, что и реализовано в маске типа URA (в базовой последовательности АРТ-П 43×41 элементов).

Увеличение шага коллиматора дает существенный выигрыш и в эффективной площади детектора. Так, например, при толщине стенки коллиматора 200 мкм и шаге $3 \times d = 6$ мм имеем увеличение площади на 15% по сравнению с коллиматором, у которого шаг $d = 2$ мм.

Наличие коллиматора в телескопе АРТ-П позволило снизить и общий вес телескопа, поскольку не было необходимости делать поддерживающую структуру для маски непрозрачную для рентгеновского излучения.

Многопроволочная пропорциональная камера.

Одна из основных задач разработки телескопа АРТ-П была связана с созданием позиционно-чувствительной многопроволочной пропорциональной камеры, предназначенной для работы в условиях космического эксперимента, что накладывало серьезные ограничения на конструкцию детектора, используемые материалы и технологию изготовления узлов и деталей, которые должны были обеспечивать работоспособность прибора после воздействия вибрационных, ударных и линейных перегрузок на участке выведения, в условиях периодического прохождения радиационных поясов Земли и постоянного пребывания в вакууме.

Ограничение по массе и габаритам предопределило отказ от газопоточной системы и использование отпаянной конструкции камеры, что, в свою очередь, повысило требование к чистоте гермозоны камеры и применяемой рабочей газовой смеси.

После продолжительных экспериментальных работ с лабораторными образцами детектора, в ходе которых шел поиск лучшей конфигурации электродов, газовой смеси, высокого напряжения, способа съема информации для получения оптимального пространственного и энергетического разрешения в диапазоне энергий 3-60 кэВ, а также решались вопросы технологии изготовления рамок, крепления проволоки, входного бериллиевого окна, чистоты гермозоны, минимизации токов утечки и т. д., был выбран вариант двухслойной камеры с позиционно-чувствительным и спектрометрическим первым слоем и чисто спектрометрическим вторым слоем, предназначенным для режекции фона заряженных частиц через схему антисовпадений. Для определения координаты зарегистрированного фотона была выбрана достаточно

надежная и малопотребляющая схема с линией задержки.

Схематический разрез детектора показан на рис. 6. Первый слой содержит зону усиления глубиной 12 мм, образованную анодной плоскостью А1 и двумя катодными плоскостями К1 и К2, проволоочки в которых натянуты взаимоперпендикулярно, и две дрейфовые зоны глубиной по 18 мм, расположенные над и под зоной усиления. Второй слой, имеющий глубину 24 мм, образован анодной плоскостью АС и двумя заземленными плоскостями Д1 и Д2 и имеет только зону усиления.

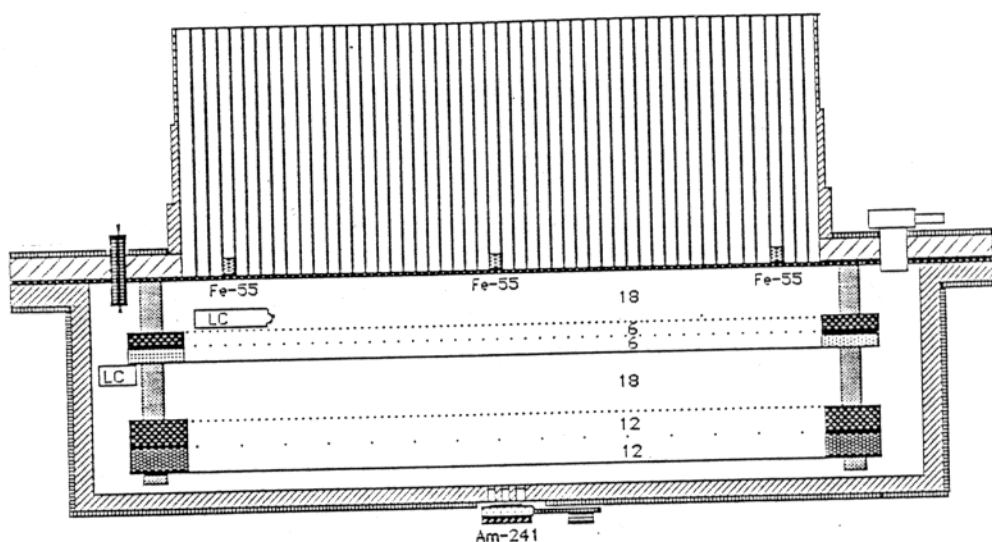


Рис. 6

Для анодных плоскостей используется золоченая вольфрам-рениевая проволока диаметром 20 мкм, намотанная с шагом 3 мм в первом слое и 6 мм во втором слое. Анодные проволоочки каждого слоя объединены в одну группу и подсоединены к своему предусилителю. По две проволоочки с каждого края плоскости А1 объединены в отдельную группу, подсоединенную к своему предусилителю, и используются для антисовпадений. Кроме этих проволоочек, на краях плоскости прикреплены охранные проволоочки из бериллиевой бронзы диаметром 100 и 200 мкм для сглаживания краевых эффектов.

Катодные плоскости К1 и К2 и заземленная плоскость Д1 изготовлены из проволоки диаметром 100 мкм, шаг намотки 1 мм, материал - бериллиевая бронза. Вторая заземленная плоскость Д2 изготовлена из пластины алюминия 1.5 мм толщиной. Катодные проволочки объединены в страйпы по 6 проволочек и между страйпами включены дискретные элементы линии задержки. Все электродные плоскости смонтированы на рамках из керамики.

Камера представляет собой цилиндрическую (диаметром ~540 мм, высотой ~160 мм), герметичную емкость, заполненную газовой смесью на основе ксенона ($85\% \text{ Xe} + 10\% \text{ Ar} + 5\% \text{ CO}_2$). Давление газовой смеси может варьироваться в пределах от 1 до 3 атм. Внутренний объем МПК составляет 19.6 л. Корпус изготовлен полностью из титана, верхний фланец является несущим элементом всей конструкции, его толщина 20 мм, толщина дна 6 мм, обечайки - 2 мм.

В МПК используется бериллиевое входное окно толщиной 0.5 мм, площадью 258×246 мм, на окно установлен коллиматор из бериллиевой бронзы, с ячейкой 6×6 мм, толщиной стенок 200 мкм, высотой 190 мм (рис. 7). На корпус МПК и на боковых поверхностях коллиматора установлена пассивная радиационная защита из олова толщиной 1.5 мм и свинца 0.5 мм.

На крышке МПК установлен заправочный клапан, через который откачивают и заполняют объем газовой смесью, давление в МПК контролируется малогабаритным датчиком давления.

Для снятия сигналов и подачи высокого напряжения в МПК были использованы высоковольтные и низковольтные гермоводы с токами утечки порядка нескольких наноампер.

Для наземной (в ходе испытаний в составе комплекса научной аппаратуры) и полетной калибровки координатных и спектрометрических каналов МПК были использованы четыре радиоактивных источника, один из них - Am-241 (59.6 кэВ), был размещен в бленкерном устройстве на

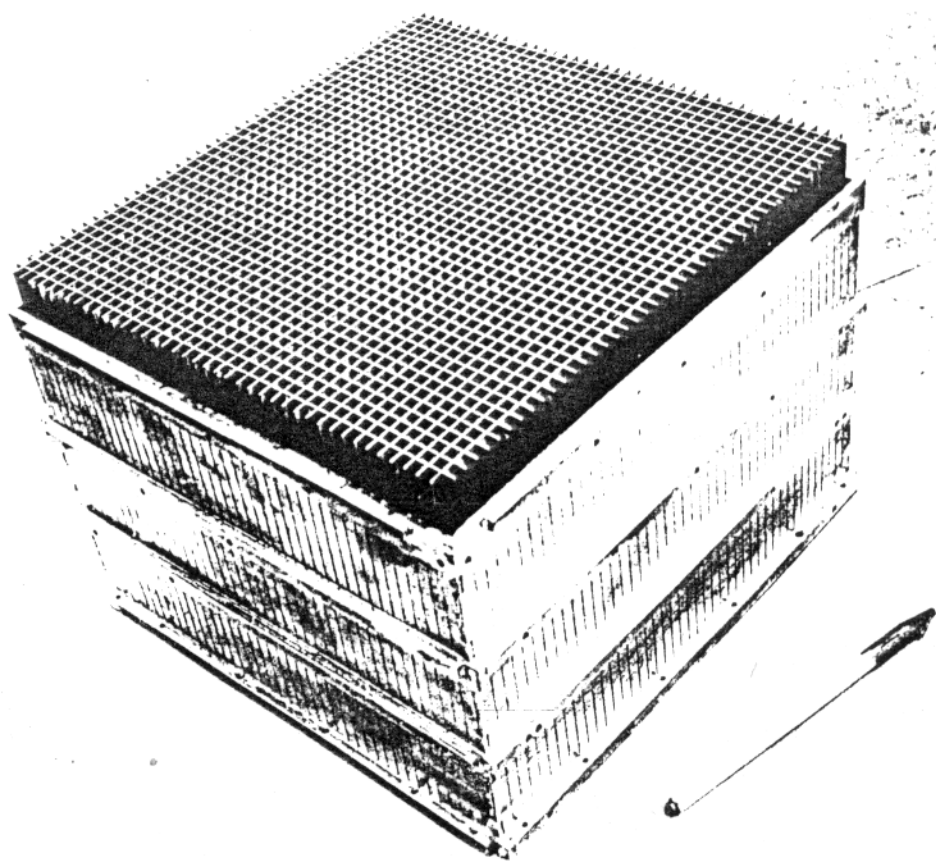


Рис. 7

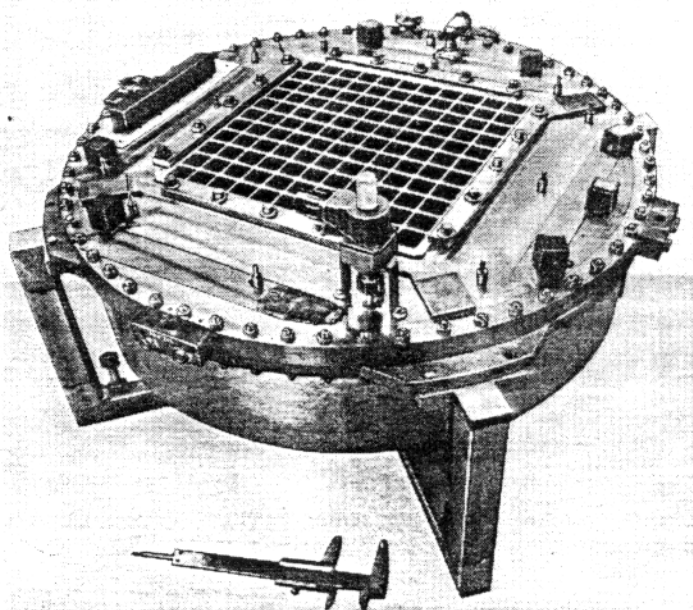


Рис. 8. Общий вид лабораторного образца МПК

днище корпуса и три источника Fe-55 (5.9 кэВ) были вмонтированы в ячейки коллиматора. Относительно слабые источники Fe-55 засвечивали камеру постоянно, яркий же источник Am-241 применялся для кратковременной засветки, для этого использовался специальный механизм, выдвигающий по команде на время ~1000 с изотоп под небольшое окошко, прозрачное для энергий 59.6 кэВ и затем задвигающее его обратно за защиту.

На рис. 8 показан внешний вид лабораторного образца МПК с технологической решеткой на окне.

На рис. 9 и рис. 10 приведено в качестве примера несколько энергетических и координатных спектров, которые были получены на лабораторном образце в процессе экспериментальных исследований камеры (Ямбуренко, Павлинский и др. 1989 [31]). На рис. 9а и 9б показаны энергетические спектры от Cd-109 (22.1 кэВ) и Am-241 (фотопик - 59.6 кэВ, пик вылета ~30 кэВ) для первого слоя камеры при напряжениях на анодной плоскости $U_a = 3500$ В и на катодных плоскостях $U_k = 1000$ В, использовалась газовая смесь ксенон - метан (90/10) при давлении 1.5 атм. На рис. 10а и 10б приведены спектры от Am-241 при $U_k = 750$ В ($U_a = 3250$ В) и $U_k = 500$ В ($U_a = 3000$ В), показывающие резкое ухудшение спектрометрии с понижением напряженности электрического поля в дрейфовых промежутках из-за существенного влияния электроотрицательных примесей на первичное облако электронов, т.е. показывающее недостаточную чистоту газовой смеси. На рис. 11а и 11б приведены энергетические спектры от Cd-109 и Am-241 для второго слоя. У источника Cd-109 помимо основной линии 22.1 кэВ есть еще слабая линия 87 кэВ, и наблюдаемый от неё пик вылета ~57 кэВ.

На рис. 12а и 12б показаны координатные спектры, полученные на 30 и 59.6 кэВ соответственно для координаты идущей вдоль анодных проволок, величина канала 0.246 мм, засветка проводилась через

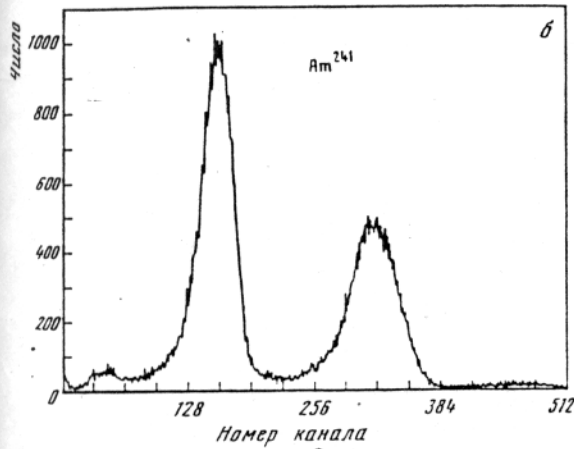
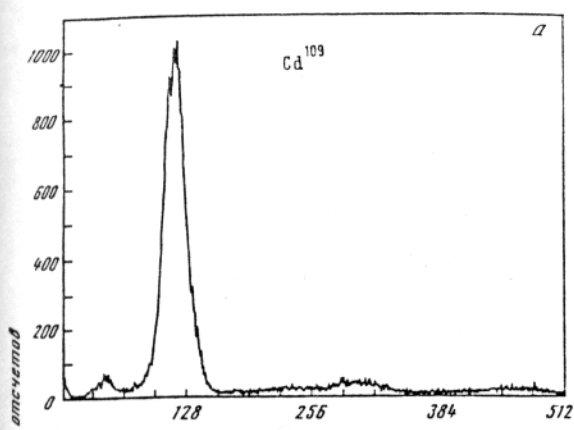


Рис. 9

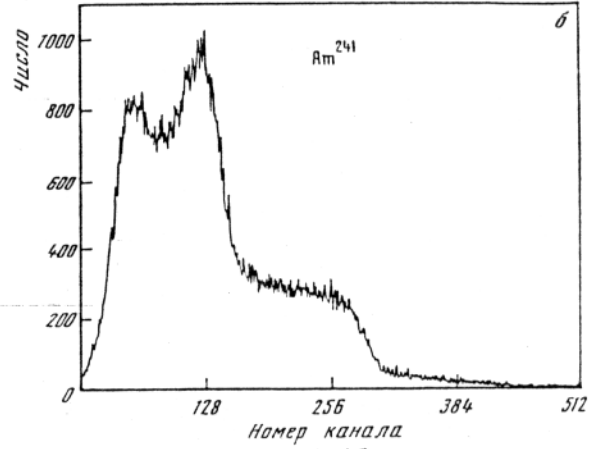
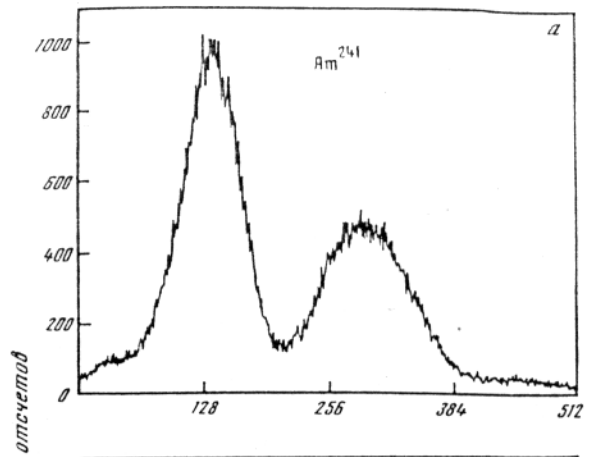


Рис. 10

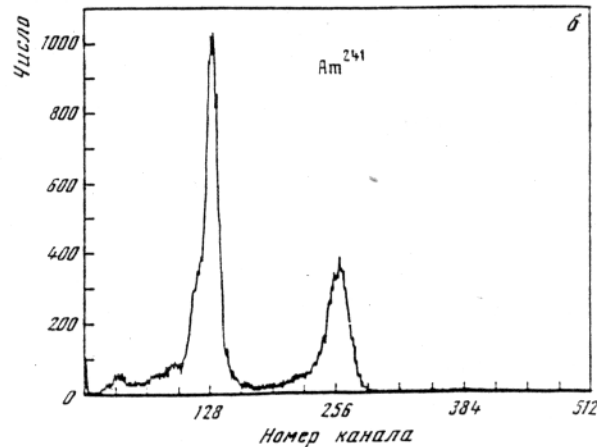
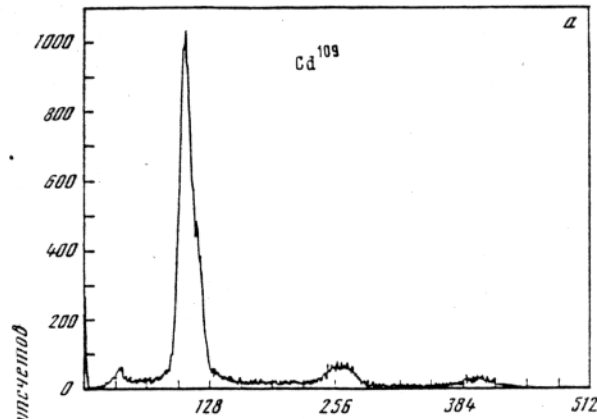


Рис. 11 Энергетические спектры второго слоя камеры, напряжение на анодной плоскости 2637 В
 а — ^{109}Cd разрешение $\Delta E/E$ на линии 22,1 кэВ 16,5%, б — ^{241}Am разрешение $\Delta E/E$ на линии 30 кэВ 13,5%, на линии 59,6 кэВ — 9%

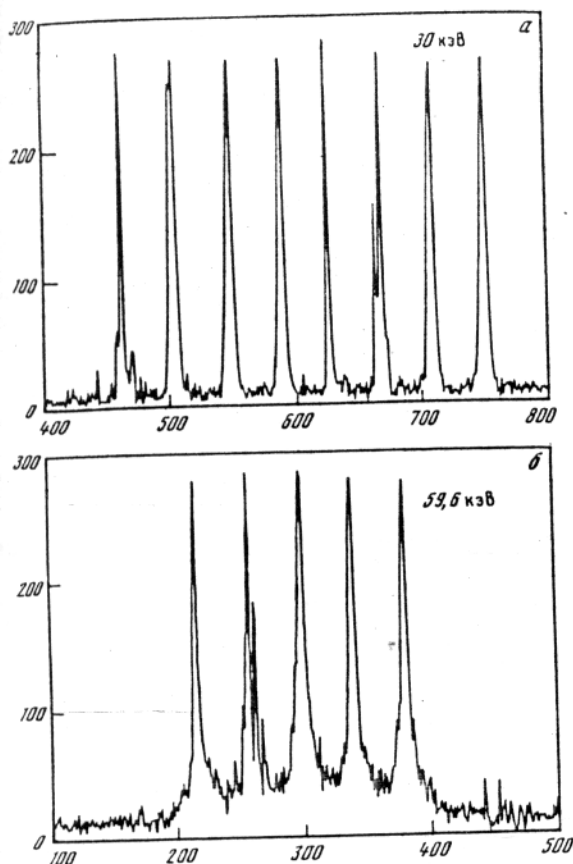


Рис. 12

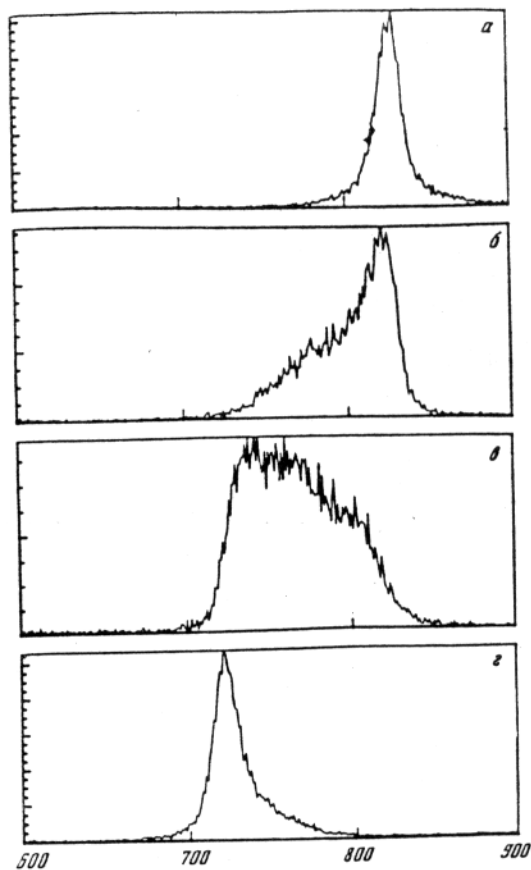


Рис. 13

узкую щель с шагом 10 мм. Для другой координаты, которая идет поперек анодов, возникает проблема влияния анодных проволок. На рис. 13а - 13г показан пример, как меняется координатный спектр при движении от анодной проволоки с шагом 1 мм (энергия 30 кэВ), величина канала ~29 мкм, в данном случае шаг намотки анодов - 3 мм. Это означает, что анодные проволоки вносят искажения в картинку тени маски записываемой на детекторе. По аналогии с коллиматором в случае многомотивной маски при шаге намотки анодов, например, не 2 мм, а 3 мм, после сложения трёх мотивов получается одинаковое влияние проволок на базовую последовательность маски, т.е. эффект усредняется.

В ходе разработки проводилось моделирование методом Монте-Карло функциональных возможностей телескопа АРТ-П, при этом, в модель закладывались та или иная оптическая схема телескопа, учитывалось предполагаемое энергетическое и пространственное разрешение

детектора, погрешность в наведении объекта, уровень режекции фона, дифференциальная и интегральная нелинейность координат, влияние анодных проволок и т.д. В качестве примера здесь приводятся два изображения района сверхновой SN 1987a в Большом Магеллановом Облаке, первое из которых (рис. 14) смоделировано для телескопа АРТ-П в 1987 г. (Ямбуренко, Павлинский и др. 1989 [28]) сразу же после регистрации обсерваторией «Квант» излучения от сверхновой (Сюняев и др. 1987a [42], 1987b [43]), а второе (рис. 15) было получено в результате реальных наблюдений SN1987a телескопом АРТ-П в 1990 г. (Гребенев и др. 1991 [44]).

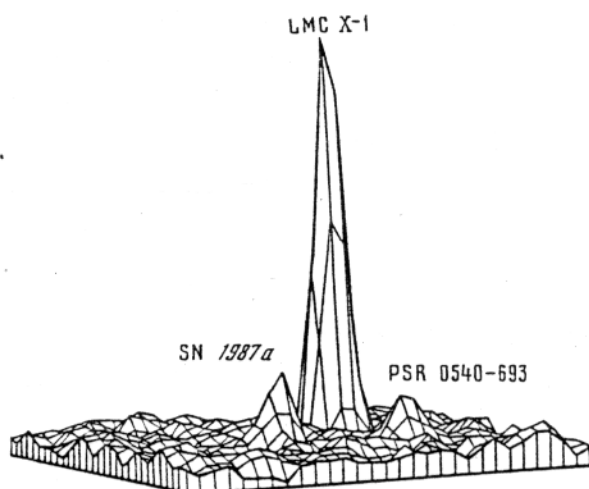


Рис. 14. Моделирование восстановления изображения (в отсчетах) района SN 1987a. размер одного элемента $2,6 \times 2,6$, поле $1,3 \times 1,3^\circ$

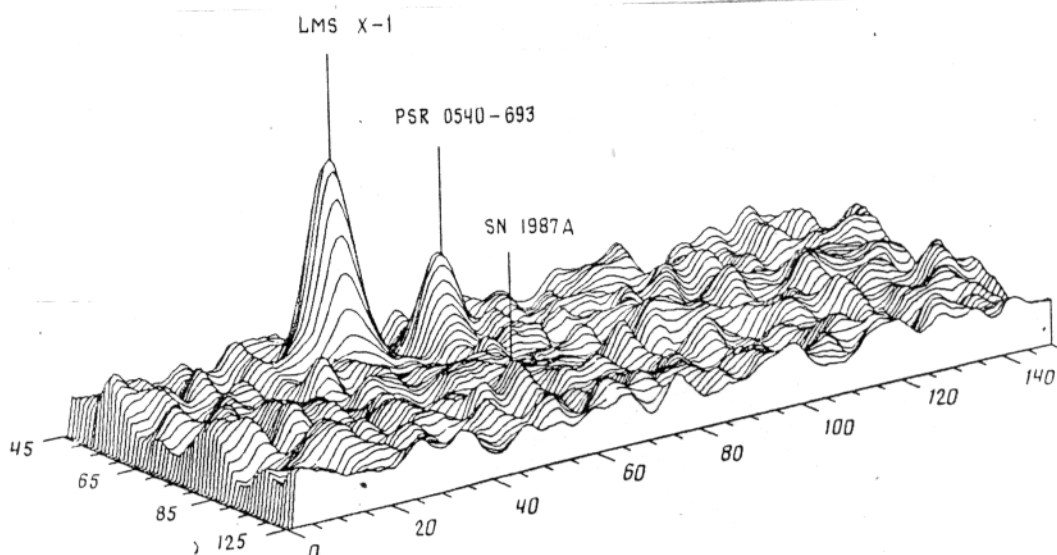


Рис. 15. Изображение области размером $3,2 \times 1,3^\circ$ вблизи SN 1987a в диапазоне энергий 3—14 кэВ, полученное после суммирования данных всего периода наблюдений сверхновой телескопом АРТ-П. Только два ранее известных источника, LMC X-1 и 50-мс пульсар PSR 0540-693, обнаружены в поле зрения телескопа. На месте сверхновой не найдено пика, превышающего уровень трех стандартных отклонений

Телескоп АРТ-П.

Телескоп АРТ-П состоит из четырёх полностью идентичных, сонаправленных модулей, установленных на общей платформе. На рис. 16 схематично изображён один из таких модулей. Маска (1) поддерживается легкой фермой из углепластика (2), под многопроволочной пропорциональной камерой (4) с коллиматором (3) спрятаны блоки цифровой и аналоговой электроники (5). Медная маска, толщиной 1.5 мм, состоит из 16 одинаковых мотивов размером 43×41 элемент (рис. 17). Масса прибора АРТ-П - 400 кг, энергопотребление в активном режиме - 150 Вт, в пассивном - 10 Вт.

Функции управления телескопом АРТ-П и обработки информации выполняет микропроцессор с емкостью ОЗУ 64 Кбайта. Помимо электрического интерфейса со служебными системами космического

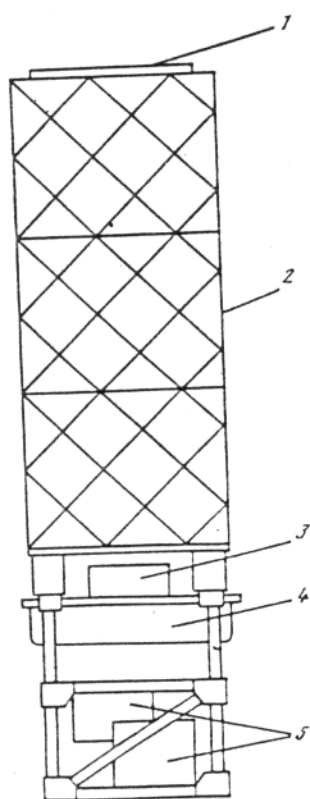
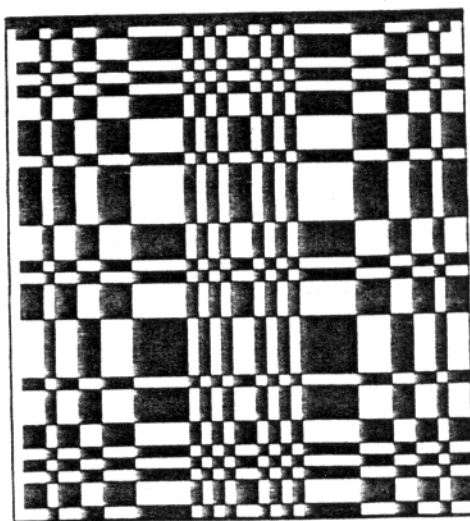


Рис. 16 Астрономический рентгеновский телескоп АРТ-П

1 - маска, 2 - ферма из углепластика, 3 - коллиматор, 4 - многопроволочная пропорциональная камера МПК, 5 - блоки электроники

Рис. 17 Мотив маски, матрица URA 43 × 41 элемент



аппарата, АРТ-П имеет канал для обмена информацией с французским телескопом «Сигма» и советской системой «Старт». По этому каналу осуществляется передача научной информации из АРТ-П в долговременную память на цилиндрических магнитных доменах телескопа «Сигма» (на каждый модуль АРТ-П отводится ~15 Мбит/сутки) или «Винчестер» системы «Старт» (~25Мбит/сутки). По каналу «Сигмы» телескоп АРТ-П принимает данные от французского звездного датчика, который определяет мгновенную ориентацию космического аппарата с точностью ≤ 1 мин. дуги.

