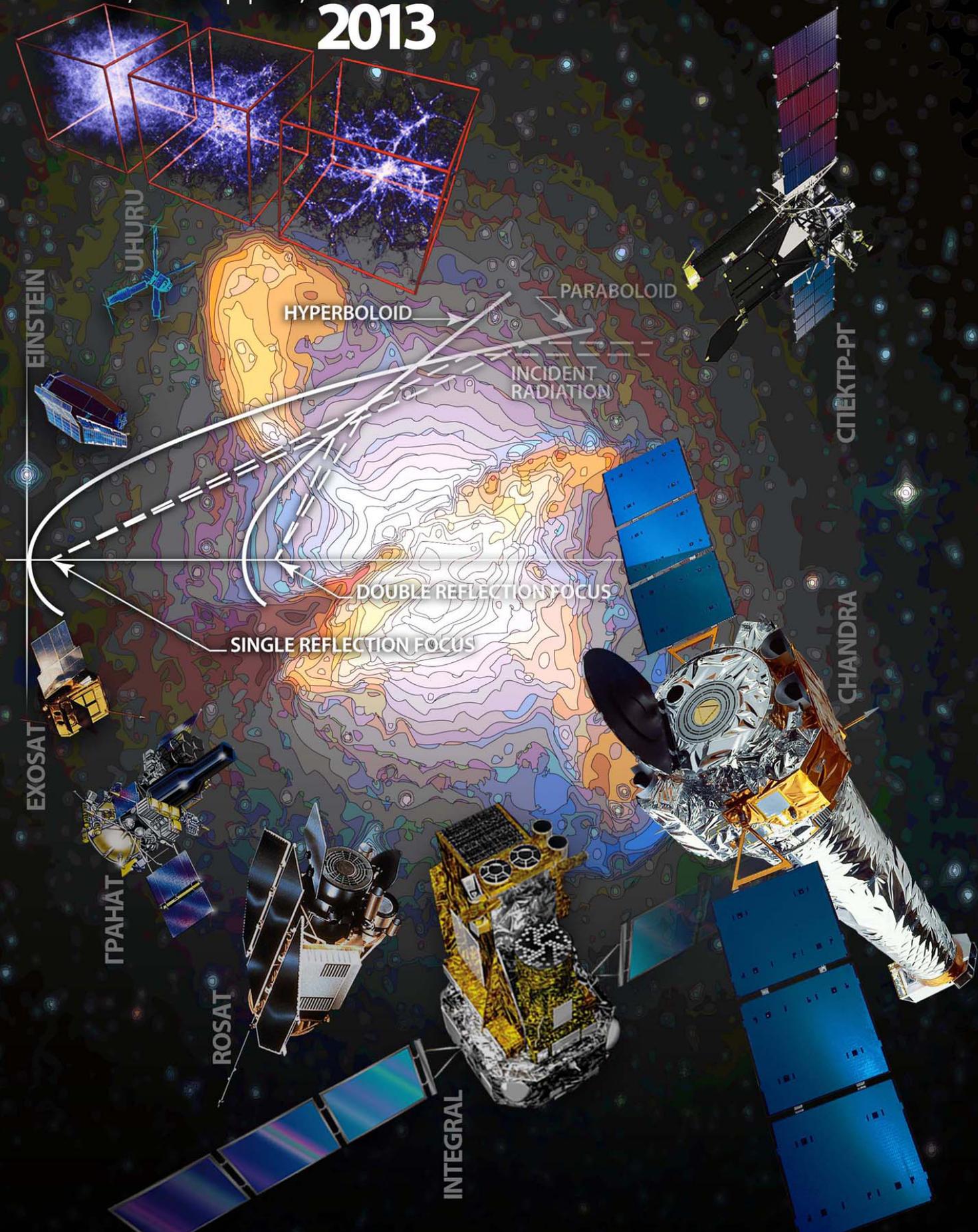


# РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ

ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА  
2013

ИРИ®





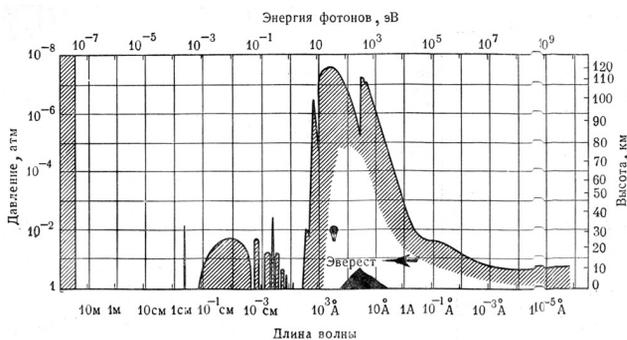
# Рентгеновская астрономия: вчера, сегодня, завтра

## Открытие космического рентгеновского излучения

Рентгеновская астрофизика - уникально богатая наука. В рентгеновском диапазоне (т.е. в диапазоне энергий фотонов от ~0.5 до 10-100 кэВ) излучает много классов объектов Вселенной - от межзвездной среды и гелиосферы, от обычных звезд, белых карликов, нейтронных звезд, до черных дыр в нашей Галактике и в ядрах огромного количества других галактик, и межгалактической среды скоплений галактик.

Атмосфера Земли абсолютно непрозрачна для рентгеновского излучения. Если измерения в области энергий фотонов выше 20 кэВ возможны с высотных стратостатов (на высотах выше 20-30 км), то для того чтобы регистрировать излучение с энергией около 1 кэВ (длина волны около 12 ангстрем) необходимо подняться на высоту не менее 100 км, поэтому первые шаги в этой области стали возможны только с развитием ракетных технологий.

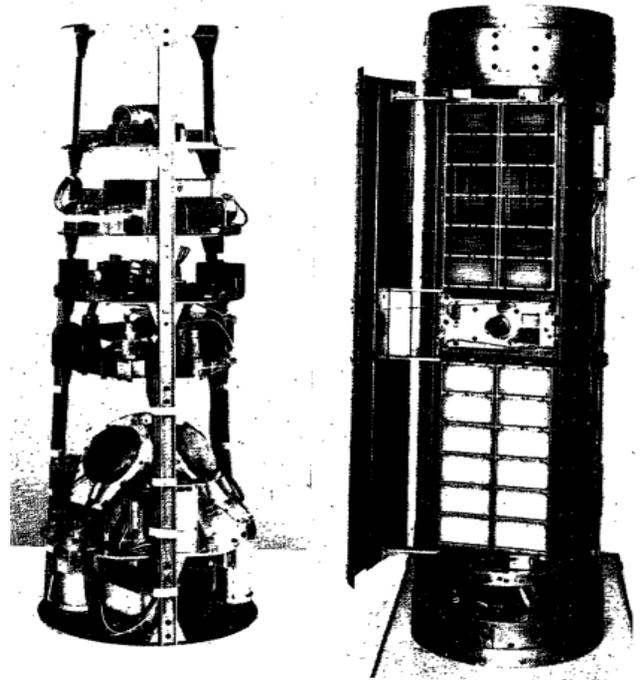
Первые астрономические измерения рентгеновского излучения начались в конце 40х - начале 50х годов с наблюдений Солнца на ракетах V-2 (см, например, Фридман и др. 1951). В качестве регистрирующего прибора использовался модифицированный счетчик Гейгера, т.е. газоразрядная трубка, регистрирующая сигнал при прохождении через нее ионизирующего фотона. Однако простое масштабирование рентгеновского потока Солнца на расстояния до других звезд показывало, что при имеющихся характеристиках рентгеновских инструментов регистрация потока любых других звезд кроме Солнца невозможна. Оценки рентгеновских светимостей других астрофизических



Высота, до которой проникает электромагнитное излучение разных энергий. Показаны высоты, до которых доходит 1/10 от падающего излучения. Хорошо видно, что с поверхности Земли нам доступно лишь излучение в узкой полосе видимого света и в радио-диапазоне.

объектов (таких как остатки вспышек сверхновых, вспыхивающие звезды и т.д.) имели огромные неопределенности, поэтому ожидалось, что следующим по яркости объектом рентгеновского неба будет Луна (за счет флуоресценции в потоке рентгеновских лучей Солнца).

В начале 60х годов были предприняты шаги по улучшению регистрирующей аппаратуры на основе пропорциональных газовых счетчиков. Улучшение чувствительности было достигнуто за счет появления антисовпадательной защиты (из-за этого существенно



Общий вид полезной нагрузки в ракетных экспериментах группы AS&E в полетах 1962 года (слева) и 1964 года (справа)

уменьшилась скорость счета событий, регистрирующих прохождение через счетчик заряженных частиц, не связанных с рентгеновскими фотонами) и увеличения эффективной площади прибора. Полет ракеты Aerobee 18 июня 1962 года, пронесшей рентгеновский детектор группы Риккардо Джаккони (AS&E) на высотах до 225 км (общее время на высоте выше 80 км составило 350 секунд), ознаменовал собой начало эры рентгеновской астрономии.

Рентгеновское излучение Луны обнаружено не было (оно впервые было зарегистрировано на советском спутнике Луна-12 в 1966 г, Мандельштам и др. 1968), но были сделаны два важнейших открытия: 1) обнаружено изотропное (имеющее одинаковую яркость в разных направлениях) рентгеновское излучение - космический рентгеновский фон (КРФ) Вселенной, 2) открыт яркий источник рентгеновского излучения, названный в дальнейшем Скорпион X-1, ярчайший источник рентгеновского неба (Джаккони и др. 1962)

В течение последующих десяти лет было проведено большое количество экспериментов в области рентгеновской астрономии при помощи запуска регистрирующей аппаратуры на ракетах. Также было проведено большое количество экспериментов на стратостатах. Эксперименты на стратостатах должны были регистрировать более жесткие рентгеновские лучи, с энергией выше 20 кэВ (фотоны меньшей энергии не достигают высоты стратостатов). Пропорциональные газовые счетчики практически прозрачны на таких энергиях, поэтому регистрирующая аппаратура строилась на других принципах.

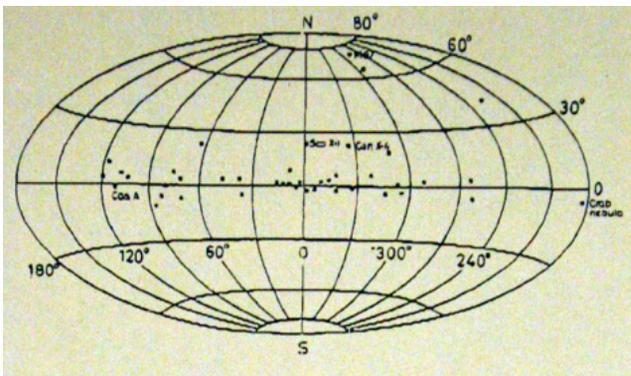
Для регистрации жесткого рентгеновского фотона использовались, как правило, сцинтилляционные кристаллы NaI(Tl), окруженные либо пластиковым, либо CsI(Tl) сцинтиллятором, служащим антисовпадательной защитой. При прохождении фотона через сцинтиллятор возникает вспышка света, которая ре-



Запуск стратостата рентгеновской группы MIT 15 октября 1970 г. В этом полете был открыт рентгеновский пульсар GX 1+4

гистрируется при помощи фотоумножителя. Яркость вспышки зависит от энергии фотона, что позволяет проводить спектрометрические измерения.

В ходе этих экспериментов было открыто значительное количество рентгеновских источников, включая объект в Крабовидной туманности (так называемый источник Таурус X-1). Большим плюсом экспериментов на стратостатах была возможность проводить наблюдения в течении многих часов, что позволило достичь чувствительностей лучше, чем в области энергий 1-10 кэВ. Более того, у некоторых источников удалось обнаружить переменность их яркости на масштабах минут, которая, как оказалось в дальнейшем, возникала из-за вращения формирующих это рентгеновское излучение нейтронных звезд. Однако в то время такие выводы не могли быть сделаны из-за малой длительности наблюдений отдельных объектов.



Карта всего неба с положениями рентгеновских источников, открытых к концу 1960х годов

Следующей ступенью к увеличению длительности работы рентгеновских инструментов стало размещение их на спутниках. В первых спутниковых экспериментах аппаратура рентгеновского диапазона была лишь дополнительной полезной нагрузкой, например на советских разведывательных спутниках типа Зенит: Космос-208 (1968), Космос-251 (1968), Космос-264 (1969), Космос-428 (1971), Космос-856 (1976), Космос-914 (1977) и т.д., на лунных модулях Космос-60 (1965), Луна-10 (1966), Луна-12 (1966), на малых спутниках Космос-135 (1966), Космос-163 (1967), Космос-461(1971-1979).

Практически все инструменты этих спутников, работающие в области рентгеновских лучей, представляли собой сцинтилляторы, либо обзоревающие всю доступную часть неба с целью измерения космического рентгеновского фона (как, например, аппаратура спутников Космос-135, Космос-163, Космос-461), либо наблюдающие части неба, ограниченные пассивным коллиматором. В первых экспериментах сцинтилляторы не были снабжены антисовпадательной защитой, что существенно снижало их чувствительность к рентгеновским фотонам. В более поздних экспериментах сцинтилляторы снабжались антисовпадательной защитой (Космос-856, Космос-914).

Среди результатов, полученных в ходе этих экспериментов, необходимо отметить получение надежных измерений космического рентгеновского фона в области энергий 20-500 кэВ (Голенецкий и др. 1971, Мазец и др. 1975). В ходе сканирующих наблюдений был обнаружено несколько рентгеновских источников (Братолобова-Цулукидзе и др. 1976, Бабушкина и др. 1975), в том числе открытых незадолго до этого специализированной рентгеновской обсерваторией UHURU. Среди существенных недостатков части этих экспериментов можно назвать малое время работы на орбите (около двух недель) из-за небольших высот орбит спутников, а также сложности орбитальной калибровки инструментов. Отсутствие хорошей калибровки (полетная калибровка рентгеновских приборов, как правило, не проводилась) приводило к тому, что заявленные характеристики обнаруженных источников не подтверждались другими группами исследователей, и результаты этих измерений мало использовались в научной литературе.

## Первые спутниковые измерения и обзоры неба в рентгеновских лучах

Прорывом в рентгеновской астрономии стало появление специализированных орбитальных обсерваторий. Это позволило увеличить время наблюдений объектов от 5 минут, доступных для ракетных измерений, до месяцев и даже лет, т.е. практически в десятки тысяч раз. Первая специализированная орбитальная рентгеновская обсерватория была создана в рамках программы НАСА малых астрономических спутников (SAS-Small Astronomical Satellite) и получила название SAS-A или UHURU.

Орбитальная обсерватория SAS-A или UHURU (Ухуру в переводе с суахили означает 'свобода'; спутник был назван так в честь 7-ой годовщины независимости Кении, у берегов которой с морской платформы Сан-Марко 12 декабря 1970 г. состоялся запуск обсерватории SAS-A) предназначалась для обзора всего неба с недостижимой ранее чувствительностью (время работы на орбите 1970-1973 гг).

Уже до запуска этой обсерватории было ясно, что, по всей видимости, рентгеновские источники имеют разную природу, поэтому необходимо было составить перепись наиболее ярких объектов неба, а также иметь возможность провести более детальное исследование отдельных источников. С этой целью обсерватория должна была систематически сканировать небо при помощи двух коллиматоров (т.е. имеющих поле зрения, ограниченное пассивным коллиматором) пропорциональных газовых счетчиков собирающей площадью около 840 кв.см. каждый. Скорость сканирования могла быть изменена по требованию программы наблюдений. В стандартном режиме на-

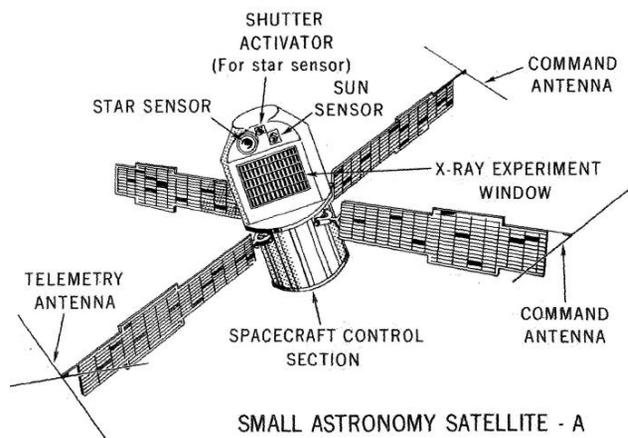


Схема рентгеновской обсерватории SAS-A (UHURU).

блюдений оптические оси спектрометров (с полями зрения  $0.5 \times 5$  градусов и  $5 \times 5$  градусов) сканировали небо по большим окружностям, смещаясь на 1 градус в день.

Результатом обзора неба обсерватории UHURU стал каталог из 399 источников разной природы от белых карликов и нейтронных звезд до галактик и скоплений галактик (Форман и др. 1978). Благодаря возможности проведения длительных наблюдений индивидуальных источников удалось решить проблему природы рентгеновского излучения ярких источников в нашей Галактике.

Дело в том, что, несмотря на открытие значительного количества рентгеновских источников в предыдущее десятилетие и даже оптическое отождествление ярчайшего из них - Скорпион X-1 (Сандэдж и др. 1966), механизм генерации такой большой светимости (рентгеновская светимость источника Скорпион X-1 приблизительно в 100 тысяч раз больше болометрической светимости Солнца) был не ясен. К началу 70х годов XX века появились идеи, что источником энергии для нее может быть выделение гравитационной энергии при падении вещества на компактный звездный остаток (Зельдович 1964, Салпигер 1964), однако с наблюдательной точки зрения убедительных подтверждений этим предположениям не было найдено.

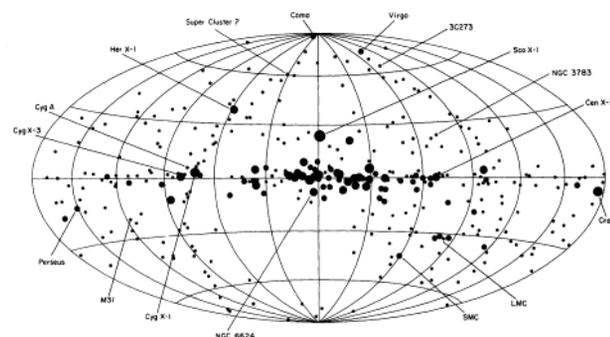
Ситуация существенно изменилась в начале 1970х годов, когда при помощи наблюдений обсерватории UHURU было показано, что по крайней мере некоторые рентгеновские источники являются двойными звездными системами (Шрайер и др. 1972). Было обнаружено, что один из ярких рентгеновских источников (Cen X-3) пульсирует, и частота пульсаций меняется систематическим образом из-за движения пульсирующего объекта вокруг центра масс двойной системы вследствие эффекта Доплера. Более того, было обнаружено систематическое уменьшение частоты пульсаций этого источника (ускорение вращения пульсирующего объекта), показывающее, что существует взаимодействие вещества обычной звезды с пульсирующим объектом. Вместе с открытием радиопульсаров (в 1967 году А.Хьюишом и Дж.Белл) это указывало на то, что пульсирующим источником является компактный объект - нейтронная звезда.

Обсерватория UHURU открыла целый ряд направлений в рентгеновской астрономии. Благодаря относительно лучшей точности локализации зарегистрированных рентгеновских источников часть из них удалось связать с известными источниками радиоиз-

лучения и впоследствии отождествить. Таким образом, например, была отождествлена первая двойная система с черной дырой Лебедь X-1.

За время работы обсерватории UHURU было обнаружено, что излучение объекта Лебедь X-1 существенно меняет свои характеристики. Это стало предвестником феномена 'рентгеновских транзиентов' (источников, время от времени вспыхивающих на рентгеновском небе), также открытых в ходе работы обсерватории UHURU (например, рентгеновская Новая в созвездии Волка 3U1543-47), на изучение которых впоследствии будут направлены большие усилия.

Благодаря улучшенному угловому разрешению спектрометров обсерватории UHURU впервые удалось обнаружить рентгеновское излучение скоплений галактик, причем не как суммарное излучение большого количества отдельных галактик, а как излучение межгалактической среды (Гурски и др. 1971). Позже, обсерваторией Ariel-V (1974-1980), в спектре излучения скопления галактик была обнаружена эмиссионная линия высокоионизированного железа (Митчелл и др. 1976), что непосредственно указало на природу этого излучения как излучения горячей оптически тонкой плазмы - межгалактического газа скопления.

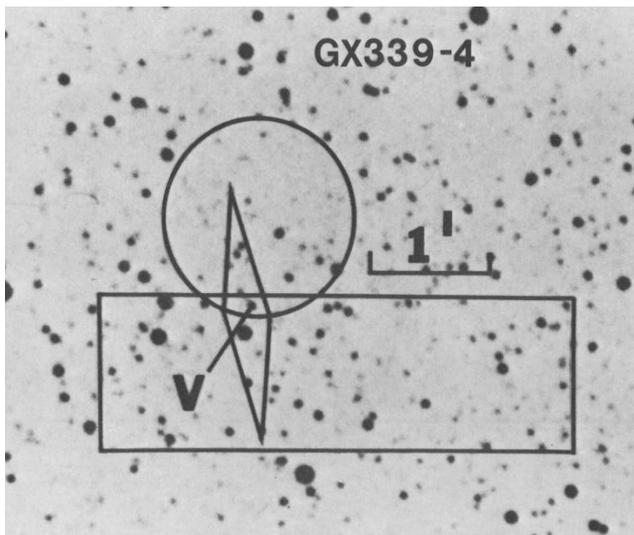


Положение на небе источников, открытых обсерваторией UHURU

После обсерватории SAS-A (UHURU) обзоры неба с аналогичной или с несколько лучшей чувствительностью были проведены со спутников HEAO1 (США, 1977-1979), Ariel-V (Великобритания/США, 1974-1980). Увеличение чувствительности достигалось увеличением эффективной площади детекторов.

Для определения природы рентгеновского источника критически важно получить его отождествление в оптическом, инфракрасном или радио-диапазонах длин волн. Однако для большей части источников, открытых этими обсерваториями, сделать это было невозможно при наличии только имеющейся грубой локализации. Проблема была особенно острой в области Галактической плоскости и Галактического балджа (центральной области Галактики), где поверхностная плотность звезд очень велика и для надежного отождествления галактических рентгеновских источников с оптическими объектами необходимы астрометрические точности их положения на уровне угловой секунды. Для решения этой проблемы было предложено несколько методов.

Первые попытки более точно определить как угловой размер рентгеновского источника (Крабовидной туманности), так и его положение на небе, были сделаны при помощи затмения исследуемого объекта Луной (Бауер и др. 1964). Было обнаружено, что источник существенно неточечный с диаметром около 1-2



Изображение области неба вокруг рентгеновского источника GX 339-4 в оптическом диапазоне. Круг и прямоугольник показывают положение, определенное при помощи наблюдений коллимированными спектрометрами обсерваторий UHURU и Ariel-V. Ромб показывает положение, определенное при помощи наблюдений инструмента с модуляционным коллиматором АЗ на обсерватории HEAO1. Истинное положение источника показано буквой V. Из работы Докси и др. (1979)

угловых минут. Однако затмения источников Луной происходят редко, и набор источников, подходящих для такого исследования, существенно зависит от типа орбиты космической обсерватории. Например, для спутника на близкой околоземной орбите это будет возможно лишь для источников в области плоскости эклиптики. Для того, чтобы иметь возможность наблюдать большое количество рентгеновских источников методом их покрытия Луной в конце 60х годов Европейской организации по исследованию космоса (предшественнику современной ЕКА) был предложен проект HELOS (англ. Highly Eccentric Lunar Occultation Satellite), с сильно вытянутой эллиптической орбитой с большим наклоном. К середине 70х годов, ввиду появления более совершенных методов достижения высокого углового разрешения рентгеновских инструментов, проект был переориентирован на долгосрочные наблюдения рентгеновских источников инструментами с большой собирающей площадью и был реализован в 1983-1986 годах как обсерватория EXOSAT.

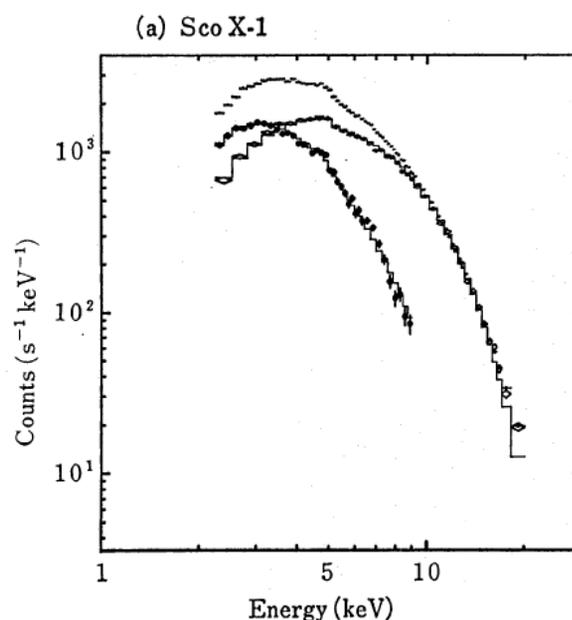
Другим способом определения размеров и угловых положений источников на небе стали наблюдения при помощи так называемых модуляционных коллиматоров. Основным принципом работы такого прибора является модуляция потока источников системой открытых и закрытых элементов коллиматора, анализируя который можно восстановить астрометрическое положение источника. Такие исследования начали проводиться еще на ракетных экспериментах, что позволило определить положение десятка ярчайших источников с точностью около 0.5-1 угл. минуты (Гурски и др. 1966, Шноппер и др. 1970). Существенное развитие эта методика получила на спутниках SAS-3 (1975-1979), HEAO1 (1977-1979), Ariel-V (1974-1980). В ходе этих экспериментов были определены положения нескольких десятков объектов с точностями до 20 угловых секунд (см. например Докси и др. 1977), которую смогли превзойти в дальнейшем только при помощи рентгеновских телескопов с фокусирующей оптикой.

## Аккреционные диски, горячая плазма внутренних частей аккреционного диска

Совершенствование рентгеновских детекторов шло по пути увеличения их эффективной площади, улучшения пространственного, спектрального и временного разрешения. С конца 1970х годов до 2010х годов сменилось несколько поколений рентгеновских обсерваторий, каждая следующая из которых в чем-то улучшала характеристики предыдущих.

Если первые инструменты имели всего несколько энергетических каналов (в особенности это ограничение было сильно у советских приборов из-за сильно ограниченного объема телеметрической информации, выделенного под результаты научных измерений), то к 1980-ым годам количество энергетических каналов превысило сотню.

Большой комплекс наблюдений, проведенных при помощи японской обсерватории Tenma (время работы на орбите 1983-1985), позволил сравнить предсказания модели излучения аккреционных дисков вокруг компактных объектов (Шакура, Сюняев 1973) и показать очень хорошее согласие с экспериментальными результатами (Митсуда и др. 1984). Модель излучения аккреционных дисков (Шакура, Сюняев 1973) позволяла оценить размер их внутренних ра-



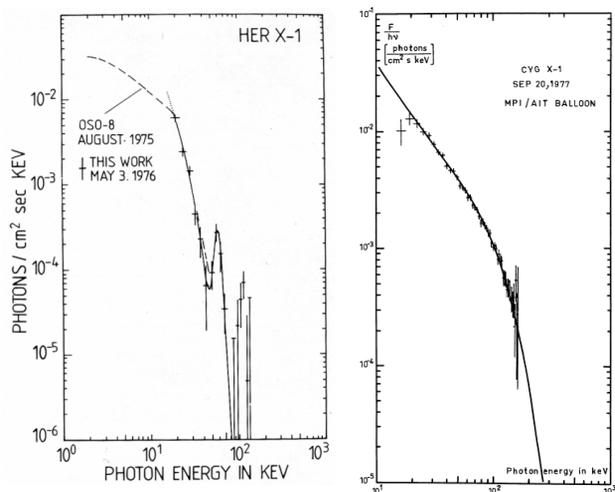
Спектр излучения ярчайшего источника рентгеновского неба Скорпион X-1 по данным наблюдений обсерватории Tenma. Гистограммами показаны модели спектра излучения аккреционного диска (модель из работы Шакуры и Сюняева 1973) и нейтронной звезды (модель излучения абсолютно черного тела). Из работы Митсуда и др. (1984)

диусов, что в свою очередь давало возможность оценить размер компактного источника (черной дыры, нейтронной звезды), вокруг которого сформировался аккреционный диск. Этот метод оценки параметров компактных объектов претерпел определенные изменения в связи с учетом различных эффектов переноса излучения и т.д., но до сих пор широко используется в рентгеновской астрономии.

В жестком рентгеновском диапазоне энергий (выше 10-20 кэВ) чрезвычайно важным оказывается

влияние скорости счета заряженных частиц в детекторе. Поэтому для надежного измерения потока даже самых ярких объектов рентгеновского неба (например, излучения двойной системы с черной дырой Лебедь X-1) необходимо очень точно контролировать вклад фоновой скорости счета в полную скорость счета детектора. Чтобы решить эту проблему для инструментов жесткого рентгеновского диапазона был предложен так называемый 'метод качающегося коллиматора': измерения потока от источника систематически чередуются с измерениями потока с пустых площадок рядом с ним. Эксперименты, проведенные на стратостатах в конце 1970х годов, позволили сделать важные измерения спектров источников разных классов и открыть несколько особенностей в спектрах, давших важную диагностику физических параметров вещества вблизи нейтронных звезд и черных дыр.

При наблюдениях с помощью рентгеновских спектрометров жесткого рентгеновского диапазона со стратостатов в 1976 году в спектре излучения нейтронной звезды в двойной системе Геркулес X-1 были обнаружены эмиссионные особенности (Трюмпер и др. 1978). Они практически сразу же были интерпретированы как проявление циклотронного поглощения



Слева: спектр излучения аккрецирующей нейтронной звезды в двойной системе Геркулес X-1. Хорошо видны линейчатые эмиссионные особенности на энергии около 40 кэВ -- циклотронная линия поглощения излучения в сильном магнитном поле нейтронной звезды (из работы Трюмпер и др. 1978). Справа: спектр излучения двойной системы с черной дырой Лебедь X-1 по данным стратостатных экспериментов. Сплошной кривой показана модель формирования излучения в результате комптоновского рассеяния фотонов на горячих электронах вблизи черной дыры (из работы Сюняев, Трюмпер 1980)

- поглощения рентгеновского излучения электронами при их переходе между квантовыми уровнями Ландау в сильном магнитном поле (этот эффект был предсказан незадолго до его обнаружения в работе Гнедина и Сюняева 1974).

Открытие линий циклотронного поглощения (наблюдения более современными обсерваториями позволяют обнаруживать до четырех гармоник циклотронного поглощения) впервые позволило напрямую измерить значение напряженности магнитного поля вблизи поверхности нейтронных звезд - около  $10^{12}$  Гаусс.

Наблюдения излучения черных дыр в жестком рентгеновском диапазоне энергий долгое время

не давали ответа на вопрос, - какой физический механизм ответственен за его формирование. Первые эксперименты на стратостатах показывали простой степенной спектр (т.е. степенную зависимость плотности потока фотонов от их энергии) на энергиях 10-50 кэВ, что не позволяло сделать надежные выводы о механизме возникновения этого излучения. Высказывались предположения о том, что излучение в жестком рентгеновском диапазоне должно, скорее всего, рождаться не в оптически толстой среде, рассмотренной в работах Шакуры и Сюняева (1973), а в очень горячей разреженной плазме в непосредственной близости к компактному объекту. Собственно жесткое рентгеновское излучение в рамках этой модели должно было формироваться в результате рассеяния затравочных фотонов на горячих электронах в этой внутренней области (Шапиро, Лайтман, Эрдли 1976).

Необходимым следствием этой модели являлось наличие экспоненциального завала в спектре излучения на энергии, соответствующей температуре горячих электронов вблизи черной дыры. Только в конце 1970х годов удалось надежно обнаружить эту особенность в спектре излучения Лебедь X-1 и детально объяснить ее форму (Сюняев, Трюмпер. 1979, Сюняев, Титарчук 1980). Это дало надежную диагностику физических параметров плазмы вблизи черных дыр.

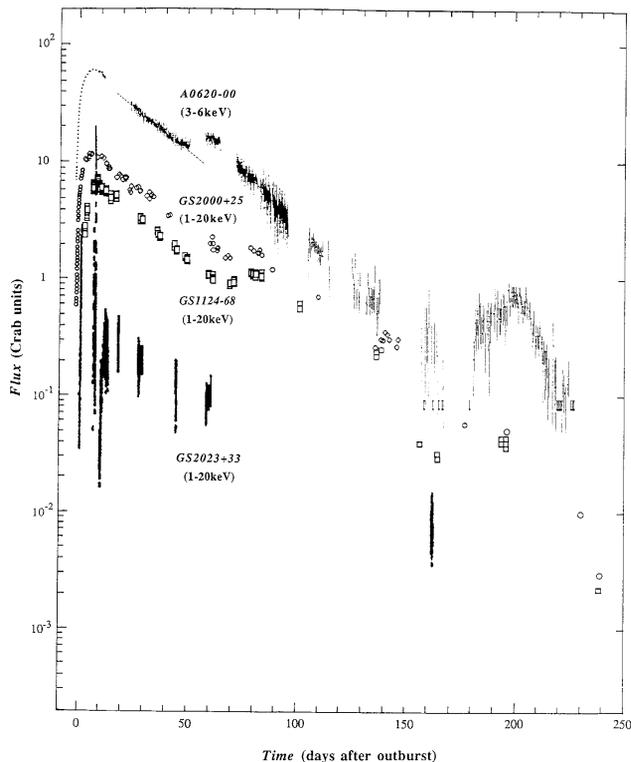
Следующее существенное увеличение чувствительности измерений и, в особенности, картографирование неба на энергиях 20-200 кэВ, стало возможным лишь после появления позиционно чувствительных детекторов этого энергетического диапазона.

### Термоядерные взрывы на поверхности нейтронных звезд, рентгеновские Новые

Возможность проводить длительные наблюдения рентгеновских источников позволили открыть их новые важные свойства. Уже в наблюдениях спутника SAS-A/UHURU было отмечено, что источники в области галактической плоскости и галактического балджа (т.е. по всей видимости, источники, расположенные в нашей Галактике) иногда сильно меняют как свою светимость в рентгеновском диапазоне, так и характеристики своего рентгеновского излучения.

Во время наблюдений рентгеновского источника в шаровом скоплении NGC 6624 (название источника в каталоге UHURU 4U1820-30) в сентябре 1975 года спутник ANS (время работы на орбите 1974-1976 гг) обнаружил два всплеска яркости с характерным временем подъема потока менее 1 секунды и экспоненциальным спадом потока с характерным временем около 10 секунд (Гриндлэй и др. 1976) Анализ полученных данных позволил исключить вероятность того, что открытый всплеск является фоновым событием (т.е. связанным с прохождением через детектор заряженных частиц). Оказалось, что уже в 1969 году в данных обзорных спутников Vela-5B аналогичное событие наблюдалось от источника Cen XR-4 (Белиан и др. 1972), однако в то время никто не высказал предположение, что наблюдавшийся всплеск является проявлением какого-то особенного механизма выделения энергии.

Дальнейшие исследования таких событий позволили сделать вывод, что они являются результатом взрывного термоядерного горения на поверхностях нейтронных звезд (см. обзор Льюин 1981). Излучение формируется в оптически толстой атмосфере нейтронной звезды, внутри которой за короткое время



Кривые яркости нескольких рентгеновских Новых - двойных систем с черными дырами, яркость которых на некоторое время (несколько месяцев) возрастает в тысячи раз по отношению к их яркости в «выключенном» («спокойном») состоянии. Из обзора Танака, Шибазаки (1996)

произошло большое выделение энергии. С тех пор все рентгеновские обсерватории посвящают большую часть своего наблюдательного времени изучению таких событий. Интерес к изучению всплесков термоядерного горения связан как с возможностями использовать эти события для определения масс и радиусов нейтронных звезд, так и возможностью с их помощью «просвечивать» окрестности нейтронных звезд.

Еще одним феноменом, обнаруженным в ходе долговременных наблюдений рентгеновских источников в нашей Галактике, было открытие так называемых рентгеновских Новых. Рентгеновские Новые представляют собой объекты, чье излучение в спокойном состоянии на много порядков слабее, чем их излучение во время вспышек. Измерения рентгеновской светимости в так называемом «выключенном» состоянии обсерваториями последнего поколения (Chandra, XMM-Newton) показывают, что в это время их светимость не превышает  $10^{32}$ - $10^{33}$  эрг/сек, в то время как во время вспышек светимость рентгеновских Новых может достигать значений  $10^{38}$  эрг/сек и выше.

Изучение феномена рентгеновских Новых показало, что их вспышки, по всей видимости, связаны с нестационарной аккрецией в двойной системе (см. обзор Ласота 1991). В выключенном состоянии темп аккреции (темп течения вещества) через диск очень мал. Постепенное накопление вещества аккреционного диска приводит к его «переключению» в «активное» состояние, при котором темп аккреции достигает значений  $10^{-8}$  масс Солнца в год и наблюдается мощная вспышка излучения. После выпадения в результате аккреции большей части накопленного вещества из диска он опять может перейти в «выключенное» состояние

и источник может фактически исчезнуть с рентгеновского неба.

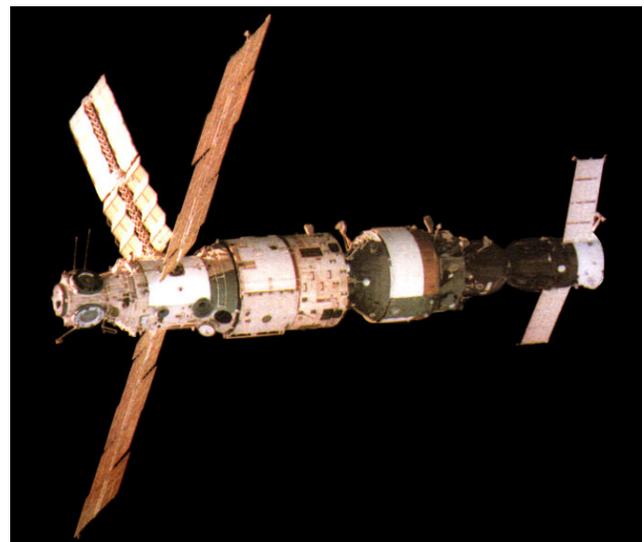
Оказалось, что среди рентгеновских Новых большую часть составляют двойные системы с черными дырами. Интерес к изучению таких объектов в большой степени обусловлен их большой яркостью, что дает возможность проводить измерения характеристик излучения черных дыр с точностями невозможными для других источников.

Одной из наиболее ярких вспышек рентгеновских Новых за всю историю рентгеновской астрономии стала вспышка в созвездии Единорога в 1975 году. Эта рентгеновская Новая получила обозначение A0620-00 (буква 'A' в названии показывает, что объект был открыт обсерваторией Ariel-V). Ее яркость в пике блеска в несколько десятков раз превышала яркость Крабовидной туманности (источник рентгеновского неба, часто используемый как некий стандарт яркости). Изучение этого события привело к всплеску интереса к рентгеновским Новым.

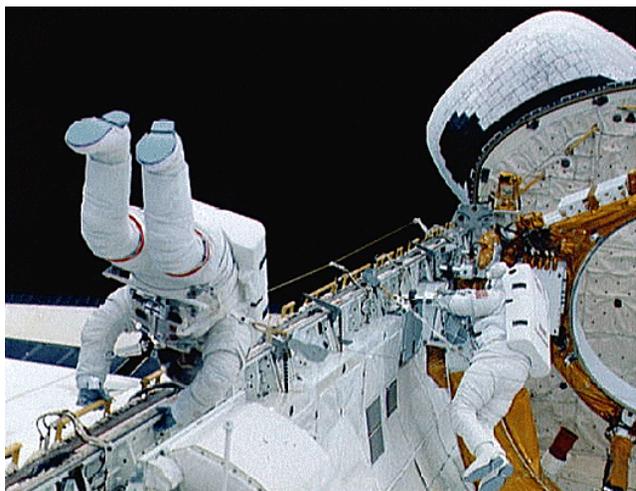
### Рентгеновские эксперименты на пилотируемых аппаратах

Рентгеновские исследования на космических аппаратах в 1970х годах были существенно ограничены возможностями записи и передачи информации на Землю. Проблемы возникали с надежностью записывающей и передающей аппаратуры, пропускной способностью телеметрического канала, надежностью автоматики и т.д. Дополнительной возможностью обеспечить организацию астрофизических экспериментов и доставку результатов наблюдений на Землю стало проведение астрофизических наблюдений космонавтами.

Одним из первых опытов астрономических экспериментов на пилотируемых аппаратах стали орбитальные космические обсерватории ультрафиолетового диапазона Орион-1 и рентгеновский телескоп РТ-2, работавшие на орбитальной станции Салют-1 в июне 1971 года и обсерватория ультрафиолетового диапазона Орион-2, работавшая на космическом корабле Союз-13 в декабре 1973 года. В ходе экспедиции Аполлон-16 в апреле 1972 г. с поверхности Луны были



Орбитальная станция МИР с пристыкованным модулем КВАНТ-1



*Астронавты работают с рентгеновским спектрометром диффузного излучения (DXS) в грузовом отсеке космического челнока Эндевор в январе 1993 года*

сделаны фотографии ряда объектов в ультрафиолетовом диапазоне.