Основные технические характеристики телескопа АРТ-П (одного модуля) приведены ниже:

Энергетический диапазон для спектрометрии и временного анализа	4-100 кэВ
Энергетический диапазон для построения изображения	4-60 кэВ
Поле зрения	$3.6^\circ \times 3.6^\circ$
Угловое разрешение	$5.2'$
Точность локализации	$\sim 1'$
Площадь входного окна детектора	$258 \times 246 \text{ мм}^2$
Площадь маски	$344 \times 328 \text{ мм}^2$
Размер элемента маски	$2 \times 2 \text{ мм}^2$
Прозрачность маски	0.5
Расстояние между маской и детектором	1320 мм
Входное окно	500 мкм, Be
Газовая смесь	$85\% \text{Xe} + 10\% \text{Ar} + 5\% \text{CO}_2$
Давление	1.2-1.5 атм
Энергетическое разрешение	25% на 5.9 кэВ 14% на 59.6 кэВ
Фон	50 отс/с

Режимы работы телескопа АРТ-П.

Телескоп АРТ-П может проводить накопление научной информации по трем разным программам: «Энергетическая калибровка», «Поток фотонов» и «Изображение».

Программа «Энергетическая калибровка» предназначена для тестирования спектрометрических каналов МПК в ходе всех наземных и полётных испытаний прибора. Она проводится каждый раз после включения или изменения статуса работы прибора (высокое напряжение, логика отбора событий, время накопления и т. д.). Время работы программы 1024 с. В течение этого времени камера засвечивается изотопом Am-241. Конечным результатом являются два энергетических спектра 1024×16 бит соответствующие первому и второму слою МПК. На рис. 18 приведены в качестве примера спектры, полученные на одном из модулей АРТ-П в ходе наземных отработок. В верхнем спектре (рис. 18а) хорошо видны пики от линии 5.9 кэВ изотопа Fe-55 (крайний левый), пик от линии 59.6 кэВ изотопа Am-241 (крайний правый), пики вылета флуоресцентных квантов ксенона K_{α} (30 кэВ) и K_{β} (26 кэВ) и небольшой пик рядом с линией железа возникающий от переизлучения медным коллиматором линии 8 кэВ. На нижнем спектре (рис. 18б) видны те же пики за исключением 5.9 и 8 кэВ. Энергетическое разрешение второго слоя лучше чем у первого. Это связано с тем, что во втором слое нет дрейфовых промежутков, влияние которых на энергетическое разрешение заметно из-за недостаточной чистоты газовой смеси.

Программа «Поток фотонов» предназначена для наблюдения источников без сжатия информации. В этой программе для каждого фотона записывается время (с точностью 1/256 с), энергия (1024 канала) и координаты (с точностью 0.5 мм) места регистрации события. На всё отводится 5 байт. Дискретность определения координаты события в четыре раза меньшей, чем размер элемента маски, позволяет проводить локализацию рентгеновского источника с точностью $d/4L \approx$

1.3'. По накоплению порции в $\sim 10^4$ фотонов информация передаётся в долговременную память. В общем случае события, соответствующие калибровочным изотопам Fe-55, отбираются по координате и энергии и не попадают в общий поток данных. При необходимости тестирования энергетических и координатных каналов МПК в течении всего времени наблюдения источника отбор можно запретить. На рис.19 приведена в качестве примера картинка от одного из изотопов Fe-55, зона размером 20x20 мм.

Программа «Изображение» предназначена для наблюдения источников со сжатием информации. В этой программе координаты каждого фотона, зарегистрированного в МПК преобразуются в новые по следующему алгоритму:

$$Y' = \{(Y + \Delta Y_{st})/4\} \bmod 82;$$

$$Z' = \{(Z + \Delta Z_{st})/4\} \bmod 86;$$

где Y и Z - первичные координаты фотона с точностью 250 мкм, ΔY_{st} и ΔZ_{st} - поправки по данным звёздного датчика на текущую ориентацию спутника, деление на 4 - переход к более грубой шкале в 1 мм, $\bmod 82$ и $\bmod 86$ - свёртка координат с учётом многомотивности маски. В результате этой свёртки можно копить картинку размером 86x82 элемента. ОЗУ микропроцессора хватает, чтобы копить одновременно 13 картинок в разных энергетических диапазонах от 4 до 60 кэВ при глубине элемента 4 бита. Также как и в программе «Поток фотонов» события, соответствующие калибровочным изотопам Fe-55, отбираются по координате и энергии и не попадают в общий поток данных. Необходимость коррекции каждого события по данным звёздного датчика связана с тем, что в космическом аппарате проекта «Гранат» используется Солнечно-звёздная ориентация. Ось наведения аппарата ходит в пределах ± 30 угловых минут по каждой координате со скоростью 5 секунд за секунду и в течении суток может уходить на один градус,

из-за слежения за Солнцем.

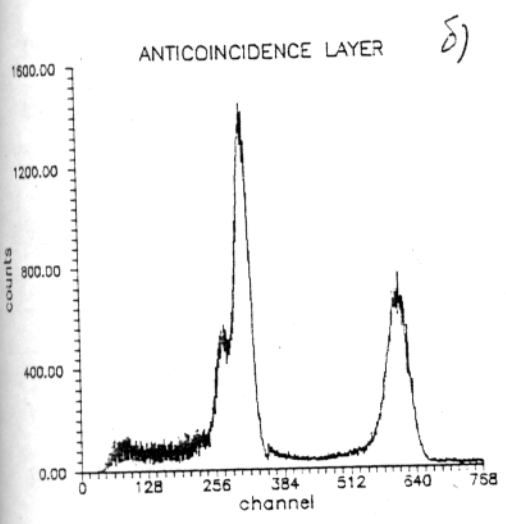
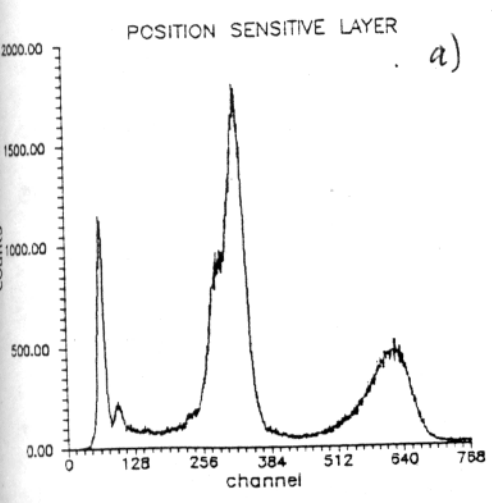


Рис 18

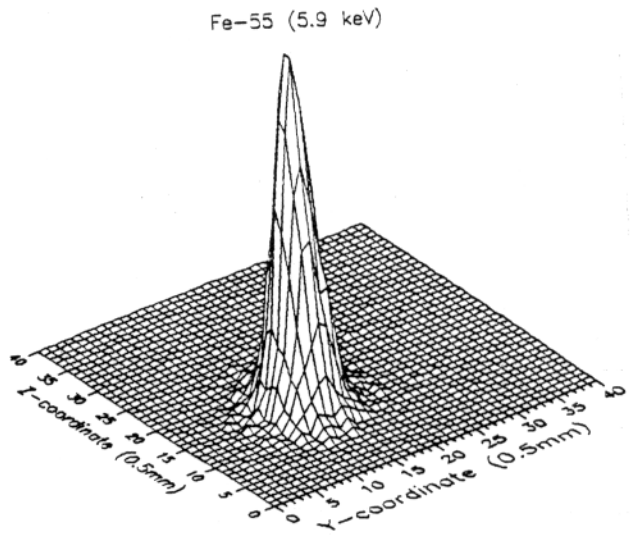


Рис. 19

Наземная и полетная калибровка телескопа АРТ-П

Непосредственно регистрировать детектором энергетический спектр исследуемого источника не представляется возможным. В любом эксперименте на выходе прибора имеется спектр отсчетов, а не фотонов, т.е. для того, чтобы получить первичный спектр надо решить уравнение, которое в простейшем случае имеет следующий вид:

$$\hat{S}_j = \int_{\Delta E} \int_0^{\infty} R(E', E) \cdot \varepsilon(E) \cdot S(E) dE dE' ,$$

где $\hat{S}$ - спектр отсчетов, $S(E)$ - спектр фотонов, $R(E', E)$ - энергетическая функция отклика детектора, $\varepsilon(E)$ - эффективность регистрации, E - энергия фотона, E' - амплитуда сигнала, ΔE_j - ширина j -го канала.

В случае телескопов, строящих изображение, появляется ещё одно уравнение:

$$N_j(x, y) = \int_{\Omega_0} M_j(x, y, \Omega) \cdot \eta(\Omega) \cdot \hat{S}_j(\Omega) d\Omega$$

где $\hat{S}_j(\Omega)$ - отражает распределение яркости по выделенному участку небесной сферы в пределах телесного угла $\Omega \div \Omega + d\Omega$ в j -ом энергетическом канале, $M_j(x, y, \Omega)$ - пространственная функция отклика детектора, x и y - координаты детектора, $\eta(\Omega)$ - прозрачность коллиматора, $N_j(x, y)$ - число отсчетов в пикселе детектора с координатами x и y , поле зрения телескопа - Ω_0 .

Для восстановления спектра источника необходимо экспериментально исследовать четыре функции $R(E', E)$, $\varepsilon(E)$, $M_j(x, y, \Omega)$ и $\eta(\Omega)$.

Эта задача представляет достаточно трудоемкую и, часто, не дешёвую часть эксперимента. Сложность особенно возросла при разработках телескопов с зеркалами косого падения, поскольку

требовалось имитировать реальные условия, т.е. параллельный пучок рентгеновских квантов большого сечения под разными углами и при разных энергиях и все это в вакууме, поскольку воздух непрозрачен для мягкого рентгена. Примером может служить установка PANTER в институте им. Макса Планка (Германия), разработанная в 1980 г. для калибровки системы зеркал (80 см в диаметре) и фокальных детекторов проекта ROSAT, стоимостью несколько миллионов немецких марок. Основными элементами установки являются труба длиной 130 м, вакуумная камера с прецизионными манипуляторами (~10 мкм шаг, точность 0.5 мкм) для перемещения и поворота зеркал, система юстировки, достаточно сложный комплекс вакуумных насосов позволяющий проводить автономную откачку в различных частях установки до давления $\leq 5 \cdot 10^{-6}$ мбар, стабильный и интенсивный источник излучения на базе рентгеновской трубки со сменными анодами из различных материалов, дающие характеристическое излучение в диапазоне длин волн 2.4-113 Å, эталонные детекторы, отслеживающие поток рентгеновских квантов и т.д.

Другим примером может служить ещё более сложная установка VETA-I (Келлог и др. 1991 [45]), подготовленная в космическом центре им. Маршалла (США) для наземной калибровки телескопа AXAF, стоимостью несколько десятков миллионов долларов, состоящая из вакуумной трубы длиной 527 и диаметром 1.5 метра, вакуумной камеры длиной 22.5 и диаметром 7.3 метра с различными достаточно сложными системами прецизионного перемещения и поворота зеркал, наведения, контроля, откачки, источниками излучения, эталонными детекторами и т.д.

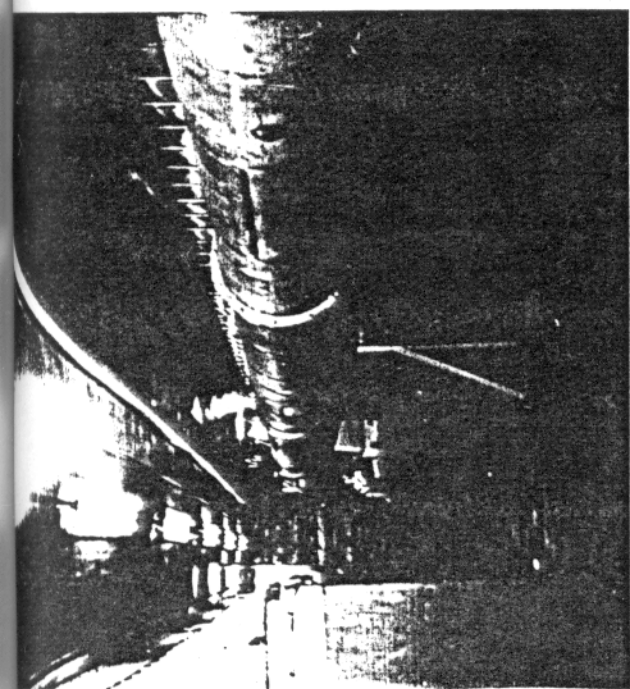
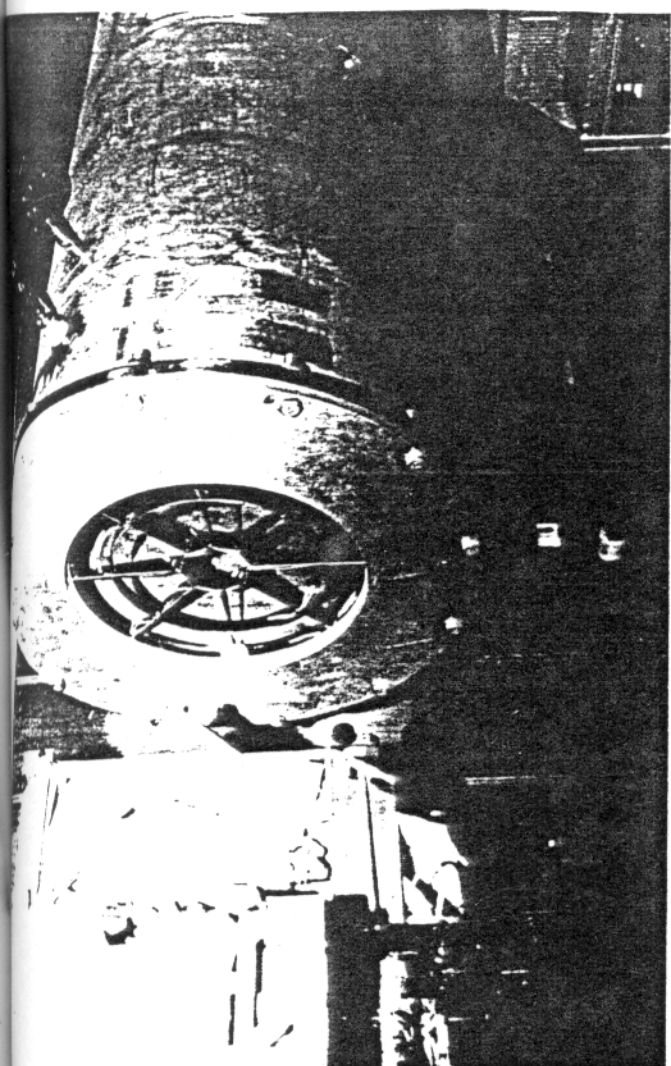
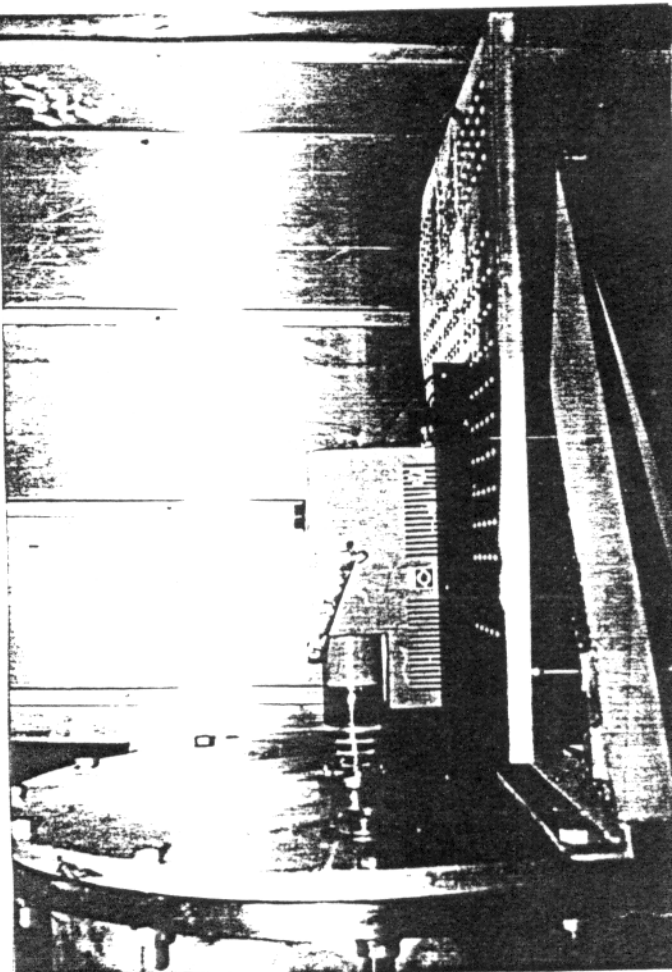
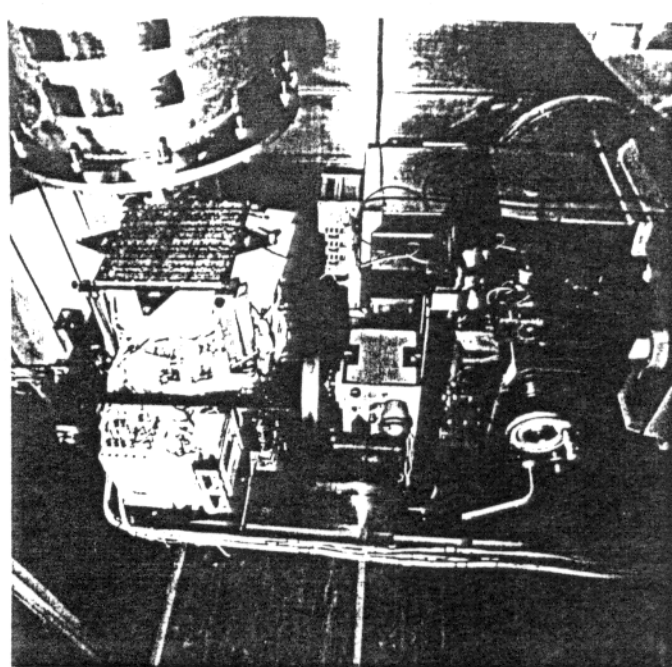
Для калибровки рентгеновского телескопа ART-II необходимо было создать установку аналогичную PANTER и VETA-I. Простая оценка показывала, что при угловом разрешении телескопа $\Delta\theta \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ рад (~5.2 угл. мин.) и размерах детектора $l \approx 250$ мм необходима база

между источником и детектором порядка $\sim 1/\Delta\theta$, т.е. ~ 170 м. Диапазон энергий, начинающийся с 3 кэВ, означал, что источник излучения и телескоп должны находиться в вакууме. Предварительная проработка вопроса создания такой установки показала, что для этих целей необходимы значительные людские и финансовые ресурсы на протяжении нескольких лет.

Поиск более простого решения привел к следующему варианту. Первый шаг к упрощению установки был сделан за счет того, что в телескопе АРТ-П используется многомотивная маска, при этом, на детектор должно проецироваться 3×3 полных мотива, размер одного мотива 86×82 мм, т.е. если засвечивать последовательно по одному мотиву точно перемещая детектор поперек пучка фотонов, то уже требуется база в три раза меньше, поскольку условный размер детектора в этом случае равен $1/3$. Второй шаг заключается в том, чтобы перед началом калибровки снять маску и перенести её ближе к детектору, т.е. установить на расстоянии ~ 250 мм, а не 1320 мм, ближе нельзя, поскольку мешает коллиматор, что дает выигрыш порядка 5. В конечном итоге получается выигрыш более чем в 15 раз и, следовательно, достаточно базы в 12-15 м. Третий шаг заключался в том, чтобы использовать вакуумопровод между источником излучения и детектором, без размещения последних в вакууме. Это оказалось возможным благодаря тому, что детектор можно было поднести почти вплотную к вакуумопроводу, и столб воздуха всего лишь в ~ 25 см уже не играл такой существенной роли.

После проведенных оценок в ИКИ АН СССР был разработан и изготовлен специализированный стенд для калибровки телескопа АРТ-П. Основной частью стенда является вакуумопровод из нержавеющей стали 6 мм толщиной, состоящий из трех секций по 5 м каждая и диаметром 60 см (рис. 20а). Входное окно имеет диаметр 1 см, выходное 40 см. Окна

Pic 20



изготовлены из майлара толщиной 100 мкм. Для компенсации давления атмосферы на выходное окно используется поддерживающая решетка из нержавеющей стали (рис. 20б). Система откачки обеспечивает внутренне давление не более 0.1 мм.рт.ст. Для того, чтобы избежать влияния рассеянного на внутренних стенках трубы излучения внутри вакуумопровода размещены две медные диафрагмы толщиной 6 мм с диаметром отверстий 13 см и 26 см на расстоянии 5 м и 10 м от входного окна соответственно.

Для трехкоординатного перемещения детектора используется ходовая часть фрезерного станка, обеспечивающая точность ≤ 50 мкм по каждой из осей (рис. 20в). Поворот детектора обеспечивался только в горизонтальной плоскости, с помощью оптической делительной головки ОДГ-5 с точностью 5 секунд дуги. Телескоп АРТ-П обездвиживался с помощью специального механизма.

Для генерации потока рентгеновских квантов используется серийная установка РЕИС-И с набором рентгеновских трубок БС-1 (мишени - Cr, Cu, Re, Mo) (рис. 20г) либо радиоактивные изотопы Fe-55, Cd-109, Am-241.

Для привязки координатных осей телескопа использовались четыре реперных устройства, расположенные на каждом модуле, одна пара соответствовала оси Z, другая - оси Y. Ось X выставлялась по совмещению первичного и отраженного лазерного пучка от зеркала, установленного на модуле АРТ-П на площадке с классной поверхностью, нормаль к которой соответствовала оси X. База для лазерного пучка была 30 м, при этом достигалась точность выставления осей порядка 1'. Привязка координатных осей маски к осям телескопа проводилась по совмещению реперных устройств маски и телескопа с помощью двух автоколлимационных теодолитов.

На стенде последовательно проводилась калибровка всех четырех

модулей АРТ-П.

Наземная калибровка.

Энергетическая калибровка. Энергия и интенсивность линий, использовавшихся при исследовании зависимости энергетического разрешения детектора от энергии падающего фотона приведены в табл. 1.

Накопление данных проводилось по программе «Поток фотонов», предназначенной для наблюдения космических источников без сжатия информации. В этом режиме для каждого фотона записывается время, энергия и координаты зарегистрированного события, на один фотон отводится 5 байт. Энергетический диапазон разбит линейно на 1024 канала так, чтобы код 40 соответствовал 4 кэВ, а код 1000 - 100 кэВ.

На рис. 21а-г представлены характерные энергетические спектры, полученные на одном из модулей АРТ-П: два спектра от рентгеновских трубок Cr (рис. 21а) и Re (рис. 21б) и два спектра от радиоактивных изотопов Cd^{109} (рис. 21в) и Am^{241} (рис. 21г).

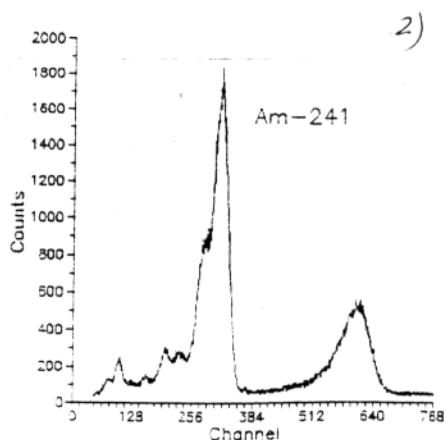
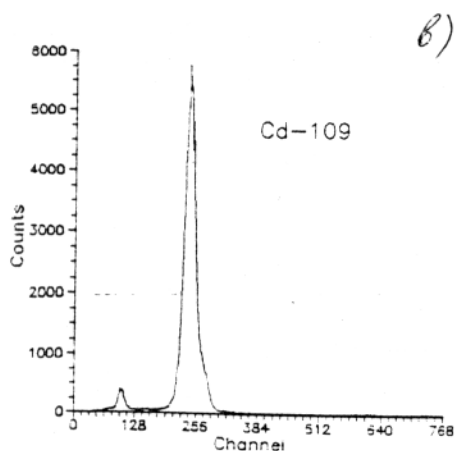
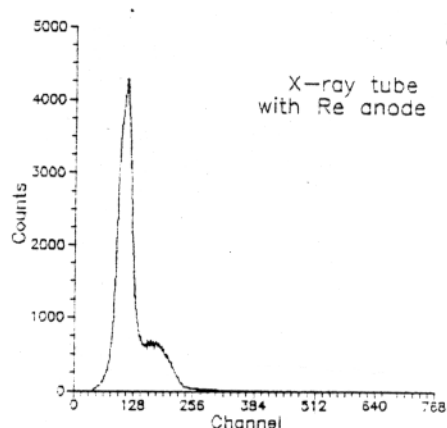
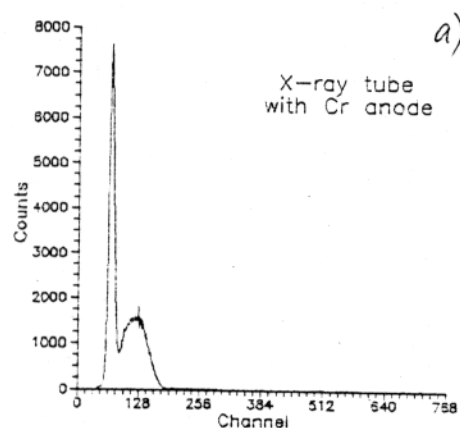


Рис. 21

На спектрах от рентгеновских трубок хорошо видны линии характеристического излучения на фоне непрерывного спектра тормозного излучения электронов. В спектрах, полученных от Cd^{109} (22.1, 24.9 кэВ) и Am^{241} , (59.6, 13, 17, 20 кэВ) помимо линий, соответствующих этим изотопам, в районе сотого канала наблюдается пик флуоресцентного переизлучения медного коллиматора на энергии 8 кэВ. В спектре Am^{241} присутствуют пики вылета флуоресцентных квантов ксенона K_{α} (30 кэВ) и K_{β} (26 кэВ).

Таблица 1

Радиоактивный изотоп или материал анода	Энергия, кэВ	Относительна интенсивность, %
Am-241	26.34	2.35
	59.54	34.94
	13.93	23.88
	17.51	29.85
	20.98	7.15
Cd-109	22.16	52.11
	21.99	27.63
	24.94	9.38
	25.46	2.63
	24.91	4.81
	88.03	3.44
Fe-55	5.898	58.0
	5.888	29.0
	6.49	13.0
Re	8.651	51.0
	8.586	6.0
	10.01	22.5
	10.272	11.0
	10.261	
	10.159	3.0
	11.685	6.4
Cr	5.415	59.38
	5.406	29.99
	5.947	10.69
Mo	17.48	55.87
	17.37	29.33
	19.99	14.8
	19.61	
Cu	8.048	59.03
	8.028	29.93
	8.91	11.04

При обработке спектров использовалась программа, на базе модифицированного симплекс-метода (Химмельблау 1976 [46]), позволяющая находить местоположение максимума, полную ширину на полувысоте и интенсивность одного или двух пиков одновременно. Для этого спектр визуально разбивался на диапазоны, в пределах которых находилось не более 2-х основных линий данного изотопа. Каждый пик аппроксимировался одним или суммой 2-х гауссианов и линейным или квадратичным фоном. Модельный спектр отсчетов описывался выражением

$$N(i) = 0,937 \left(\sum_{j=1}^2 \frac{INT_j}{FW_j} \exp(-2,785 \left[\frac{i-MAX_j}{FW_j} \right]^2) \right) + a_0 + a_1 i + a_2 i^2,$$

где INT - интенсивность, FW - полная ширина на полувысоте, MAX - положение максимума пика, $N(i)$ - число отсчетов в канале, i - номер канала, j - номер пика, a_0, a_1, a_2 - коэффициенты.

Для спектров от рентгеновской трубки производилось вычитание тормозного спектра, который аппроксимировался полиномом 2-й степени. Часть линий аппроксимировалась одним гауссианом, т.к. разрешение детектора не позволяет достоверно разделить линии излучения. В этих случаях значение энергии принималось равным средневзвешенному (с учетом интенсивности) по энергиям составляющих линий.

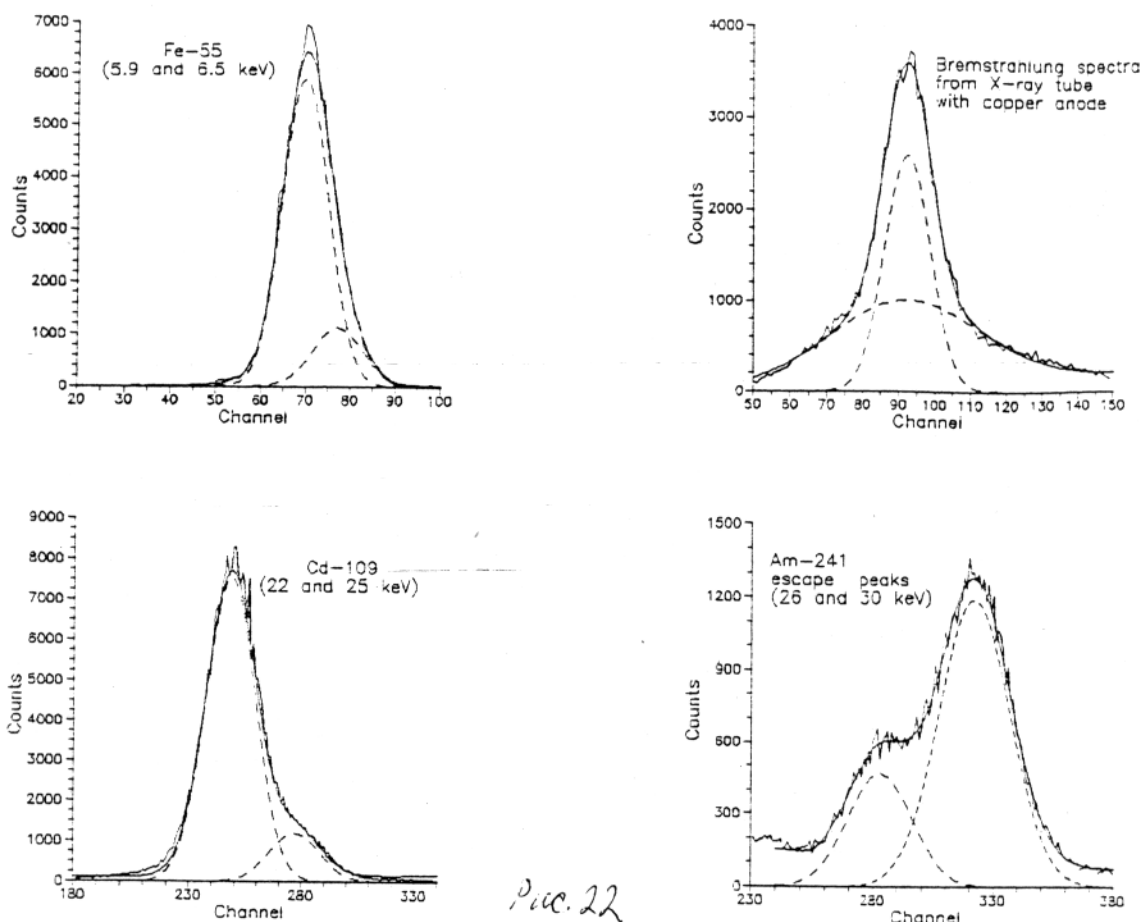
В процессе пошаговой подгонки минимизировался функционал Ψ

$$\Psi = N^{-1} \sum_{i=1}^N \left[\frac{SG(i) - N(i)}{W(i)} \right]^2,$$

где N - число энергетических каналов, $SG(i)$ - спектр отсчетов,глаженный по четырем точкам квадратичным полиномом, $N(i)$ - модельный спектр отсчетов, $W(i)$ - весовые коэффициенты. На рис.22 представлена часть результатов обработки энергетических спектров.