Наблюдения Солнца ультрафиолетовыми и первыми рентгеновскими телескопами проводились на американской орбитальной станции Skylab в 1973г. В 1970-х годах в Советском Союзе разрабатывался проект орбитальной обсерватории Гамма-1, которая содержала стыковочный модуль для возможности ее посещения космонавтами с целью замены носителей информации (планировалось использование фото- и кино-плёнок) и, возможно, инструментов (затем от такой схемы эксперимента отказались).

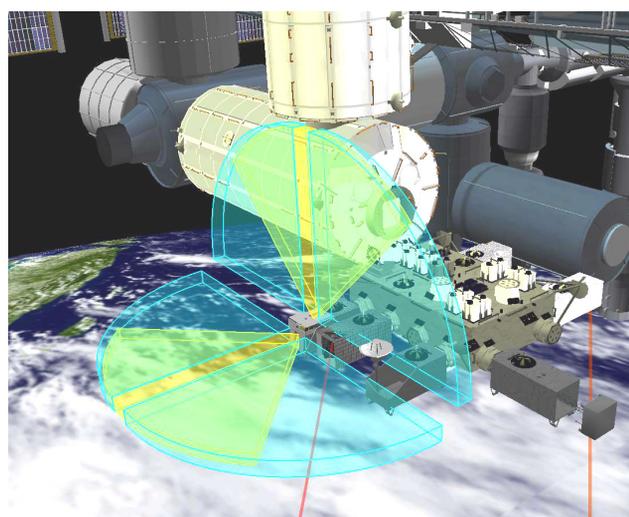
Астрофизические наблюдения в рентгеновском диапазоне на пилотируемых аппаратах продолжались в 1975 году на станции Салют-4 при помощи телескопов РТ-4 и 'Филин'. Телескоп РТ-4 (развитие телескопов РТ-1 Лунохода-1 и РТ-2 Салюта-1) представлял собой параболический концентратор мягких рентгеновских фотонов (с энергией около 0.25 кэВ) и пропорциональный газовый счетчик в качестве детектора. Для наведения на объекты телескоп имел свою собственную систему ориентации. Одной из главных задач этого инструмента было обнаружение и измерение мягкого рентгеновского излучения близких звезд, которое не удалось обнаружить на эксперименте S150 на американской орбитальной станции Skylab (1973-1974 гг). Аналогичный по параметрам и задачам телескоп был установлен на голландско-американском спутнике ANS (1974-1976), и, благодаря более длительным наблюдениям на этой автоматической станции, задача обнаружения рентгеновского излучения близких звезд была успешно решена.

Спектрометр «Филин» представлял собой более стандартный рентгеновский прибор (коллимированный газовый счетчик) для диапазона энергий 0.2-10 кэВ. Несмотря на значительную эффективную площадь детекторов спектрометра «Филин» (около 450 кв.см) с его помощью был получен очень небольшой комплекс результатов (в частности, были получены результаты по рентгеновской Новой 1975 года в созвездии Единорога A0620-00), в основном из-за крайне ограниченного количества сеансов наблюдений (Бейгман и др. 1976, Курт и др. 1976). Астрофизическая программа рентгеновского диапазона была продолжена на орбитальной станции Салют-7 при помощи телескопа РТ-4М и газового сцинтилляционного пропорционального счетчика «Сирень» (производства Франции).

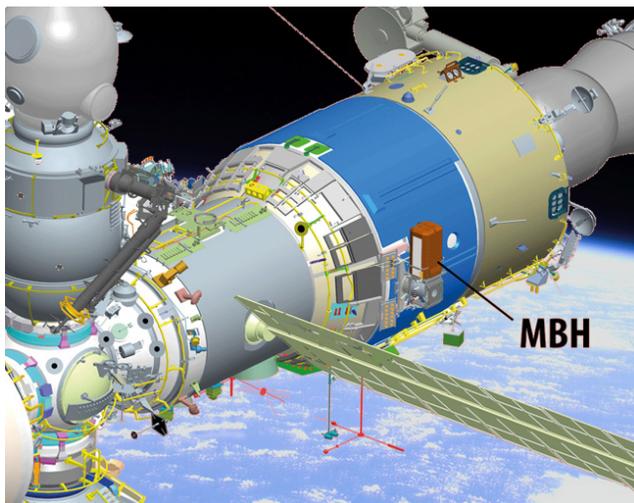
Опыт работы на пилотируемых станциях показал существенные сложности для инструментов рентгеновского диапазона. Среди них: ограниченность сеансов наблюдений в случае, если есть необходимость привлекать для работы с инструментами космонавтов, поглощение мягкого рентгеновского излучения в микроатмосфере вокруг орбитальной станции, а также оседание вещества этой микроатмосферы на захлаженные части рентгеновских инструментов. Кроме того, динамические механические нагрузки на станции накладывают свои ограничения на параметры системы автономного наведения и стабилизации аппаратуры.

Увеличение надежности работы аппаратуры, усовершенствование регистрирующей техники и пропускной способности телеметрического канала спутников постепенно привели к отказу от реализации масштабных астрофизических проектов на базе пилотируемых космических кораблей. Хотя необходимо отметить, что возможность замены приборов обсерватории была успешно использована в 1984 году при ремонте инструментов Solar Maximum Mission астронавтами космического челнока Челленджер, в 1988 году на модуле КВАНТ станции МИР, когда космонавты заменили неисправный детектор телескопа ТТМ, и в нескольких экспедициях в период 1994-2009 гг космических челноков НАСА для ремонта и замены аппаратуры на космическом телескопе имени Хаббла.

Основным направлением использования пилотируемых кораблей для рентгеновской астрономии стали тестовые наблюдения инструментами, изготовленными с использованием новых технологий. Так, например, в ноябре-декабре 1983 года на космическом челноке Колумбия (STS-9) в рамках программы Spacelab-1 был испытан новый тип газового пропорционального счетчика, использующего принцип сцинтилляции (что позволяло в два раза повысить энергетическое разрешение прибора). Интересно заметить, что период 1983-1984 гг газовые сцинтилляционные пропорциональные счетчики, как приборы с принципиально лучшим энергетическим разрешением, в были установлены сразу на ряд космических аппаратов: на японскую обсерваторию Тенма (запущена в феврале 1983 года), на европейскую обсерваторию EXOSAT (запущена в мае 1983 года), на станцию Салют-7 (прибор



*Расположение астрофизического эксперимента MAXI на японском модуле Международной Космической Станции и его поля зрения*



*Планируемое размещение астрофизического эксперимента MBN на российском сегменте Международной Космической Станции.*

Сирень, изготовление технического центра ЕКА, доставлен кораблем Прогресс в августе 1984 года).

В декабре 1990 года в ходе экспедиции космического челнока Колумбия (STS-35) впервые был испытан спектрометр широкого рентгеновского диапазона BBXRT (0.3-13 кэВ), изготовленный на основе охлаждаемого кремния Si(Li). Концентратором рентгеновских лучей для спектрометра стала зеркальная система на тонких фольгах, ставшая после этих успешных испытаний основной для телескопов японских обсерваторий ASCA и Suzaku.

В январе 1993 года с борта космического челнока Эндевор (STS-54) были проведены спектрометрические измерения космического рентгеновского фона в диапазоне энергий 0.15-0.28 кэВ при помощи Бреговского спектрометра DXS.

Самым успешным долговременным опытом работы астрофизической обсерватории рентгеновского диапазона на пилотируемой станции стала обсерватория РЕНТГЕН (1987-2001 гг), установленная на модуле КВАНТ-1 орбитальной станции МИР.

В настоящее время на Международной Космической Станции проводится один астрофизический эксперимент рентгеновского диапазона - MAXI. Задачей этого прибора является систематический обзор всего неба в диапазоне энергий 1-20 кэВ с чувствительностью на уровне обзора неба обсерватории UHURU за день. Монитор всего неба MAXI является проектом японского космического агентства (JAXA) и установлен на японском модуле МКС/Кибо.

Планируется, что в 2015 году на российском сегменте МКС будет установлен еще один астрофизический эксперимент - рентгеновский спектрометр MBN. Задачей прибора MBN (изготавливаемого в Институте космических исследований РАН) является высокоточное измерение спектра космического рентгеновского фона (КРФ) в энергетическом диапазоне 6-70 кэВ. Основой прибора являются 4 термостабилизированных рентгеновских детектора на полупроводниковых кристаллах теллурида кадмия (CdTe). Основным преимуществом прибора MBN при измерении КРФ является система модуляции апертуры рентгеновских детекторов, что позволит с высокой точностью учесть вклад счета заряженных частиц в полную скорость счета (Ревнивцев и др. 2012)

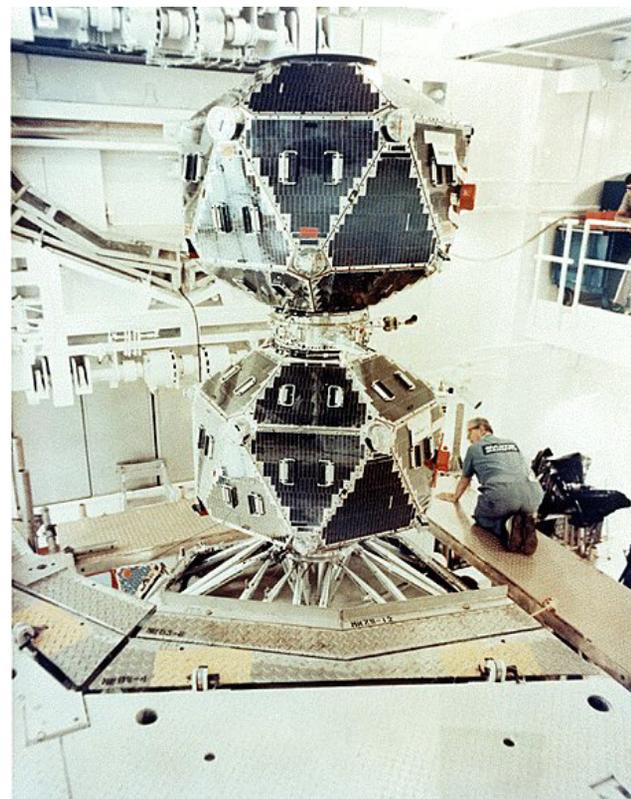
## Гамма-всплески

Рентгеновское небо не является стационарным. Множество объектов на нем способно менять свою яркость на разных масштабах времен, от миллисекунд до десятков и сотен лет. Исключением являются только большие протяженные объекты, такие как скопления галактик, имеющие размеры сотни килопарсек и мегапарсеки, и остатки вспышек сверхновых, имеющие размеры парсек и десятки парсек.

За годы развития рентгеновской астрономии были обнаружены транзистентные события разных типов: вспышки нестационарного термоядерного горения на поверхностях нейтронных звезд и белых карликов, режимы нестационарной аккреции в дисках вокруг компактных объектов, приливные разрушения звезд и последующая аккреция образовавшегося вещества в окрестностях сверхмассивных черных дыр и т.д.

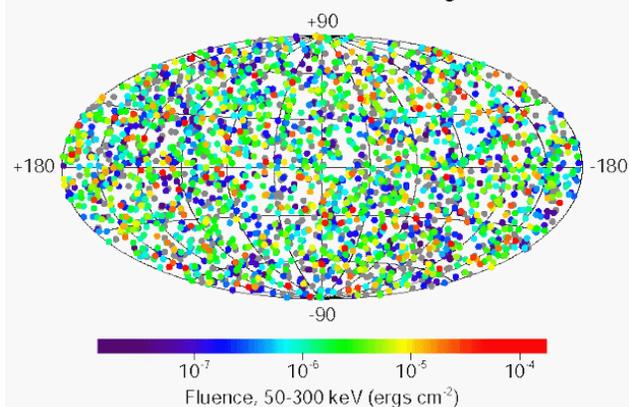
Одним из первых 'быстрых' транзистентных явлений в истории рентгеновской астрономии был феномен 'гамма-всплесков'. Гамма-всплески были открыты в ходе работы спутников военного назначения Vela 5A,5B,6A,6B, основной целью которых было слежение за всплесками гамма-излучения, возникающими при атмосферных ядерных взрывах.

Гамма-всплески были обнаружены в 1969 году, однако впервые эта информация была опубликована только в 1973 году после тщательной проверки данных спутников Vela (Клебесадел и др. 1973). Независимое подтверждение феномена гамма-всплесков было получено на спутнике Космос-461 в 1971 году (Мазец и др. 1974).



*Спутники Vela5a и 5b, открывшие феномен гамма-всплесков.*

## 2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Распределение гамма всплесков, обнаруженных в эксперименте BATSE обсерватории им. Комптона (1991-2000). Хорошо видно, что распределение всплесков изотропно по небу

Гамма-всплеск появляется на гамма (и жестком рентгеновском) небе в течении очень небольшого времени, но в это время он становится самым ярким источником на всем небе. Исследования показали, что распределения длительности гамма-всплесков имеют два пика: в области менее секунды и в области нескольких десятков секунд. По прошествии некоторого времени объект полностью исчезает с рентгеновского неба и его дальнейшее исследование становится невозможным.

Уже первые измерения гамма-всплесков показали, что их распределение по небу достаточно однородно, т.е. гамма-всплеск может возникнуть в любом направлении, что с учетом малой длительности события делало определение их точных положений очень затруднительным. Это привело к тому, что даже природа гамма-всплесков долгое время оставалась неясной. До конца 1990х годов основными характеристиками, исследовавшимися у гамма-всплесков, были формы их кривых блеска и спектральные характеристики.

В период 1970х-1980х годов разные спутники (в том числе межпланетные станции) несли на себе детекторы жесткого рентгеновского и гамма диапазонов с целью исследования феномена гамма-всплесков: американские аппараты Аполлон, советские спутники серии Метеор, Космос, Прогноз, советские межпланетные аппараты Венера, Фобос, американские аппараты Пионер и т.д.

В исключительных случаях, когда гамма-всплеск регистрировался более чем двумя-тремя спутниками, отстоящими друг от друга на больших расстояниях, удавалось получить его относительно точное положение на небе методом триангуляции (определение направления, откуда идет излучение, по задержкам между временами регистрации прихода всплеска на разных аппаратах).

Одним из первых успешных реализаций метода триангуляции всплесков гамма-излучения при помощи межпланетной сети космических аппаратов был всплеск, произошедший 5 марта 1979г. Всплеск жесткого рентгеновского и гамма-излучения был обнаружен приборами Конус на советских межпланетных станциях Венера-11 и -12 (Мазец и др. 1979). Пульсации во время спадающей части всплеска однозначно указывали на то, что источником яркого излучения является вращающаяся нейтронная звезда в галактике

Большое Магелланово Облако. Появившиеся идеи, что все гамма-всплески имеют такую же природу, в дальнейшем не подтвердились.

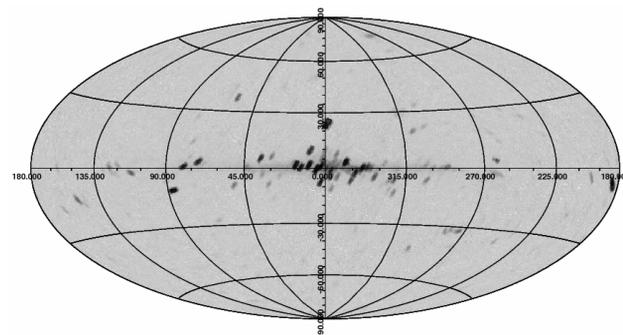
Оказалось, что всплеск 5 марта 1979 года не является представителем семейства собственно 'гамма-всплесков', а является так называемым 'мягким гамма-повторителем' (soft gamma repeater, SGR) -- нейтронной звездой со сверхмощным магнитным полем ( $10^{14}$ - $10^{15}$  Гс), дающей всплески жесткого рентгеновского и гамма-излучения при перестройке магнитного поля нейтронной звезды (Дункан, Томсон 1992).

За прошедшее время было обнаружено еще несколько таких источников в нашей Галактике. В декабре 2004 года вспышка одного из них, SGR 1806-20, стала ярчайшей вспышкой рентгеновского излучения за всю историю рентгеновской астрономии - поток в максимуме всплеска достигал значений несколько миллионов фотонов в секунду на квадратный сантиметр.

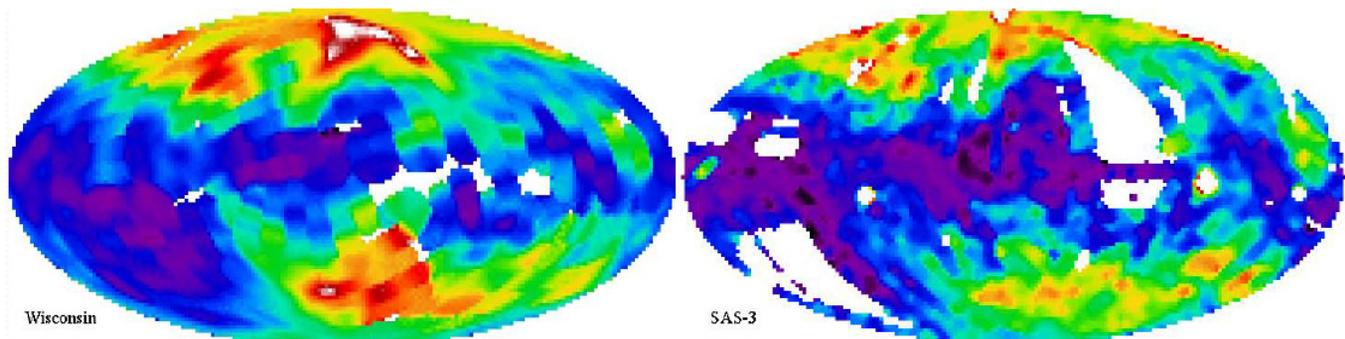
Долгое время считалось, что гамма-всплески имеют галактическую природу. Основная проблема состояла в том, чтобы связать источники гамма-всплесков с объектами в каком-нибудь другом спектральном диапазоне, в котором их можно было бы изучить более детально. Самое большое количество гамма-всплесков - более 3000, обнаруженных на одном аппарате, было зарегистрировано прибором BATSE обсерватории им. Комптона (НАСА, время работы на орбите 1991-2000). Оказалось, что их распределение на всех потоках очень изотропно, что практически исключало гипотезу о галактическом происхождении гамма-всплесков.

Лишь в 1997 году при помощи рентгеновских телескопов орбитальной обсерватории ВерроSAX (время работы на орбите 1996-2003) удалось получить относительно точное положение гамма-всплеска GRB970228 (Коста и др. 1997), и затем определить расстояние до него (Ван Парадайс и др. 1997) доказав, что гамма-всплески расположены от нас на космологических расстояниях.

В настоящее время считается, что гамма-всплески представляют собой проявление либо коллапса массивной звезды, либо слияния двух нейтронных звезд с выбросом струи ультрарелятивистского вещества, создающего всплеск жесткого рентгеновского и гамма-излучения. Энергии, высвобождаемые в этих процессах, могут достигать значений  $10^{52}$  эрг, т.е. уже сравнимы с энергией покоя звезды небольшой массы.



Карта неба, полученная инструментом A2 обсерватории HEAO1 (1977-1979). Благодаря специальной конструкции инструмента A2 он, наряду с обнаружением дискретных источников на небе, мог измерять поток космического рентгеновского фона. Серая область, покрывающая все небо -- это не инструментальный фон детектора, а действительное фоновое излучение неба.



Карты поверхностной яркости неба в мягком рентгеновском диапазоне по данным ракетных экспериментов (Университет Висконсина), и по данным наблюдений на спутнике SAS-3 (из обзора Сноуден и др.)

Для того, чтобы рутинным образом определять точные положения гамма-всплесков, что позволило бы изучать их в оптическом, инфракрасном и радио-диапазонах, необходимо сочетать большое поле зрения инструмента, способного зарегистрировать/обнаружить гамма-всплеск, с хорошей точностью его локализации. Попытка реализовать один из способов комбинации таких противоречивых требований к рентгеновским инструментам была сделана на приборе 'Подсолнух' орбитальной обсерватории ГРАНАТ (1989-1999). Прибор представлял собой комплекс рентгеновского и оптического детекторов на поворотной платформе, включаемый по результатам грубого измерения положений гамма-всплеска, полученного всплесковым прибором 'Конус'. К сожалению, комплекс 'Конус'-'Подсолнух' не заработал в штатном режиме.

Современной реализацией этого принципа комбинации гамма-всплескового прибора, способного обнаружить всплеск на большой части неба, и прибора, способного определить его положение с точностью в несколько угловых секунд, является спутник SWIFT (НАСА, запущен в 2004 г). В качестве поискового гамма-всплескового прибора выступает телескоп с кодирующей маской BAT (Burst Alert Telescope), обзорающий в каждый момент времени телесный угол в один стерадиан (около 8% всего неба, или 1/6 части неба, не закрытого Землей для аппарата, находящегося на низкой околоземной орбите).

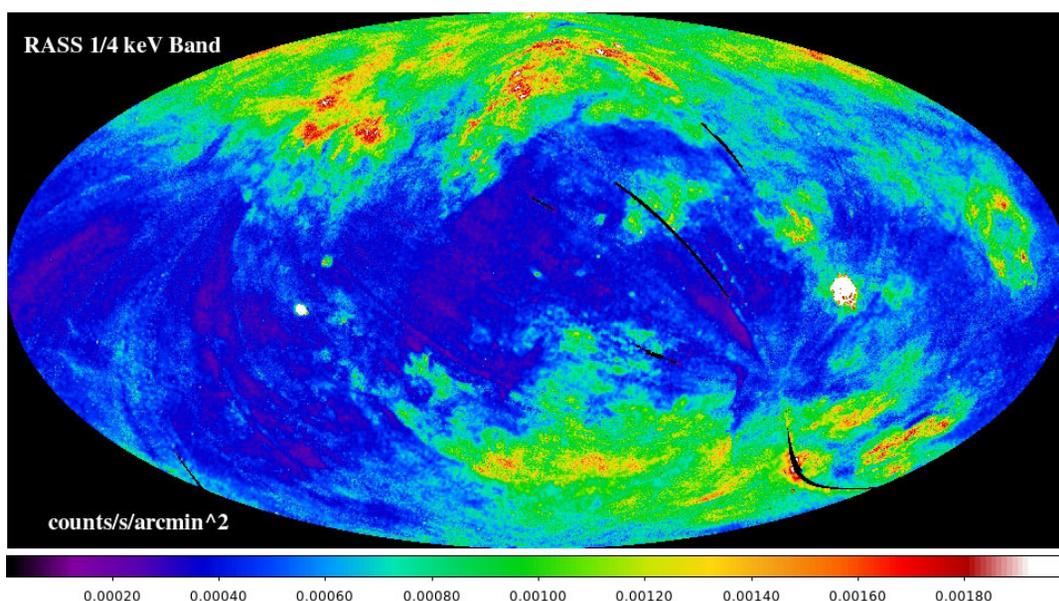
После обнаружения гамма-всплеска спутник доворачивается на объект и его точное положение определяется уже при помощи наблюдений рентгеновского телескопа косоугольного падения XRT. За время работы обсерватория SWIFT обнаружила более 700 гамма-всплесков, из них у более 200 всплесков измерены красные смещения (космологические расстояния).

### Фоновое излучение неба в мягком рентгеновском диапазоне

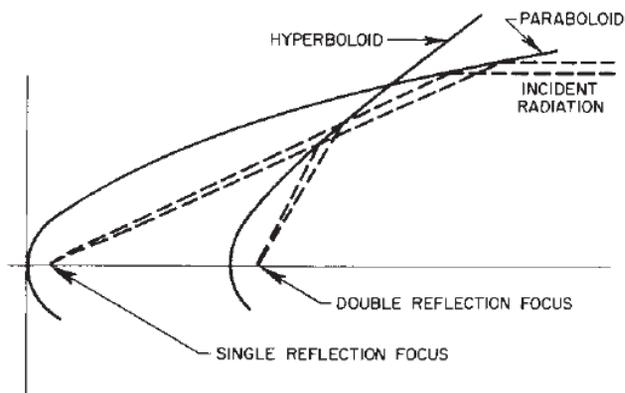
Космический рентгеновский фон, открытый в начале 60х годов в диапазоне энергий выше 1-2 кэВ, неоднократно наблюдался разными инструментами, подтверждавшими, что его угловое распределение с высокой точностью изотропно по небу.

Одно из наиболее точных измерений распределения поверхностной яркости КРФ было сделано инструментом А2 обсерватории HEAO1 благодаря его специальной конструкции (Маршалл и др. 1980). Инструмент представлял собой пропорциональный газозонный счетчик, над разными анодными проволоками которого были расположены коллиматоры с разными полями зрения (отличающимися приблизительно в 2 раза). Это приводило к тому, что при практически идентичной скорости счета разных анодов детектора за счет прохождения заряженных частиц, поток фотонов на разные аноды был разным. Вычитая скорости счета соседних анодов можно было практически идеально вычесть инструментальный фон детектора (фон заряженных частиц) и измерять поверхностную яркость КРФ в разных направлениях на небе.

Однако уже в конце 60х годов измерения, проводимые на меньших энергиях (~0.25 кэВ), показыва-



Карта поверхностной яркости неба в мягком рентгеновском диапазоне (0.25 кэВ) по данным обсерватории ROSAT



Принципиальная схема рентгеновского телескопа 'косоугольного падения'. Плоскопараллельный пучок фотонов от космических источников фокусируется из-за двойного отражения в системе зеркал

ли, что яркость рентгеновского фона в этом диапазоне не согласуется с продолжением спектра КРФ, измеренного на энергиях 1-10 кэВ, в область меньших энергий и существенно не изотропна по небу.

Карта поверхностной яркости мягкого рентгеновского фона постепенно пополнялась новыми данными. Множество измерений было проведено как ракетными экспериментами (программа Университета Висконсина), так и со спутников (HEAO1, SAS-3). Особенностью мягкого рентгеновского фона являлось его явное подавление в области плоскости Галактики, что вначале привело к гипотезе о его внегалактическом происхождении (межзвездная среда в плоскости Галактики очень эффективно поглощает рентгеновское излучение малых энергий).

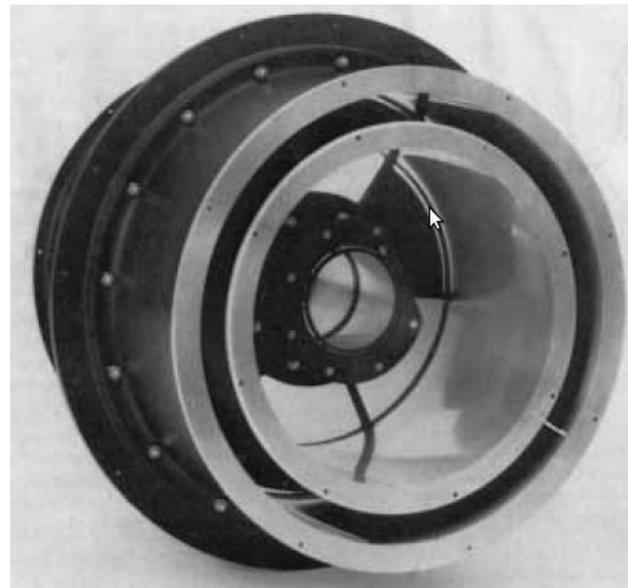
Огромный скачок в качестве наблюдательных данных для исследования диффузного излучения в мягких рентгеновских лучах произошел с началом работы на орбите рентгеновской обсерватории ROSAT (Германия, США, Великобритания, время работы на орбите 1990-1999 гг). В отличие от предыдущих экспериментов на обсерватории ROSAT был установлен рентгеновский телескоп косоугольного падения, позволяющий существенно увеличить угловое разрешение получаемого изображения по сравнению с коллимированными спектрометрами, а также сильно уменьшить фон, создаваемый заряженными частицами.

Детальные исследования яркости мягкого рентгеновского фона, и ее корреляции с распределением межзвездной среды в Галактике показали, что это фоновое излучение имеет Галактическую природу и возникает в результате излучения плазмы горячей фазы межзвездной среды.

Одним из интереснейших результатов, полученных по данным обсерватории ROSAT, стало обнаружение переменного излучения, возникающего в гелиосфере за счет перезарядки высокоионизированных ионов тяжелых элементов (например, кислорода) с нейтральным межпланетным веществом.

### Рентгеновские телескопы косоугольного падения

Наличие на небе протяженных источников рентгеновского излучения со всей очевидностью ставило вопрос об угловом разрешении следующего поколения инструментов. Прогресс в этом направлении



Один из первых прототипов рентгеновских телескопов косоугольного падения

так же позволил бы значительно увеличить чувствительность приборов.

Предел чувствительности большинства рентгеновских инструментов определяется шумами детекторов, среди которых важнейшую роль играет скорость счета 'фоновых' событий, обусловленных не регистрацией рентгеновских фотонов, а прохождением через детектор заряженных частиц (либо первичных космических лучей, либо вторичных частиц, возникающих после взаимодействия космических лучей высоких энергий с космическим аппаратом). Рентгеновские счетчики, снабженные коллиматорами (ограничивающими их поля зрения) собирают как полезный сигнал (рентгеновские фотоны), так и счет заряженных частиц с общей площади детектора. Однако, если научиться фокусировать рентгеновские фотоны так же как оптические или инфракрасные в небольшое пятно в фокальной плоскости инструмента, то можно получить очень большой выигрыш за счет того, что эти

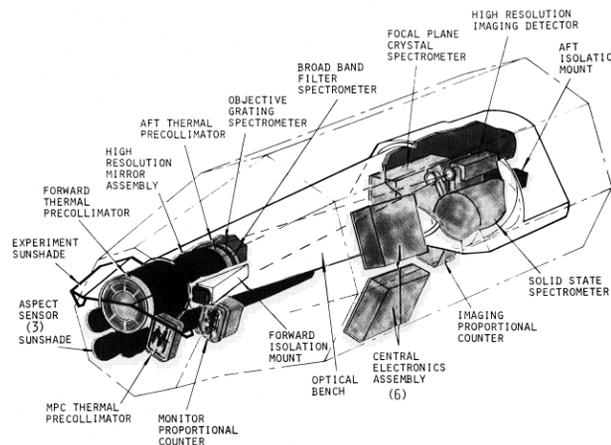
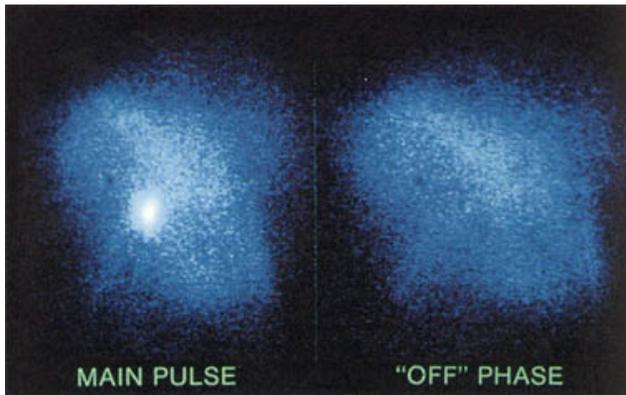


Схема орбитальной обсерватории HEAO2, обсерватории им. Эйнштейна с первым рентгеновским телескопом косоугольного падения. Качество изображения в области энергий 0.5-4 кэВ не было превзойдено до запуска в 1999 году обсерватории Чандра



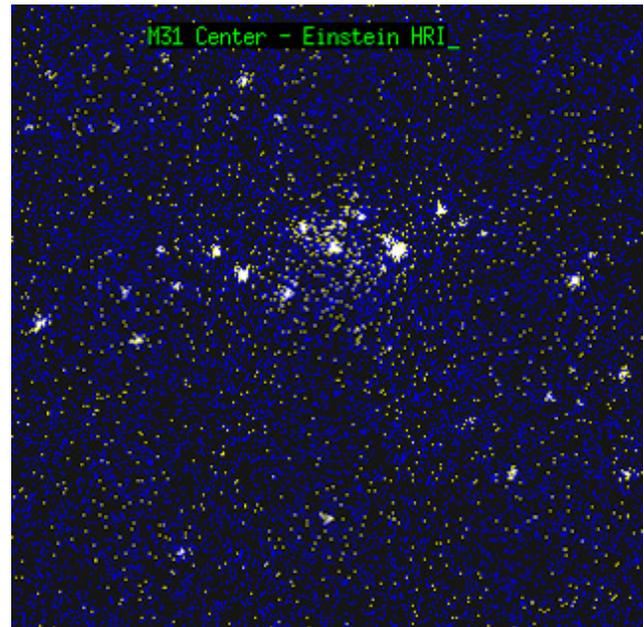
Изображения Крабовидной туманности, полученные обсерваторией им.Эйнштейна (HEAO2), усредненные за разные периоды яркости нейтронной звезды - пульсара в ее центре. Присутствие яркого пятна (пульсара) в центре левого изображения и его отсутствие на правом связано с импульсным характером излучения нейтронной звезды из-за ее собственного вращения с периодом приблизительно 0.033 сек.

фотоны будут собираться в очень малой части фокального детектора, в которой счет заряженных частиц может быть в сотни и тысячи раз меньше, чем во всем детекторе.

Первое предложение по созданию телескопов, работающих в рентгеновском диапазоне появилось еще в 1960 году (Джиаккони и др. 1960). Однако до первой реализации этого принципа на обсерватории HEAO-2 (обсерватория им.Эйнштейна) прошло около 20 лет. Основная проблема была связана с тем, что для фокусировки рентгеновских фотонов были необходимы новые технологии. Рентгеновские лучи нельзя отразить обычным способом (на большие углы), однако это становится возможным, если углы их падения на хорошо отполированную поверхность очень малы (менее одного градуса). В таком случае плоскопараллельный пучок рентгеновских фотонов можно сконцентрировать в фокальной плоскости. Таким образом, рентгеновский телескоп фактически представляет собой систему вложенных конусов или параболоидов и гиперboloидов, внутренние поверхности которых должны быть отполированы с точностью до нескольких ангстрем, а сама форма трубы-зеркала должна быть выдержана с точностью несколько микрон.

Первое применение такая технология нашла в научной аппаратуре космической станции Skylab в солнечном рентгеновском телескопе S-054 (диапазон энергий 0.2-5 кэВ) в 1973-1974 гг (Вайана и др. 1977). Первой астрофизической рентгеновской обсерваторией с телескопом косоугольного падения на борту стала обсерватория HEAO2/обсерватория им. Эйнштейна, работавшая с 1978 до 1980 года.

Результаты работы обсерватории HEAO2 сильно расширили границы рентгеновской астрономии. Чувствительность фактически выросла в 1000 раз по сравнению с инструментами обсерватории UHURU. Рентгеновское излучение было обнаружено от огромного числа типов объектов: от полярных областей Юпитера и обычных звезд всех типов до остатков вспышек сверхновых, белых карликов и горячего газа в эллиптических галактиках. Исследования нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах, с которых началась рентгеновская астрономия, стало возможным во всей нашей Галактике, а также и в других галактиках. Были получены удивительные по качеству



Изображение центральной области галактики M31 (Туманность Андромеды) по данным рентгеновского телескопа обсерватории им. Эйнштейна.

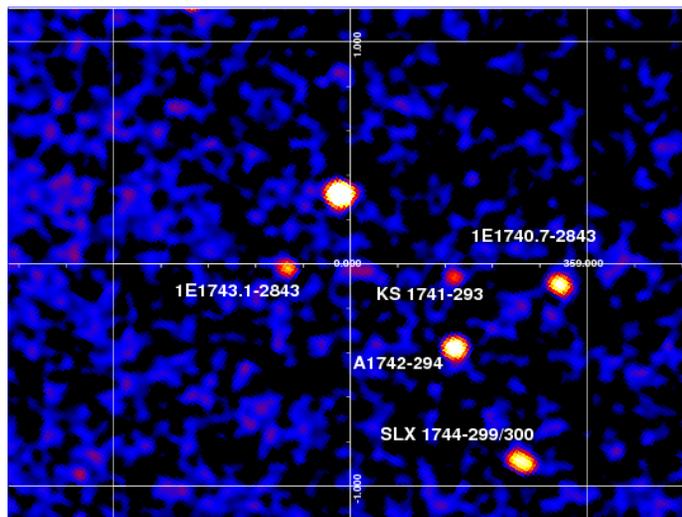
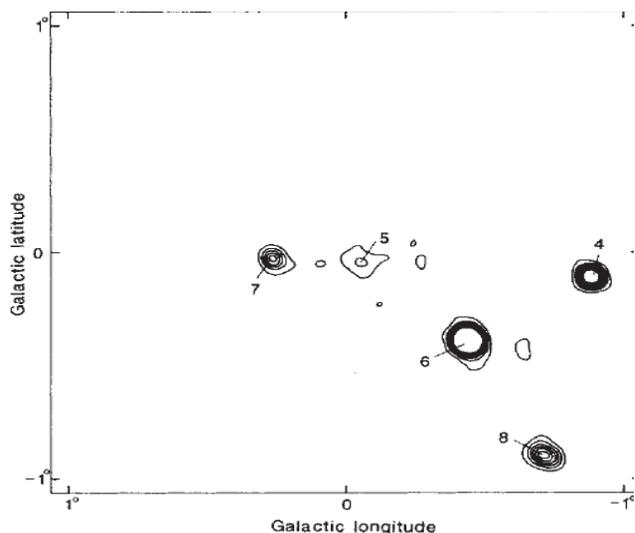
изображения центральной области галактики Туманность Андромеды

Огромный прорыв произошел в понимании природы космического рентгеновского фона, открытого еще в первых ракетных экспериментах. Высококачественные измерения спектра КРФ, проведенные в 1977-1979 годах обсерваторией HEAO1 показывали, что форма КРФ может быть хорошо описана моделью тормозного излучения горячих электронов температурой около 40 кэВ. Означает ли это, что вся Вселенная заполнена горячей разреженной плазмой?

Ответ на этот вопрос был дан при помощи глубоких наблюдений обсерватории им. Эйнштейна. Было показано (Джиаккони и др. 1979), что при увеличении чувствительности наблюдений количество регистрируемых источников существенно возрастает. При этом поток от источников, обнаруженных на пределе чувствительности, достигнутой обсерваторией им. Эйнштейна (HEAO2), позволял объяснить уже около 40% всей поверхностной яркости КРФ на энергиях 1-2 кэВ. Кроме того было ясно, что следует ожидать существования рентгеновских источников с еще более слабыми потоками, и, следовательно, еще большая доля КРФ может быть в будущем разрешена на вклад отдельных объектов. В настоящее время обсерватория Chandra разрешает более 80% КРФ на отдельные источники.

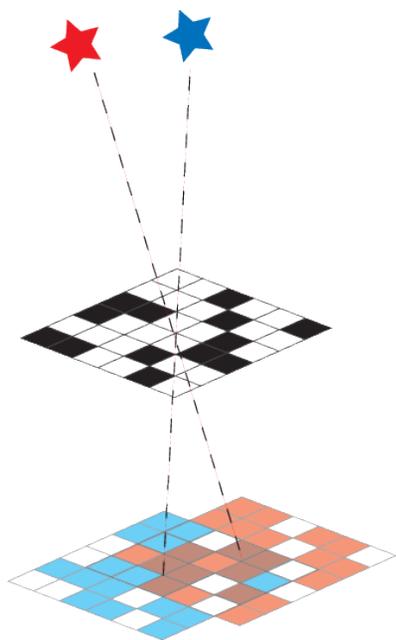
Подавляющее большинство объектов, обнаруженных в таком обзоре, оказываются активными ядрами в далеких галактиках - аккрецирующими сверхмассивными черными дырами. Обнаружение огромного количества таких источников открыло целое направление в астрофизике - исследование космологической эволюции черных дыр.

С технической точки зрения возможности зеркальной системы обсерватории им.Эйнштейна превосходили возможности фокальных приборов. Ширина пятна, в которое зеркальная система фокусировала фотоны, оставляла около 80-100 микрон (что соответствовало 5-6 угловым секундам на небе), в то время как газовые пропорциональные счетчики (ИРС), имевшие максимальную эффективность регистрации



Изображения области центра Галактики, полученные по результатам наблюдений на телескопах с кодирующими масками в диапазоне энергий 3-30 кэВ: слева - телескопа *Spcacelab2/XRT*, справа - телескопа *МИР/КВАНТ/ТТМ*. Размер изображения - около  $2 \times 2$  градуса, что всего в два-три раза больше углового разрешения обзоров неба, проведенных обсерваториями *UHURU* и *HEAO1*. Подписаны некоторые объекты, обнаруженные в ходе наблюдений. Объекты, имеющие в названии буквы «KS» были впервые открыты аппаратурой модуля *КВАНТ* станции *МИР*.