Симплекс-метод не использует производных и поэтому не дает ошибок параметров. Погрешности определялись в процедуре поиска диапазона изменения параметра в пределах доверительного интервала

функционала Ψ , соответствующего ошибке, равной одному стандартному отклонению (Лэмптон 1976 [47]).



По экспериментальным данным, для каждого модуля методом наименьших квадратов по 12 точкам была построена калибровочная линейная зависимость $K = A \cdot E + B$, (3), где E - энергия кванта, K - амплитудный канал (рис. 23). В таблице 2 приведены коэффициенты A и B для всех модулей АРТ-П.

Таблица 2

Модуль	I	II	III	IV
A	9.59	10.19	10.40	9.85
B	12.56	13.63	14.63	2.12

На рис. 24 показана зависимость энергетического разрешения детектора от энергии с учетом калибровочной характеристики. Данные аппроксимировались двумя функциями. Первая функция соответствовала

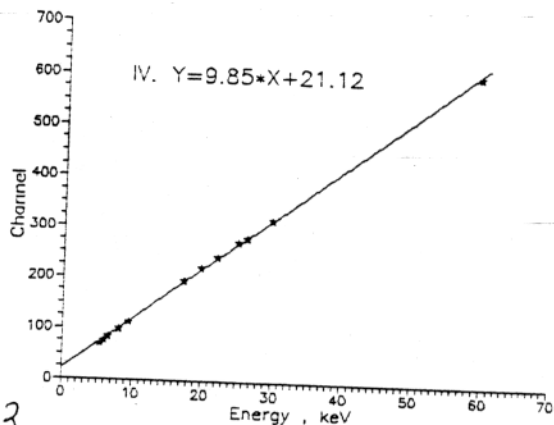
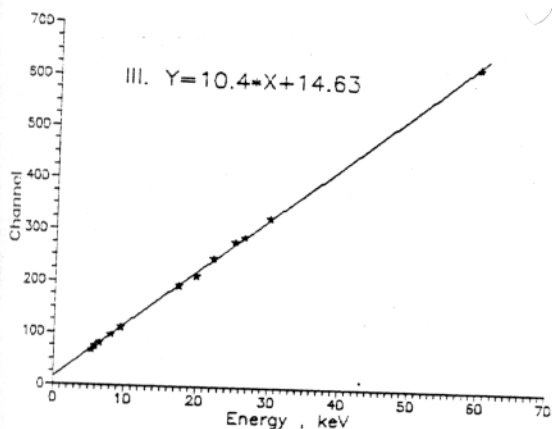
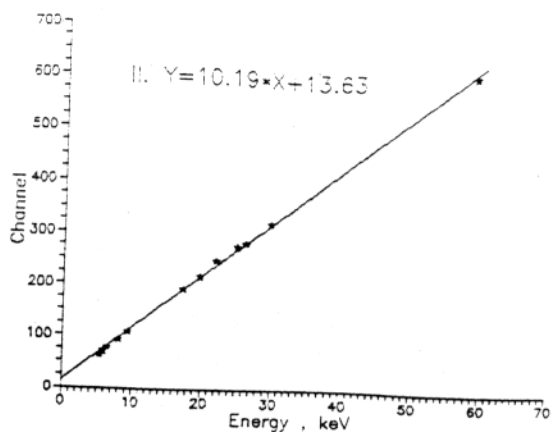
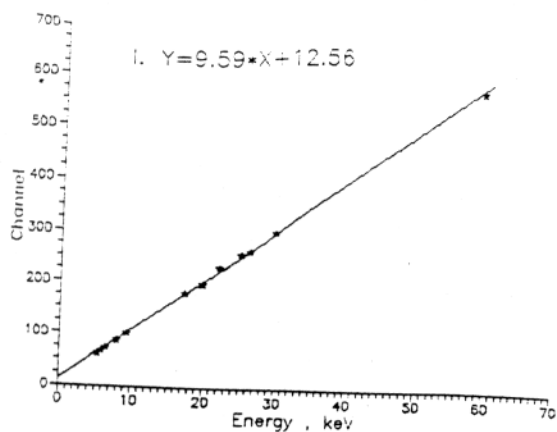


Рис. 23

классическому представлению зависимости энергетического разрешения пропорциональных камер от энергии

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = K \cdot E^{-1/2} + L,$$

во второй функции добавлен дополнительный член $\sim E^{1/2}$.

$$\eta = A \cdot E^{-1/2} + B + C \cdot E^{1/2},$$

где E - энергия, ΔE - полная ширина распределения на полувысоте, K , L , A , B , C - коэффициенты, которые определялись методом наименьших квадратов по 6 экспериментальным точкам. Полученные данные приведены в таблице 3 и 4. Следует отметить, что вторая функция лучше описывает экспериментальные данные. На рис. 24 кривые отвечают второй модели.

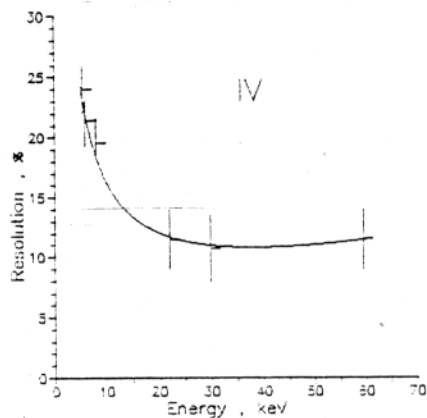
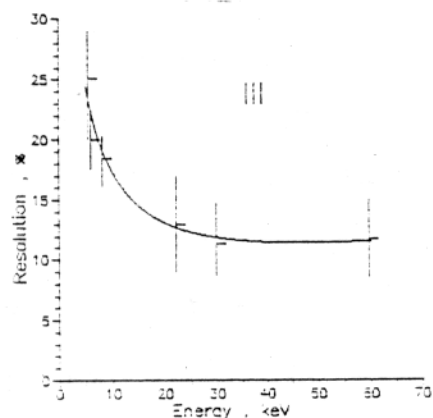
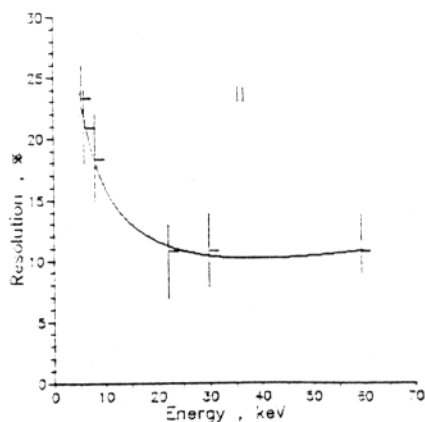
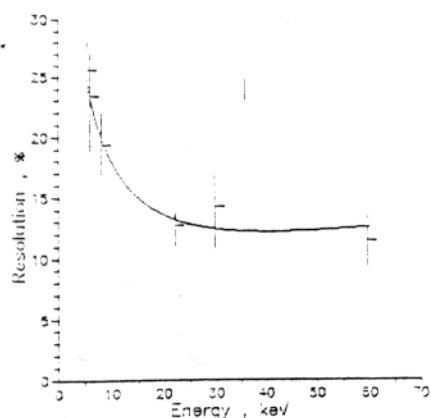


Рис 24

Таблица 3

Модуль	I	II	III	IV
K	47.24	46.77	38.54	40.98
L	3.52	1.71	4.91	3.

Таблица 4

Модуль	I	II	III	IV
A	40.78	74.01	64.43	74.01
B	-9.97	-13.53	-7.45	-13.26
C	1.70	1.93	1.37	1 9

Для каждого детектора была получена калибровочная зависимость энергия-канал, которая хорошо списывалась прямой, что позволило провести коррекцию положения максимумов пиков и определить разрешение прибора как функцию энергии рентгеновских квантов.

Эти данные позволили решить задачу по построению главной диагонали калибровочной матрицы детекторов, строки которой

нормированы на вектор эффективности, т.е. функцию $R(E', E)$. Для построения боковой диагонали, связанной с пиком вылета ксенона и переизлучением коллиматора (флуоресцентный квант меди 8 кэВ), необходимы были данные по эффективности детектора $\epsilon(E)$. Эту задачу предполагалось решать при помощи математической модели детектора и данных наблюдений известного источника в Крабовидной туманности.

Координатная калибровка телескопа. При исследовании координатного разрешения детектора основная цель состояла в измерении контрастности изображения тени маски на детекторе в зависимости от энергии. Для иллюстрации возможностей детектора на рис. 25 показано изображение лезвия бритвы, засветка проводилась рениевой трубкой ($Re - 8.6$ и 10 кэВ), поле 50×50 мм, размер одного пикселя 0.5×0.5 мм, а на рис. 26 - изображение одного мотива маски 172×164 элемента.

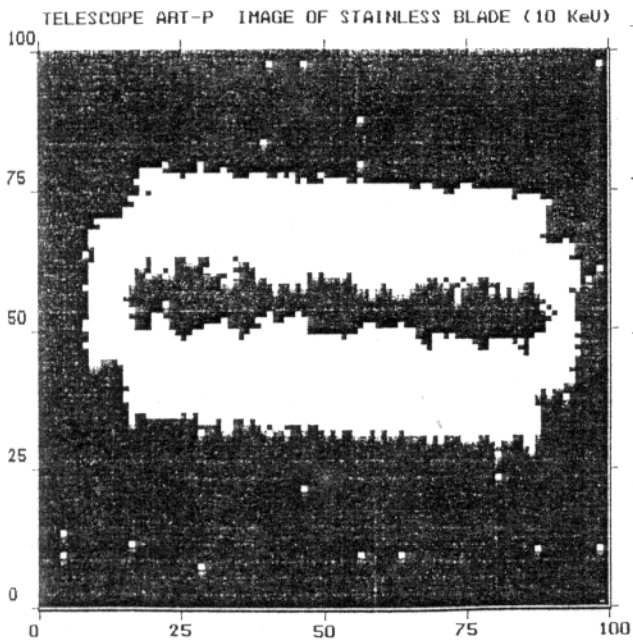


Рис. 25

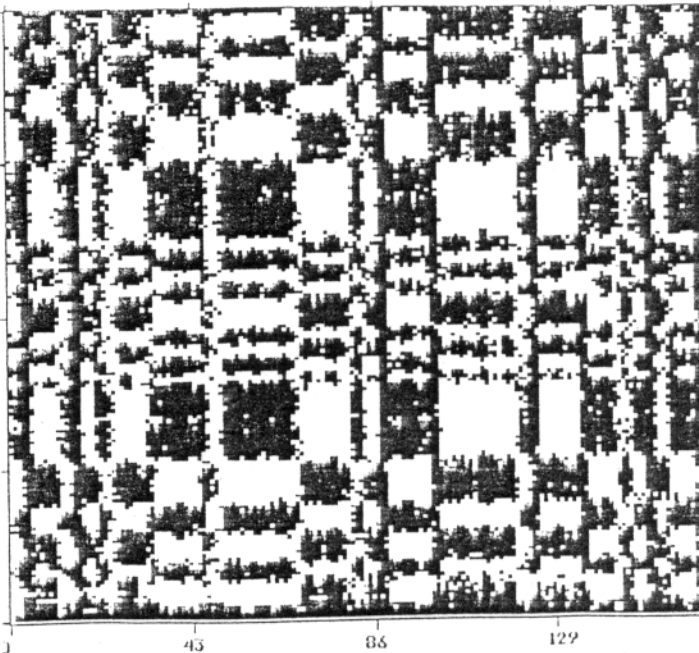
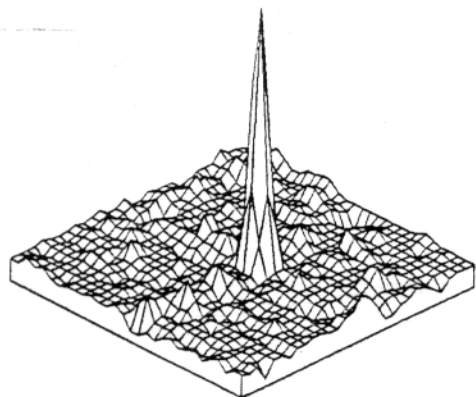
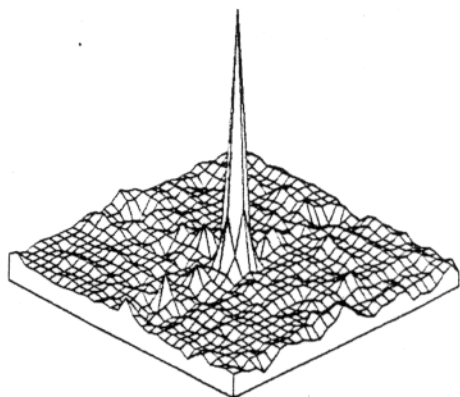


Рис. 26

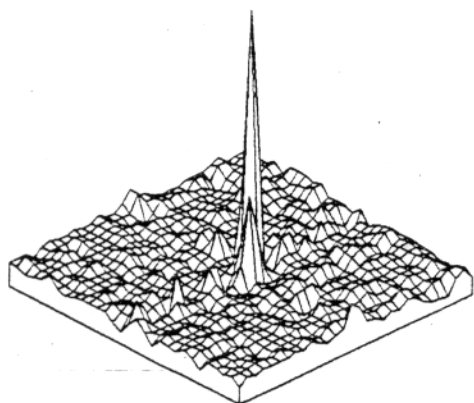
На рис. 27 показан результат восстановления изображения, полученного при засветке только одного мотива маски фотонами разной энергии. Расходимость пучка составляла $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ рад. Размер приведенной зоны 30×30 элементов (полное поле зрения 172×164 элемента). В восстановленном изображении наблюдаются провалы и выбросы, превышающие статистически значимые флуктуации фона. Это объясняется влиянием анодных проволок и расходимостью пучка, которые приводят к нарушению свойств сбалансированности кросс-корреляционной функции.



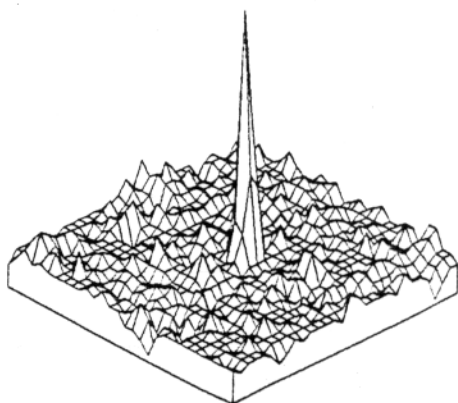
X-ray tube Cr (5.4 keV)



X-ray tube Re (10 and 11 keV)



Cd-109 (22.1 keV)



Am-241 escape peak (30 keV)

Рис. 27

Фотон, прошедший прозрачный элемент маски, из-за пространственного разрешения детектора имеет вероятность зарегистрироваться в непрозрачной зоне. На рис. 28 показана измеренная контрастность изображения мотива маски в зависимости от энергии. Под контрастностью понимается величина

$$Y = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-},$$

где I_+ - количество событий, зарегистрированных в зоне прозрачных элементов, а I_- - количество событий, зарегистрированных в зоне непрозрачных элементов маски. В идеальном случае $Y = 1$. При оценке величины контрастности на энергии 30 кэВ, соответствующей пику вылета от линии 59.6 кэВ изотопа Ам-241, учитывалась 12% прозрачность маски. На малых энергиях падение контрастности объясняется ухудшением координатного разрешения из-за малой величины сигнала, а на больших энергиях начинает сказываться пробег фотоэлектронов и прозрачность маски.

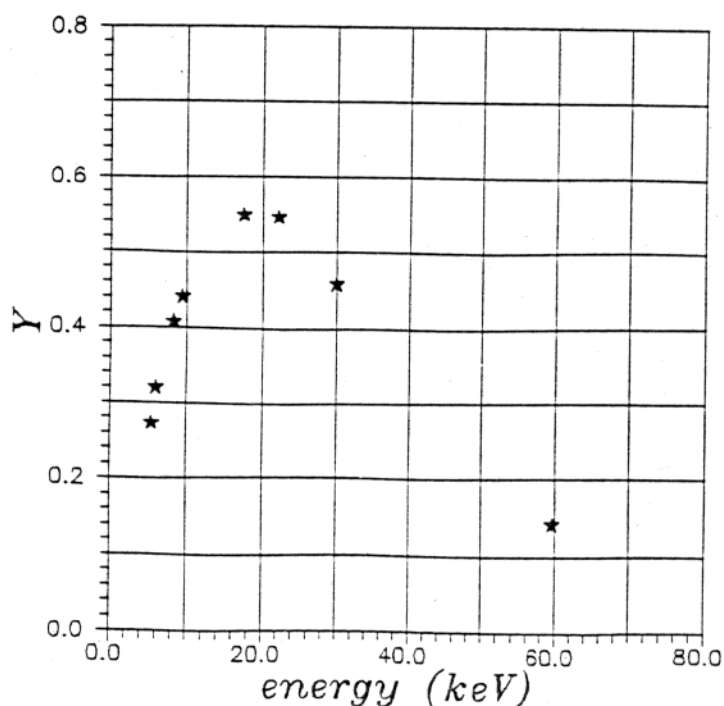


Рис. 28

Коллиматор. Диаграмма направленности коллиматора по координатам Z и Y исследовалась с помощью двух изотопов Cd-109 (22.1 кэВ) и Am-241 (59.6 кэВ). Модуль поворачивали в горизонтальной плоскости с шагом 6' в пределах $-3^\circ \div +3^\circ$. Засветка проводилась по всей площади детектора при снятой маске. На рис.29 представлена для примера диаграмма направленности коллиматора по двум осям Y и Z измеренная на энергиях 22.1 и 59.6 кэВ соответственно. Экспериментальные данные хорошо согласуются с моделью коллиматора с полем зрения $1.8^\circ \times 1.8^\circ$ (FWHM). небольшое расхождение объясняется расхожимостью пучка рентгеновских квантов ~ 0.02 рад. На рисунке видно, что у данного модуля ось Y коллиматора смещена относительно оси телескопа на ~ 6 мин. дуги. Коллиматор непрозрачен для рентгеновских квантов вплоть до 60 кэВ.

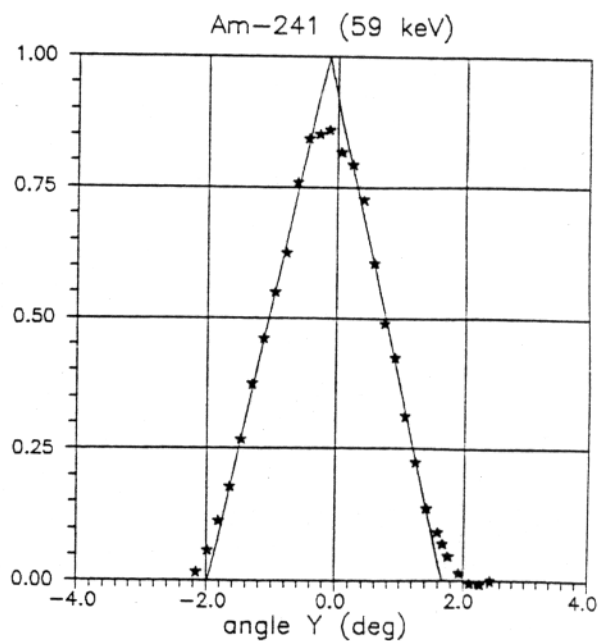
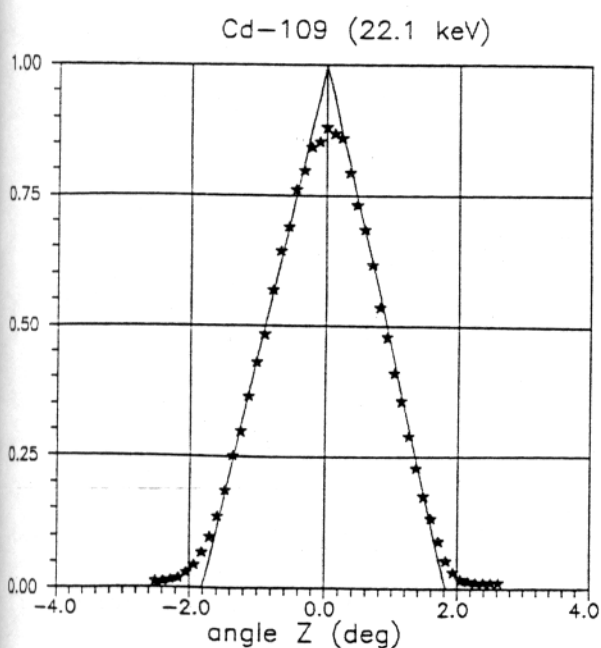


Рис.29

Полетная калибровка.

Первое же действие после вывода телескопа на орбиту заключалось в проверке энергетических и координатных каналов МПК. Предполагалось, что разрешение может несколько ухудшиться из-за сильной вибрации на этапе выведения, которая могла сказаться на натяжении проволок. Последнее обстоятельство, например, вызвало ухудшение энергетического разрешения телескопа XRT с 13% на линии 22.1 кэВ до 23%. Вторая проблема заключалась в эффективности логики отбора полезных событий в условиях высокого фона заряженных частиц.

К счастью, энергетическое и координатное разрешение МПК практически не изменилось. На рис. 30 показан для примера калибровочный энергетический спектр первого слоя, полученный через 25 дней после запуска.

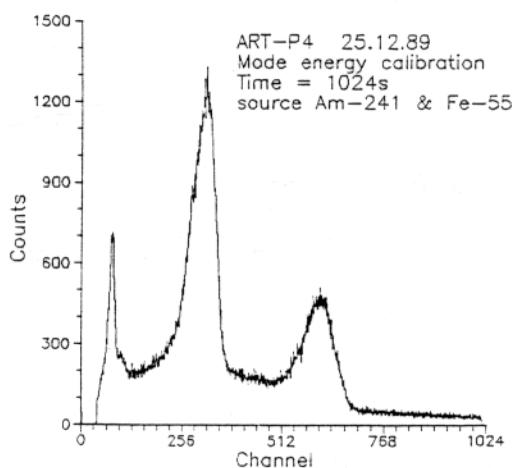


рис. 30

После проведения плановых работ по подготовке обсерватории «Гранат» к выполнению научной программы с февраля 1990 г. начались регулярные сеансы наблюдений рентгеновских источников. Одним из главных источников в списке мишеней был яркий рентгеновский источник в Крабовидной туманности - Crab Nebular. По нему предполагалось уточнить модельную матрицу отклика детекторов. Предполагалось, что спектр источника известен и описывается степенным законом

$A \cdot E^\alpha \cdot \exp(-\sigma N_H)$. За основу были взяты данные наблюдения Crab Nebular газовыми сцинтилляционными счетчиками спутника Тенма, в которых были получены следующие значения параметров $A = 9.36 \text{ фот/с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{кэВ}$; $\alpha = -2.08$; $N_H = 3.3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ (Кояма и др. 1984 [48]).

Матрица отклика МПК имеет достаточно простой диагональный вид в диапазоне энергий от 3 кэВ до К - края (34.5 кэВ). Выше К - края появляется вторая диагональ, связанная с вылетом К - квантов ксенона из МПК. Математическая модель детектора учитывала взаимодействие фотонов с веществом детектора, вылет L и K квантов, режекцию полезных событий.

В модель закладывались данные по зависимости энергетического разрешения от энергии, полученные в ходе наземной калибровки телескопа АРТ-П, характеристика преобразования энергия - код, уход которой проверялся в полёте по линиям 5.9, 30 и 59.6 кэВ. В функцию отклика закладывался не чистый гауссиан, а гауссиан с хвостом простирающимся в область малых энергий, который интерпретируется как частичная потеря первичных электронов, образованных фотоэлектроном, при дрейфе облака в газе. Для этого использовалась полуимприческая формула, предложенная Иное (Иное и др. 1978 [49]) для ГСПС:

$$R(E', E) = \int_0^{\infty} G(E', E'') \cdot H(E, E'') \cdot dE'',$$

где

$$H(E, E'') = \begin{cases} k \cdot (1 - E'')^{k-1} & (E'' \leq E), \\ 0 & (E'' \geq E), \end{cases}$$

где $G(E', E'')$ - распределение Гаусса. В модели учитывался химический состав входного окна, наличие несколько пленок алюминизированного майлара толщиной несколько микрон, давление и состав газовой смеси, пространственное разрешение детектора, прозрачность - маски и коллиматора.

Модель имела достаточно хорошее согласие с экспериментальными данными и даже позволила обнаружить неучтённую примесь тяжелых

элементов в бериллиевом окне. После запроса изготовителей окна и уточнения химического состава сплава разногласия между моделью и экспериментальными данными в эффективности регистрации в районе 4-5 кэВ были устранены.

На рис. 31 показана для примера функция отклика детектора для разных энергий, на рис. 32 - эффективная площадь, На рис. 33 - спектр отсчетов от источника Crab Nebular (закрашенные кружки) и свертка спектра фотонов с матрицей отклика детектора (гистограмма). Ниже приведена разница между моделью и экспериментальными данными в единицах стандартного отклонения.

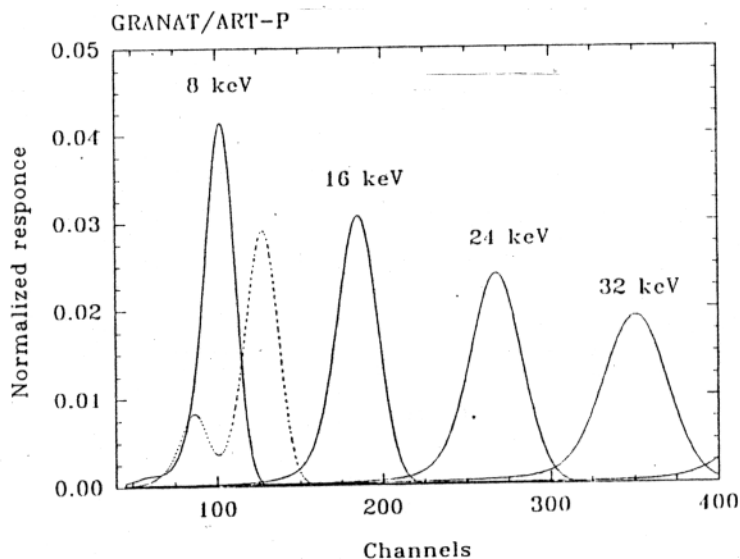


Рис. 31

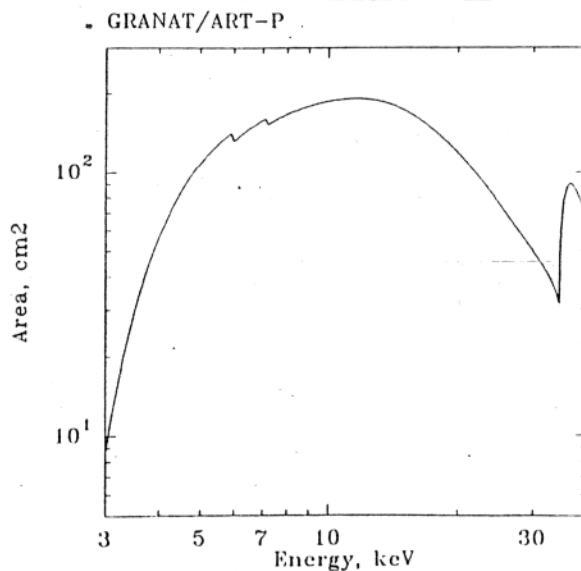


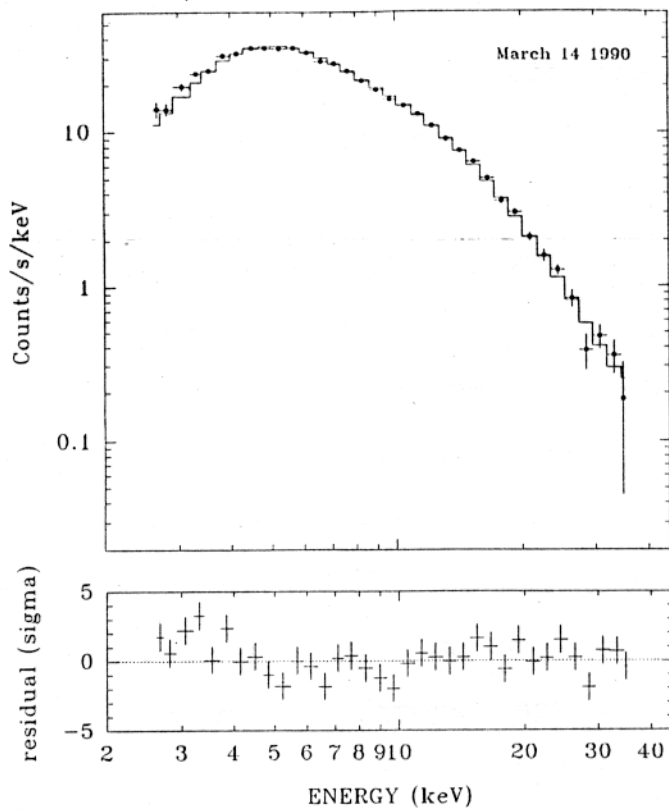
Рис. 32

CRAB NEBULA

GRANAT/ART-P

GRANAT team, IKI

March 14 1990



Puc. 33

Построение рентгеновской карты области
Галактического центра телескопом АРТ-П.