фотонов среди приборов обсерватории, давали пространственное разрешение около 1 мм, что соответствовало примерно 1 угловой минуте. Таким образом, максимальное количество фотонов от источника можно было получить при помощи детекторов IPC, в то время как для достижения максимального пространственного разрешения использовались детекторы на основе микроканальных пластин (HRI), имеющих на порядок меньшую эффективность, чем детекторы IPC. Лишь дальнейшее развитие детекторных технологий в 1980х и 1990х годах (с запуском обсерваторий с промежуточными характеристиками *ROSAT/1990-1999* гг и *ASCA/1993-2000* гг) позволило полностью согласовать возможности фокусирующей оптики и регистрирующей аппаратуры.

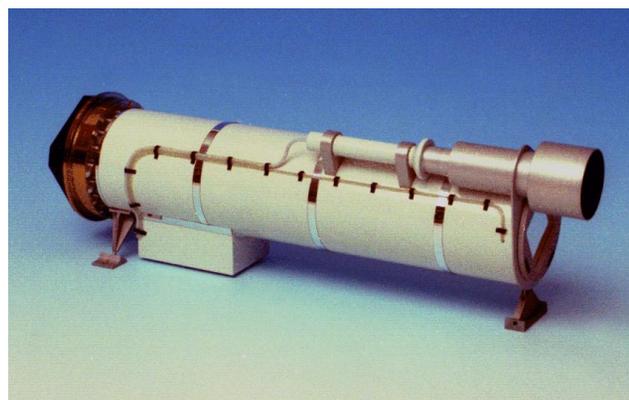


Принцип построения изображений при помощи кодирующей апертуры. Поток квантов, приходящий от рентгеновского источника, «кодируется» маской и создает свою уникальную тень на детекторе (тенеграмма)

### Широкополосные спектры рентгеновских источников

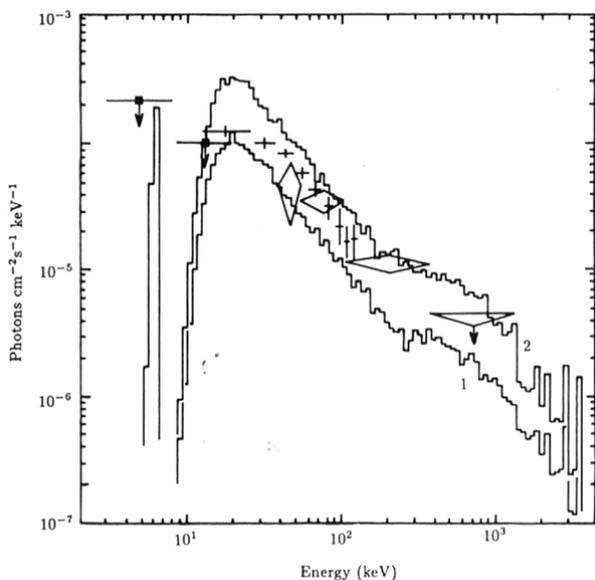
Широкий диапазон температур объектов, излучающих в рентгеновском диапазоне, таких как двойные системы с черными дырами и нейтронными звездами, требовал расширения диапазона энергий, в котором происходит регистрация спектра их излучения. Было обнаружено, что в разное (или даже в одно и то же) время излучение аккрецирующих черных дыр может иметь в излучении компоненты с характерными температурами в 1-2 кэВ и свыше 30-50 кэВ. Эффективную регистрацию фотонов в таком широком диапазоне энергий практически невозможно провести при помощи одного прибора. Решением этой проблемы стали комбинации приборов на орбитальных обсерваториях.

Интерес к более жесткому рентгеновскому излучению (с энергиями выше 5-10 кэВ) также обусловлен



*ТТМ* - «телескоп с теневой маской», один из основных инструментов обсерватории *РЕНТГЕН* на модуле *КВАНТ-1* станции *МИР*. При помощи наблюдений этого телескопа были получены наилучшие на конец 1980х-начало 1990х годов карты области центра Галактики в рентгеновских лучах выше 4 кэВ.

тем фактом, что фотоны таких энергий практически не поглощаются в межзвездной среде в нашей Галактике. Для фотонов более низких энергий межзвездное поглощение является эффективным экраном, закрывающим от нас области в направлении плоскости Галактики, и в особенности интереснейшую область центра Галактики. Первые картографирования области Галактического Центра обсерваторией им. Эйнштейна показали, что межзвездное поглощение на энергиях ниже 2-3 кэВ существенно ограничивает чувствительность к источникам в этом направлении. На более высоких энергиях угловое разрешение инструментов составляло не лучше 20-30 угловых минут, что было совершенно недостаточно для картографирования этой густонаселенной области неба.



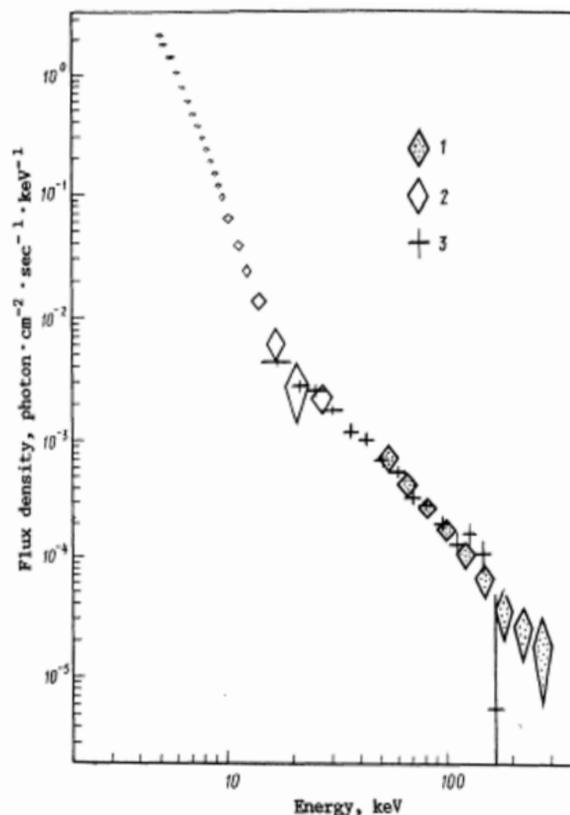
Энергетический спектр Сверхновой 1987А, полученный обсерваторией РЕНТГЕН: разными значками показаны результаты измерений разных приборов обсерватории, гистограммами - результаты моделирования. Из работы Сюняева и др.(1987).

Одна из первых попыток построения карты области Галактического Центра на энергиях выше 3-4 кэВ была предпринята в ходе экспедиции STS-51-G космического челнока Дискавери в июне 1985 года при помощи аппаратуры SPARTAN-1. Рентгеновский инструмент представлял собой два спектрометра, работающих в диапазоне энергий 1-12 кэВ и наблюдавших небо через коллиматоры с полями зрения 0.5 угл. минуты x 3 градуса. Узкая полоса пропускания коллиматоров по одной оси позволяла при сканировании объектов получать изображение со значительно улучшенным, относительно существующих, угловым разрешением. Для получения полноценного изображения направление сканирования инструмента несколько раз менялось в ходе эксперимента.

Следующим шагом в получении изображений на энергиях выше 3-4 кэВ стал эксперимент XRT (X-Ray Telescope) в составе орбитальной обсерватории Spacelab2, работавшей в составе экспедиции STS-51-F на космическом челноке Челленджер в июле-августе 1985 года. Время наблюдений телескопа Spacelab2/XRT было невелико (общее время наблюдений на область центра Галактики составило всего около 6 часов), что ограничило чувствительность полученной карты неба.

Основной принцип построения изображения, использованный в этом телескопе, существенно отличался как от принципа построения изображения в телескопах косоугольного падения, так и от метода модуляционных коллиматоров. Если в первом случае рентгеновские фотоны фокусируются в малой области в фокальной плоскости телескопа, то во втором поток квантов модулируется во времени. В телескопе Spacelab2/XRT использовался так называемый метод кодирующей апертуры. Этот метод основан на пространственной модуляции первичного потока рентгеновских квантов при помощи маски, расположенной над детектором и состоящей из большого числа случайно расположенных прозрачных и непрозрачных элементов. Поток фотонов, приходящий от рентгеновского источника, находящегося на бесконечности, «кодируется» маской и регистрируется позиционно-чувствительным детектором. Важнейшей особенностью описываемого метода является то, что для разных направлений прихода излучения (т.е. для разных источников на небе) формируется своя, отличная от других, засветка детектора (тенеграмма). При наличии в поле зрения нескольких источников на детектор проецируется тень, являющаяся суперпозицией разных тенеграмм, и вклад каждой зависит от интенсивности источника. Принимая во внимание, что фон детектора маской не кодируется, имеется возможность однозначно выделить полученный сигнал и восстановить двумерное изображение участка небесной сферы, что и было впервые продемонстрировано в эксперименте Spacelab2/XRT.

Концепция телескопа с кодирующей апертурой получила свое органичное развитие при создании



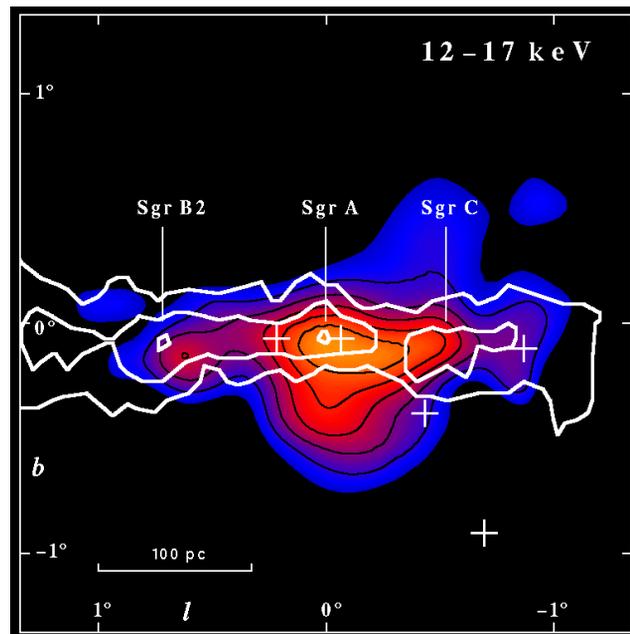
Широкополосный рентгеновский спектр одной из рентгеновских Новых (X-ray Nova Vul 1988) по данным инструментов модуля МИР/Квант. На то время это были рекордные спектральные измерения на высоких энергиях (выше 100 кэВ). Из работы Сюняева и др. (1988)

приборов обсерватории РЕНТГЕН на модуле КВАНТ орбитальной станции МИР (1987-1996). В создании уникальной аппаратуры обсерватории, позволявшей исследовать рентгеновские источники в широчайшем диапазоне энергий 2-800 кэВ, участвовали ученые и специалисты СССР (телескоп-спектрометр Пульсар X-1), Нидерландов и Великобритании (телескоп с кодирующей маской ТТМ), Германии (спектрометр Гексе), и Европейского космического агентства (спектрометр Сирень-2). С помощью телескопа ТТМ были впервые получены карты больших участков рентгеновского неба в диапазоне энергий до 30 кэВ, открыты новые источники в области Галактического Центра.

Выдающимся результатом, полученным обсерваторией РЕНТГЕН, безусловно, является открытие жесткого рентгеновского излучения от Сверхновой 1987А. Эта сверхновая вспыхнула в феврале 1987 г. в соседней галактике Большое Магелланово Облако и до сих пор является самой близкой к нам из известных сверхновых за последние 400 лет. Ее наблюдения стали наиболее приоритетными в ранней программе обсерватории. Дело в том, что оболочка, образовавшаяся при взрыве звезды с общей массой более 15 солнечных масс, сначала является настолько плотной, что полностью задерживает рентгеновские лучи. Но, поскольку оболочка разлетается во все стороны с огромными скоростями, она постепенно становится прозрачной для рентгеновских и гамма-лучей. Как показывали теоретические расчеты (Гребенев и др. 1987), гамма-излучение, обусловленное распадом радиоактивного кобальта  $^{56}\text{Co}$ , должно выходить наружу сквозь расширяющуюся оболочку примерно через полгода после взрыва.



Обсерватория Гранат (1989-1999). Основные инструменты обсерватории представляли собой рентгеновские телескопы с кодирующими масками АРТ-П и СИГМА. Телескоп СИГМА был первым астрофизическим телескопом, способным строить изображения в диапазоне энергий выше 50 кэВ.

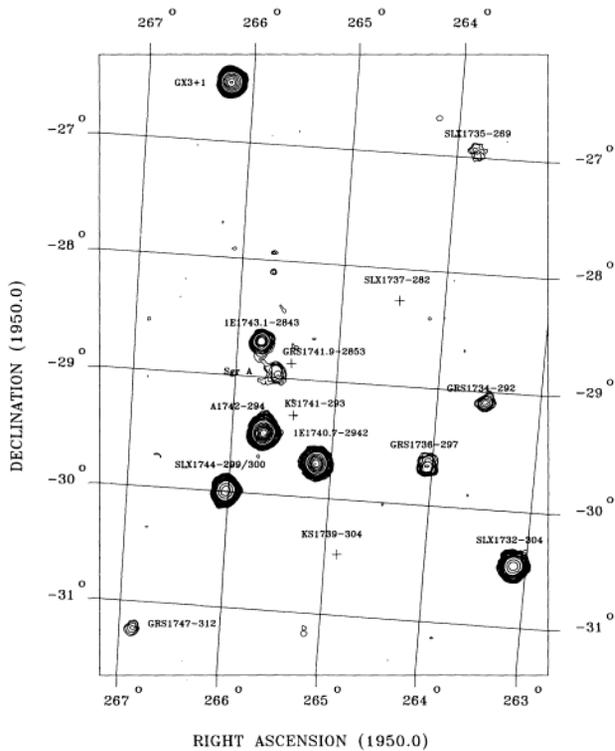


Изображение области Центра Галактики в диапазоне энергий 12-17 кэВ, полученное телескопом АРТ-П обсерватории ГРАНАТ. Белые контуры показывают распределение молекулярного газа. Рентгеновское излучение, регистрируемое от молекулярного облака Sgr B2, рождается в результате переизлучения прошлой активности сверхмассивной чёрной дыры в центре Галактики.

10 августа 1987 г. приборы обсерватории впервые зарегистрировали жесткое рентгеновское излучение из области Сверхновой. Для выяснения природы и истинного источника этого излучения (так как вблизи от Сверхновой находятся другие рентгеновские источники) было предложено развернуть и 'покачать' весь орбитальный комплекс МИР, чтобы исключить из поля зрения обсерватории другие объекты, а также для измерения фона (последнее требовалось для правильного определения значения жесткого рентгеновского потока, регистрируемого прибором Пульсар X-1). Система управления комплексом блестяще справились с этой задачей - было показано, что излучение действительно идет от Сверхновой, и с высокой точностью был измерен ее спектр в широком диапазоне энергий, подтвердив сделанные теоретические расчеты (Сюняев и др. 1987)

Помимо открытия рентгеновского излучения от Сверхновой 1987А, среди важнейших результатов обсерватории РЕНТГЕН, которая продолжала свои наблюдения вплоть до 1996 года, следует отметить следующие: было впервые обнаружено жесткое рентгеновское/гамма излучение рентгеновских Новых, простирающееся до энергий выше 200-300 кэВ, что позволило указать на необходимость учета нетепловых процессов в формировании, по крайней мере, части излучения от аккрецирующих чёрных дыр; открыт целый ряд аккрецирующих нейтронных звёзд и чёрных дыр, для которых были впервые получены широкополосные спектры; получены изображения области центра Галактики в широком диапазоне энергий.

Необходимо сказать, что стыковка модуля КВАНТ с базовым модулем станции МИР проходила достаточно драматично. Стыковка увенчалась успехом лишь с третьей попытки, когда топлива на борту модуля оставалось либо на успешную стыковку, либо на контролируемый спуск с орбиты и последующее зато-



Карта неба области балджа нашей Галактики по данным наблюдений телескопа АРТ-П (3-17 кэВ) обсерватории ГРАНАТ.

пление в Тихом океане. Для решения задачи стыковки, в том числе под давлением ученых, опасавшихся потерять уникальную обсерваторию, был организован незапланированный выход космонавтов в открытый космос, во время которого летчик-космонавт Александр Лавейкин обнаружил застрявший в стыковочном узле посторонний предмет - предположительно, мешок с выброшенным ранее станционным мусором. После этого стыковка модуля КВАНТ со станцией МИР была успешно завершена, означая начало почти десятилетней успешной работы обсерватории.

Практически одновременно с подготовкой запуска обсерватории РЕНТГЕН в Советском Союзе велись разработки по созданию космической обсерватории на самостоятельном спутнике, которая получила название ГРАНАТ (1989-1998). Этот проект осуществлялся совместно советскими, французскими, датскими и болгарскими учеными. Обсерватория была задумана как комплекс приборов для проведения детальных исследований астрофизических объектов в диапазоне энергий 2 кэВ - 100 МэВ.

Основными приборами обсерватории ГРАНАТ являлись француско-советский телескоп СИГМА и телескоп АРТ-П (Астрофизический Рентгеновский Телескоп Позиционно-чувствительный), разработанный в Институте космических исследований АН СССР. Оба телескопа работали по принципу кодирующей апертуры и взаимно дополняли друг друга, имея перекрывающиеся рабочие диапазоны энергий: 2-60 кэВ (АРТ-П) и 40 кэВ-2 МэВ (СИГМА). Телескоп АРТ-П состоял из 4 идентичных модулей, каждый из которых содержал позиционно-чувствительный газовый счётчик и кодирующую маску. Каждый модуль имел эффективную площадь около 600 кв.см и поле зрения 1.8x1.8 градуса. Угловое разрешение телескопа АРТ-П составляло 5 угловых минут. Телескоп СИГМА был первым в мире

астрофизическим телескопом, способным строить изображения в жёстком рентгеновском диапазоне (40-1300 кэВ).

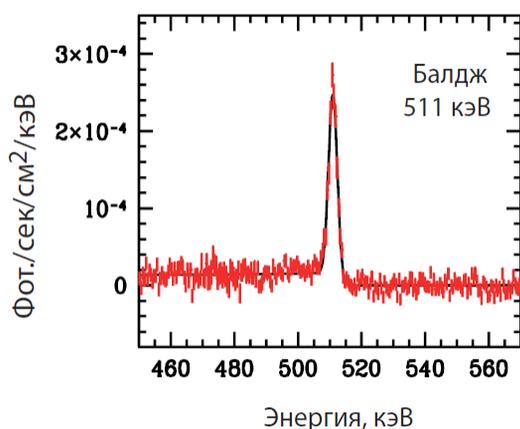
Помимо этих инструментов на борту обсерватории были установлены обзорные детекторы комплекса научной аппаратуры «Вотч», «Фебус», «Конус». Они перекрывали широчайший диапазон энергий от 5 кэВ до 100 МэВ и были, в основном, предназначены для регистрации и исследования гамма-всплесков, хотя прибор «Вотч», работавший в диапазоне энергий 5-150 кэВ, вполне успешно использовался для обнаружения и локализации новых и транзиентных рентгеновских источников. В частности, именно этим прибором был открыт первый микроквazar в нашей Галактике - GRS 1915+105 (GRS здесь означает GРanat Source, источник ГРАНАТа), у которого позднее было обнаружено околосветовое движение релятивистских струй.

Необходимо упомянуть советско-болгарский прибор «Подсолнух», предназначавшийся для наблюдения гамма-всплесков и транзиентных источников в диапазоне энергий 2-25 кэВ. Особенностью прибора было его размещение на поворотной платформе, обеспечивающей оперативный поворот (со скоростью 90 градусов в секунду) и наведение в автоматическом режиме установленных на ней приборов в предполагаемую точку расположения источника космического гамма-всплеска по сигналам прибора «Конус». В рамках программы исследований предполагалось изучение временной структуры гамма-всплеска, проведение спектрального анализа его послесвечения, осуществление точной локализации источника гамма-всплеска. На поворотной платформе устанавливались также оптический монитор, построенный на основе ПЗС-матрицы. Таким образом, весь комплекс приборов на поворотной платформе был задуман и создан для исследования гамма-всплесков. К сожалению, после запуска обсерватории он так и не заработал в штатном режиме, отсрочив, таким образом, открытие природы гамма-всплесков на целых восемь лет, до 1997 года, когда на орбите начала свою работу итало-голландская обсерватория ВерроSAX (1996-2003), впервые обнаружившая рентгеновское послесвечение гамма-всплесков и способная быстро и точно проводить их локализацию и сообщать об этом всем наземным телескопам.