В 1979 г. на обсерватории EINSTEIN телескопом с зеркалом косого падения была получена первая картинка области Галактического центра в рентгеновском диапазоне энергий 0.5-4.5 кэВ. В зоне $\sim 1.0^\circ \times 1.0^\circ$ было обнаружено двенадцать рентгеновских источников (рис. 34), включая A1742-294 на краю поля зрения. (Ватсон и др. 1981 [10]).

В 1985 году в двух полетах МТКК ШАТТЛ, с разницей в несколько недель, наблюдалась область Галактического центра двумя приборами SPARTAN 1 (Каваи и др. 1988 [12]) и XRT (Скиннер и др. 1987 [13]).

SPARTAN 1, построенный на базе двух пропорциональных счетчиков, с узким щелевым коллиматором $5' \times 3'$ покрывал диапазон энергий от 1 до 15 кэВ. После многократного сканирования в разных направлениях узкой щелью коллиматора была восстановлена картинка Галактического центра (рис. 35), содержащая четыре ярких источника: три уже известных - A1742-294, 1E1740.7-2942, 1E1743.1-2843 и один новый - SP1744.2-2959, всего лишь в пять раз слабее (в диапазоне энергий 2-10 кэВ) яркого источника A1742-294.

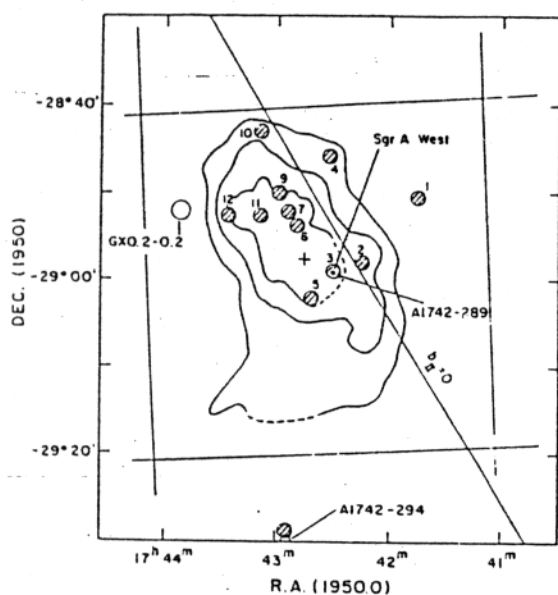


Рис. 34

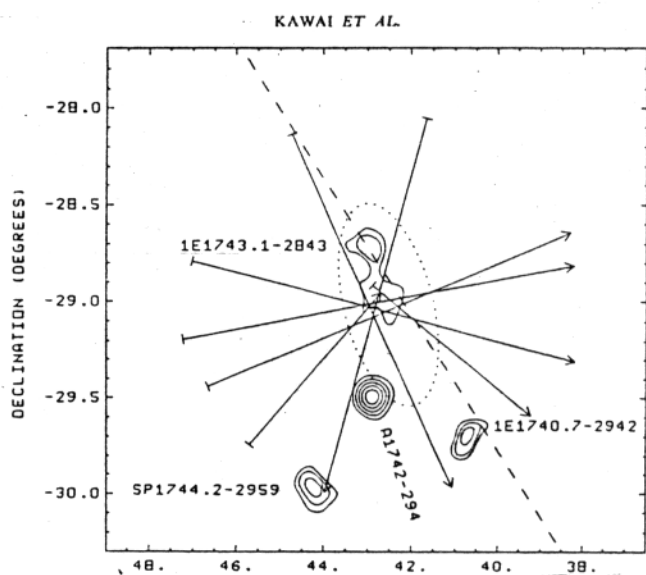


Рис. 35

Через шесть недель после завершения научной программы SPARTAN 1 область Галактического центра наблюдал рентгеновский телескоп XRT, который построил две картинки размером $\sim 6^\circ \times 6^\circ$ с «грубым» ~ 12 мин. дуги (рис. 36) и «тонким» ~ 3 мин. дуги. (рис. 37) разрешением в диапазоне энергий 3-30 кэВ. Было найдено 9 источников, четыре из которых были ранее неизвестны.

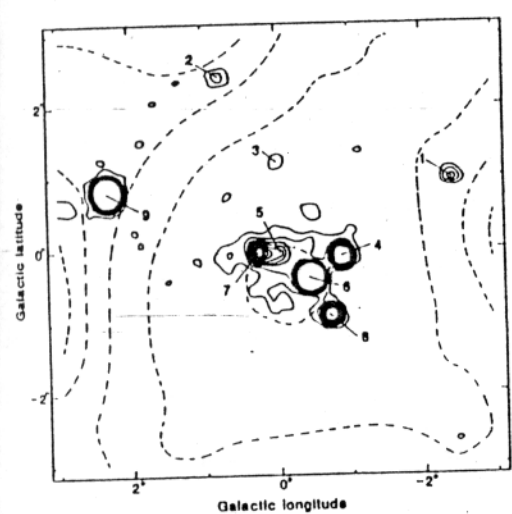


Рис. 36

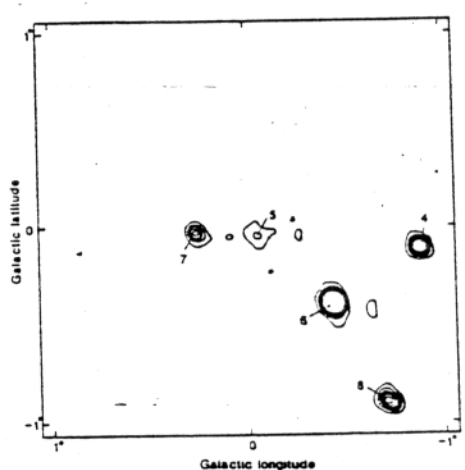


Рис. 37

Весной 1990 года, астрономическим рентгеновским телескопом ART-П обсерватории «Гранат» была получена первая картинка области Галактического центра в диапазоне энергий 3-30 кэВ. В дальнейшем, примерно с интервалом в полгода, ещё трижды обсерватория «Гранат» исследовала эту область. На рис. 38 показан обзор телескопом ART-П источников Галактической плоскости, проведенный в 1990г, квадратики соответствуют полю зрения телескопа.

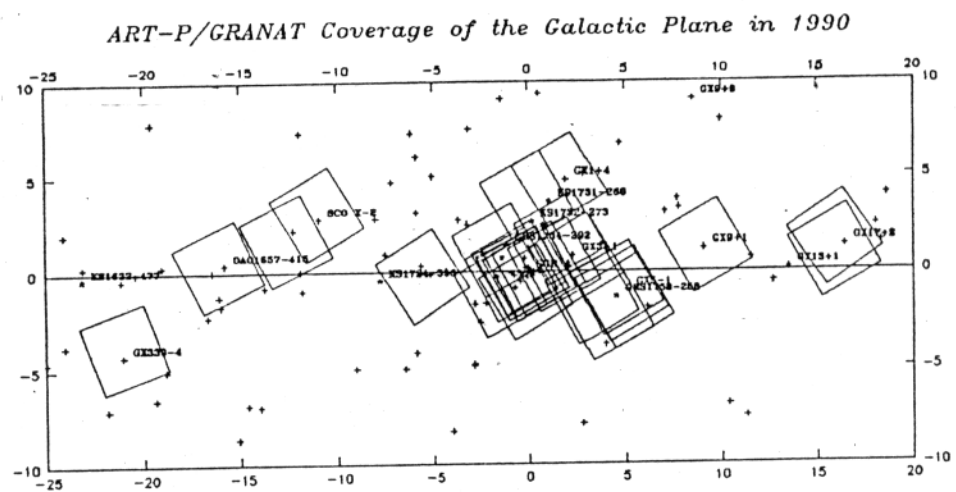


Рис. 38

Зона Галактического центра была доступна для наблюдений обсерваторией «Гранат» раз в полгода на непродолжительное время порядка месяца. Эти ограничения связаны с расположением опорных звёзд (Сириус, Канопус, Капелла, Ригель, Арктур, Вега, ...) для звёздного датчика системы ориентации аппарата и с разворотом плоскости солнечных панелей относительно направления на Солнце в пределах $\pm 20^\circ$.

В начале миссии существовала проблема с французским звёздным датчиком, предназначенным для определения мгновенной ориентации аппарата. В каждом сеансе, сразу же после включения, звёздный датчик картографирует в течение нескольких секунд зону $\sim 4^\circ \times 4^\circ$ и запоминает расположение и величину звёзд до 6^m (не более 30 шт.), выбирает две звёзды равной величины и отслеживает по ним каждые четыре секунды смещение и поворот осей аппарата относительно первоначального положения. Необходимым условием работы датчика является правильное задание кванта времени на считывание ПЗС-матрицы. Величину кванта задавали каждый раз в начале сеанса. Первое время неправильно учитывалась чувствительность датчика, что приводило к прекращению работы последнего и, следовательно, к потере сеанса, поскольку каждый фотон, зарегистрированный в АРТ-П, должен корректироваться на текущую ориентацию аппарата, в противном случае получается дефокусированное изображение, т. е. точечный источник размазывается в пятно $1^\circ \times 1^\circ$.

Полезное время наблюдения телескопом АРТ-П определялось размером выделяемой бортовой памяти на данный сеанс (максимальный ~ 14 Мбайт) и интенсивностью источника (источников). При наблюдении области Галактического центра использовалась программа «Поток фотонов». Это позволяло проводить точную локализацию и спектрометрию источников и регистрировать рентгеновские всплески. В этой программе

по накоплению в модуле $\sim 10^4$ фотонов наблюдение прерывается на 25 либо 11 секунд для передачи информации в бортовую память (UGB или «Старт»), это происходило примерно раз в 150-170 с. При совместной работе с гамма-телескопом «Сигма» наблюдения прерывались каждый час на ~ 12 минут для передачи информации из телескопа «Сигма» в долговременную память. «Мёртвое» время детектора АРТ-П составляло ~ 580 мкс при регистрации полезного события и ~ 50 мкс при регистрации заряженной частицы. В таблице 5 приведены даты сеансов, номера используемых модулей и полезное время наблюдений.

В таблице указаны только те сеансы, в которых телескоп АРТ-П захватывал своим полем зрения область размером $2^\circ \times 2^\circ$ вокруг центра Галактики.

Таблица 5

1990г	Время, с	Модуль	1991г	Время, с	Модуль
24. III	2538	IV	22. II	16572	III
24. III	8546	I	23. II	17023	III
8. IV	9070	I	26. II	10679	III
:	:	:	27. II	16854	III
9. IX	37749	IV	14. III	18747	III
11. IX	2997	IV	22. III	19893	III
13. IX	29863	IV	28. III	16004	III
29. IX	4305	IV	1. IV	20550	III
5. X	16670	IV	10. IV	19371	III
6. X	39921	IV	:	:	:
9. X	13361	IV	:	:	:
10. X	14360	IV	29. VIII	18275	III
11. X	29563	IV	3. IX	11493	III
13. X	36801	IV	7. IX	4953	III
14. X	13269	IV	19. IX	17009	III
18. X	7135	IV	23. IX	15707	III
			14. X	7170	III
			17. X	13937	III
			18. X	23173	III
			19. X	65182	III

Весна 1990 г.

Наблюдения Центра Галактики были выполнены телескопом АРТ-П 24 марта и 8 апреля 1990 г. В центральной области было обнаружено шесть рентгеновских источников: Sgr A, 1E1740.7-2942, A1742-2942, 1E1743.1-2843, SLX1744-299 и GRS1741.7-2853. На рис. 39 приведена картинка по сумме двух сеансов, размером $2.3^\circ \times 2.3^\circ$, диапазон

энергий 3-17 кэВ. Контуры соответствуют статистической значимости детектирования источника на уровне 3.5, 5, 6.5, ... стандартных отклонений. Пиксел изображения соответствует 1.3 угл. мин.

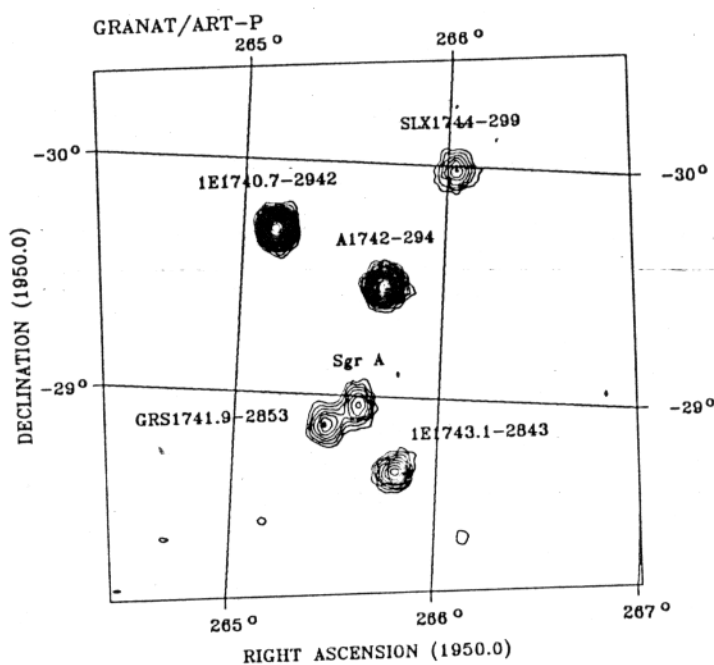


Рис. 39

Возможность обнаружения источника в каждом сеансе определяется не только его яркостью, но и его положением внутри поля зрения телескопа. Это связано с неодинаковой чувствительностью телескопа внутри поля зрения из-за разного пропускания коллиматора и хождением оси аппарата во время сеанса в пределах ± 30 угл. мин. Изображение, приведённое на рис. 39 не скорректировано на чувствительность телескопа.

Sgr A. Согласно данным ART-P, положение этого рентгеновского источника с точностью ~ 1 угл. мин. совпадает с положением радиоисточника Sgr A West, т.е. с ядром Галактики. Распределение интенсивности на изображении, полученном ART-P, хорошо согласуется с откликом телескопа на точечный источник.

1E1740.7-2942. Скиннер и др. 1987 [13] первыми указали на то,

что основная часть рентгеновского излучения из зоны Галактического центра на энергиях выше ~20 кэВ может быть связана с источником 1E1740.7-2942, расположенным в ~50 угл. мин. от центра Галактики. Данные АРТ-П подтверждают этот вывод и показывают, что этот источник является ярчайшим уже на энергиях выше 15 кэВ.

A1742-294. В области $2^\circ \times 2^\circ$ в группе рентгеновских источников вокруг центра Галактики доминирует источник A1742-294, отстоящий на ~30 мин. дуги от Sgr A. Скиннер и др. обнаружили, что в диапазоне энергий 4.25-15 кэВ его доля составляет ~37% от общего потока, излучаемого центральной областью радиусом $\sim 1.3^\circ$. Светимость источника была в два раза ниже, чем во время наблюдений «Spacelab-2» в 1985 г. (Скиннер и др. 1987 [13]).

GRS1741.9-2853 (Granat Source). Неизвестный рентгеновский источник, отстоящий на ~10 мин. дуги от ядра Галактики, наблюдался в обоих сеансах 24 марта и 8 апреля. Сравнение светимости источника, зафиксированной телескопом АРТ-П ($1.6 \cdot 10^{36}$ эрг/с, 4-30 кэВ) с данными «Spacelab-2» показывает, что источник был по крайней мере в 10 раз слабее в 1985 г.: верхний предел на светимость в диапазоне 3-30 кэВ равен $1.5 \cdot 10^{35}$ эрг/с (3σ верхний предел, полученный из 1σ ошибки на светимость ближайшего источника Sgr A West).

SLX1744-299/SLX1744-300. Эта область неба содержит два источника в пределах углового разрешения телескопа. - SLX1744-299 и SLX1744-300 (Паттерсон и др. 1989 [26], Скиннер и др. 1990 [50]). Угловое расстояние между ними - 3.8 угл. мин., т.е. меньше номинального углового разрешения телескопа (ширина на полувисоте 5 угл. мин.). Значения, приведенные в таблице 6, относятся к полному потоку из области неба, содержащей оба источника.

1E1743.1-2843. Этот источник был открыт и локализован орбитальной обсерваторией им. Эйнштейна (Ватсон и др. 1981 [10]) и в дальнейшем наблюдался миссиями «Spacelab-2» (Скиннер и др. 1987

[13]) и «Spartan 1» (Каваи и др. 1988 [12]). Согласно данным АРТ-П, этот источник характеризуется наибольшим низкочастотным поглощением $N_H \sim 3 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$, что было впервые обнаружено во время наблюдений прибором «Spartan 1» (Каваи и др., 1988 [12]). Это значение в 2-4 раза превосходит значение, полученное для остальных источников, наблюдавшихся телескопом в зоне центра Галактики. Во время наблюдений АРТ-П светимость источника в диапазоне 4-20 кэВ изменялась от $(2.0 \pm 0.2) \cdot 10^{36} \text{ эрг/с}$ 24 марта 1990 г. до $(1.4 \pm 0.2) \cdot 10^{36} \text{ эрг/с}$ 8 апреля 1990 г. Усредненная светимость (4-20 кэВ) составила $(1.7 \pm 0.2) \cdot 10^{36} \text{ эрг/с}$, что в ~2 раза меньше светимости источника, зафиксированной во время наблюдений «Spacelab-2» в 1985 г. (Скиннер и др. 1987 [13]).

Среди шести источников, наблюдаемых телескопом АРТ-П в стандартном рентгеновском диапазоне 4-30 кэВ, четыре, а именно: GRS1741.9-2853, A1742-294, SLX1744-299/SLX1744-300 и 1E1743.1-2843 имеют достаточно мягкие спектры, температура, соответствующая аппроксимации тормозным излучением, лежит в диапазоне 6-10 кэВ (наклон спектра в диапазоне 4-20 кэВ $\alpha \sim 2.5-3$). Sgr A West - источник, ближайший к Галактическому центру, имеет более жесткий спектр, с температурой ~20 кэВ ($\alpha \sim 1.6$). Единственный источник, наблюдаемый до энергий ~300 кэВ, кандидат в черные дыры - 1E1740.7-2942 (Кук и др. 1990 [51], Мандру и др. 1990 [52], Сюняев и др. 1991 [53]).

Рентгеновские потоки и светимость источников, усредненные за два дня наблюдений приведены в таблице 6.

Таблица 6

Название источника	Поток у Земли [10^{-2} фот/с/см ²] ⁽¹⁾		Светимость ⁽²⁾ [10^{36} эрг/с]	
	4-20 кэВ	20-30 кэВ	4-20 кэВ	20-30 кэВ
Sgr A	1.00±0.08	0.05 ⁽³⁾	1.30±0.08	0.2 ⁽³⁾
GRS1741.9-2853	1.10±0.08	0.05 ⁽³⁾	1.27±0.09	0.2 ⁽³⁾
1E1740.7-2942	5.30±0.30	0.70±0.23	6.80±0.35	2.3±0.8
SLX1744-299/ SLX1744-300 ⁽⁴⁾	3.50±0.30	0.2 ⁽³⁾	3.20±0.35	0.8 ⁽³⁾
A1742-294	3.80±0.17	0.26±0.12	4.40±0.20	0.9±0.4
1E1743.1-2843	1.50±0.12	0.08 ⁽³⁾	1.70±0.13	0.3 ⁽³⁾

(1) Усредненные за наблюдения 24 марта и 8 апреля

(2) Расстояние до источника предполагалось равным 8.5 кпк

(3) 1σ верхний предел

(4) Два источника в пределах углового разрешения телескопа

Осень 1990 г. Осенью 1990 г. программа наблюдений области центра Галактики была более продолжительной. В общей сложности с 9 сентября по 18 октября было проведено одиннадцать сеансов. Наведение в этих сеансах было подобрано так, чтобы поле зрения телескопа АРТ-П равномерно покрыло зону $\sim 4^\circ \times 4^\circ$. Рентгеновское изображение показало наличие одиннадцати источников в области $4.8^\circ \times 5.8^\circ$ (рис. 40), к пяти источникам: A1742-294, 1E1740.7-2942, SLX1744-299, 1E1743.1-2843 и Sgr A, наблюдавшимся телескопом АРТ-П весной, добавилось три известных: GX3+1, SLX1735-269, SLX1732-304 и три неизвестных источника: GRS1734-292, GRS1736-297 GRS1747-312. Контурь на рис. 40 соответствуют статистической значимости детектирования источника на уровне 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 30, 40, ... стандартных отклонений. В таблице 7 приведены рентгеновские потоки и светимости источников в диапазоне энергий 4 - 20 кэВ, усреднённые за всё время наблюдений с 9 сентября по 18 октября, при оценке светимости предполагалось, что расстояние до источников - 8.5 кпк.

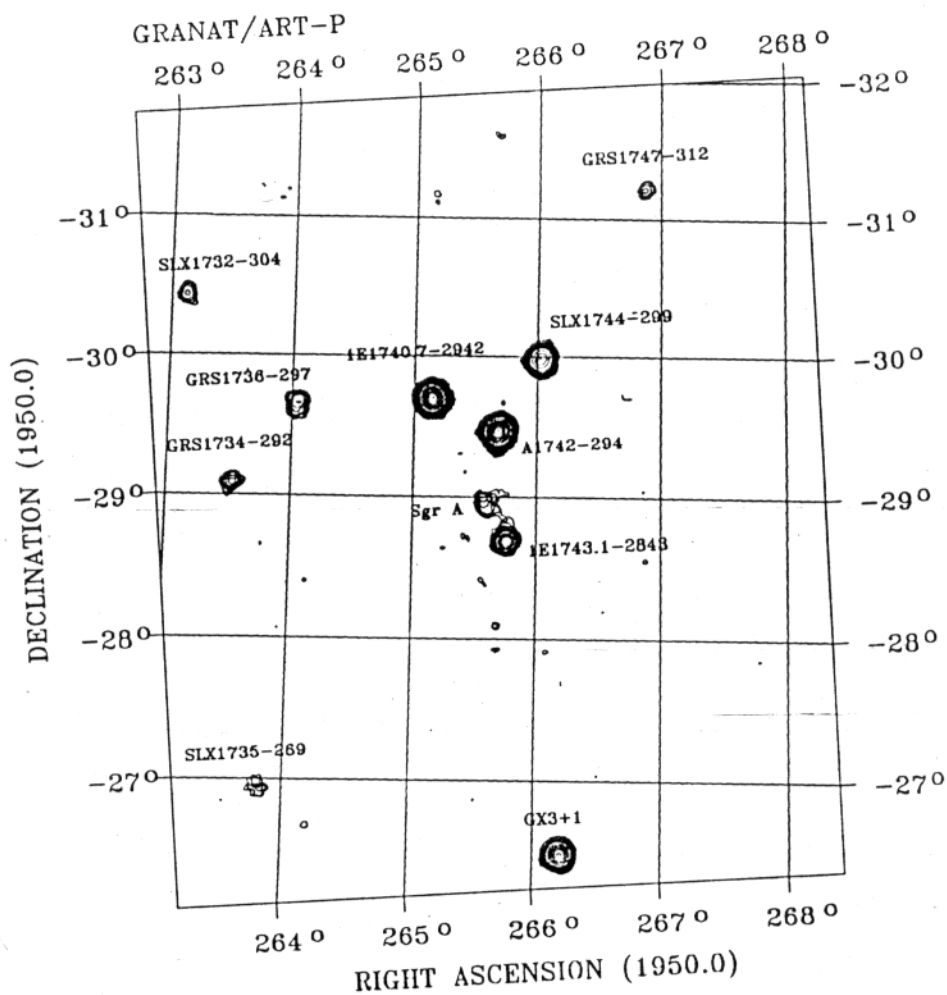


Рис. 40

Таблица 7

Название источника	Поток у Земли [10^{-3} фот/с/см ² /кэВ]	Светимость [10^{36} эрг/с]
A1742-294	3.27 ± 0.04	5.58 ± 0.10
1E1740.7-2942	2.57 ± 0.04	5.50 ± 0.09
SLX1744-299	2.10 ± 0.05	3.76 ± 0.12
Sgr A	0.55 ± 0.05	1.06 ± 0.12
1E1743.1-2943	1.11 ± 0.05	2.03 ± 0.12
GX 3+1	20.02 ± 0.99	31.75 ± 0.18
GRS1736-297	0.28 ± 0.04	0.57 ± 0.10
GRS1734-292	0.39 ± 0.05	0.79 ± 0.13
GRS1747-312	2.48 ± 0.94	3.21 ± 2.06
SLX1732-304	0.61 ± 0.11	1.14 ± 0.29
SLX1735-269	0.99 ± 0.22	2.32 ± 0.43

Весна 1991 г. В весенней программе наблюдений области Галактического центра основное внимание уделялось источнику 1E1740.7-2942. Это объясняется тем, что в ходе наблюдений 13-14 октября 1990 г. телескопом «Сигма» было зарегистрировано сильное ужесточение спектра источника 1E1740.7-2942 в диапазоне 300-600 кэВ, что интерпретировалось как аннигиляция в холодной электрон-позитронной плазме (Мандру и др. 1990 [52], Поль и др. 1990 [54], Сюняев и др. 1991 [53]).

Телескопом АРТ-П с 22 февраля по 10 апреля было выполнено 9 сеансов наблюдений области Галактического центра вблизи источника 1E1740.7-2942. Данная серия наблюдений проходила в условиях высокой Солнечной активности. Кроме того, в этой серии использовался третий модуль, имеющий пониженную чувствительность в мягких энергиях и худшее координатное разрешение по сравнению с первым и четвёртым модулями. Это решение было вынужденным, поскольку третья серия наблюдений проводилась через полтора года после запуска обсерватории «Гранат». К этому моменту телескоп АРТ-П превысил ресурс в полтора раза и в рабочем состоянии остался только третий модуль, в первом же и четвёртом незадолго до этого произошёл отказ программного обеспечения бортового микропроцессора.

На рис. 41 представлена картинка области размером $\sim 4^\circ \times 4^\circ$ в диапазоне 3-17 кэВ. Снижение чувствительности телескопа сказалось на качестве картинки. Рентгеновское изображение содержит три источника: A1742-294, 1E1740.7-2942 и SLX1744-299, два источника: 1E1743.1-2843 и Sgr A из-за уширения координатной функции отклика детектора выглядят на картинке размазанными. Контуры на рисунке соответствуют статистической значимости детектирования источника на уровне 4, 6, 8, ... стандартных отклонений. В то же время, чувствительность телескопа была вполне достаточной, чтобы оценить рентгеновские потоки и светимости источников 1E1743.1-2843 и Sgr A в диапазоне

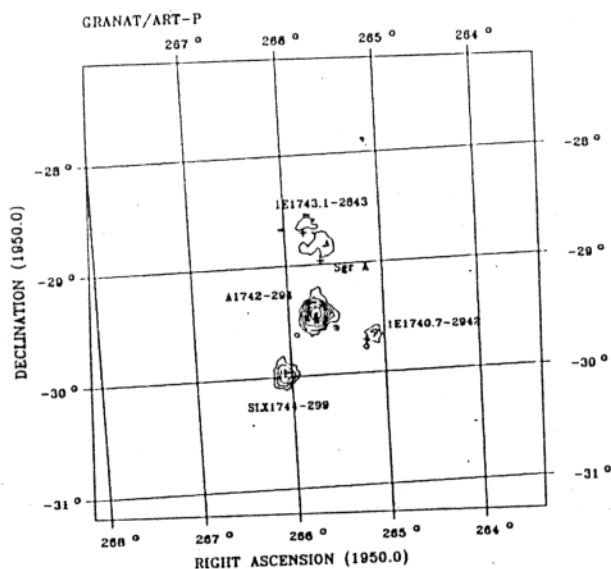


Рис. 41

энергий 4 - 20 кэВ. В таблице 8 приводятся данные по всем пяти источникам.

Таблица 8

Название источника	Поток у Земли [10^{-3} фот/с/см ² /кэВ]	Светимость [10^{36} эрг/с]
A1742-294	2.13 ± 0.28	4.05 ± 0.36
1E1740.7-2942	0.45 ± 0.28	1.09 ± 0.36
SLX1744-299	1.78 ± 0.37	3.05 ± 0.47
Sgr A	0.96 ± 0.28	1.65 ± 0.35
1E1743.1-2943	0.77 ± 0.30	1.52 ± 0.39

Осень 1991 г. Осенью изображение области Галактического центра практически ничем не отличалась от весеннего 1991 г. Также, как и весной было выполнено девять сеансов наблюдений третьим модулем АРТ-П с 29 августа по 19 октября. На рис. 42 представлена картинка области размером $\sim 4^\circ \times 4^\circ$ в диапазоне 3-17 кэВ по сумме девяти сеансов, которая содержит те же три источника A1742-294, 1E1740.7-2942, SLX1744-299 и размытое изображение от 1E1743.1-2843 и Sgr A. В таблице 9 приведены данные по потоку и светимости для пяти источников.

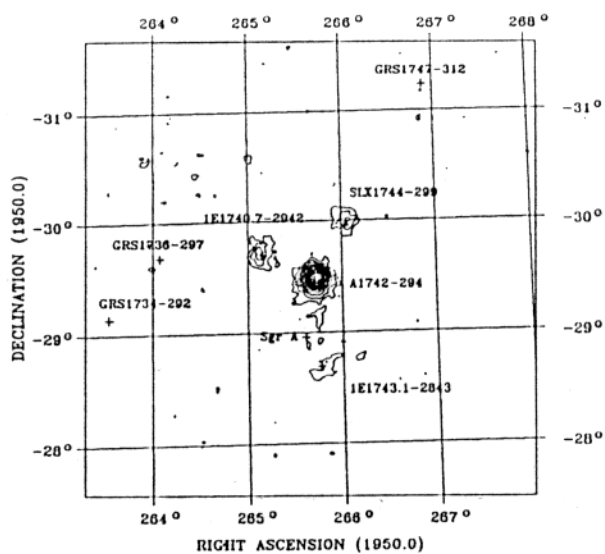


Рис. 42

Таблица 9

Название источника	Поток у Земли [10^{-3} фот/с/см ² /кэВ]	Светимость [10^{36} эрг/с]
A1742-294	3.51 ± 0.23	6.70 ± 0.30
1E1740.7-2942	0.80 ± 0.24	1.81 ± 0.32
SLX1744-299	0.64 ± 0.20	1.11 ± 0.27
Sgr A	0.58 ± 0.36	1.21 ± 0.47
1E1743.1-2943	0.83 ± 0.50	2.01 ± 0.66

Новые рентгеновские источники: GRS1741.9-2853, GRS1758-258, GRS1734-292, GRS1736-297 и GRS1747-312, обнаруженные в области центра Галактики телескопом АРТ-П.

Одним из важнейших результатов детального обзора области вблизи центра Галактики, проведённого телескопом АРТ-П в марте-апреле и сентябре-октябре 1990 г. (см. главу 3), стало обнаружение в этом поле пяти ранее неизвестных рентгеновских источников. Новые источники: GRS1741.9-2853, GRS1758-258, GRS1734-292, GRS1736-297 и GRS1747-312, были названы Источниками «Граната» (GRanat Sources). Первые два источника GRS1741.9-2853 и GRS1758-258 были открыты весной 1990 г. в ходе первой серии наблюдений области Галактического центра (Сюняев и др. 1991 [55], Сюняев и др. 1991 [56]), три остальных: GRS1734-292, GRS1736-297 и GRS1747-312 - осенью 1990 г., во второй серии наблюдений (Павлинский и др. 1992 [57]).

GRS1741.9-2853 (*Granat Source*). Источник, находящийся на расстоянии менее 10 мин. дуги (~ 25 пк) от динамического центра Галактики (Sgr A West), был зарегистрирован в ходе наблюдений 24 марта и 8 апреля 1990 г. На рис.39 (см. главу 3) показано изображение области $2.3^\circ \times 2.3^\circ$ по сумме двух сеансов в диапазоне энергий 3-17 кэВ.

Детальный анализ данных показал, что 99% доверительный интервал на положение этого источника (круг радиусом 1.6 угл. мин. с центром в точке с координатами R.A = $17^h 41^m 52^s$, Dec. = $-28^\circ 52' 55''$ (1950.0) не содержит источника 1E1741.7-2850 (рис.40), открытого орбитальной обсерваторией им. Эйнштейна. Положение яркого транзиентного источника GS1741.2-2859/GS1741.6-289, открытого спутником «Гинга» (Митсуда и др. 1990 [58]), также находится вне доверительного интервала на положение источника (рис.40). Светимость источника в диапазоне 4-20 кэВ составила $1.3 \cdot 10^{36}$ эрг/с (или ~ 7 миллиКраб),

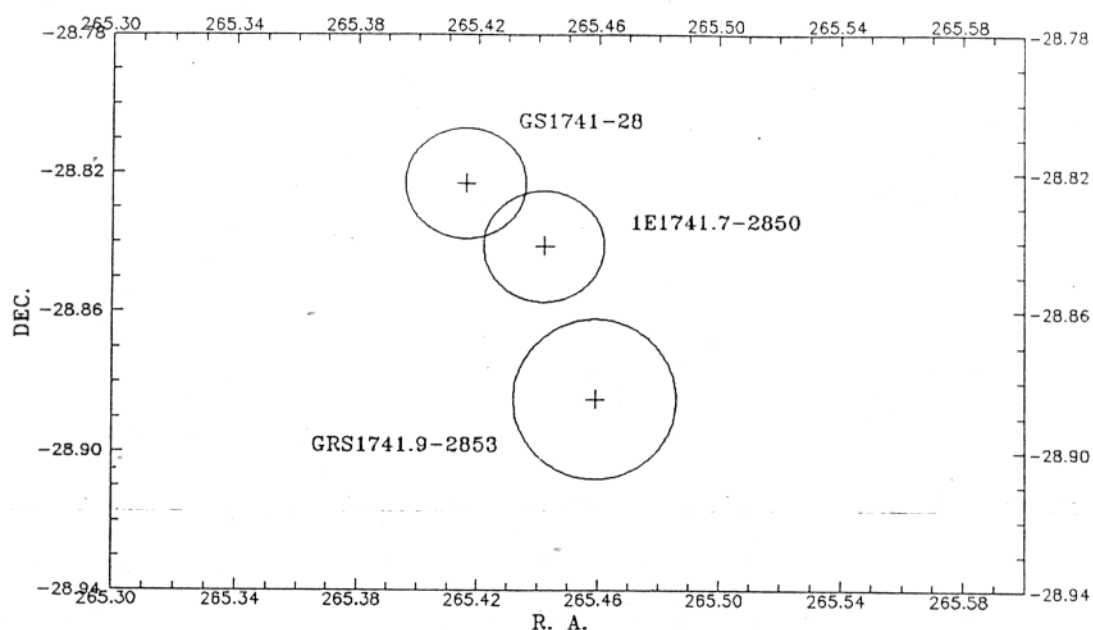


Рис. 40

верхний предел на светимость источника GS1741.2-2859 равен $0.25 \cdot 10^{36}$ эрг/с (или 1.5 миллиКраб). Интересно отметить, что источник GS1741.2-2859 имел яркость ~300 миллиКраб в диапазоне 1-10 кэВ во время наблюдений спутника «Гинга». Источник GRS1741.9-2853 отсутствует на изображении этой области неба в диапазоне 3-30 кэВ, полученном «Spacelab-2» (Скиннер и др. 1987 [13]). Сравнение светимости источника, зафиксированной телескопом АРТ-П ($1.6 \cdot 10^{36}$ эрг/с, 4-30 кэВ), с данными «Spacelab-2» показывает, что источник был по крайней мере в 10 раз слабее в 1985 г.: верхний предел на светимость в диапазоне 3-30 кэВ равен $1.5 \cdot 10^{35}$ эрг/с (3σ верхний предел, полученный из 1σ ошибки на светимость ближайшего источника Sgr A West).

Источник GRS1741.9-2853, который уверенно наблюдался в марте-апреле 1990 г. на протяжении двух недель, исчез ко времени осенних наблюдений телескопом АРТ-П. Так, например, верхний предел на уровне трех стандартных отклонений на его светимость в диапазоне 3-12 кэВ был равен $3.2 \cdot 10^{35}$ эрг/с (~2 миллиКраб), согласно данным телескопа АРТ-П, полученным 9 сентября 1990 г. Во время наблюдений в марте-апреле поток излучения GRS1741.9-2853 был на уровне ~7

миллиКраб (Сюняев и др. 1991 [55]).

GRS1734-292, GRS1736-297 и GRS1747-312. Новые рентгеновские источники были зарегистрированы в ходе наблюдений в сентябре (9.561-10.130 UT) и октябре 1990 г. (6.543-7.101 UT) 1990 г. Длительность сеансов была 38000 и 40000 с соответственно.

На рис. 41 а и б приведены карты областей неба размером $3.0 \times 3.0^\circ$ в диапазоне 3-17 кэВ, полученные телескопом АРТ-П во время этих сеансов наблюдений.

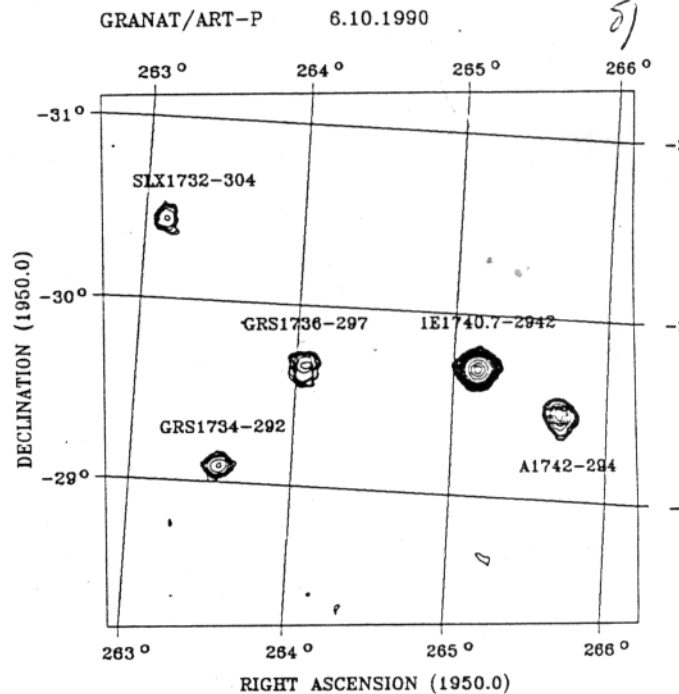
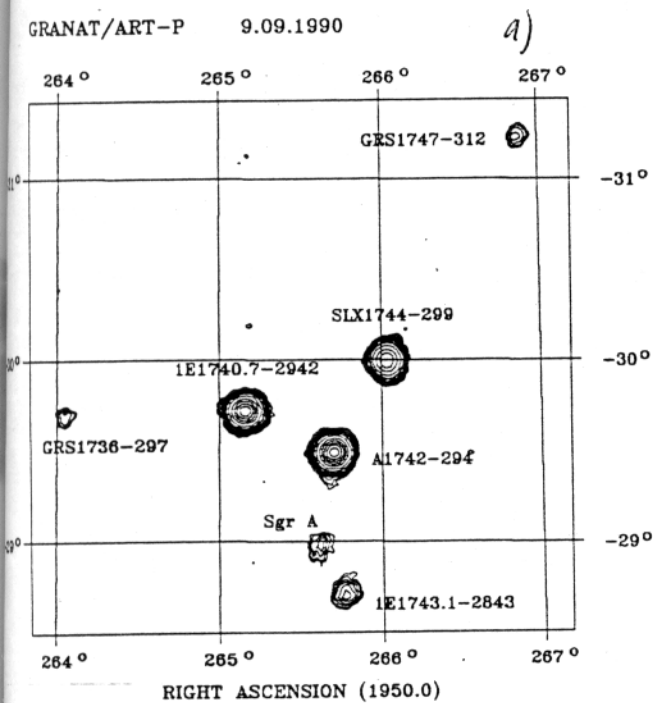


Рис. 41

Показаны линии уровня соответствующие превышению зарегистрированного потока от источника над уровнем фона на 3, 4, 5, ..., 10, 20, 30 и более стандартных отклонений. Возможность зарегистрировать источник определяется не только яркостью источника, но и его положением

внутри поля зрения телескопа. Это связано с падением чувствительности телескопа к краю поля зрения из-за уменьшения пропускания коллиматора. Реальное распределение чувствительности по полю зрения зависит от стабильности наведения телескопа во время сеанса.

В ходе наблюдений 9-10 сентября 1990 г. телескоп АРТ-П зарегистрировал семь рентгеновских источников (рис. 41а). Среди них хорошо известные: Sgr A (Стрелец А) - источник радио и инфракрасного излучения, отождествленный с ядром нашей Галактики (Оорт, 1977 [59]), A1742-294 - ярчайший в этом поле рентгеновский источник (Келлог и др., 1971 [2]; Скиннер и др., 1987 [13]), рентгеновский барстер SLX1744-299 (Скиннер и др., 1990 [50]) и два источника обнаруженных приборами обсерватории «Эйнштейн» 1E1740.7-2942 и 1E1743.1-2843 (Ватсон и др., 1981 [10]; Герц и Гриндлей, 1984 [11]). Один из них, 1E1740.7-2942, обладает аномально жестким спектром и ответственен за все жесткое ($h\nu \geq 20$ кэВ) излучение области центра Галактики (Скиннер и др., 1987 [13]). Кроме того в поле зрения телескопа были обнаружены два ранее неизвестных источника: GRS1736-297 и GRS1747-312. Координаты новых источников, определенные с точностью ~ 1.5 угл. мин., приведены в таблице 10.

Таблица 10

Источник	Координаты (эпоха 1950.0)		Поток, ⁽¹⁾ миллиКраб	Светимость, ⁽²⁾ 10^{35} эрг/с
	R. A.	Dec.		
GRS1734-292	$17^h 34^m 14^s$	$-29^\circ 09' 02''$	3.4 ± 0.4	5.1 ± 0.6
GRS1736-297	$17^h 36^m 21^s$	$-29^\circ 41' 50''$	2.6 ± 0.6	4.0 ± 0.9
GRS1747-312	$17^h 47^m 38^s$	$-31^\circ 15' 25''$	30 ± 7	45 ± 11

⁽¹⁾ диапазон энергий 3-12 кэВ

⁽²⁾ в предположении расстояния до источника равного 8.5 кпк

Оба источника находились на краю поля зрения прибора в зоне низкой чувствительности: излучение GRS1736-297 регистрировалось с эффективностью ~28% от максимально возможной, излучение GRS1747-312 с эффективностью менее 5%.

Один из двух обнаруженных источников, GRS1736-297, наблюдался еще раз спустя месяц 6-7 октября 1990 г., когда инструменты обсерватории «Гранат» были наведены в точку, отстоящую на 1° от направления, в котором они наводились 9-10 сентября (рис. 41б). Новый источник оказался в центре поля зрения телескопа АРТ-П и его излучение регистрировалось в течение сеанса с эффективностью ~83%. При той же продолжительности наблюдений, что и в сентябре, источник был зарегистрирован с большей достоверностью (~8.6 стандартных отклонений). Второй источник, GRS1747-312, был во время этих наблюдений вне поля зрения телескопа.

В то же время, в поле зрения попали два источника, которые не были видны во время сентябрьского сеанса наблюдений: SLX1732-304, положение которого совпадает с положением шарового скопления Терзан 1 (Скиннер и др., 1987 [13]), и еще один ранее неизвестный источник - GRS1734-292 (см. табл. 10). На рис. 42 представлено изображение, полученное телескопом АРТ-П, области неба содержащей оба новых источника. Высота пиков на этом рисунке пропорциональна значимости детектирования источников. Из рисунка следует, что интенсивность излучения обоих источников была много меньше интенсивности излучения 1E1740.7-2942 - одного из ярчайших источников в этом поле. И это несмотря на то, что излучение GRS1736-297 и GRS1734-292 регистрировалось с максимально возможной эффективностью, в то время как излучение 1E1740.7-2942 было сильно ослаблено из-за уменьшения пропускания коллиматора. Источники Sgr A, 1E1743.1-2843 и SLX1744-299 были во время этого сеанса на краю поля зрения в зоне с

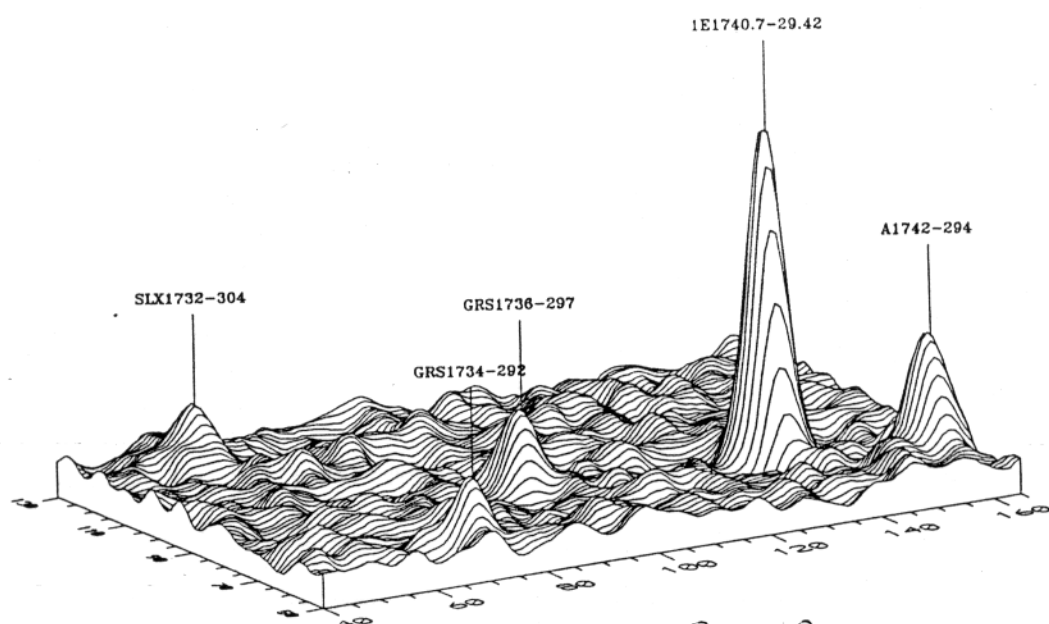


Рис. 42

чувствительностью менее 5% от максимально возможной. Потока излучения от этих источников, превышающего уровень фона с достоверностью выше трех стандартных отклонений, обнаружено не было.

Осенью 1990 г. приборы обсерватории «Гранат» провели более десяти сеансов наблюдений области вблизи центра Галактики. К сожалению, все вновь обнаруженные источники находятся на достаточно большом ($\geq 1.8^\circ$) расстоянии от Sgr A, который был основной мишенью обсерватории, поэтому в большинстве сеансов новые источники были недоступны для наблюдений с помощью телескопа ART-P (не попадали в поле зрения).

Светимости источников. В таблице 10 приведены потоки излучения и светимости новых источников. Предполагалось, что все обнаруженные источники расположены вблизи центра Галактики, на расстоянии 8.5 кпк, а не проецируются на эту область с более близкого расстояния. GRS1734-292 и GRS1736-297 имели примерно на порядок более низкую светимость, чем известные источники A1742-294, 1E1740.7-2942 или SLX1744-299. Третий источник - GRS1747-312, выгодно отличался от них. Сам факт того, что он уверенно регистрировался в то время,

когда находился на краю поля зрения в зоне с чувствительностью менее 5%, свидетельствует о том, как ярко он был. Например, источник 1E1743.1-243, наблюдавшийся 6 октября 1990 г. в аналогичных условиях, не был обнаружен на уровне трех стандартных отклонений. Для сравнения, светимость ярчайшего в этом поле рентгеновского источника A1742-294 в диапазоне энергий 3-12 кэВ 9 сентября была равна $(5.3 \pm 0.1) \cdot 10^{36}$ эрг/с, что лишь незначительно превышает светимость GRS1747-312.

Область неба, содержащая GRS1747-312, исследовалась с помощью телескопа АРТ-П повторно в ходе наблюдений в октябре 1990 г. (5.579-5.837 UT). Во время этого сеанса GRS1747-312 находился даже ближе к центру поля зрения телескопа, чем в сеансе 9-10 сентября 1990 г. Это иллюстрируется рис. 43, на котором приведены карты неба размером $3.0 \times 3.0^\circ$ в диапазоне энергий 3-17 кэВ, полученные телескопом АРТ-П 9-10 сентября и 5 октября.

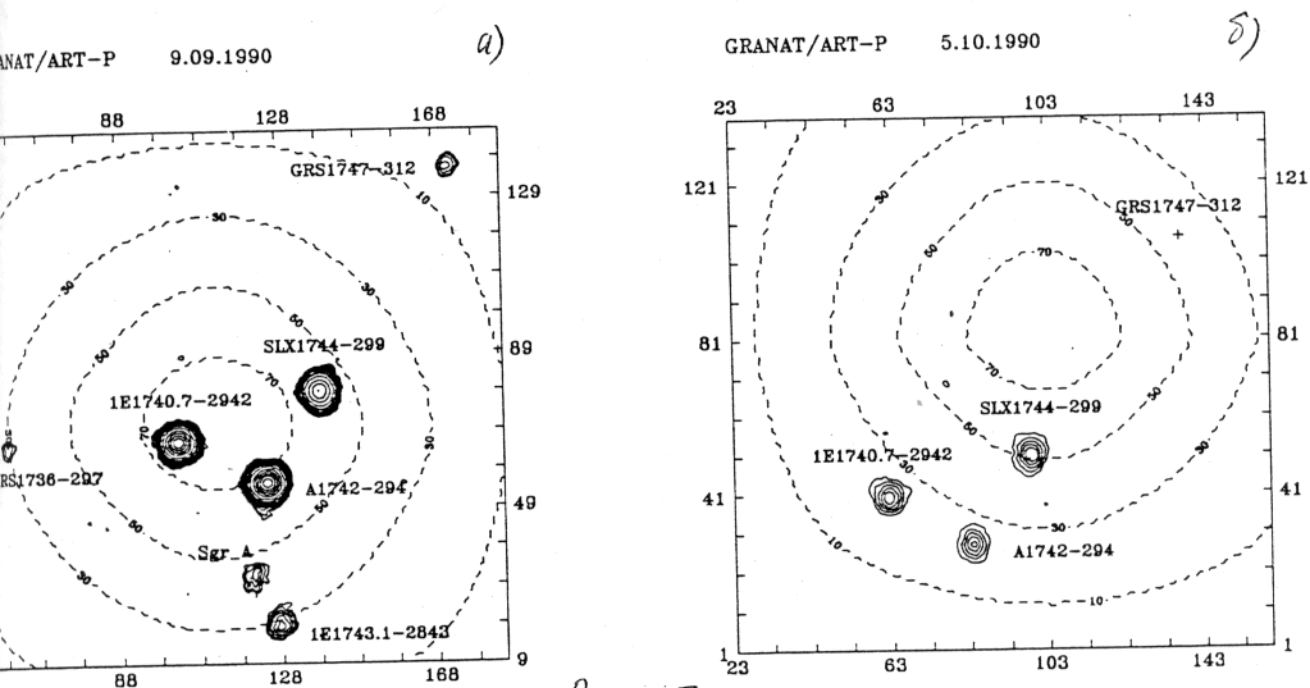


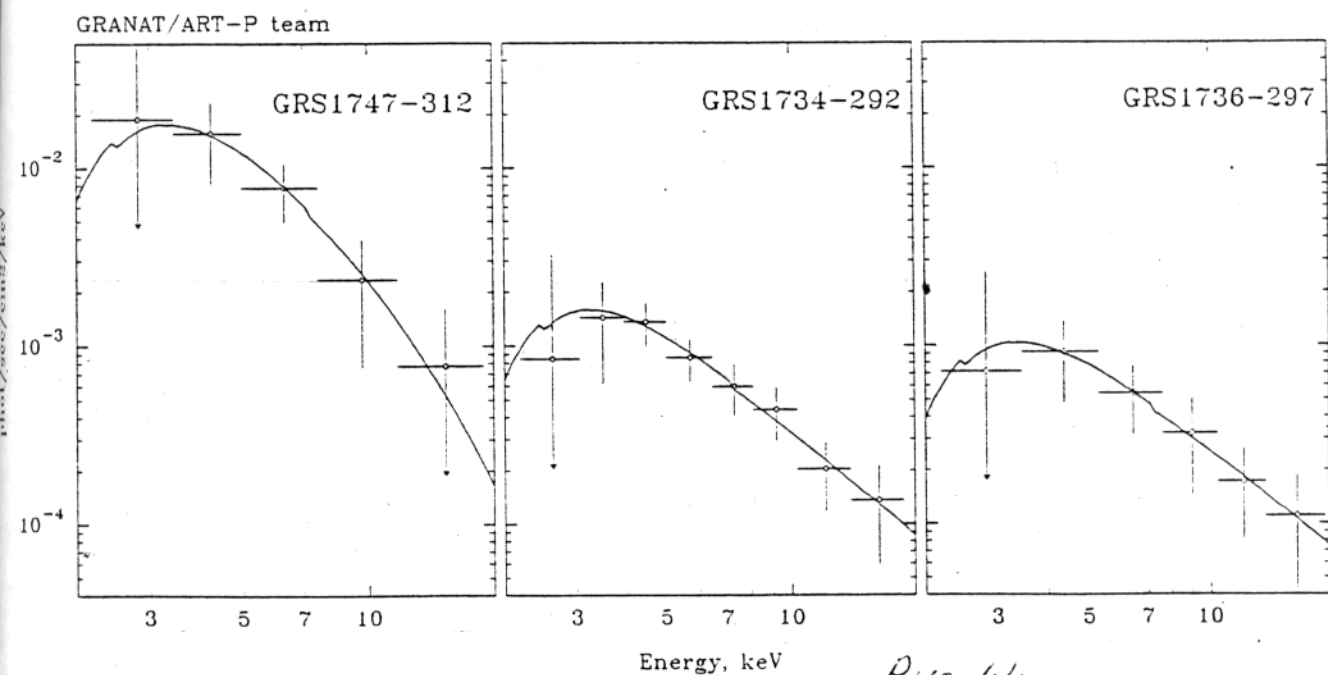
Рис. 43

Штриховыми линиями показаны области чувствительности телескопа на уровне 10, 30, 50 и 70% от максимально возможной. При

продолжительности наблюдений ~ 17000 с и чувствительности $\sim 42\%$, потока от GRS1747-312, превышающего уровень фона с достоверностью выше трех стандартных отклонений, обнаружено не было. Предел на светимость источника был равен $2.6 \cdot 10^{35}$ эрг/с (~ 1.6 миллиКраб), что почти в 17 раз ниже уровня потока, зарегистрированного 9-10 сентября. Эти оценки позволяют сделать вывод, о переменности излучения GRS1747-312 с характерным временем менее одного месяца.

По всей видимости, GRS1747-312 - второй транзиентный источник, после GRS1741.9-2853, обнаруженный телескопом ART-P. В то же время нет достаточных оснований для того, чтобы отнести два других обнаруженных источника GRS1734-292 и GRS1736-297 к транзиентам. Два сеанса наблюдений GRS1736-297, проведенные с интервалом порядка одного месяца, не выявили достоверной переменности его рентгеновского излучения: поток в диапазоне 3-12 кэВ был равен 3.4 ± 0.9 миллиКраб 9-10 сентября и 2.5 ± 0.3 миллиКраб 6-7 октября 1990 г.

Рентгеновские спектры источников. На рис. 44 приведены фотонные спектры всех трех источников, восстановленные с учетом функции отклика детектора.



Источники GRS1734-292 и GRS1736-297 имеют жесткие спектры, демонстрирующие сильное поглощение в мягком диапазоне энергий. Сильное поглощение рентгеновского излучения межзвездным веществом и пылью, характеризующееся количеством атомов водорода на луче зрения $\sim 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ в предположении солнечного обилия тяжелых элементов, типично для источников вблизи центра Галактики. Поэтому наличие поглощения в спектрах двух новых источников может рассматриваться как свидетельство того, что они действительно расположены вблизи центра Галактики, а не являются результатом проекции на эту область источников, находящихся намного ближе к Земле.

Спектры двух источников, GRS1734-292 и GRS1736-297, хорошо описываются с помощью степенного закона с фотонным индексом $\alpha \approx -2.0 \pm 0.1$ и потоком на 10 кэВ $I_{10} \approx (3.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-4} \text{ фот} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$ (в случае GRS1734-292) и $\alpha \approx -1.8 \pm 0.2$, $I_{10} = (2.5 \pm 0.8) \cdot 10^{-4} \text{ фот} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$ (в случае GRS1736-297). Из рис. 44 видно, что GRS1747-312 имеет более мягкий спектр, который лучше аппроксимируется тормозным излучением оптически тонкой плазмы с температурой $kT = 5.8 \pm 1.5 \text{ кэВ}$ и потоком на 10 кэВ $I_{10} = (2.3 \pm 0.9) \cdot 10^{-3} \text{ фот} \cdot \text{см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ кэВ}^{-1}$.

Наблюдения, выполненные инструментами обсерваторий «Гинга», «Рентген» на модуле «Квант» и «Гранат» в 1987-1991 гг., свидетельствуют, что яркие рентгеновские новые вспыхивают в окрестности Земли (на расстоянии ~ 1 кпк) примерно раз в год. Простые масштабирующие оценки показывают, что каждый год в нашей Галактике (в области с радиусом ~ 10 кпк) должны вспыхивать сотни рентгеновских новых. К сожалению, излучение далеких новых оказывается в сотни раз более слабым, чем излучение рентгеновских новых, вспыхивающих в окрестности Земли. В этой связи обнаружение двух рентгеновских транзиентов, во многом аналогичных рентгеновским новым, в такой

плотно заселенной области, какой является окрестность центра Галактики не должно вызывать сильного удивления.

Два других источника GRS1734-292 и GRS1736-297 имеют жесткие спектры в диапазоне телескопа АРТ-П, по всей видимости простирающиеся в область энергий выше 20 кэВ. Только низкая светимость этих источников объясняет тот факт, что они не были зарегистрированы телескопом «Сигма». Данные телескопа АРТ-П не позволяют сделать однозначное утверждение о наличии переменности их излучения. По крайней мере один из источников, GRS1736-297, имел время жизни, превышающее один месяц. Два наблюдения, проведенные на протяжении месяца, показали, что интенсивность рентгеновского излучения этого источника была на одном уровне. Кажется вполне вероятным, что эти два источника не относятся к транзиентам, а постоянно присутствуют на звездном небе. Они не были обнаружены во время предыдущих обзоров области Галактического центра (весной 1990 г.) из-за малой интенсивности их излучения ($\sim 2-3$ миллиКраб) и относительно большой ($\sim 2^\circ$) удаленности от центра Галактики. За все время наблюдений от этих двух источников (также как от GRS1747-312) не было обнаружено рентгеновских всплесков, поэтому принадлежность их к рентгеновским барстерам, типа A1742-294 или SLX1744-299, кажется маловероятной. Своим жестким спектром эти два новых источника скорее напоминают источник 1E1740.7-2942, находящийся в том же поле зрения и который широко обсуждается как возможный кандидат в черные дыры (Сюняев и др. 1991 [56]).