Среди наиболее значимых результатов обсерватории ГРАНАТ следует отметить: глубокие изображения области Центра Галактики в жёстком (40-150 кэВ) и мягком (4-20 кэВ) рентгеновских диапазонах (Сюняев и др. 1991, Павлинский и др. 1994, Ревнивцев и др. 2004),



Обсерватория ИНТЕГРАЛ (ЕКА, РКА). Выведена на орбиту 17 октября 2002 г.



Спектр галактического балджа по данным спектрометра SPI обсерватории ИНТЕГРАЛ вблизи энергии аннигиляции позитронов (511 кэВ). Из работы Чуразова и др. (2011)

в которых был открыт ряд неизвестных ранее чёрных дыр и нейтронных звезд в нашей Галактике; получение высококачественных широкополосных спектров кандидатов в чёрные дыры и нейтронных звезд; открытие протяжённого жёсткого (8-22 кэВ) диффузного излучения вокруг центра Галактики и в направлении на молекулярное облако Sgr B2 - эхо прошлой активности центральной сверхмассивной чёрной дыры Стрелец A\* (Сюняев и др. 1993). Последний результат был блестяще подтвержден наблюдениями обсерватории ИНТЕГРАЛ спустя почти 15 лет.

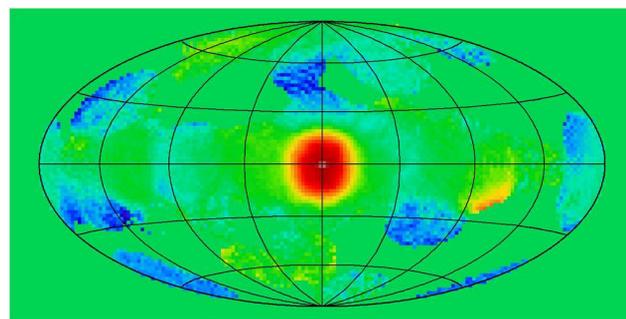
Серьезные успехи и научные результаты, полученные обсерваториями РЕНТГЕН и ГРАНАТ (особенно последней в жестком рентгеновском и гамма-диапазонах), подвели ученых к мысли о создании полноценной космической лаборатории гамма-лучей, которая позволяла бы не только строить изображения неба в жестких рентгеновских и гамма-лучах и проводить спектральный и временной анализ рентгеновских источников в широком диапазоне энергий, но также проводить и тонкую спектроскопию (спектроскопию с высочайшим энергетическим разрешением) регистрируемого излучения на энергиях вплоть до 8 МэВ. Так родилась концепция Международной Астрофизической Лаборатории Гамма Лучей ИНТЕГРАЛ (INTErnational Gamma Ray Astrophysical Laboratory (INTEGRAL), совместного проекта Европейского (ЕКА) и Российского космических агентств (работает на орбите с 2002 г.).

Основными приборами обсерватории ИНТЕГРАЛ являются гамма-телескоп IBIS и спектрометр SPI. Как и в случае основных инструментов обсерватории ГРАНАТ задача восстановления изображений

инструментами обсерватории ИНТЕГРАЛ решается с использованием принципа кодирующей апертуры. Спектрометр SPI (SPectrometer on INTEGRAL) по своей чувствительности в ядерных линиях намного превосходит все существовавшие до сих пор инструменты орбитальных обсерваторий. Его регистрирующие элементы изготовлены из сверхчистого германия и охлаждаются до температуры 90К. Диапазон чувствительности этого детектора от 20 кэВ до 8 МэВ, спектральное разрешение составляет  $E/dE \sim 500$ .

Гамма-телескоп IBIS (Imager on Board the INTEGRAL Satellite, диапазон энергий 15 кэВ-10 МэВ) позволяет получать изображения в жестком рентгеновском и гамма диапазонах с более высоким угловым разрешением, нежели любые предшествующие приборы.

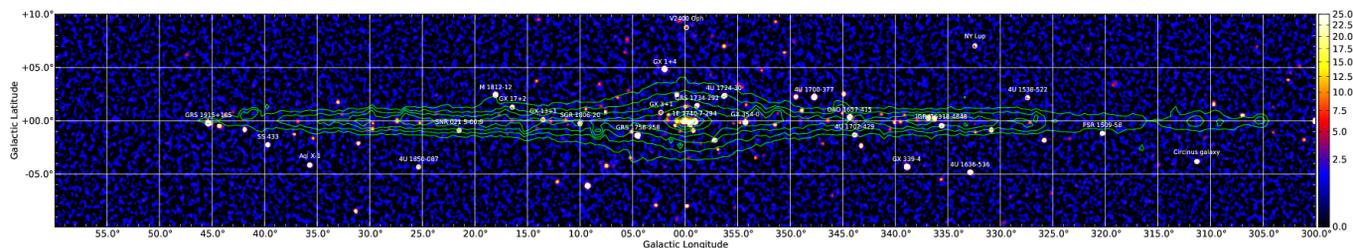
Успешный вывод обсерватории на высокоапогейную орбиту ракетой-носителем ПРОТОН, выполненный с точностями много лучше (более, чем на порядок) гарантированных величин, позволил значительно сократить расходы топлива при формировании окончательной орбиты двигателями космического ап-



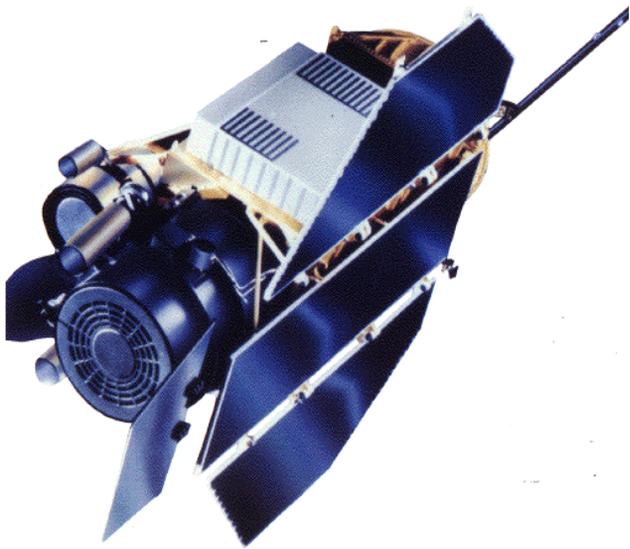
Изображение неба в области энергий 511 кэВ (в галактической системе координат). Хорошо видно концентрацию излучения в направлении центра Галактики. Из работы Чуразова и др. (2011)

парата и увеличить операционное время жизни обсерватории с 5 лет до 21 года. Таким образом, на настоящий момент и в ближайшие годы обсерватория будет являться действующим и эффективным инструментом для исследований неба в жестких рентгеновских лучах.

В результате многолетней работы обсерватории был получен ряд важных результатов в разных областях рентгеновской и гамма-астрономии. Одним из них является измерение энергии аннигиляции электронов и позитронов с высочайшей точностью  $E/m_e c^2 = 1.00002 \pm 0.00007$  (Чуразов и др. 2011). Пространственное распределение интенсивности излучения этой линии показывает, что аннигиляция по-



Карта Галактической плоскости в диапазоне энергий 17-60 кэВ, полученная обсерваторией ИНТЕГРАЛ. Контуры показывают яркость нашей Галактики в инфракрасном спектральном диапазоне - распределение обычных звезд. Из работы Кривоноса и др. (2012)



Обсерватория ROSAT (годы работы на орбите 1990-1999)

зитронов происходит в центральной зоне Галактики. По ширине линии 511 кэВ и относительной яркости трех-фотонного континуума (на энергиях ниже 511 кэВ) показано, что аннигиляция происходит в теплой (~10 тыс. градусов), частично ионизованной межзвездной среде, причем в основном не напрямую, а через образование позитрония - короткоживущей связанной системы из электрона и позитрона. Интенсивность линии свидетельствует о том, что в области ее формирования аннигилирует порядка  $10^{43}$  позитронов в секунду.

Среди других важных результатов обсерватории ИНТЕГРАЛ необходимо отметить построение карты нашей Галактики с беспрецедентной чувствительностью в такой большой части неба (Кривонос и др. 2012); разрешенного протяженного жесткого рентгеновского излучения вдоль плоскости Галактики (проблема 'хребта' Галактики, Ревнивцев и др. 2006, 2009, Кривонос и др. 2007), открытие эмиссионных гамма-линий от Сверхновой 1987А на энергиях 67.9 и 78.4 кэВ, возникающих в результате распада радиоактивного титана и скандия (Гребенев и др. 2012).

### Прогресс в пространственном и спектральном разрешении обсерваторий в 1980х-1990х годах

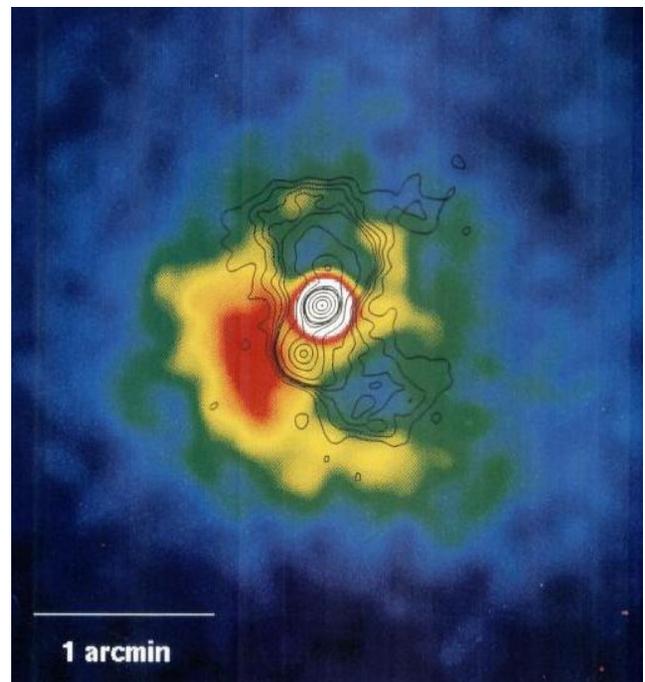
Исследования объектов Вселенной методами астрономии дают информацию только трех типов: пространственную (изображение), спектральную (распределение плотности потока фотонов от энергии или длины волны) и временную (зависимость яркости объектов от времени).

Орбитальная обсерватория HEAO2/Эйнштейн, впервые имевшая возможность получать высокоточную пространственную информацию о рентгеновском излучении неба, в то же время имела и несколько существенных недостатков. Прежде всего, эффективная площадь детекторов, имеющих возможность строить пространственное изображение с высоким разрешением, была очень мала - около 10 кв. см на энергии 1 кэВ. Этого было совершенно недостаточно для полной реализации потенциала фокусирующих рентгеновских телескопов. Тем не менее, в 1980х годах на спут-

нике EXOSAT еще раз были использованы рентгеновские зеркала косоугольного падения с малой эффективной площадью (около 10 кв. см).

Огромным шагом вперед стало создание телескопов косоугольного падения с большим полем зрения и со значительно увеличенной эффективной площадью (около 240 кв.см) на немецкой орбитальной обсерватории ROSAT. Такой скачок в эффективной площади, и в особенности в таком параметре как произведение эффективной площади на поле зрения зеркальной системы, дало возможность провести беспрецедентный по чувствительности обзор всего неба в рентгеновских лучах на энергиях 0.2-2.5 кэВ. Результатом обзора неба стало обнаружение более 150 000 источников и составление каталогов объектов разных классов, открытие ранее неизвестных и детальное изучение известных остатков вспышек сверхновых, обнаружение изолированных нейтронных звезд, открытие излучения комет и многое другое.

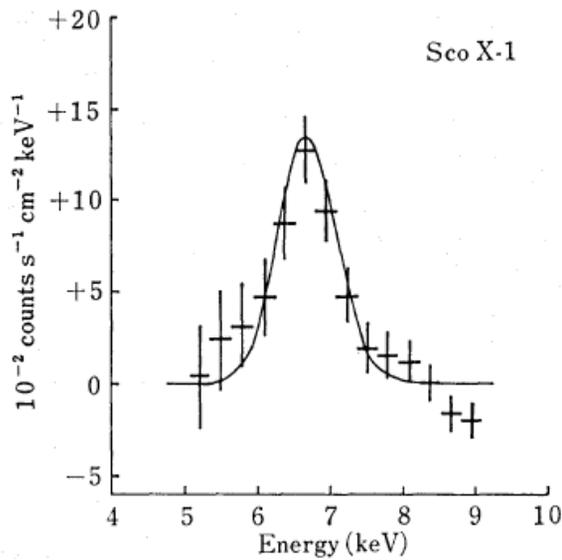
При исследованиях черных дыр, нейтронных звезд, белых карликов, т.е. компактных объектов, пространственная информация оказывается практически недоступной: источники имеют слишком малые разме-



Рентгеновское изображение скопления галактик в созвездии Персея (данные обсерватории ROSAT), с наложенными контурами радиояркости этого скопления галактик. Хорошо видна антикорреляция яркости скопления галактик в рентгеновском и радио диапазонах, указывающая на существенное влияние выбросов центральной сверхмассивной черной дыры (выбросы вещества из черной дыры видны по их излучению в радиодиапазоне) на горячий межгалактический газ. Из работ Берингер и др. (1993)

ры (например, нейтронная звезда имеет размер около 10-15 км на расстоянии от нас в сотни и тысячи парсек). Остаются только спектральная и временная информация.

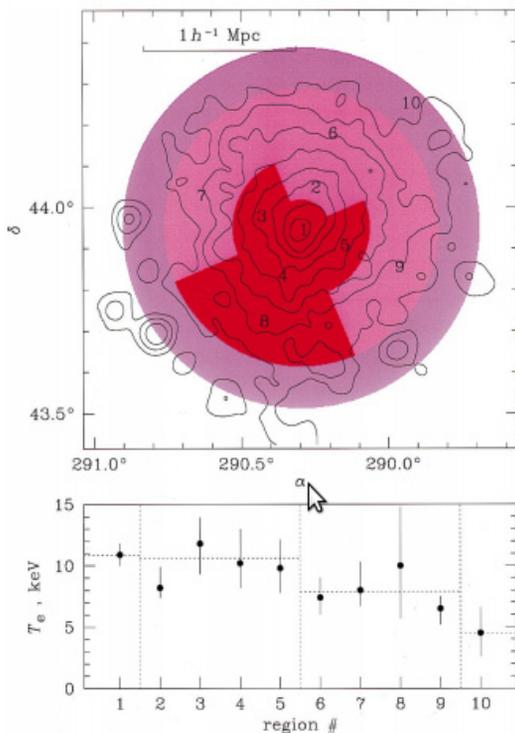
Для того, чтобы увеличить научную ценность спектральной информации необходимо увеличить энергетическое разрешение регистрирующих приборов. Первые инструменты рентгеновского диапазона имели энергетическое разрешение на уровне 20-25% до энергий 5-10 кэВ (газовые пропорциональные



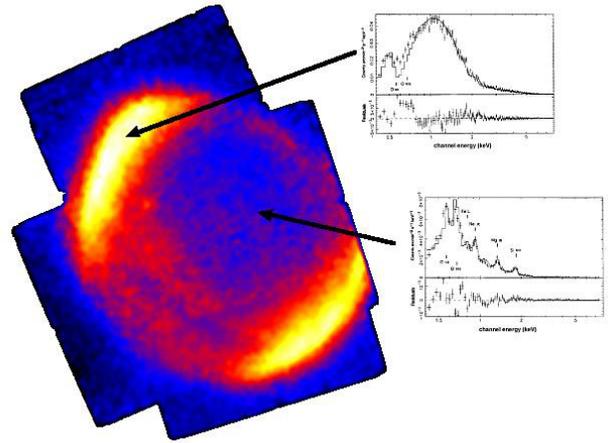
Эмиссионная линия железа, открытая в спектре аккрецирующей нейтронной звезды Sco X-1 благодаря увеличенному спектральному разрешению инструмента ГСПС обсерватории Телта (из работы Сузуки и др. 1984)

счетчики) и на уровне 10-15% в диапазоне 50-300 кэВ (сцинтилляторы).

Кардинально новым способом получения хорошего энергетического разрешения стало использование диспергирующих элементов - Брэгговских кристаллов или дифракционных решеток. Основным принципом работы таких приборов является их свойство отклонять плоскопараллельный пучок фотонов



Распределение температуры горячей плазмы внутри скопления галактик по данным наблюдений обсерватории ASCA. Контуры показывают рентгеновскую яркость скопления, цвет секторов - их температуру. Из работы Маркевича (1996).



Изображение остатка вспышки сверхновой SN1006, полученное обсерваторией ASCA. Показано, что на краях остатка вспышки рентгеновское излучение формируется за счет нетепловых процессов, в отличие от излучения во внутренней части остатка.

на угол, пропорциональный энергии фотонов. Регистрация потока фотонов позиционно-чувствительным детектором позволяет приписать фотонам, отклоненным на разные углы, определенную энергию. Впервые этот метод построения спектров астрофизических источников был использован на орбитальной обсерватории HEAO2/Эйнштейн, затем на обсерватории EXOSAT (1983-1986 гг). Однако, наряду с преимуществами, этот метод получения спектров высокого разрешения обладает и недостатком - большой потерей потока фотонов.

Важным шагом для увеличения энергетического разрешения на энергиях ниже 10 кэВ при высокой эффективности регистрации фотонов стало использование газовых сцинтилляционных пропорциональных счетчиков (ГСПС), что позволило улучшить энергетическое разрешение приборов (без потери эффективности регистрации фотонов) до 10%. Это сразу дало возможность открыть несколько новых явлений в рентгеновской астрономии. По данным обсерватории Телта, на которой впервые были использованы газовые сцинтилляционные пропорциональные счетчики рентгеновских фотонов, были открыты предсказанные незадолго до этого (Баско и др. 1974) флуоресцентные линии железа у целого ряда источников в нашей Галактике (см. например, Сузуки и др. 1984) и у внегалактических объектов.

Флуоресцентные линии возникают в результате отражения рентгеновского излучения от относительно холодного вещества. Обнаружение этих эмиссионных линий дало очень важный инструмент для изучения окрестностей черных дыр и нейтронных звезд. Профили линий, их ширина, смещение энергии относительно истинного положения и т.д., дает информацию о движении вещества, в котором возникают эти линии, вокруг компактных объектов, о гравитационном красном смещении в этом месте. Однако для детальных исследований эмиссионных линий в спектрах рентгеновских источников имеющегося качества наблюдательных данных пока было недостаточно.

В 1978 году впервые на рентгеновской обсерватории HEAO2/Эйнштейн для измерения спектров с высоким разрешением были использованы твердотельные детекторы рентгеновского излучения. Спектрометр SSS (Solid State Spectrometer) представлял собой криогенно-охлаждаемый кремниевый детектор



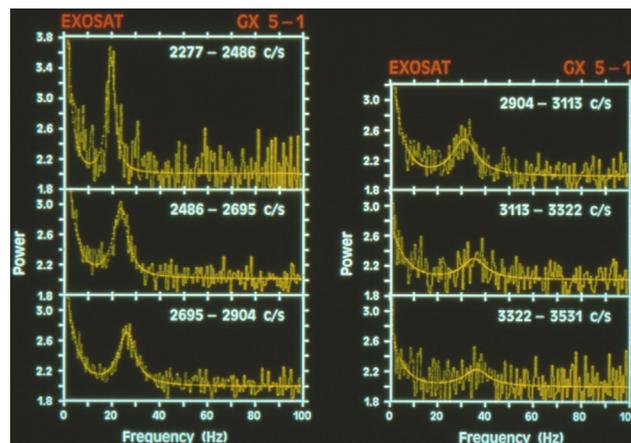
Тонкие фольги, используемые для легких рентгеновских зеркал косого падения. Эта технология позволила существенно облегчить рентгеновские зеркала. Если для толстых зеркал, обеспечивающих рекордное угловое разрешение (HEAO2/обсерватория им.Эйнштейна, Chandra) соотношение масса-эффективная площадь было около 2кг/кв.см, то зеркала на тонких фольгах обеспечивали соотношение около 30 г/кв.см (телескопы BBXRT, ASCA, Suzaku).

(рабочая температура 100К), обеспечивающий энергетическое разрешение около 160 эВ (до 4%) во всем рабочем диапазоне энергий. Однако в этом эксперименте рабочий энергетический диапазон спектрометра был ограничен свойствами зеркальной системы и фактически заканчивался на энергиях 4-4.5 кэВ, не захватывая флуоресцентные линии железа.