GRS1758-258. 12 и 17 апреля 1990 г. основные приборы обсерватории «Гранат» были направлены на область неба, содержащую известный источник GX5-1. Анализ данных наблюдений показал, что в поле зрения приборов АРТ-П и «Сигма» присутствует ранее неизвестный источник, расположенный в 40 минутах дуги от GX5-1. Изображение этого участка неба в диапазоне 6-20 кэВ, полученное прибором АРТ-П,

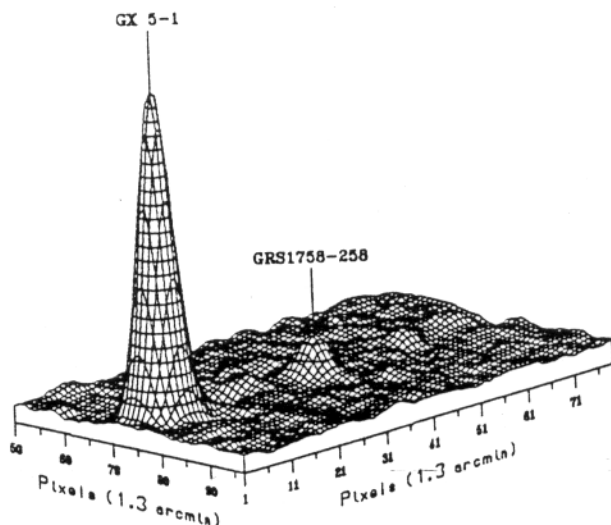


Fig.45: The slice ($1^{\circ}.2$ by $1^{\circ}.2$) of ART-P image in 4-20 keV energy band, containing two sources: GX 5-1 and GRS1758-258. The peak height is proportional to the significance of source detection.

показано на рис. 45. Положения источника GX5-1 и нового источника GRS1758-258 (GRanat Source) указаны стрелками. Координаты источника GRS1758-258, по данным АРТ-П (эпоха 1950.0, ошибка ≤ 1 угл. мин.):

$$\text{R.A.} = 17^{\text{h}} 58^{\text{m}} 07^{\text{s}}$$

$$\text{Dec.} = -25^{\circ} 44' 00''$$

Этот источник был хорошо виден телескопом «Сигма» в более жестком диапазоне энергий до ~ 300 кэВ.

На рис. 46 показан спектр источника GRS1758-258, полученный приборами АРТ-П и «Сигма». Данные «Сигмы» (Сюняев и др. 1991 [53], [56]) были получены в ходе наблюдений 24 марта, 4, 8 и 12 апреля 1990 г. Два спектра на энергиях ниже 30 кэВ соответствуют наблюдениям АРТ-П 12 и 17 апреля 1990 г. Хорошо видна переменность спектра - светимость источника в диапазоне 4-30 кэВ составила $(8.2 \pm 0.9) \cdot 10^{36}$ и $(4.6 \pm 0.7) \cdot 10^{36}$ эрг/с 12 и 17 апреля соответственно (предполагая, что расстояние до источника 8.5 кпк). Результат аппроксимации данных АРТ-П в диапазоне 3-30 кэВ степенным законом дает следующие параметры спектра: фотонный индекс $\alpha = 1.7 \pm 0.4$, поглощение

$N_H L < 7 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (1σ), поток на энергии 10 кэВ $F_{10} = (2.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$ фот/с/см²/кэВ - 12 апреля и $\alpha = 1.4 \pm 0.5$, $N_H L < 1.5 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$ (1σ), $F_{10} = (1.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$ фот/с/см²/кэВ - 17 апреля.

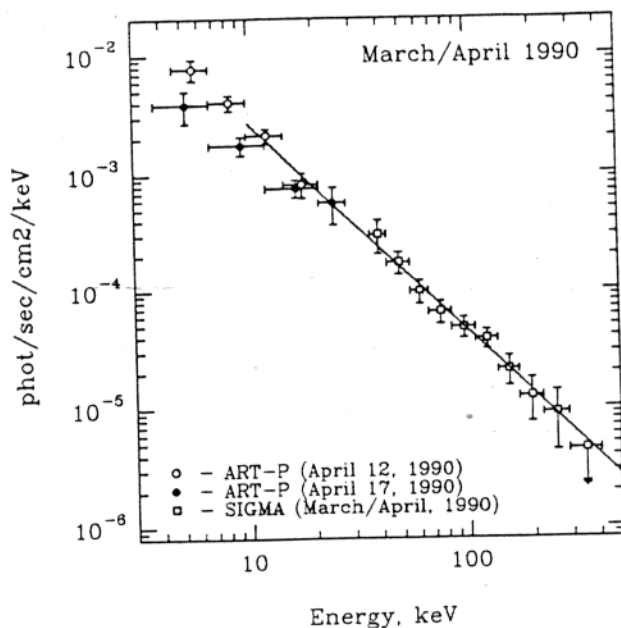


Fig. 46: The spectrum of GRS1758-258. Points above 30 keV represents averaged spectrum, obtained by SIGMA during the whole set observations on March/April. Two spectra below 30 keV corresponds to ART-P observations on April 11-12 and 16. The best power law fit to data in 35-300 keV band is shown by solid curve.

Осенью - 19 и 20 октября 1990 г., телескоп АРТ-П продолжил наблюдения источника GRS1758-258. Время наблюдения было 3804 и 11528 с соответственно. Результат аппроксимации данных АРТ-П в эти дни в диапазоне 3-30 кэВ степенным законом дал следующие параметры спектра: фотонный индекс $\alpha = 1.94 \pm 0.07$, при фиксированном поглощении $N_H L = 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, поток на энергии 10 кэВ $F_{10} = (2.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$ фот/с/см²/кэВ. На рис. 47 показан спектр источника GRS1758-258 (незакрашенные кружки) и результат его аппроксимации (сплошная линия). Для сравнения на рис. 47 приводится также спектр известного источника класса LMXB GX 5-1 (закрашенные кружки) и спектр Краба (штриховая линия), показывающие различие (в первом случае) и схожесть (во втором случае) спектров источников. Светимость источника GRS1758-258 в течение суток не изменилась. В таблице 11

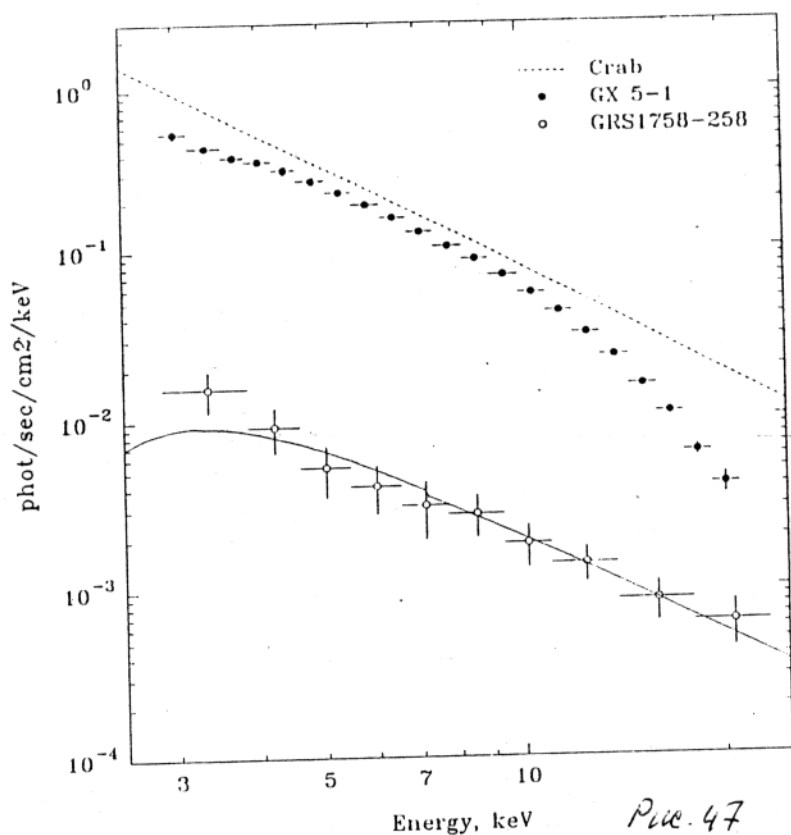


Рис. 47

приведены значения рентгеновских потоков и светимости источников GRS1758-258 и GX 5-1 для двух дней наблюдений в диапазоне энергий 4-20 кэВ, расстояние до источников предполагалось равным 8.5 кпк.

Таблица 11

Название источника	Поток у Земли [10 ⁻³ фот/с/см ² /кэВ]	Светимость [10 ³⁶ эрг/с]
GRS1758-258	2.15±0.43 ⁽¹⁾	4.26±0.76
	2.14±0.21 ⁽²⁾	4.21±0.39
GX 5-1	87.97±0.70 ⁽¹⁾	144.2±1.2
	71.70±0.43 ⁽²⁾	120.1±0.7

(1) 19 октября

(2) 20 октября

Ровно через год - 20 и 23 октября 1991 г. телескопом ART-P ещё раз наблюдался источник GRS1758-258. Какого - либо значимого потока зарегистрировано не было. Это объясняется низкой чувствительностью

наблюдений связанной с большой яркостью источника GX 5-1 и использованием в этом сеансе менее чувствительного третьего модуля телескопа АРТ-П. Рентгеновский поток от источника GX 5-1 в диапазоне энергий 4 - 20 кэВ составил $(136 \pm 5) \cdot 10^{-3}$ фот/с/см²/кэВ, светимость $(176 \pm 5) \cdot 10^{36}$ эрг/с, полученный верхний предел на светимость GRS1758-258 по сумме двух сеансов равнялся $8 \cdot 10^{36}$ эрг/с (3σ).

Рентгеновское излучение ядра Галактики Sgr A

и кандидата в чёрные дыры 1E1740.7-2942.

В 1979 г. обсерватория EINSTEIN зарегистрировала жесткий рентгеновский источник 1E1742.5-2859, местоположение которого совпадало с точностью одна минута дуги с ядром Галактики. Энергетический спектр 1E1742.5-2859 описывался тепловым спектром с $kT \approx 5$ кэВ при поглощении $N_H L \approx 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ и светимостью $1.5 \cdot 10^{35}$ эрг/с в диапазоне энергий 0.5-4.5 кэВ.

В 1985 году по данным телескопа XRT светимость источника 1E1742.5-2859 = Sgr A в диапазоне энергий 3-30 кэВ составила лишь $6.2 \cdot 10^{35}$ эрг/с (предполагая расстояние до источника 10 кпк), в то время как ряд экспериментов указывал на существование интенсивного, переменного и жесткого (~15-150 кэВ) рентгеновского излучения из области Галактического центра (Денис и др. 1980 [14], Найт и др. 1985 [15], Матьюсон 1982 [16]). Данные HEAO-1 A-4 (Денис и др. 1980 [14]) говорили о том, что источник, находящийся в пределах $\sim 2^\circ$ зоны вокруг центра Галактики, является одним из самых ярких на небе в диапазоне энергий 80-180 кэВ. Низкая светимость Sgr A, не позволяющая объяснить существование яркого жесткого источника в центре Галактики, и доминирующее значение на энергиях $E \geq 20$ кэВ источника 1E1740.7-2942 (рис. 48, диапазон 19-30 кэВ), отстоящего на 50 мин. дуги от Sgr A позволили сделать предположение, что за жесткое излучение из области Галактического центра ответственен источник 1E1740.7-2942, а не Sgr A.

Первые же наблюдения телескопом АРТ-П области Галактического центра 24 марта и 8 апреля 1990 г. подтвердили предположения Скинера и др. [13] о доминирующем значении источника 1E1740.7-2942 в области высоких энергий. На рис. 49 приведена картинка по сумме двух сеансов, размером $2.3^\circ \times 2.3^\circ$, диапазон энергий 17-30 кэВ. Контуры

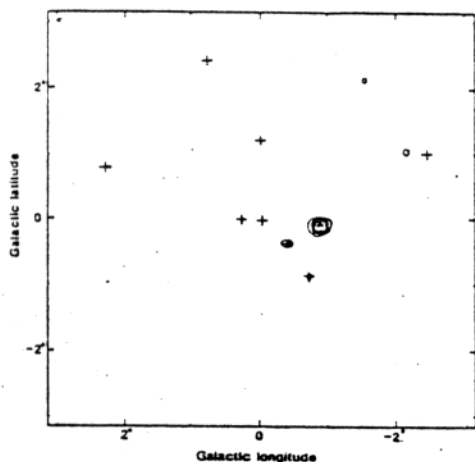


Fig. 48. As Fig. 1, except that X-ray energy range is restricted to 19-30 keV. Crosses show positions of sources in Fig. 1.

Рис. 48

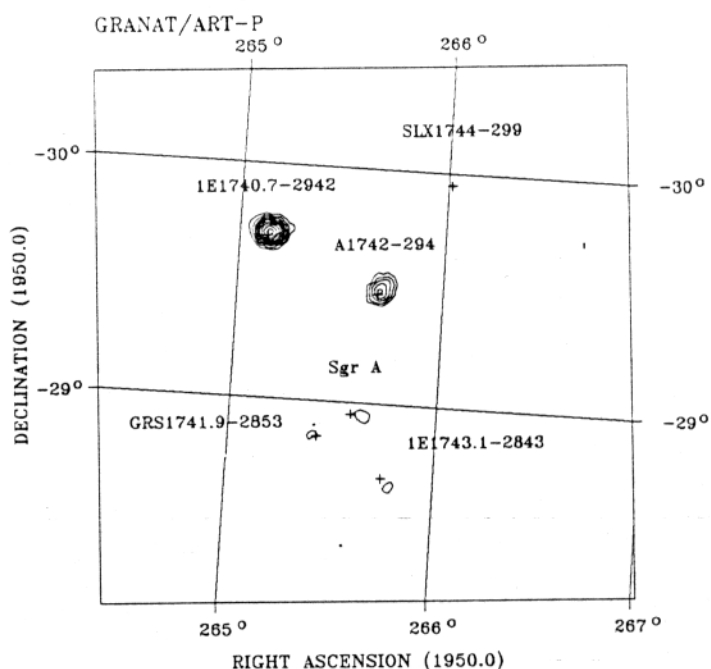


Рис. 49

соответствуют статистической значимости детектирования источника на уровне 3.5, 5, 6.5, ... стандартных отклонений. Пиксел изображения соответствует 1.3 угл. мин.

В этих же сеансах телескоп ART-P зарегистрировал излучение от источника Sgr A (рис. 39 глава 3).

Sgr A. Согласно данным ART-P, положение этого рентгеновского источника с точностью ~ 1 угл. мин. совпадает с положением радиоисточника Sgr A West, т.е. с ядром Галактики. Распределение интенсивности на изображении, полученном ART-P, хорошо согласуется с откликом телескопа на точечный источник. Т.о., рентгеновский источник, наблюдавшийся телескопом ART-P, расположен на расстоянии не более чем 2.5 пк от центра Галактики (при условии, что это не является эффектом проекции). Светимость источника по данным ART-P составляла $(1.51 \pm 0.17) \cdot 10^{36}$ эрг/с 24 марта 1990 г. и $(1.90 \pm 0.21) \cdot 10^{36}$ эрг/с 8 апреля 1990 г. (диапазон 4-20 кэВ, расстояние до источника предполагалось равным 8.5 кпк).

Главный результат заключался в сравнении данных наблюдений телескопа ART-P и обсерватории «Spacelab-2» в 1985 г. (Скиннер и

др., 1987), показавшем, что источник в 1985 г. был слабее более, чем в три раза. Этот факт является сильным аргументом в пользу того, что наблюдаемое рентгеновское излучение связано с небольшим числом источников (наиболее вероятно, с одним источником). Переменность этого источника (или источников) и его спектр наиболее естественно объясняется в рамках аккреции на нейтронную звезду в маломассивной двойной системе.

Широко известны аргументы группы Таунса (1989) [60], основанные на измерениях дисперсии скоростей газа, в пользу существования массивной ($\sim 10^6 M_{\odot}$) черной дыры в центре Галактики. Окружающая область богата газом и вполне могла бы обеспечить достаточно высокий темп аккреции на сверхмассивную черную дыру. Эта аккреция должна приводить к возникновению мощного рентгеновского излучения из этой области, подобного наблюдаемому от многих активных ядер галактик (Тернер и Паундс, 1989 [61]). Однако такое излучение не наблюдается в случае нашей Галактики. Отсутствие мощного рентгеновского излучения от центра Галактики можно объяснить либо сильной направленностью излучения, либо тем фактом, что при сильно докритической аккреции на сверхмассивную черную дыру максимум излучения аккреционного диска приходится на экстремальный ультрафиолетовый диапазон (Шакура и Сюняев, 1973 [62], 1976 [63]). Это излучение должно полностью поглощаться окружающим газом и пылью и переизлучаться в инфракрасном диапазоне.

В то же время звездная плотность в зоне Галактического центра в пределах центральной угловой минуты превышает или, как минимум, сравнима с плотностью звезд в наиболее компактных шаровых скоплениях, а его масса и размер превышают типичные величины для шаровых скоплений. Естественно было ожидать, что тройные столкновения звезд должны гораздо чаще приводить к образованию

маломассивных двойных систем, включающих нейтронные звезды, чем в шаровых скоплениях. Это противоречит тому факту, что рентгеновское излучение от центра Галактики связано с небольшим числом (с одним?) компактных источников. Возможно, что главным фактором, препятствующим образованию двойных систем при тройных столкновениях является высокая дисперсия скоростей звезд, намного превышающая дисперсию скоростей в типичных шаровых скоплениях.

Наиболее естественным объяснением наблюдаемого рентгеновского излучения является существование в плотном облаке звезд ($\sim 10^7 M_{\odot}$ в зоне радиусом 2.5 пк) компактного рентгеновского источника - аккрецирующей нейтронной звезды в маломассивной тесной двойной системе. Именно такие системы наблюдаются как барстеры во многих шаровых скоплениях и имеют сравнимую светимость. К сожалению, за всё время наблюдений телескопом АРТ-П не удалось обнаружить ни одной вспышки, свидетельствующей о том, что источник является рентгеновским барстером.

Сравнение с ядром галактики М31. В Туманности Андромеды светимость рентгеновского источника в пределах 2 секунд дуги от ядра близка по данным Эйнштейновской обсерватории к 10^{38} эрг/с, т.е. в десятки, а может и в сотни раз превышает светимость источника в ядре нашей Галактики. Излучение рентгеновского источника в ядре М31 также переменено более, чем в 10 раз. Отметим, что 2 секунды дуги в случае ядра М31 соответствуют 6 пк. Это лишь в 2.5 раза хуже, чем разрешение, которое АРТ-П имеет для ядра нашей Галактики. Скорее всего, в обоих случаях мы имеем дело с объектами одинаковой природы с той лишь разницей, что компактный рентгеновский источник в М31 имеет светимость в сто раз более высокую, чем ядро нашей Галактики, но не превышающую эдингтоновский предел для объекта с массой $\sim M_{\odot}$.

Значимая переменность рентгеновского потока от Sgr A была зафиксирована телескопом АРТ-П при сравнении весенних и осенних

наблюдений 1990 г. рис.50. Усреднённый поток в диапазоне энергий 4-20 кэВ равнялся 8.8 ± 0.5 и 5.7 ± 0.5 миллиКраб весной и осенью соответственно, т.е. за полгода уменьшился на ~35%. В 1991 г. телескоп не зафиксировал изменения потока.

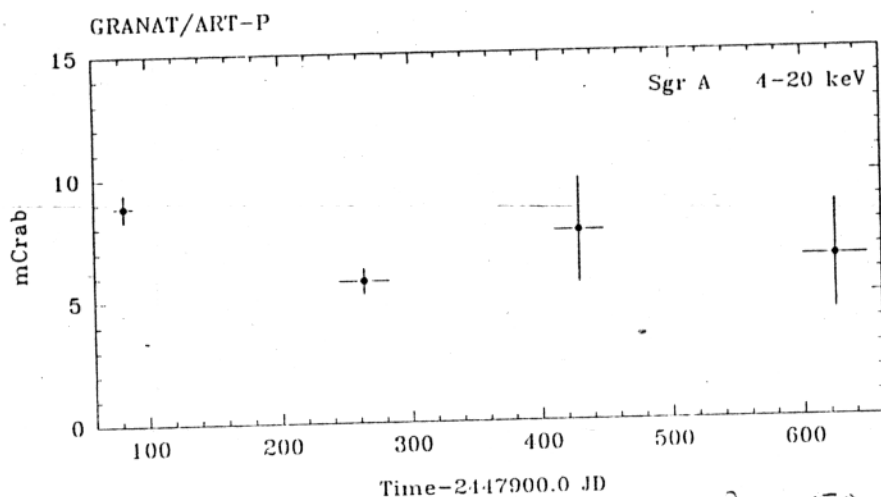


Рис. 50

На рис.51 приведен для примера усреднённый фотонный спектр источника Sgr A по всем осенним сеансам 1990 г. (закрашенные кружки). Спектр хорошо описывается с помощью степенного закона с фотонным индексом $\alpha \approx -1.6 \pm 0.1$ и потоком на 10 кэВ $I_{10} \approx (5 \pm 1) \cdot 10^{-4}$ фот·см⁻²с⁻¹кэВ⁻¹ при фиксированном поглощении $N_H L = 6 \cdot 10^{22}$ см⁻² (штриховая линия).

1E1740.7-2942. Первые изображения области Галактического центра в диапазоне 3-30 кэВ, полученные в 1985 г. Скиннером и др. 1987 г. [13] показали, что на энергиях 20-30 кэВ ярчайшим источником среди десятка источников, наблюдаемых в области Галактического центра на меньших энергиях, является источник 1E1740.7-2942, открытый ранее обсерваторией им. Эйнштейна (Ватсон и др. 1981 [10], Герц и Гриндли 1984 [11]). Наблюдения телескопа GRIP в баллонном полёте 1988 г. (Кук и др. 1990 [51]) и телескопа «Сигма» обсерватории «Гранат» весной 1990 г. (Мандру 1990 [52], Поль и др 1990 [54], Сюняев и др.

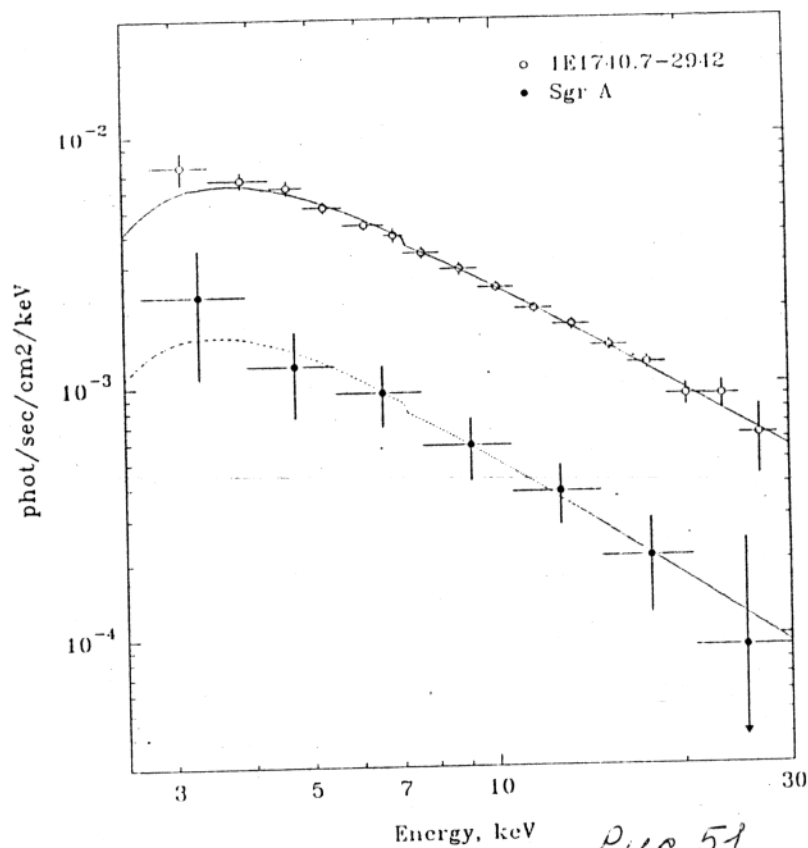


Рис. 51

1990 [53] [56]) показали, что 1E1740.7-2942 является единственным ярким источником вблизи Галактического центра на энергиях выше 35 кэВ. Ближайшим источником со сравнимой светимостью в жестком диапазоне является GRS1758-258, открытый обсерваторией «Гранат», расположенный вблизи источника GX5-1 и в 5° от ядра Галактики.

При наблюдениях области Галактического центра обсерваторией «Гранат» в большинстве сеансов в поле зрения телескопа ART-P попадал источник 1E1740.7-2942.

Весной 1990 г. телескоп ART-P дважды 24 марта и 8 апреля регистрировал излучение от 1E1740.7-2942. В обоих сеансах спектр источника хорошо аппроксимируется степенным законом с наклоном $\alpha = -1.41 \pm 0.05$ (24 марта) и $\alpha = -1.37 \pm 0.09$ (8 апреля) при фиксированном поглощении $N_H L = 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ атомов водорода на луче зрения с потоком на 10 кэВ $F_{10} = (3.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-3} \text{ фот/с/см}^2/\text{кэВ}$ и $(3.0 \pm 0.6) \cdot 10^{-3} \text{ фот/с/см}^2/\text{кэВ}$ и светимостью в диапазоне энергий 4-20 кэВ

$(9.1 \pm 0.7) \cdot 10^{36}$ эрг/с и $(6.9 \pm 0.9) \cdot 10^{36}$ эрг/с (предполагая расстояние до источника 8.5 кпк) соответственно. Скиннер в 1985 г. на телескопе XRT получил значение $\sim 7.2 \cdot 10^{36}$ эрг/с в диапазоне энергий 3-30 кэВ.

Аппроксимация данных в диапазоне 4-300 кэВ (рис. 52) (АРТ-П + Сигма) (Сюняев и др. 1991 г. [53]) спектром комптонизированного диска (Сюняев и Титарчук 1980 г. [64]) дает температуру $T_e = 35 \pm 2$ кэВ, полутолщину диска $\tau = 1.5 \pm 0.1$, количество нейтрального газа на луче зрения $N_H L = (1.9 \pm 1) \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$ и спектральный поток на энергии 100 кэВ $F_{100} = (9.0 \pm 0.5) \cdot 10^{-5}$ фот/с/см²/кэВ. Усреднённая светимость источника в диапазоне 4-300 кэВ составила $L = (3.2 \pm 0.2) \cdot 10^{37}$ эрг/с. Спектр источника в стандартном состоянии демонстрирует явный завал на энергиях ~ 150 кэВ.

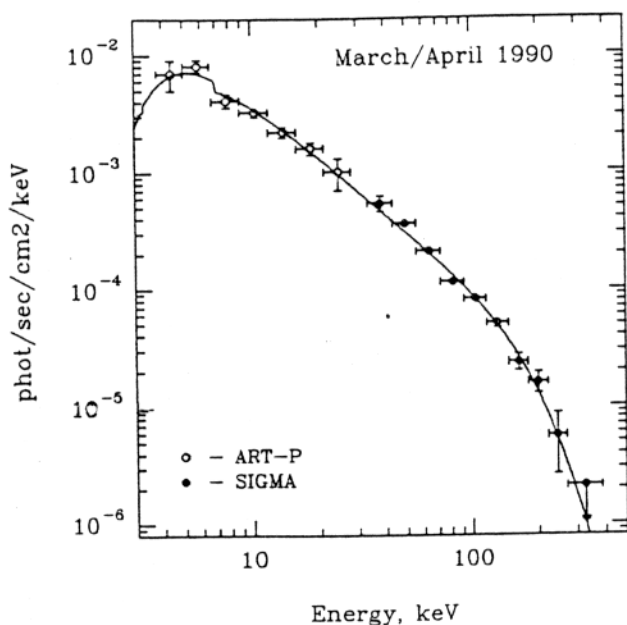


Fig. 52 The spectrum of 1E1740.7-2942, obtained by ART-P and SIGMA telescopes during observations in March/April, 1990. Solid line corresponds to the best fit comptonized disk spectrum (see text).

Рис. 52

Жесткость спектра 1E1740.7-2942 даёт основания рассматривать его, также как и новый источник GRS1758-258, в качестве кандидата в чёрные дыры (Сюняев и др. [56]), поскольку при аккреции на черную дыру возникновение жесткого излучения достаточно естественно, так как из-за недостатка мягких фотонов для комптонизации температура

плазмы может быть очень высока (Шакура и Сюняев, 1973 [62], Шапиро и др., 1976 [65]). Светимость источника 1E1740.7-2942 в диапазоне 30 - 300 кэВ (если этот источник действительно находится на расстоянии 8.5 кпк) близка к светимости известного кандидата в черные дыры Лебедь X-1 (Сюняев и Трюмпер, 1979 [66], Линг и др. [67]).

Осенью 1990 г. источник 1E1740.7-2942 наблюдался телескопом АРТ-П в десяти сеансах. Светимость в диапазоне энергий 4 - 20 кэВ оставалась постоянной на протяжении месяца с 9 сентября по 9 октября на уровне 28.0 ± 0.4 миллиКраб (рис. 53б).

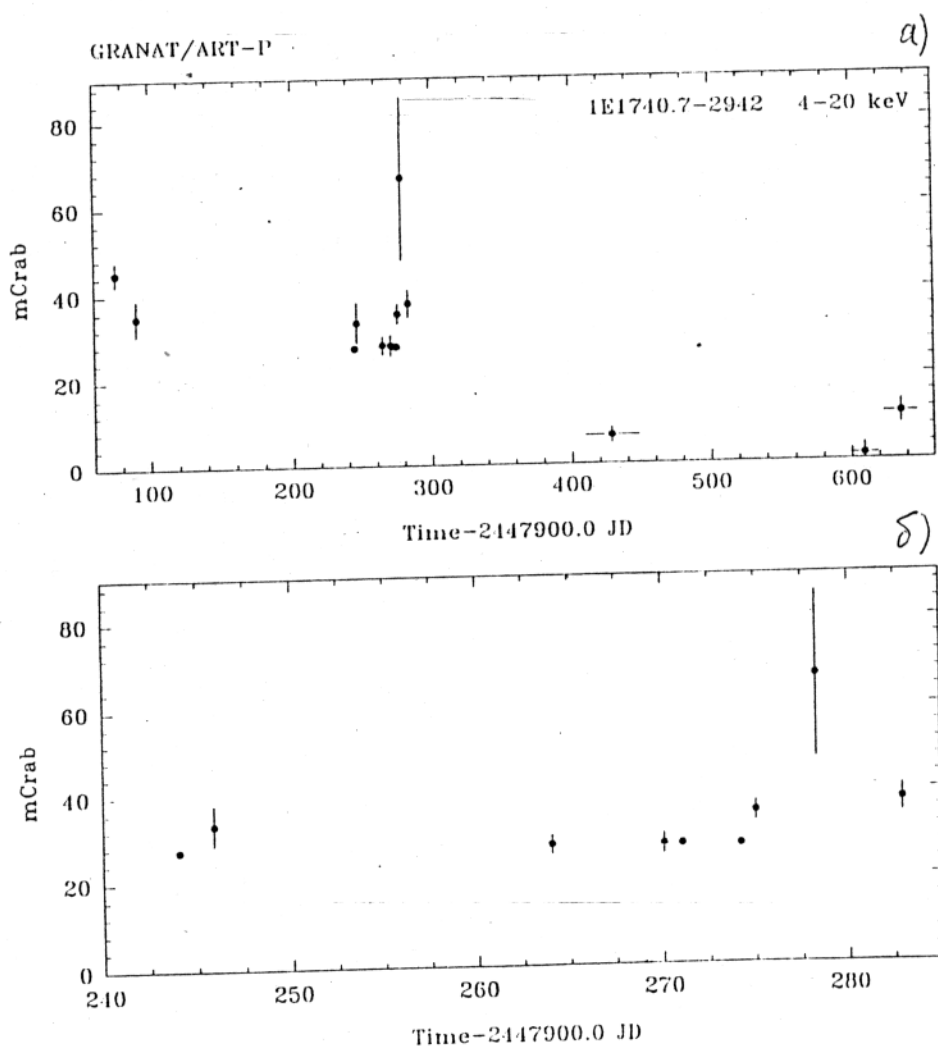


Рис. 53

На рис. 51 приведен спектр фотонов от 1E1740.7-2942 (незакрашенные кружки). В этот период спектр источника хорошо аппроксимируется степенным законом с наклоном $\alpha = -1.40 \pm 0.01$ при фиксированном

поглощении $N_H L = 6 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ атомов водорода на луче зрения с потоком на 10 кэВ $F_{10} = (2.46 \pm 0.05) \cdot 10^{-3} \text{ фот/с/см}^2/\text{кэВ}$ и светимостью в диапазоне энергий 4-20 кэВ $(5.51 \pm 0.09) \cdot 10^{36} \text{ эрг/с}$ (предполагая расстояние до источника 8.5 кпк) соответственно. 10 октября поток от источника возрос примерно на ~30% и составил 35 ± 2 миллиКраба. В сеансах 13 и 14 октября 1E1740.7-2942 находился на краю поля зрения, усреднённый поток составлял 66 ± 19 миллиКраб. 18 октября поток равнялся 37 ± 3 миллиКраба.

Следует отметить, что осенью 1990 г., после, практически, месячной программы наблюдений области центра Галактики телескоп «Сигма» зарегистрировал 13-14 октября сильное ужесточение спектра источника 1E1740.7-2942. Поток, зарегистрированный в диапазоне энергий 300-600 кэВ, составил $(10 \pm 1.8) \cdot 10^{-4} \text{ отсч/с/см}^2$, в то время как величина потока за все время наблюдения весна-осень 1990г. не превысила $1 \cdot 10^{-4} \text{ отсч/с/см}^2$. «Высокое состояние» источника интерпретировалось как аннигиляция в холодной электрон-позитронной плазме (Сюняев и др. 1991 [68]).

Наблюдения, проведённые весной 1991 г. дали новый неожиданный результат: рентгеновский поток от источника 1E1740.7-2942 упал в несколько раз. Эти наблюдения открыли новое «низкое» состояние этого источника, которое никогда не наблюдалось у хорошо известного кандидата в чёрные дыры Суг X-1. Рентгеновский поток составил величину 6.5 ± 1.9 миллиКраб в диапазоне энергий 4-20 кэВ, т.е. уменьшился более чем в пять раз.

Недавно Балли и Левенталь (1991) [69] сообщили об открытии молекулярного облака в направлении на источник 1E1740.7-2942. Сюняев и др. (1991) [70] предположили, что при условии, что источник действительно расположен внутри молекулярного облака и оптическая толща этого облака по томпсоновскому рассеянию составляет ~0.2 (что

соответствует значению $N_H L = 3 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$, приведённому Балли и Левенталем [69], то поток от источника в каждый момент времени не должен падать ниже 0.2 от потока, усреднённого за последний год (или годы). Возможно, что в низком состоянии наблюдается излучение погасшего компактного источника, рассеянное в окружающем облаке. Это рассеянное излучение не должно исчезать одновременно с выключением компактного источника.

Осенью 1991 г. с 29 августа по 23 сентября какого-либо значимого потока от источника 1E1740.7-2942 телескоп АРТ-П не фиксировал. Верхний предел по потоку составил 6.9 миллиКраб (3σ). В последующих сеансах телескоп АРТ-П зарегистрировал излучение от источника 1E1740.7-2942 на уровне 11.0 ± 2.5 миллиКраб. Увеличение потока было зарегистрировано также телескопом «Сигма». Быстрая переменность в масштабе нескольких дней или менее говорит о том, что приборы регистрировали излучение от компактного объекта, а не от окружающего облака.

На рис. 53а приведены данные по потоку от источника 1E1740.7-2942 в единицах миллиКраб для двух лет наблюдений телескопом АРТ-П в диапазоне энергий 4 - 20 кэВ.

Рентгеновские всплески из области Галактического центра, зарегистрированные телескопом ART-P

В 1976 г. спутник SAS-3 зарегистрировал первые три рентгеновские вспышки из области Галактического центра (Льюин и др. 1976 [8]). Точность их локализации (~ 1000 угл. мин.²) была недостаточна для идентификации с каким-либо известным рентгеновским источником, более того, по данным спутника Ariel - 5, который летал годом раньше SAS-3, было известно только о существовании постоянного рентгеновского источника A1742-294 и транзиентного источника A1742-289, в бокс ошибок которого ($\sim 1.2^\circ$) попадал центр Галактики Sgr A (West) (Элис и др. 1975 [3], Вильсон и др. 1977 [6], Проктор и др. 1978 [7]). В 1979 г. в двух, сравнительно коротких сеансах наблюдений, длительностью ~ 7000 секунд, обсерваторией EINSEIN в диапазоне энергий 0.5 - 4.5 кэВ была получена достаточно подробная карта зоны Ядра Галактики, размером $\sim 1 \times 1^\circ$, которая содержала дюжину рентгеновских источников (Ватсон и др. 1981 [10]). Плотность источников говорила о том, что для идентификации вспышек необходима точность, как минимум, на порядок выше, чем в эксперименте SAS-3.

В 1985 г. на МТКК ШАТТЛ был запущен рентгеновский телескоп с кодированной апертурой XRT (Бринкман и др. 1985 [22]), который с 29 июля по 6 августа провел 30 коротких сеансов наблюдений области Галактического центра общей продолжительностью ~ 7 часов. Поле зрения телескопа составляло $\sim 3 \times 3^\circ$ (ширина на полувысоте), угловое разрешение несколько минут дуги, энергетический диапазон 3-30 кэВ. Телескоп XRT построил рентгеновскую карту центра Галактики размером $\sim 6 \times 6^\circ$ (Скиннер и др. 1987 [13]), открыв при этом несколько рентгеновских источников и зарегистрировав 3 августа вблизи источника SLX1744-299 (на расстоянии ~ 3.5 угл. мин.) рентгеновскую

вспышку продолжительностью 20 секунд. Бокс ошибок при этом был менее 16 угл. мин.² (Скиннер и др. 1990 [50]).

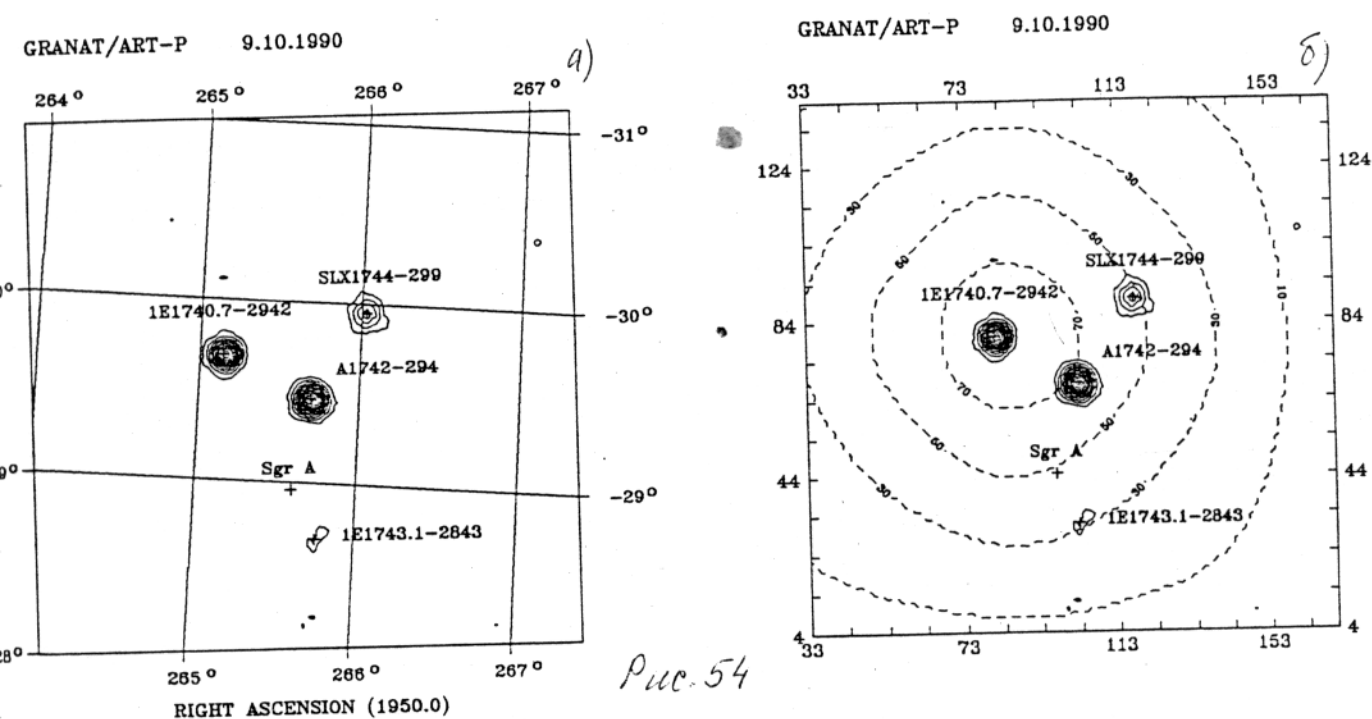
В 1989 г. при наблюдении области Галактического центра телескопом с кодированной апертурой ТТМ на модуле «Квант» станции МИР (Сюняев и др. 1989 [24]) был открыт новый рентгеновский источник KS1731-260, от которого зарегистрировали несколько рентгеновских вспышек. Точность локализации, благодаря кодированной апертуре, была такой же высокой, как и у телескопа XRT, т.е. порядка 10 угл. мин.²

В течении двух лет приборы обсерватории «Гранат» четырежды, с интервалом в полгода, проводили детальный обзор области центра Галактики. В ходе этих наблюдений телескоп АРТ-П зарегистрировал более двух десятков всплесков. Точность локализации (менее 10 угл. мин.²) позволила отождествить вспышки с известными рентгеновскими источниками: A1742-294, SLX1744-299, GX3+1, SLX1732-304, MXB1728-33.

9 октября 1991 г. телескопом АРТ-П в очередном сеансе наблюдений был зарегистрирован очень мощный всплеск с энерговыделением более 10^{38} эрг/с (в диапазоне энергий 3-20 кэВ) от источника SLX1744-299. У всплеска наблюдался необычный для рентгеновских барстеров длинный хвост. В этом же сеансе были зарегистрированы два обычных всплеска от источника A1742-294.

По программе 9 октября исследовался источник 1E1740.7-2942, один из самых жестких источников на небе (Скиннер и др. 1987 [13], Сюняев и др. 1991 [53] [56]). В поле зрения телескопа АРТ-П ($\sim 3.6 \times 3.6^\circ$) попало пять известных источников: A1742-294, SLX1744-299, 1E1740.7-2942, 1E1743.1-2843 и Sgr A. На рис. 54а показано восстановленное рентгеновское изображение размером $\sim 3.0 \times 3.0^\circ$ в диапазоне энергий 3-17 кэВ. Сплошными линиями показаны линии уровня, свидетельствующие о регистрации источника с достоверностью 4, 8, 12 и более стандартных отклонений, крестиками

обозначены координаты известных источников, попавших в поле зрения прибора. Видно, что доминируют три источника A1742-294, SLX1744-299 и 1E1740.7-2942, на уровне 4σ зарегистрирован источник 1E1743.1-2849 и на уровне 2σ источник Sgr A, который на рис. 54а не виден. На рис. 54б показана карта где штриховые линии ограничивают области средней для данного сеанса чувствительности телескопа ART-П на уровне 10, 30, 50 и 70% от максимально возможной. Изображение, приведенное на рис. 54а и 54б, не скорректировано на чувствительность телескопа.



Полное время экспозиции 9 октября составило 15645 секунд (без учета времени на передачу информации). Распределение скорости счета в детекторе в диапазоне 3-17 кэВ показано на рис. 55, по оси X отложено бортовое время в секундах с момента включения телескопа ART-П, один бин соответствует 16 секундам. Наблюдение прерывалось примерно раз в 120-140 сек. на 11 сек. для передачи информации в долговременную память, на рис. 55 время передачи соответствует четко

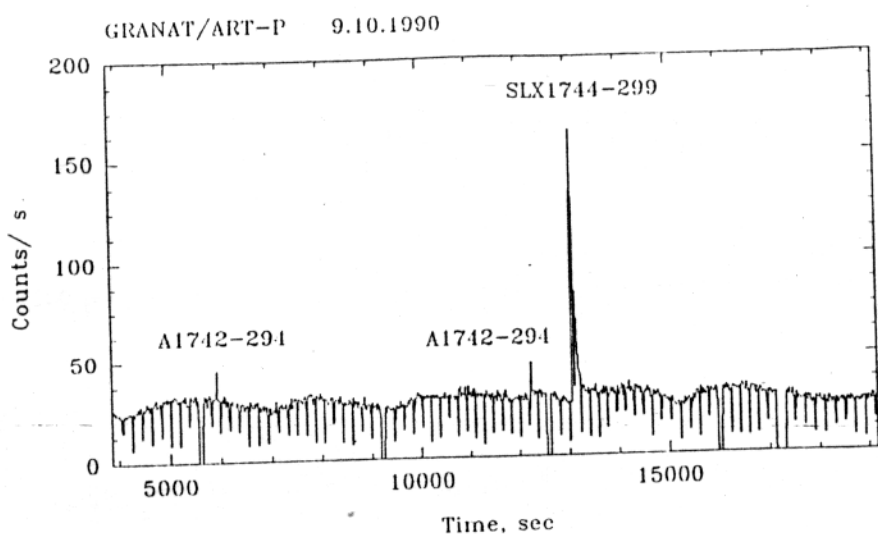


Рис. 55

выраженным узким провалам в скорости счета (гребенка). Примерно раз в час обмен информацией прерывался на более длительное время ~1.5 минут (широкие провалы) для освобождения буфера бортовой ЭВМ. Наблюдаемая широкая волна в скорости счета обусловлена непрерывно меняющимся наведением спутника в пределах ± 30 угл. мин. В 18:20:50, 20:06:09 и 20:19:56 UT было зарегистрировано три всплеска, два от источника A1742-294 и один от SLX1744-299 (отождествление будет показано ниже). Всплеск SLX1744-299 отличался радикально от всплесков A1742-294 своей продолжительностью и мощностью.

На рис. 56а, б и в показаны более подробно (один бин равен одной секунде) три участка, соответствующие наблюдаемым всплескам. Хорошо видно, что если первые два всплеска длились порядка 10 секунд, то у третьего всплеска наблюдается экспоненциальный спад с характерным временем $\tau \approx 43$ с (на рис. 56в - гладкая сплошная линия). Для отождествления источников всплесков было восстановлено три изображения в каждом временном интервале, показанных на рис. 56 штриховыми линиями. Результаты восстановления показаны на рис. 57а, б и в в соответствии с порядком регистрации всплесков. Полученные

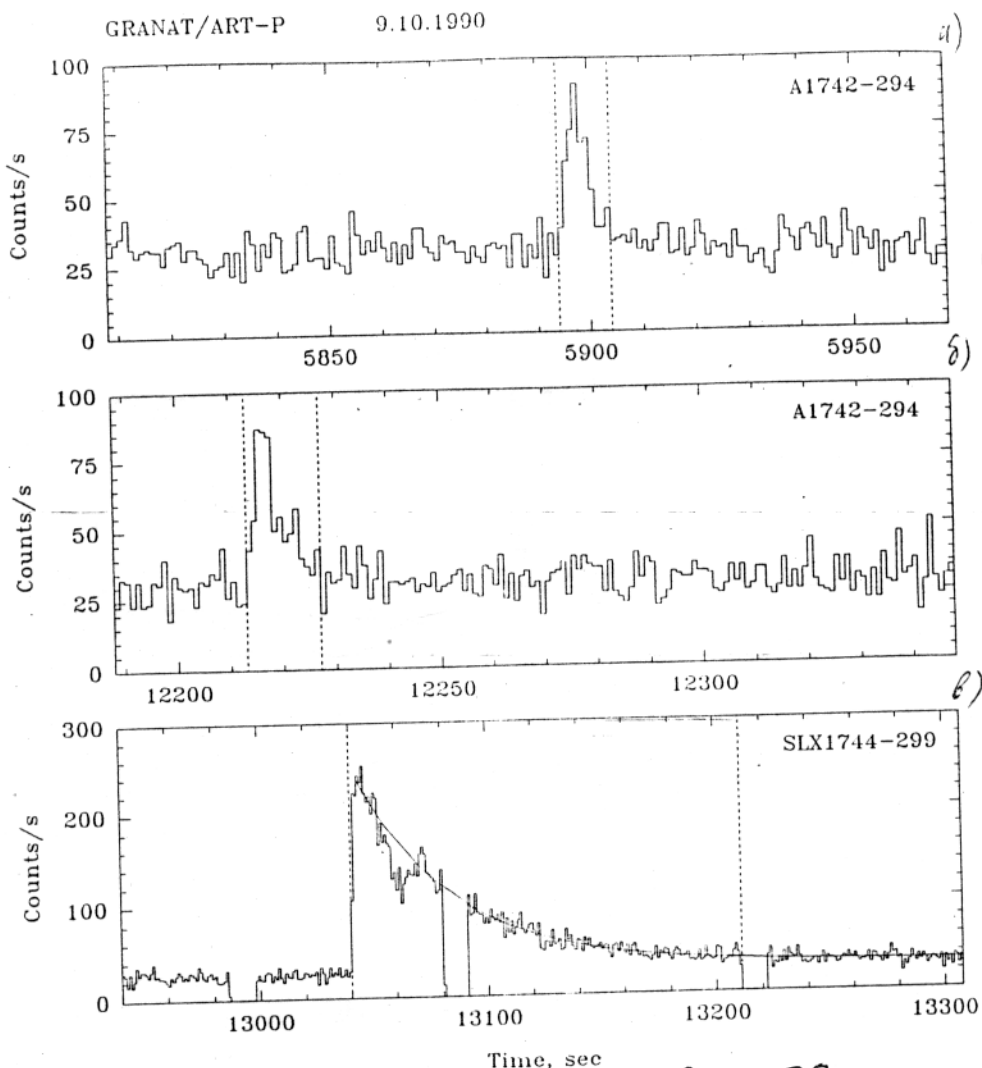
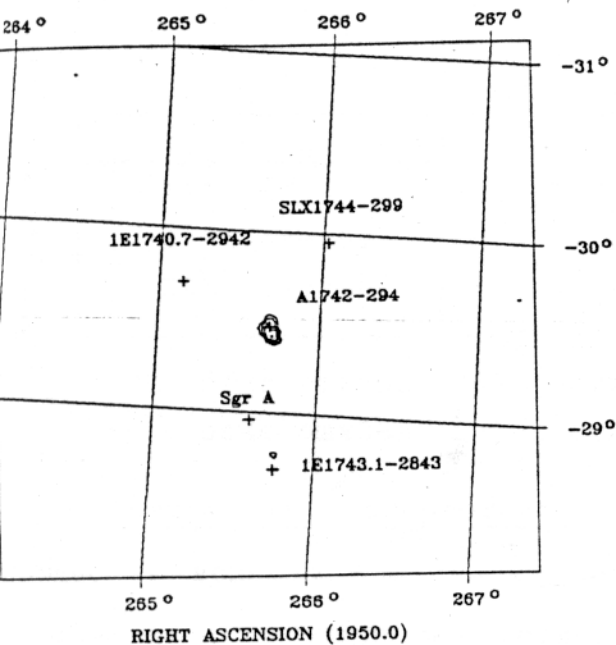


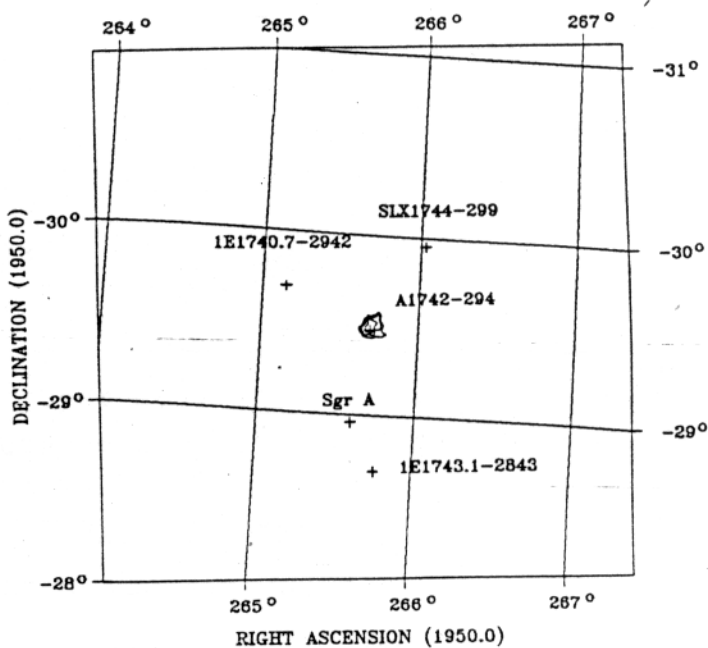
Рис. 56

ординаты всплесков приведены в таблице 12, там же даны координаты источников A1742-294, SLX1744-299 и SLX1744-300. Следует отметить, что источником мощного всплеска является именно SLX1744-299, поскольку некоторые сомнения вызывал тот факт, что в 1985 г. телескопом XRT был зарегистрирован всплеск не от SLX1744-299, а от близлежащего источника SLX1744-300, отстоящего всего на ~ 3.5 угл. мин. (Скиннер и др. 1990 [50]). В нашем же случае положение всплеска большей степенью достоверности совпадает с положением источника SLX1744-299, что позволяет сравнивать спектр источника в обычном состоянии и в момент вспышки.

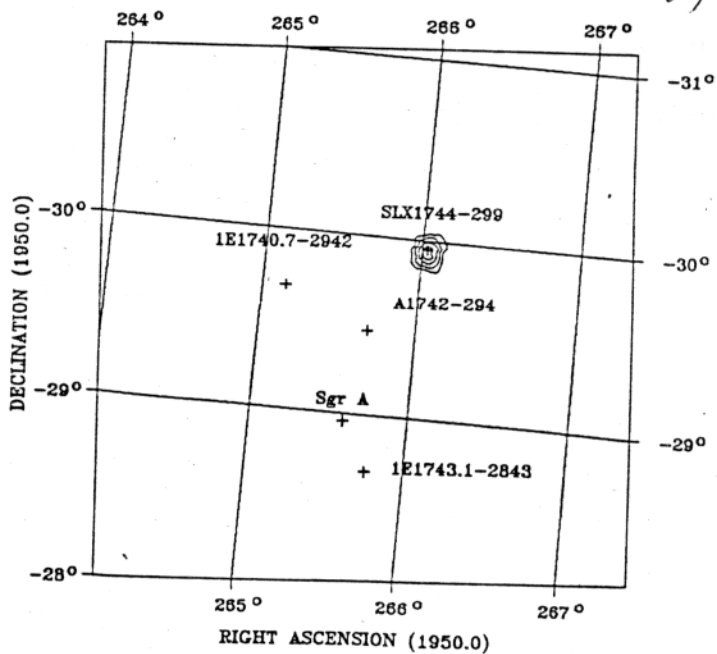
GRANAT/ART-P 9.10.1990 Burst



GRANAT/ART-P 9.10.1990 Burst



GRANAT/ART-P 9.10.1990 Burst



Picc. 57

Таблица 12

Время всплеска бортовое, с	R.A. (1950.0)	DEC. (1950.0)
5895 *	17 ^h 42 ^m 55 ^s	-29° 28' 47"
12214 *	17 ^h 42 ^m 55 ^s	-29° 29' 51"
13041 **	17 ^h 44 ^m 13 ^s	-29° 58' 23"
Источник		
A1742-294	17 ^h 42 ^m 53 ^s	-29° 29' 49"
SLX1744-299	17 ^h 44 ^m 13 ^s	-29° 58' 40"
SLX1744-300	17 ^h 44 ^m 13 ^s	-30° 01' 28"

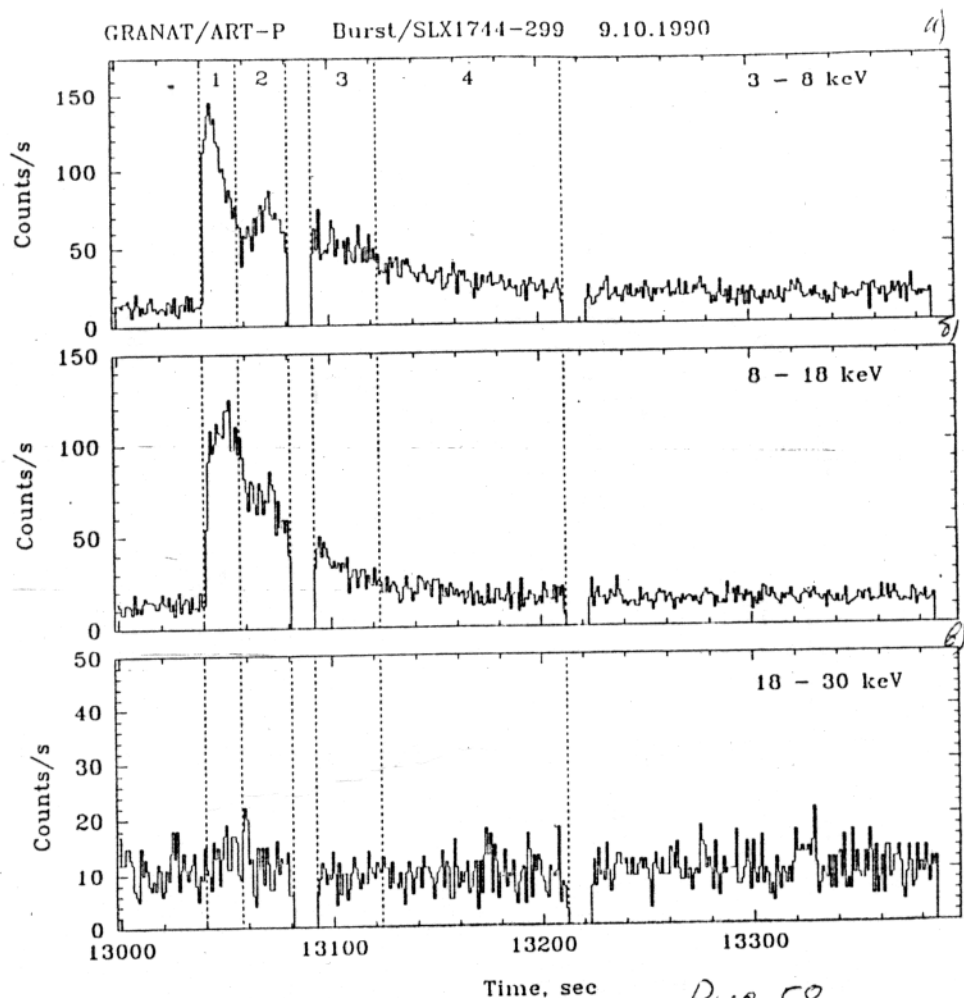
* - бокс ошибок (2σ) соответствует зоне 3.4 угл. мин.²

** - бокс ошибок (2σ) соответствует зоне ≤ 1 угл. мин.²

Светимость и энергетические спектры всплесков и источников.

Мощность вспышки SLX1744-299 оказалась достаточной для того, чтобы исследовать эволюцию энергетического спектра во времени. На рис. 58а, б и в показана вспышка в трех энергетических диапазонах 3-8, 8-18 и 18-30 кэВ, скорость счета не скорректирована на «мёртвое» время прибора. Ясно видна разница в форме вспышки в первом и втором энергетических диапазонах. В мягких энергиях после прохождения максимума вспышки наблюдается довольно резкий спад на ~60% в течение ~15 с, за которым следует второй подъем (примерно на 30%) с таким же характерным временем ~12 с и только после этого длительный спад в течении ~150 с. Во втором энергетическом диапазоне такого ярко выраженного провала не наблюдается.