В 1990 году в ходе орбитального полета космического челнока Колумбия криогенно-охлаждаемый кремниевый спектрометр был установлен в фокусе зеркал косого падения, выполненных по технологии тонких фольг (телескоп BBXRT). Телескоп не обеспечивал такое пространственное разрешение как телескоп обсерватории Эйнштейн/HEAO2 (угловое разрешение его зеркал составляло около 1 угловой минуты), однако позволял успешно концентрировать рентгеновские фотоны на небольшой криогенно-охлаждаемый кремниевый спектрометр. В этом эксперименте рабочий диапазон спектрометра составлял 0.3-12 кэВ с энергетическим разрешением 90 эВ на энергии 1 кэВ и 150 эВ на энергии 6 кэВ.

Впервые скомбинировать умеренное пространственное разрешение с хорошим энергетическим разрешением фокального прибора удалось на японской обсерватории ASCA (1993-2000). Обсерватория состояла из четырех телескопов косого падения, выполненных по технологии тонких фольг (изготовлены в Центре космических полетов им. Годдарда, США), в фокусах которых стояли два позиционно чувствительных газовых сцинтилляционных пропорциональных счетчика и два твердотельных спектрометра, сделанных на основе четырех ПЗС матриц (размером 420x400 элементов, изготовлены в Массачусетском технологическом институте, США). Рабочая температура твердотельных спектрометров составляла около -60С.

Возможность получать пространственно-разрешенную информацию с хорошим спектральным разрешением от протяженных объектов рентгеновского неба (галактики, скопления галактик, остатки вспышек сверхновых и т.д.) сразу привела к ряду важных открытий. Например, было обнаружено нетепловое излуче-



Спектр мощности (Фурье-образ) переменности яркости аккрецирующей нейтронной звезды GX 5-1. Хорошо виден пик квазипериодических осцилляций яркости источника на частотах 20-30 Гц.

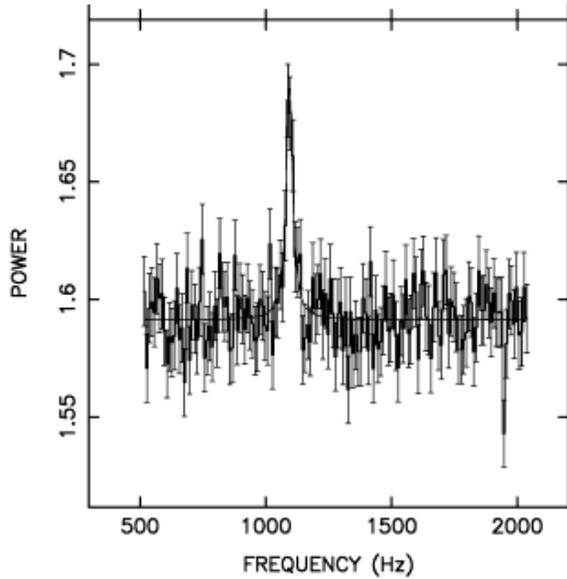
ние в некоторых частях оболочек остатков вспышек сверхновых, стало возможным исследование распределения температур и обилия тяжелых элементов в оболочках - относительно широкий энергетический диапазон инструментов обсерватории (0.5-10 кэВ) позволил выделять более жесткое излучение компактных объектов в тепловом излучении разлетающейся оболочки. При изучении горячего газа скоплений галактик новые возможности инструментов обсерватории ASCA привели к обнаружению температурных неоднородностей. Хорошее спектральное разрешение твердотельного детектора/ПЗС матрицы обсерватории позволило обнаружить структуру флуоресцентных эмиссионных линий компактных объектов.

## Временная информация о рентгеновских источниках

Скопления галактик, галактики, остатки вспышек сверхновых не демонстрируют значительной



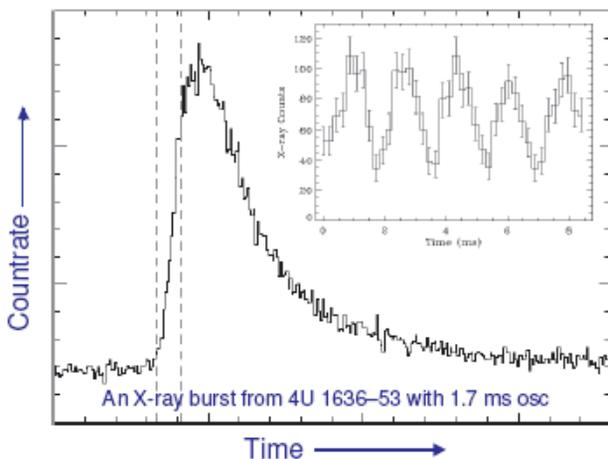
Обсерватория RXTE (1995-2012). Основной спектрометр этой обсерватории имел самую большую эффективную площадь (около 6400 кв.см) среди всех когда либо использовавшихся для наблюдений астрофизических рентгеновских объектов.



Спектр мощности переменности (Фурье-образ) кривой блеска аккрецирующей нейтронной звезды Скорпион X-1. На спектре мощности явно виден пик квазипериодических осцилляций яркости на частоте около 1100 Гц. Из работы ван дер Клиса и др. (1996)

переменности своего потока на малых временных масштабах. Действительно, существенные изменения яркости объектов (без учета эффектов, связанных с очень узкими диаграммами направленности излучения) не может происходить на масштабах времени, которые короче времени пролета объекта светом. Однако релятивистские компактные объекты (белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры) имеют размеры менее световой секунды, что означает, что переменность их рентгеновской яркости может быть весьма значительна на временах до миллисекунды или даже меньше.

Уже первые ракетные и спутниковые измерения ярчайших компактных объектов (например, источника Лебедь X-1) показали, что их рентгеновский поток



Кривая блеска источника 4U1636-53 во время всплеска термоядерного горения на поверхности звезды. В начальный период всплеска до того, как термоядерное горение распространилось на всю поверхность звезды, наблюдаются осцилляции яркости (на врезке) из-за быстрого вращения звезды. Из работы Стромайера и др. (1998)

может меняться на масштабах существенно меньших секунды (Ода и др. 1971). Именно на таких масштабах происходит движение вещества вокруг черных дыр и нейтронных звезд (размер черной дыры звездной массы или нейтронной звезды составляет около 10-30 км, а скорость движения вещества на круговой орбите вокруг них может доходить до половины скорости света).

Работа с временными масштабами малых долей секунд представляет собой очень сложную задачу. Основная сложность наблюдений такой быстрой переменности состоит в том, что объекты наших исследований находятся так далеко, что количество фотонов, приходящих от них в единицу времени, очень мало. Особенно серьезна эта проблема в рентгеновском и жестком рентгеновском диапазонах.

В частности, одна из наиболее известных и ярчайших в рентгеновском диапазоне двойных звездных систем с черной дырой в нашей Галактике - система Лебедь X-1 - имеет светимость в рентгеновском диапазоне в сто тысяч раз больше светимости нашего Солнца, однако расстояние до нее настолько велико (2 тысячи парсек или в 400 миллионов раз дальше, чем Солнце), что в окрестностях Земли от двойной системы Лебедь X-1 в рентгеновском диапазоне энергий приходит лишь по несколько фотонов в секунду на квадратный сантиметр. Поэтому, чтобы накопить полезный сигнал, позволяющий проводить измерения физических параметров вещества в окрестностях черной дыры в этой системе, нужны достаточно большие инструменты, позволяющие собирать фотоны с большой площади.

Одна из первых попыток сконцентрироваться на изучении быстрой переменности яркости рентгеновских источников была реализована в программе Европейского космического агентства EXOSAT (годы работы на орбите 1983-1986). Основным инструментом обсерватории стала система пропорциональных газовых счетчиков с общей эффективной площадью около 1600 кв.см., самой большой для спутников с трехосной стабилизацией на то время.

Результатом работы обсерватории стало открытие разных типов квазипериодических осцилляций яркости рентгеновских источников (см., например, обзор Хазингера, ван дер Клиса 1989), по-видимому связанных с особенностями аккреционных течений вблизи компактного объекта. Это открытие дало новый метод диагностики поведения вещества у черных дыр и нейтронных звезд.

Следующим шагом в этом направлении стали обсерватории GINGA (1987-1991, эффективная площадь основного инструмента около 4000 кв.см.) и RXTE (1995-2012, эффективная площадь основного детектора около 6400 кв.см.).

### Достижения рентгеновской астрономии последних лет

В последние 10-15 лет наблюдается бурное развитие рентгеновской астрономии. Основной прогресс здесь связан с запуском и успешной работой на орбите ряда рентгеновских обсерваторий, имеющих самые лучшие параметры углового разрешения, энергетического разрешения, эффективной площади. Обсерватории ИНТЕГРАЛ и полученных с ее помощью результатов в жестком рентгеновском диапазоне энергий уже было сказано выше. Здесь речь пойдет об обсерваториях более мягкого диапазона.

Необходимо сказать что ввиду новых технических возможностей рентгеновской астрономии ее



Обсерватория Чандра (НАСА). Выведена на орбиту 23 июля 1999 г

задачи начинают сильно пересекаться с задачами современной фундаментальной физики.

Среди задач, находящихся на переднем крае рентгеновской астрономии/астрофизики - задачи об уравнении состояния материи при сверхядерных плотностях, о существовании кварковой материи, задачи об устройстве Вселенной, доли так называемой 'темной энергии' в полном энергетическом балансе Вселенной, о природе 'темной энергии', фундаментальные задачи плазменной физики, такие как теплопроводность, диффузия, развитие неустойчивостей в присутствии магнитных полей, и многое другое.

В конце 1995 года на орбиту была запущена обсерватория Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE), имевшая, до ее выключения в начале 2012 года, самую большую собирающую площадь рентгеновских детекторов - около 6400 кв.см. Такое значительное увеличение эффективной площади по сравнению с предыдущими миссиями позволило продвинуться существенно дальше по шкале временной переменности, что привело к открытию квазипериодических осцилляций с частотами до 1 кГц, которые близки к частотам обращения вещества у горизонта событий черных дыр и у поверхностей нейтронных звезд (Ван дер Клис и др. 1996).

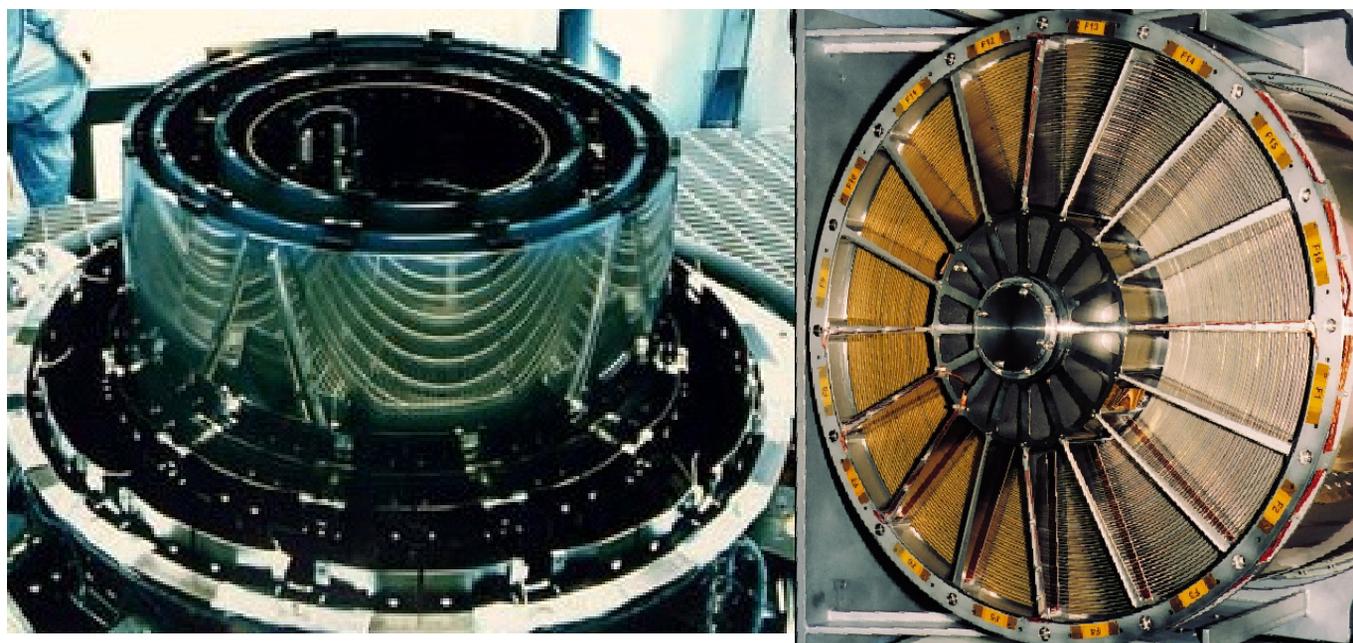
Еще одним важным открытием, сделанным обсерваторией RXTE, стало открытие пульсаций яркости нейтронных звезд с частотами в сотни Гц или периода-

ми вращения нейтронных звезд в 1-2 миллисекунды (Вэйландс и др. 1998). Это впервые позволило подтвердить предсказанный путь эволюции нейтронных звезд в двойных системах - их раскрутку при аккреции и превращение, после истощения вещества звезды-компаньона, в одиночные миллисекундные радиопульсары.

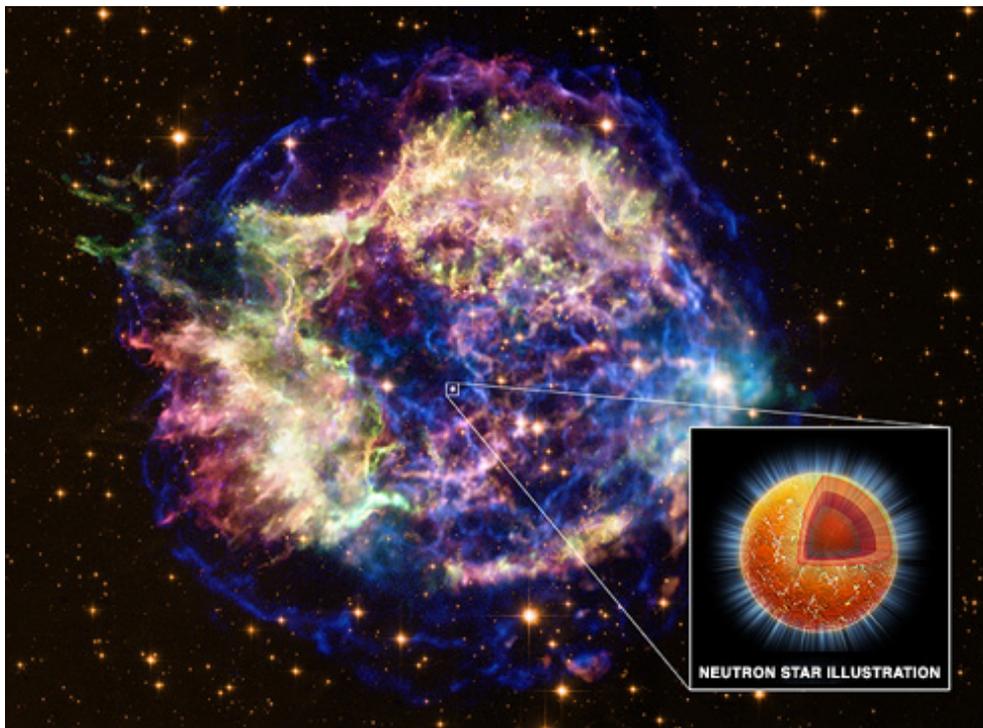
Быстровращающиеся нейтронные звезды были обнаружены не только среди пульсаров (т.е. нейтронных звезд, у которых магнитное поле достаточно сильно для того, чтобы направить падение аккрецируемого вещества на магнитные полюса, что в свою очередь, совместно с вращением нейтронной звезды, создает эффект 'маяка'), но и среди нейтронных звезд со слабыми магнитными полями.

В частности, пульсации были обнаружены во время всплесков термоядерного горения, происходящего в атмосферах нейтронных звезд. Был обнаружено, что в самом начале термоядерного горения в течение времени, за которое оно еще не успело распространиться по всей поверхности нейтронной звезды, видны осцилляции яркости горячего пятна (возникшего из-за термоядерного горения в этой области) на частоте вращения нейтронной звезды (Стромайер и др. 1998).

Обнаружение таких больших частот вращения нейтронных звезд дало новый инструмент диагностики их физических параметров. При частотах вращения около 500 Гц линейная скорость поверхности нейтронной звезды составляет 10-20% скорости света, что должно приводить к видимым эффектам на кривой яркости пульсаций. Ожидается, что измерение этих искажений может стать одним из самых надежных методов определения радиусов нейтронных звезд. Эти измерения очень важны для понимания уравнения состояния вещества при сверхядерных плотностях в центрах



Слева: Зеркальная система обсерватории Chandra (НАСА). Справа: зеркальная система обсерватории XMM-Newton (ЕКА)



Рентгеновское изображение остатка вспышки сверхновой Кассиопея А по данным обсерватории Chandra. Разными цветами показаны разные энергии фотонов. В центре хорошо виден компактный объект, по всей видимости, нейтронная звезда, образовавшаяся в результате взрыва сверхновой.

этих компактных объектов - являются ли нейтронные звезды на самом деле кварковыми? образуется ли канонный или бозонный конденсат в центре компактной звезды? и т.д.

В 1999 году состоялись запуски сразу двух рентгеновских обсерваторий, обеспечивших скачок в наблюдательной технике рентгеновской астрономии. В июле 1999 года была запущена обсерватория AXAF/Chandra (НАСА), в декабре 1999 года была запущена обсерватория ХММ (X-ray Multi Mirror mission)/обсерватория им. Ньютона (ХММ-Newton, ЕКА).

Основой обсерватории Chandra являются зеркала косоугольного падения, технологически являющиеся наследниками зеркал обсерватории HEAO2/Эйнштейн. При этом эффективная площадь зеркал увеличилась

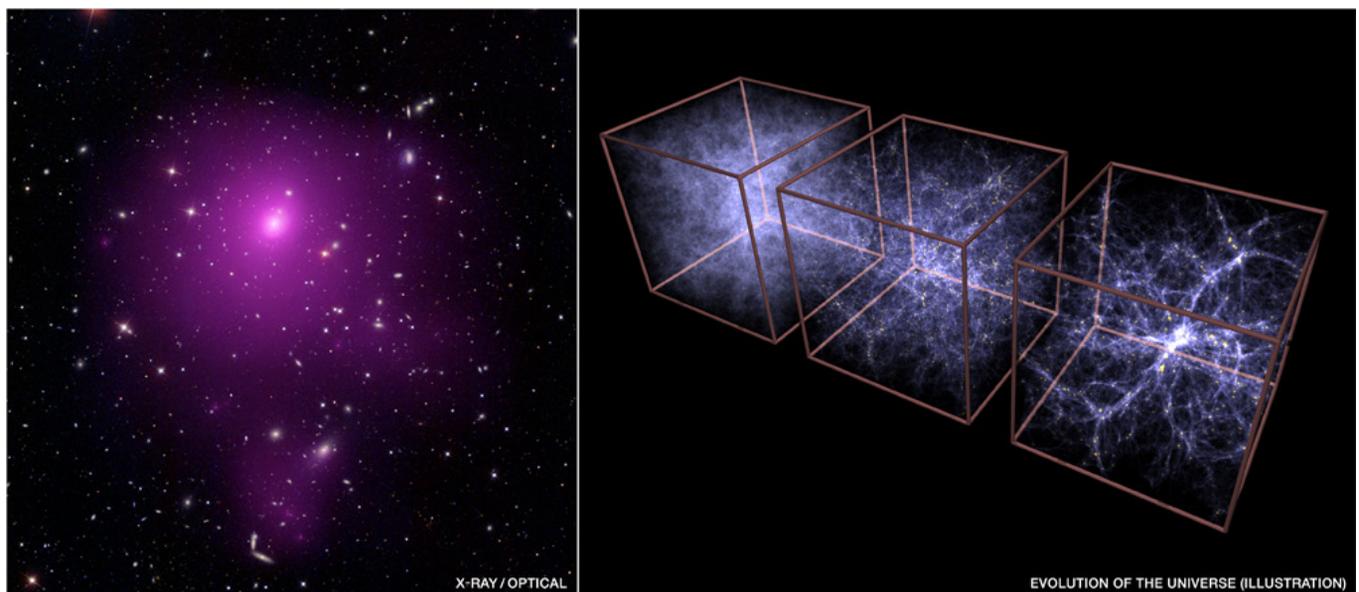
до 600-700 кв.см на энергиях 1-2 кэВ, продолжившись до энергий около 8 кэВ. В качестве фокальных детекторов используются ПЗС матрицы нового поколения, обеспечивающие энергетическое разрешение около 150-200 кэВ на энергии 6 кэВ. Введение в комплекс инструментов дифракционных решеток позволяет получать спектры точечных источников с еще большим энергетическим разрешением (до  $E/dE \sim 1000$ ).