Вспышка была поделена на четыре временных интервала, на рис. 58 они показаны штриховыми линиями и помечены цифрами 1, 2, 3 и 4, что соответствует временам: 0-17, 18-38, 50-79, 80-168 с с момента вспышки, интервал с 39 по 49 с соответствует передачи информации в бортовую память. На рис. 53 показаны энергетические спектры, которые были зарегистрированы в интервалы времени, указанные на рис. 58: незакрашенные кружки - 0-17, закрашенные кружки - 18-38,



незакрашенный треугольник - 50-79, закрашенный треугольник - 80-168

Для того, чтобы понять какой мощности была вспышка, на рис. 59

трихвойной линией показан спектр Краба $9.36 \cdot 10^{-2.06}$ (Кояма и др. 1984

48]), на этом же рисунке приводится и спектр источника SLX1744-299

нормальном состоянии - незакрашенные квадратики. Спектр

нормального состояния лучше всего аппроксимируется тормозным

излучением оптически тонкой плазмы с $kT_e = (8.9 \pm 0.6)$ кэВ при

фиксированном поглощении $N_H L = 6.0 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ атомов водорода на луче

зрения (далее везде используется данное значение) и потоком на 10

кэВ $F_{10} = (2.01 \pm 0.24) \cdot 10^{-3}$ фот/с/см²/кэВ. Из рис. 53 видно, что спектр

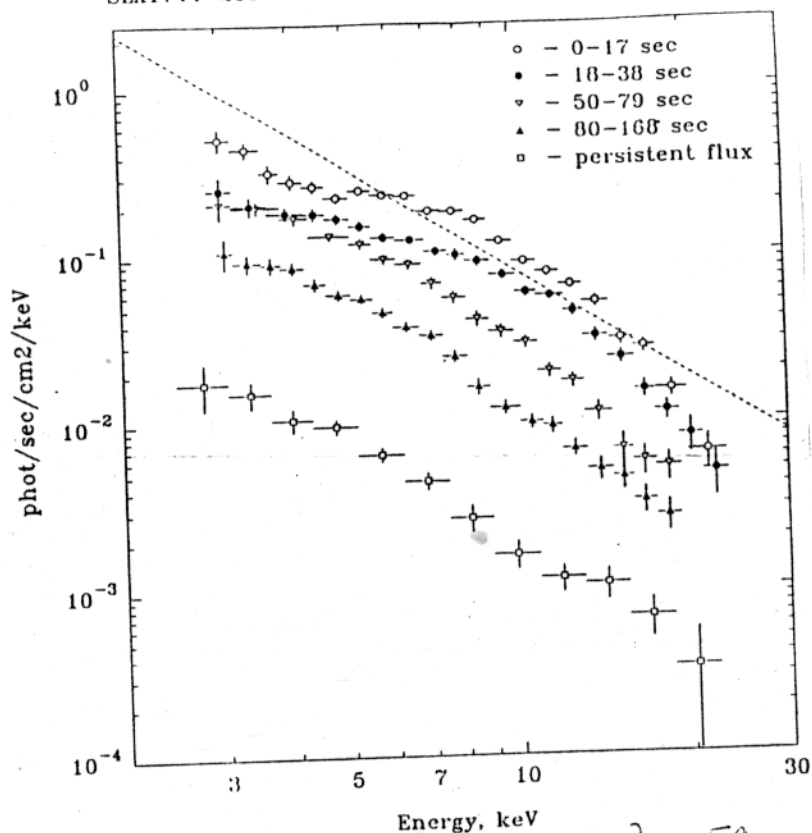
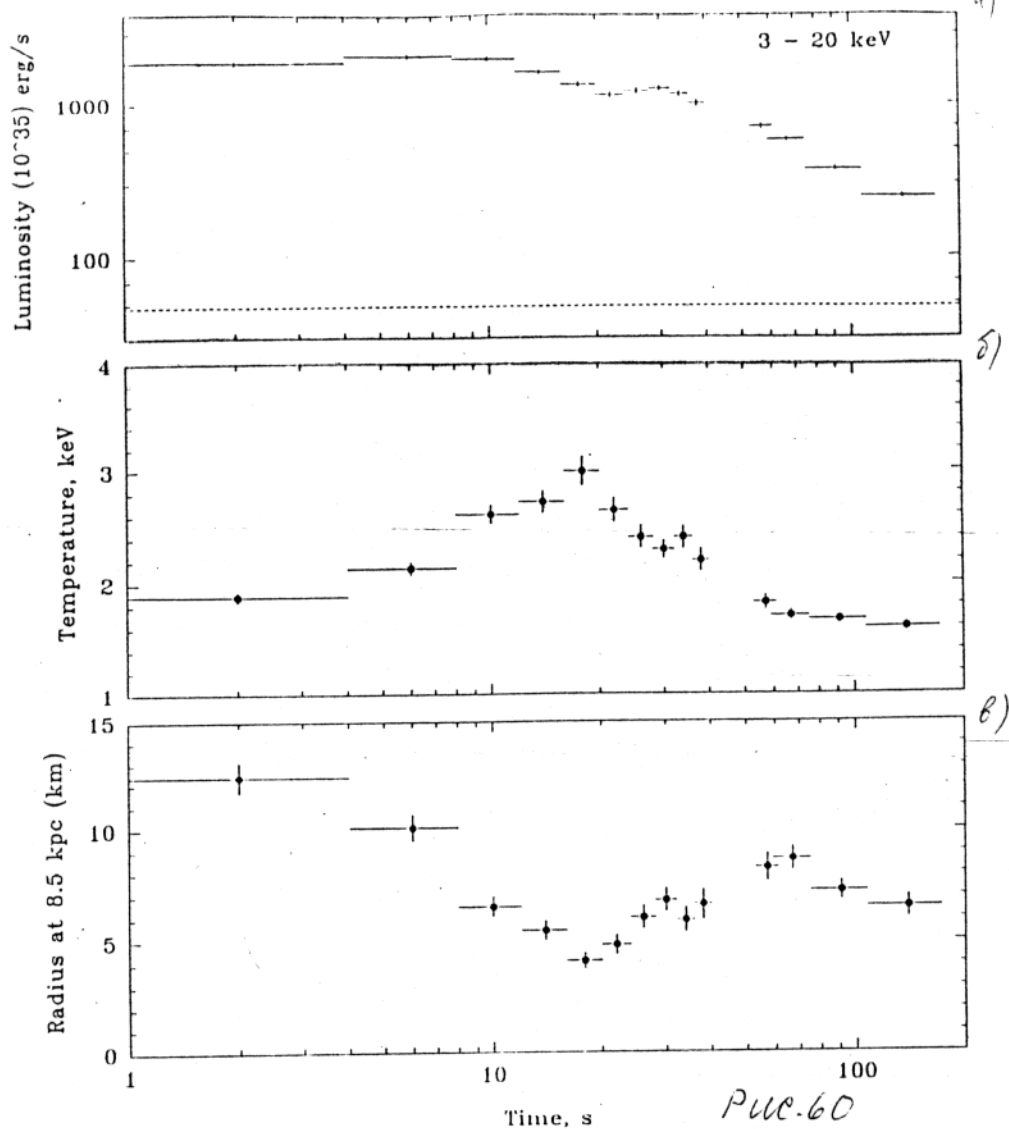


Рис. 59

источника значительно менялся в процессе вспышки. Эти изменения были исследованы более подробно.

На рис. 60а показана светимость SLX1744-299 во время всплеска в диапазоне энергий 3-20 кэВ, на рис. 60б - температура и на рис. 59в - радиус излучающей области, полученные в результате аппроксимации спектра вспышки чернотельным излучением (предполагаемое расстояние 8.5 кпк). Логарифмический временной масштаб позволяет наблюдать как быструю, так и медленную эволюцию параметров вспышки. Из рис. 60а видно, что светимость источника в максимуме достигала величины $(2.15 \pm 0.07) \cdot 10^{38}$ эрг/с, в то время как в нормальном состоянии она была в ~45 раз меньше $(4.74 \pm 0.36) \cdot 10^{36}$ эрг/с, штриховая линия показывает светимость источника в нормальном состоянии. Из рис. 59б видно, что примерно на 20 с от начала всплеска температура



излучающей области достигла максимума $kT_e \approx 3$ кэВ, и это совпадает с провалом в светимости источника, также имевшем место на 20 с с начала всплеска. Дальше температура медленно падала с небольшим скачком в районе ~33 с. Используя простое соотношение между светимостью источника и чернотельной температурой, при известном расстоянии, можно оценить радиус излучающей области, что и показано на рис. 60в. Следует отметить, что в начальный момент (примерно до 30с) спектр хорошо описывался чернотельным спектром, после же он стал все более приближаться по форме к спектру в нормальном состоянии, т.е. тормозному излучению оптически тонкой плазмы.

Необходимо отметить, что очень похожий всплеск по форме, продолжительности и мощности был зарегистрирован спутником EXOSAT в 1985 г. при наблюдениях компактной маломассивной рентгеновской двойной системы XB 1905+00 (Шевалье и Иловайский 1989 г. [71]). За всё время наблюдений телескопом АРТ-П был зарегистрирован только один всплеск такой мощности и продолжительности. По всей видимости они достаточно редки и отличаются по своей природе от обычных барстеров 1-го типа, в которых накопленный между вспышками гелий сгорает за несколько секунд.

Ниже приведены данные для двух всплесков от источника A1742-294. Из-за низкой значимости даны только усредненные за все время вспышек параметры: для первой вспышки светимость составила $(2.14 \pm 0.2) \cdot 10^{37}$ эрг/с, температура $kT_e \approx (1.45 \pm 0.09)$ кэВ, радиус (7.6 ± 1.1) км, для второй вспышки соответственно $(2.50 \pm 0.2) \cdot 10^{37}$ эрг/с, $kT_e \approx (1.96 \pm 0.12)$ кэВ, радиус (4.1 ± 0.6) км (при аппроксимации спектра вспышки чернотельным излучением и расстоянии 8.5 кпк). На рис. 61 приведены два спектра соответствующие моменту вспышки - незакрашенные кружки, её аппроксимация чернотельным излучением - штриховая линия, и нормальному состоянию - покрашенные кружки и аппроксимация тормозным излучением оптически тонкой плазмы с $kT_e = (8.58 \pm 0.33)$ кэВ и потоком на 10 кэВ $F_{10} = (3.00 \pm 0.18) \cdot 10^{-3}$ фот/с/см²/кэВ - сплошная линия.

В таблице 13 приведено время (UT) и координаты всплесков, зарегистрированных телескопом АРТ-П в осенних (1990 г.) сеансах наблюдения области центра Галактики, бокс ошибок ≤ 2 угл. мин. Здесь же приведены координаты рентгеновских источников попавших в бокс ошибок всплесков.

Следует отметить, что в сеансе наблюдений 7 сентября 1990 г., длительностью ~16500 с значимого потока на уровне 2.5 миллиКраб или

$2.4 \cdot 10^{-4}$ фот/с/см²/кэВ (3 σ) в диапазоне энергий 4-20 кэВ от источника МХВ1730-335, известного как «Быстрый барстер», зарегистрировано не было. Не было также зарегистрировано и ни одного рентгеновского всплеска от этого источника. В этом сеансе был зарегистрирован поток только от близлежащего «медленного» барстера МХВ1728-33, который составил 78 ± 1 миллиКраб или $(7.7 \pm 0.1) \cdot 10^{-3}$ фот/с/см²/кэВ. От него же была зарегистрирована одна рентгеновская вспышка в 12.00.35 UT.

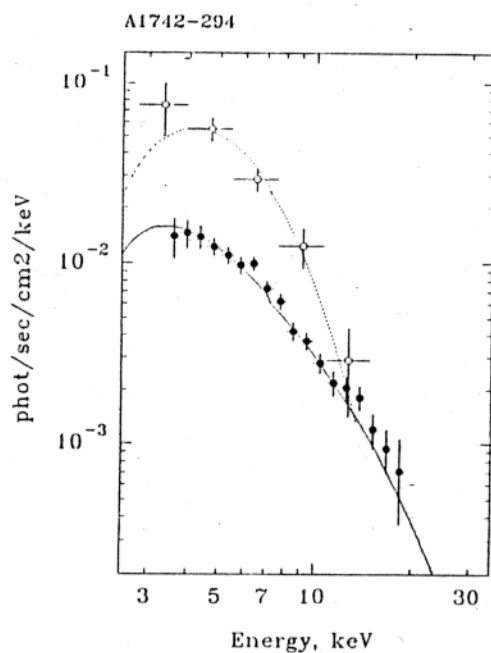


Рис. 61

Таблица 13

Время всплеска UT, 1990 г.	R.A. (1950.0)	DEC. (1950.0)	Источник
12.00.35 7.09	17 ^h 28 ^m 41 ^s	-33°49'29"	MXB1728-33
12.16.18 8.09	17 ^h 32 ^m 34 ^s	-30°29'26"	SLX1732-304
14.07.46 9.09	17 ^h 42 ^m 50 ^s	-29°31'18"	A1742-294
15.42.04 9.09	17 ^h 44 ^m 13 ^s	-30°00'48"	SLX1744-300
15.53.19 9.09	17 ^h 42 ^m 52 ^s	-29°31'26"	A1742-294
20.05.16 9.09	17 ^h 44 ^m 16 ^s	-30°02'21"	SLX1744-300
0.52.23 10.09	17 ^h 44 ^m 14 ^s	-30°02'10"	SLX1744-300
14.31.30 5.10	17 ^h 42 ^m 54 ^s	-29°32'59"	A1742-294
18.43.32 5.10	17 ^h 42 ^m 51 ^s	-29°30'54"	A1742-294
22.10.28 6.10	17 ^h 42 ^m 50 ^s	-29°30'00"	A1742-294
14.35.49 10.10	17 ^h 42 ^m 51 ^s	-29°29'25"	A1742-294
16.06.23 10.10	17 ^h 42 ^m 47 ^s	-29°29'43"	A1742-294
21.49.58 14.10	17 ^h 44 ^m 44 ^s	-26°34'44"	GX 3+1
9.50.28 18.10	17 ^h 42 ^m 52 ^s	-29°28'31"	A1742-294
11.07.49 18.10	17 ^h 44 ^m 08 ^s	-29°57'10"	SLX1744-299
Источник			
A1742-294	17 ^h 42 ^m 53 ^s	-29°29'49"	
SLX1744-299	17 ^h 44 ^m 13 ^s	-29°58'40"	
SLX1744-300	17 ^h 44 ^m 13 ^s	-30°01'28"	
GX 3+1	17 ^h 44 ^m 48 ^s	-26°32'49"	
MXB1728-33	17 ^h 44 ^m 13 ^s	-29°58'40"	
SLX1732-304	17 ^h 32 ^m 38 ^s	-30°25'40"	

З А К Л Ю Ч Е Н И Е.

В ходе большой коллективной работы при непосредственном участии автора при разработке телескопа с кодированной апертурой для наблюдений в рентгеновском диапазоне энергий:

- найдена оптимальная конфигурация маски, коллиматора и детектора, позволяющая получать изображения без артефактов;
- разработан позиционно-чувствительный детектор на основе многопроволочной пропорциональной камеры большой площади повышенного давления и ресурсом работы более года без смены рабочего газа;
- разработан стенд для наземной калибровки телескопа с имитацией квазипараллельного пучка фотонов для исследования пространственного и энергетического разрешения системы маска-детектор;
- проведена наземная и полетная калибровка телескопа.

По данным наблюдений телескопа АРТ-П построена рентгеновская карта области центра Галактики в диапазоне энергий 3 - 30 кэВ. Обнаружено пять новых рентгеновских источников: GRS1758-258, GRS1741.9-2953, GRS1734-292, GRS1736-297 и GRS1747-312, один из которых - GRS1758-258, вблизи известного источника GX5-1, имеет аномально жесткий спектр и может быть причислен к кандидатам в черные дыры.

Проведено исследование энергетических спектров и переменности рентгеновских источников - Sgr A (динамического центра Галактики по данным радионаблюдений) и кандидата в чёрные дыры, самого жесткого в области Галактического центра источника, 1E1740.7-2942. Впервые обнаружена сильная переменность источников Sgr A и 1E1740.7-2942 в рентгеновском диапазоне энергий.

Зарегистрировано и локализовано с точностью одной угловой минуты около двух десятков рентгеновских всплесков. Источники

всплесков отождествлены с рядом известных рентгеновских источников в области Галактического центра. Подробно исследован мощный, продолжительный всплеск от источника SLX1744-299.

В заключение автор выражает искреннюю благодарность: члену-корреспонденту АН СССР Р. А. Сюняеву за постановку задачи и научное руководство на протяжении всей работы; кандидату физ.-мат. наук Ямбуренко Н. С. и кандидату тех. наук Корневу Е. А. за помощь, руководство и плодотворную совместную работу в ходе создания телескопа АРТ-П, кандидату тех. наук Синайко Е. И. и Степанову Д. К. за помощь в разработке калибровочного стенда, ближайшим коллегам: Деханову И. А., Бабаляну Г. Г., к. ф.-м. н. Гребеневу С. А., к. ф.-м. н. Чуразову Е. М., к. ф.-м. н. Гильфанову М. Р., Лозникову В. М., к. ф.-м. н. Мелиоранскому А. С., Чулкову И. В.; директору ОКБ ИКИ Табалдыеву С. Р., оказавшему организационную помощь в реализации проекта АРТ-П, сотрудникам ОКБ ИКИ: Спектору Л. В., Лемберскому В. М., Арямкину В. М., Сероштанову В. М., Мокроусову Н. В., Штеренбенргу А. С., Филатову А. Н., Перцеву А. И., Шевченко В. С., Шмелёву В. С., Фукс В. В., Черниковой Л. Б., Пустовалову М. Н., Астахову Ю. С. и другим сотрудникам принимавшим участие в создании телескопа АРТ-П, техническому руководителю проекта «Гранат» Новикову Б. С., сотрудникам ИКИ Евгенову В. М., Богомолу А., Благий С., Дьячкову А. В., Хавенсону Н., специалистам НПО им. Лавочкина, создавшим спутник «Гранат», и участвующим в управлении аппаратом, сотрудникам Центра дальней космической связи в г. Евпатория, непосредственно участвующим в приёме данных со спутника «Гранат».

Список литературы

1. Беклин и Негебауэр (Becklin, E. E., and Neugebauer, G.)//
Astrophys. J. 1968. V. 151. P. 145.
2. Келлогг и др. (Kellogg, E., Gursky, H., Murray, S., Tananbaum, H.,
Giacconi, R.)// Astrophys. J. Letters. 1971. V. 169. P.99.
3. Элис и др. (Eyles, C.J., Skinner, G.K., and Willmore, A.P.)//
Nature, 1975, V. 257. P. 291.
4. Брандуарди и др. (Branduardi, G., Ives, J.C., Sanford, P.W.,
Brinkman, A.C., and Maraschi, L.)// Monthly Not. Roy. Astron.
Soc. 1976. V. 175. P. 47.
5. Жерниган и др. (Jernigan, J.G., Apparao, K.M.V., Bradt, H.V.,
Doxsey, R.E., Dower, R.G., and McClintock, J.E.)// Nature,
1978. V. 272. P. 701.
6. Вильсон и др. (Wilson, A.M., Carpenter, G.F., Eyles, C.J.,
Skinner G.K., Wilmore, A.P.)// Astrophys. J. Letters. 1977. V.
215. P. 111.
7. Проктор и др. (Proctor, R.J., Skinner G.K., Wilmore, A.P.)//
Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1978. V. 185. P. 745.
8. Льюин и др. (Lewin, W.H.G., et al.)// Monthly Not. Roy. Astron.
Soc. 1976. V. 1976. P. 83.
9. Крудас и др. (Cruddace, R.G., Fritz, G., Shlman, S., Friedman,
H., McKee, J., Johnson, M.)// Astrophys. J. Letters. 1978. V.
222. P. 95.
10. Ватсон и др. (Watson, M.G., Willingale, R., Grindlay, J.E.,
Hertz, P.)// Astrophys. J. 1981. V. 250. P. 142.
11. Герц и Гриндли (Hertz, P., and Grindlay, J.E.)// Astrophys. J.
1984. V. 278. P. 137.
12. Кавай и др. (Kawai, N., Fenimore, E.E., Middleditch, J.,
Cruddace, R.G., Fritz, G.G., Snyder, W.A., Ulmer, M.P.)//

- Astrophys. J. 1988. V. 330. P. 130.
- Скиннер и др. (Skinner, G.K., Willmore, A.P., Eyles, C.J., Bertram, D., Church, M.J., Harper, P.K.S., Herring, J.R.H., Peden, J.C.M., Pollock, A.M.T., Ponman, T.J., Watt, M.P.)// Nature, 1987, V. 330. P. 544.
- Денис и др. (Dennis, B.R., et. al.)// Astrophys. J. 1980. V. 236. P. 49.
- Найт и др. (Knight, F.K., Johnson, W.N., Kurfess, J.D., Strickman, M.S.)// Astrophys. J. 1985. V. 290. P. 557.
- Маттьюсон (Matteson, J.L.)// The Galactic Center, eds. Riegler, G.R. & Blandford, R.D., Am. Inst. Phys., New York, 1982. P. 109.
- Левенталь и др. (Leventhal, M., MacCallum, C.J., Stang, P.D.)// Astrophys. J. 1978. V. 225. P. 11.
- Левенталь и др. (Leventhal, M., MacCallum, C.J., Hutters, A.F., Stang, P.D.)// Astrophys. J. 1986. V. 302. P. 459.
- Риглер и др. (Riegler, G.R. et. al.)// Astrophys. J. 1981. V. 248. P. 13.
- Риглер и др. (Riegler, G.R., Ling, J.C., Mahoney, W.A., Wheaton, W.A., Jacobson, A.S.)// Astrophys. J. 1985, V. 294. P. 13.
- Макишима и др. (Makishima, K. et. al.)// Astrophys. J. 1981. V. 247. P. 23.
- Бринкман и др. (Brinkman et. al.)// Non Thermal and Very High Temperature Phenomena in X-ray Astronomy, eds. G.C.Perola and M.Salvati, Istituto Astronomico, Univerita «La Sapienza», Roma, 1985. P. 261.
- Занд и др. (In't Zand, J.J.M. et al.)// Timing Neutron Stars, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, eds. H.Ogelman and E.P.J. van den Heuvel 1989. P. 317.

- Сюняев и др. (Sunyaev, R., Churazov, E., Gilfanov M.R., Loznikov, V., Yamburenko N., Skinner, G.K., Patterson, T.G., Willmore, A.P., Emam, O., Brinkman, A.C., Heise, J., in't Zand, J.J.M., Jager, R.)// Proc. 23rd ESLAB Symposium, eds. Hunt, J. & Battrick, B., 1989. P. 641.
- Занд и др. (In't Zand, J.J.M., Patterson, T.G., Brinkman, A.C., Heise, J., Jager, R., Skinner, G.K., Willmore, A.P., Al-Emam, O., Sunyaev, R., Churazov, E., Gilfanov M.R., Yamburenko N.)// Proc. 23rd ESLAB Symposium, eds. Hunt, J. & Battrick, B., 1989. P. 693.
- Патерсон и др. (Patterson, T.G., Skinner, G.K., Willmore, A.P., Emam, O., Brinkman, A.C., Heise, J., in't Zand, J.J.M., Jager, R., Sunyaev, R., Churazov, E., Gilfanov M.R., Yamburenko N.)// Proc. 23rd ESLAB Symposium, eds. Hunt, J. & Battrick, B., 1989. P. 567.
- Сюняев и др. (Сюняев Р., Бороздин К., Гильфанов М., Ефремов В., Каниовский А., Чуразов Е., Скиннер Дж., Аль-Эмам О., Паттерсон Т., Виллмор А., Бринкман А., Хайзе Дж., Ин'т Занд Дж., Ягнр Р., Вогес В., Питч В., Деберайнер С., Энгельхаузер Я., Трюмпер И., Реппин К., Кендзиорра Е., Мони Б., Майсак М., Штауберт Р.)// Письма в Астрон. журн. 1991. Т. 17, 2, С. 126.
- В. Ямбуренко и др. (Ямбуренко Н.С., Павлинский М.Н., Бабалян Г.Г., Деханов И.А., Сюняев Р.А., Табалдыев С.Р., Корнев Е.А., Арямкин В.М., Лемберский В.И., Спектор Л.В.)// Аппаратура и методы исследования космического пространства, Москва «НАУКА», отв. ред. Балебанов В.М. 1989. С. 182.
9. Павлинский и др. (Павлинский М.Н., Ямбуренко Н.С., Деханов И.А., Бабалян Г.Г., Сюняев Р.А., Корнев Е.А., Табалдыев С.Р.,

- Спектор Л. В., Арянкин В. М., Зинько А. А., Лемберский В. И., Мокроусов Н. В., Бондаренко С. Н., Штеренберг А. С.)// Труды четвертого международного семинара Научное Космическое Приборостроение СССР, г. Фрунзе, ИКИ АН СССР, 1989. С. 44.
30. Поль и др. (Paul, J., Mandrou P., Roques J.P., et al.)// Proc. COSPAR. Pergamon Press. 1990.
31. Ямбуренко Н. С., Павлинский М. Н., Бабалян Г. Г. и др.// Аппаратура и методы исследования космического пространства, Москва «НАУКА» отв. ред. В. М. Балебанов, 1989. С. 182.
32. Джаконни и др. (Giacconi, R., et al.)// Astrophys. J. 1979. V. 230. P. 540.
33. Трюмпер (Trueemper, J.)// Adv. Space Res. 1983. V. 2. P. 241.
34. Вейскопф (Weisskopf., M.)// Astrophysical Letters and Communications, 1987. V. 26. P. 1.
35. Дике (Dicke, R. H.)// Astrophys. J. 1968. V. 153. P. 101.
36. Алес (Ables, J.G.)// Proc. of the Astron. Soc. of Australia, 1968. V. 4. P. 172.
37. Гансон и Полихронопулос (Gunson, J., and Polychronopoulos, B.)// Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1976. V. 177. P. 485.
38. Миямото (Miyamoto, S.)// Space Science Instr. 1977. V. 3. P. 473.
39. Фенимор и Кэннон (Fenimore, E. E., Cannon, T. M.)// Applied Optics, 1978. V. 17. 3. P. 337.
40. Проктор и др. (Proctor, R. J., Skinner G. K., Wilmore A. P.)// Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1979. V. 187. P. 633.
41. Любарский и др. (Любарский Ю. Э., Павлинский М. Н., Ямбуренко Н. С.)// Авторское свидетельство 1294125 от 1.11.1986 на изобретение: «Устройство для получения изображений радиоактивных объектов».

- Сюняев и др. (Sunyaev, R., Kaniovsky, A., Efremov, V., et al.)// Nature. 1987a. V. 330. P. 227.
- Сюняев Р. А., Гильфанов М. Р., Чуразов Е. М. и др. // Письма в Астрон. журн. 1988. Т. 14. С. 591.
- Гребенев С. А., Сюняев Р. А., Павлинский М. Н. и др. // Письма в Астрон. журн. 1991. Т. 17. 4. С. 310.
- Келлог и др. (Kellogg, E., Brissenden, R., Flanagan, K., Freeman, M., Hughes, J., Jones, M., Ljungberg, M., McKinnon, P., Podgorski, W., Schwartz, D., Zombeck M.)// Proceedings of SPIE Conference «Multilayer and Grazing Incidence X-Ray/EUV Optics». 1991. P. 1546.
- Химмельблау П. // Прикладное нелинейное программирование, Мир, 1975.
- Лэмптон (Lempton, M.)// Astrophys. J. 1976. V. 208. P. 177.
- Кояма и др. (Koyama, K., Ikegami, T., Inoue, H., et al.)// Publ. Astron. Soc. Japan. 1984. V. 36. P. 659.
- Иное и др. (Inoue, H., Koyama, K., Matsuoka, M., et al.)// Nucl. Instr. Methods. 1978. V. 157. P. 295.
- Скиннер и др. (Skinner, G.K., Foster, A.J., Willmore, A.P., Eyles, C., J.)// Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1990, V. 243, P. 72.
- Кук и др. (Cook, W.R., Grunsfeld, J.M., Heindl, W.A., et al.)// Astrophys. J. (Letters). 1991. V. 372. P. 75.
- Мандру и др. (Mandrou, P., et al.)// IAU Circ. No 5140, 1990.
- Сюняев и др. (Sunyaev R, Churazov E., Gilfanov M., Pavlinsky M., Grebenev S., Babalyan G., Dekhanov I., Yamburenko N., Bouchet L., Niel M., Roques J.-P., Mandrou P., Goldwurm A., Cordier B., Laurent Ph., Paul J.)// Astron. Astrophys. 1991, V. 247. P.

- Поль и др. (Paul, J., et al)// Proc. of Int. Symp. on Gamma-ray line Astrophysics, Saclay, 1990. in press.
- Сюняев Р., Павлинский М., Гильфанов М. и др.// Письма в Астрон. журн. 1991а. Т. 17. С. 99.
- Сюняев Р., Гильфанов М., Чуразов Е. и др.// Письма в Астрон. журн. 1991б. Т. 17. С. 116.
- Павлинский М., Гребенев С., Сюняев Р.// Письма в Астрон. журн. 1992. в печати.
- Митсуда и др. (Mitsuda K., Takeshima T., Kii T. et al.)// Astrophys. Journ. 1990. V. 353. P. 480.
- Оорт (Oort J.H.)// Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1977. V. 15. P. 295.
- Таунс (Townes, C.H.)// The Center of the Galaxy. IAU Symp. 136. Ed. Morris M. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1989. P. 1.
- Тернер и Паундс (Turner, T.J., Pounds, K.A.)// Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1989. V. 240. P. 833.
- Шакура и Сюняев (Shakura N.I. and Sunyaev R.A.)// Astron. Astrophys. 1973. V. 24. P. 337.
- Шакура и Сюняев (Shakura N.I. and Sunyaev R.A.)// Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 1976. V. 175. P. 613.
- Сюняев и Титарчук // Astron. and Astrophys. 1980. V. 86. P. 121.
- Шапиро и др. (Shapiro, S.L., Lightman, A.P., Eardley, D.M.)// Astrophys. J. 1976. V. 204. P. 187.
- Сюняев и Трюмпер (Sunyaev, R.A., Truemper, J.)// Nature. 1979. V. 279. P. 506.
- Линг и др. (Ling, J.C., Mahoney, W.A., Wheaton, Wm.A. et al.)// Astrophys. J. Letters. 1987. V. 321. P. 117.
- Сюняев и др. (Sunyaev, R., Churazov, E., Gilfanov M.R., et

al.)// Proc. 28th Yamada Conference. Nagoya. Japan. 1991.

Балли и Левенталь (Bally, J., Leventhal, M.)// IAU Circ. 1991.
N. 5228.

Сюняев Р. А., Гильфанов М. Р., Чуразов Е. М. и др. // Astrophys.
J. Letters in press.

Шевалье и Иловайский (Chevalier, C., Ilovaişky, S.)// Two
topics in X-ray astronomy: Proc. 23rd ESLAB Symposium / Eds
Hunt, J. & Battrick, B. Paris: ESA Publ. Division, 1989. V. 1.
P. 345.