Обсерватория ХММ-Newton также использует зеркала косоугольного падения, однако технология их изготовления немного другая. Для увеличения эффективной площади зеркал косоугольного

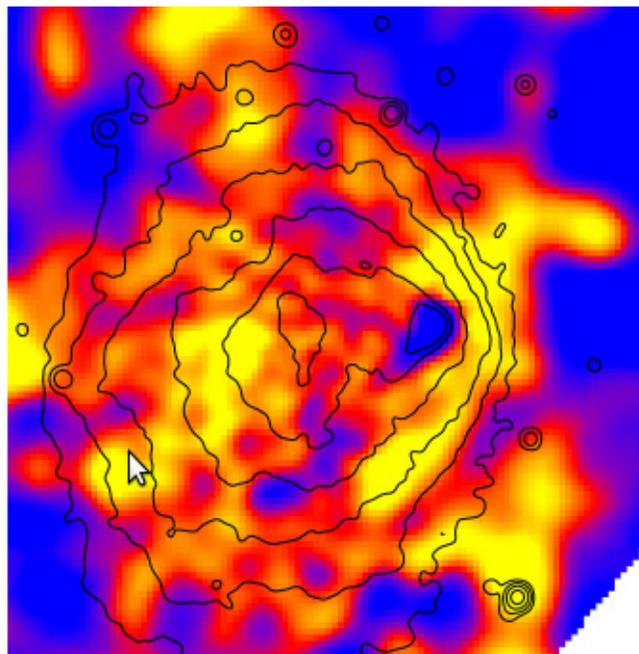
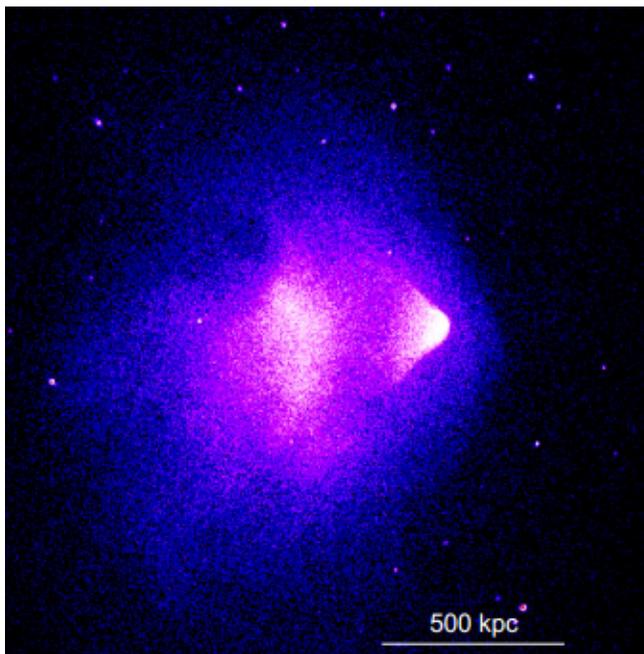
падающего большое количество параболоидов и гиперболоидов вкладывают друг в друга, создавая, таким образом, сложную систему вложенных труб. Целью обсерватории Chandra было получение максимально возможного углового разрешения телескопа, поэтому вложенных зеркал в ее зеркальной системе всего 4. Угловое разрешение этой зеркальной системы составляет около 0.5 угловой секунды.

Обсерватория ХММ-Newton нацелена на получение максимально возможной эффективной площади зеркальной системы при умеренном угловом разрешении. Она имеет три зеркальные системы, каждая из которых состоит из 58 вложенных слоев зеркал. Сложности выравнивания такой большой системы не позволили сделать угловое разрешение лучше, чем 5-7 угловых секунд.

За годы работы обсерваторий Chandra и ХММ-Newton было получено большое количество результатов. Здесь мы хотели бы упомянуть лишь о некоторых из них, связанных с наиболее фундаментальными проблемами современной физики.



Слева: рентгеновское изображение скопления галактик, наложенное на оптическое. В рентгеновском диапазоне хорошо видно протяженное излучение, возникающее из-за тормозного излучения горячей плазмы. Справа: схематично показан процесс роста возмущений плотности вещества во Вселенной. В узлах хорошо видной сети повышенной плотности вещества находятся скопления галактик. Рост скоплений галактик зависит от космологических параметров Вселенной (НАСА).



Изображение скопления галактик 1E 0657-56 ('Пуля') по данным обсерватории Chandra. Слева -- рентгеновская карта скопления, справа -- температурная карта (синий цвет обозначает плазму с температурой меньше 6 кэВ, желтый -- с температурой более 20 кэВ). Хорошо видно, что перед летящей холодной 'пулей' стоит ударная волна. Из работы Маркевича и др. (2010)

Открытие излучения горячего газа в скоплениях галактик в наблюдениях обсерватории UHURU дало начало космологическим исследованиям в рентгеновской астрономии. Рост скоплений галактик, являющихся наиболее массивными гравитационно-связанными объектами во Вселенной, существенно зависит от эволюции Вселенной, от ее космологических параметров. Измерение распределения скоплений по их массам, а также измерения эволюции этого распределения с красным смещением, дает возможность сделать надежные оценки космологических параметров Вселенной. В случае существенного вклада темной энергии (темная энергия фактически расталкивает пространство, препятствуя образованию сгущений вещества на больших расстояниях) рост массивных скоплений галактик должен быть подавлен по сравнению со случаем отсутствия темной энергии.

Поиск скоплений галактик на небе - нетривиальная задача. В настоящее время такие исследования ведутся как в рентгеновском, так и в оптическом, инфракрасном, и в субмиллиметровом (на основе эффекта Сюняева-Зельдовича, связанного с искажением излучения реликтового фона при его прохождении че-

рез горячий газ скоплений галактик) диапазонах длин волн. Однако пока оказывается, что наиболее полную выборку скоплений галактик можно получить только при использовании обзоров неба в рентгеновском диапазоне энергий. Используя обзоры неба обсерватории ROSAT и детальные наблюдения скоплений галактик при помощи обсерваторий Chandra и XMM-Newton, удалось получить независимое подтверждение существования темной энергии во Вселенной (Вихлинин и др. 2009)

Горячий газ скоплений галактик представляет собой разреженную плазму, поведение которой в присутствии магнитного поля очень сложно предсказать теоретически. Благодаря разрешающей способности инструментов обсерватории Chandra и XMM-Newton свойства такой плазмы можно измерить в астрофизических наблюдениях (Маркевич и др. 2007), что представляет большой интерес для плазменной физики.

Комбинация хорошего пространственного, энергетического разрешения и большой эффективной площади обсерваторий Chandra и XMM-Newton позволила развиваться целым направлениям в рентгеновской астрономии, таким как изучение популяций аккрецирующих объектов в далеких галактиках, детальное изучение химического состава горячей плазмы в галактиках, в скоплениях галактик, в остатках вспышек сверхновых и т.д. На новый уровень точности вышли измерения влияния активности центральных сверхмассивных черных дыр в галактиках и в скоплениях галактик на галактическую и межгалактическую среду.

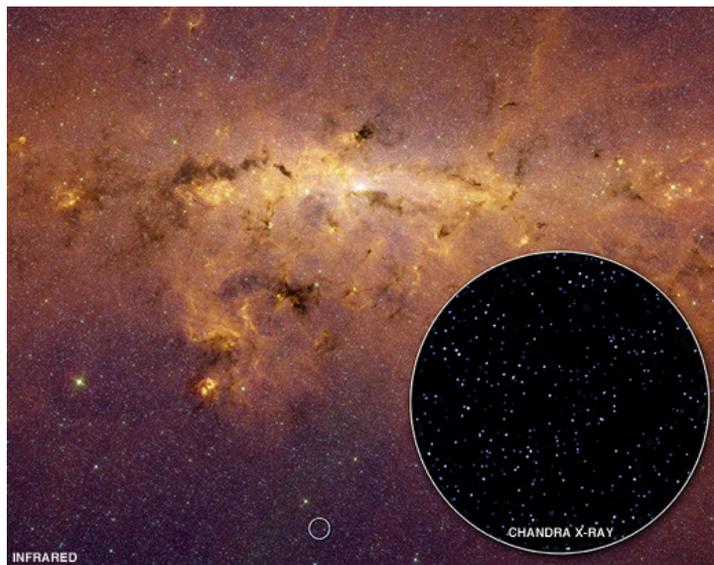
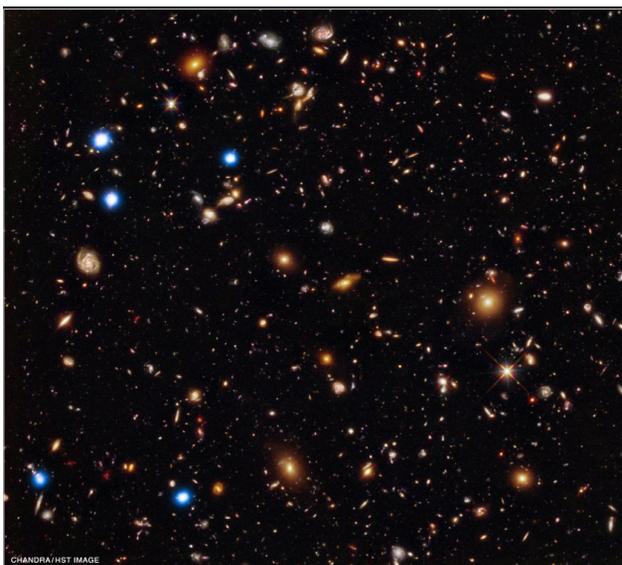


Согласно последним исследованиям, активные ядра - сверхмассивные черные дыры в центрах галактик - существенно влияют на темпы роста самих галактик в ходе эволюции Вселенной.

### Новые шаги рентгеновской астрономии

Улучшение характеристик рентгеновских инструментов в ближайшее десятилетие ожидается по нескольким направлениям.

Прежде всего, планируется сделать скачок в энергетическом разрешении приборов, которое в современных рентгеновских инструментах ограничено



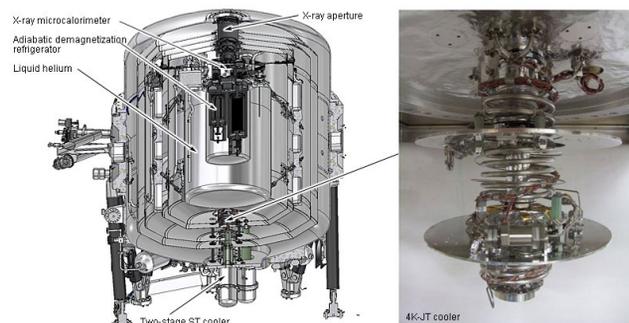
Рекордное угловое разрешение рентгеновского телескопа обсерватории Chandra (около 0.5 угл.секунд в центре поля зрения) позволило разрешить на огромное количество точечных источников внегалактический рентгеновский фон Вселенной (его подавляющая часть складывается из излучения миллиардов активных ядер галактик), а также фоновое рентгеновское излучение нашей Галактики. Слева показана комбинация изображений некоторой области неба орбитальными телескопами Chandra и Хаббл. Справа показано как разрешается на большое количество источников протяженное излучение области вдоль плоскости Галактики.

физическими свойствами полупроводников. Давно ожидаемый ввод в строй рентгеновских микрокалориметров, способных довести энергетическое разрешение в области энергий 6 кэВ до уровня в 3-5 эВ, был задержан несколькими техническими авариями. Рентгеновская обсерватория Астро-Е (Япония), на которой были установлены криогенные рентгеновские микрокалориметры, была потеряна в ходе неудачного запуска в феврале 2000 года. Ее копия (с немного улучшенными характеристиками энергетического разрешения) была успешно запущена в июле 2005 года. К сожалению, уже через несколько недель проблемы в системе охлаждения привели к полной потере жидкого гелия, что фактически означало выход из строя микрокалориметра. Следующей орбитальной обсерваторией с микрокалориметрами на борту должна стать обсерватория Astro-H (запуск запланирован на 2015 год).

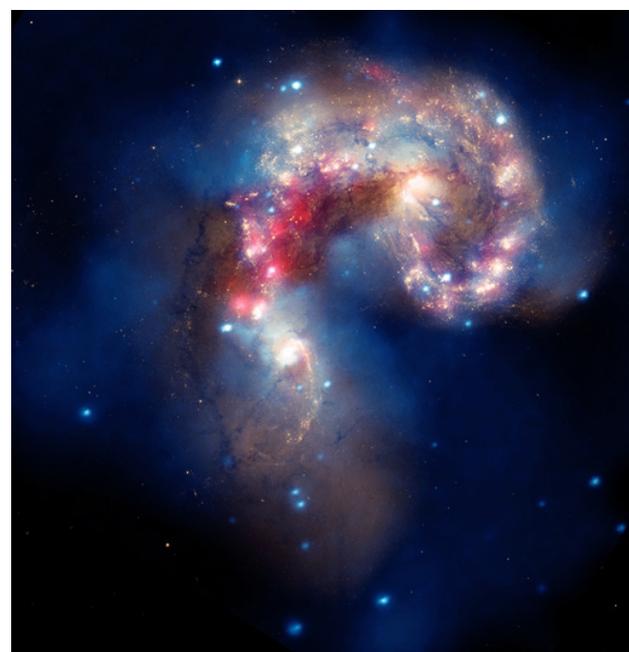
В области жесткого рентгеновского диапазона современные технологии построения изображения и увеличения чувствительности фактически достигли своего технического предела (обсерватории ИНТЕГРАЛ, SWIFT). Дальнейшее увеличение чувствительности инструментов в этом диапазоне энергий требует

значительного увеличения площади и массы регистрирующей аппаратуры (более 10 тонн), что делает практически невозможным выведение таких обсерваторий на орбиту. Поэтому для улучшения характеристик аппаратуры, работающей в жестком рентгеновском диапазоне, требуются принципиально новые технические решения.

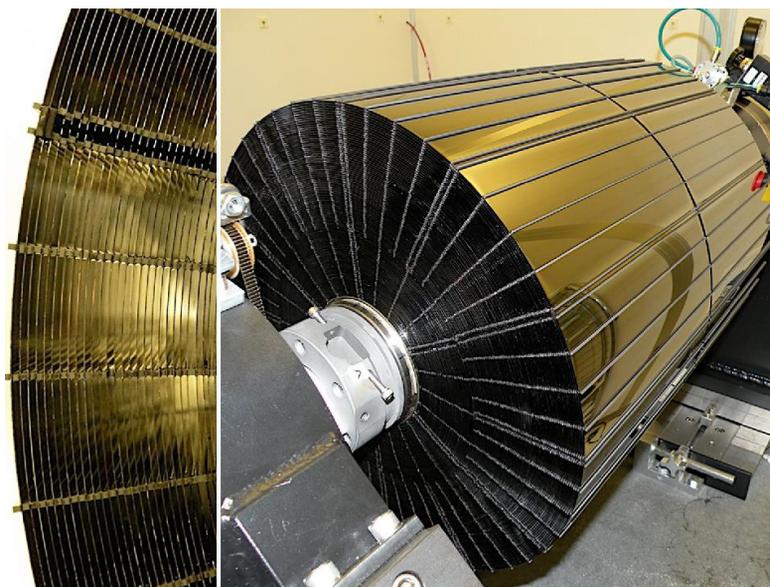
Одним из таких решений является использование рентгеновских зеркал косоугольного падения с многослойными покрытиями, которые позволяют поднять верхнюю границу энергии фотонов, отражаемых от зеркал, до 70-80 кэВ. Орбитальная обсерватория с



Микрокалориметр для новой рентгеновской обсерватории ASTRO-H космического агентства Японии JAXA. Сложная система криогенного охлаждения доводит температуру микрокалориметра до величины около 50 миллиК.



Изображение галактик Antennae в рентгеновском (синий цвет, данные обсерватории Чандра), оптическом (желтый, обсерватория им. Хаббл) и инфракрасном (красный, обсерватория Спитцер) диапазонах



Слева: Рентгеновские зеркала косоугольного падения с многослойным покрытием обсерватории NuSTAR. Справа: Художественное представление обсерватории NuSTAR на орбите. (НАСА)

такими зеркалами - NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array, Гаррисон и др. 2010) была запущена на орбиту в июне 2012 года. Ожидаемая чувствительность рентгеновских телескопов NuSTAR в области жесткого рентгеновского диапазона приблизительно в 100 раз лучше чувствительности обсерватории ИНТЕГРАЛ (это достигается за счет фокусирующей оптики). Однако поле зрения телескопа при этом очень мало, менее 12 угловых минут.

Основными мишенями обсерватории NuSTAR являются остатки вспышек сверхновых, активные ядра галактик, ультраяркие рентгеновские источники, природа которых пока остается неясной.

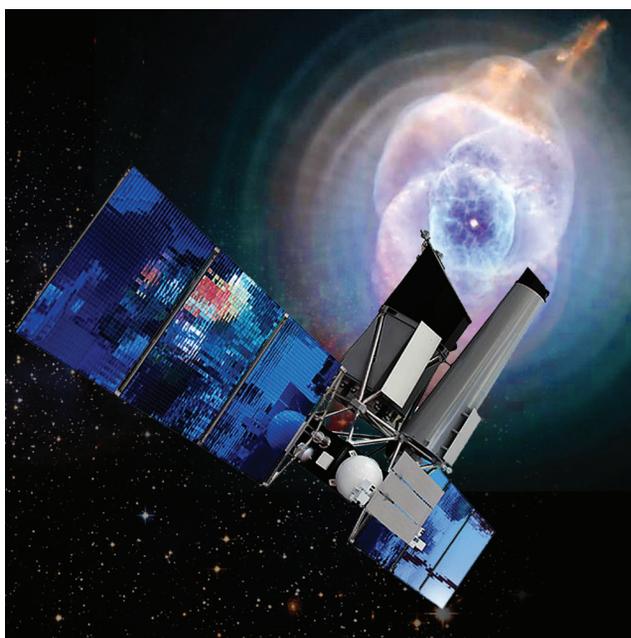
Потенциал открытий, созданный обзором всего неба обсерватории ROSAT в 1990х годах, постепенно заканчивается. Особенно это видно по тому, что за последние годы рентгеновские обсерватории посвя-

щают достаточно много времени обзорам разных площадок на небе. Задачами этих обзоров, как правило, являются исследования космологической эволюции галактик и сверхмассивных черных дыр.

Следующим обзором рентгеновского неба, который даст огромный импульс рентгеновской астрономии на ближайшие десятилетия станет обзор обсерватории Спектр-Рентген-Гамма (Спектр-РГ). Обсерватория является совместным проектом России и Германии и нацелена на решение фундаментальных вопросов космологии - свойств и эволюции Вселенной, природы темной энергии и темной материи, возникновения и роста сверхмассивных черных дыр и поиск наиболее редких объектов.

Основой обсерватории являются два рентгеновских телескопа косоугольного падения - eROSITA (Германия) и АРТ-ХС (Россия), совместно перекрывающих область энергий 0.2-30 кэВ. Задачей обсерватории является получение обзора всего неба с чувствительностью практически в сто раз превышающей чувствительность существующих обзоров неба, и продление такого обзора в область более жесткого рентгеновского диапазона.

Ожидается, что в ходе обзора всего неба обсерватория Спектр-Рентген-Гамма обнаружит все скопления галактик в наблюдаемой части Вселенной (около 100 000 скоплений), около 3 миллионов аккрецирующих сверхмассивных черных дыр, сотни тысяч звезд с активными коронами, десятки тысяч звездобразующих галактик



Общий вид спутника Спектр-РГ

## Список литературы

- Бабушкина О.П. и др. 1975, Письма в *Астрономический Журнал*, 1, 32
- Basko M.M., Sunyaev R.A., Titarchuk L.G., 1974, *A&A*, 31, 249
- Бейгман И.Л. и др. 1976, Письма в *Астрономический Журнал*, 2, 6
- Belian R.D., Conner J.P., Evans W.D., 1972, *ApJ*, 171, L87
- Boehringer H., Voges W., Fabian A.C., Edge A.C., Neumann D.M., 1993, *MNRAS*, 264, L25
- Bowyer S., Byram E.T., Chubb T.A., Friedman H., 1964, *Sci*, 146, 912
- Братолобова-Цулукидзе Л.С. и др. 1976, Письма в *Астрономический Журнал*, 2, 71
- Churazov E., Sazonov S., Tsygankov S., Sunyaev R., Varshalovich D., 2011, *MNRAS*, 411, 1727
- Costa E., et al., 1997, *Nature*, 387, 783
- Doxsey R.E., Bradt H.V., Dower R.G., Jernigan J.G., Apparao K.M.V., 1977, *Nature*, 270, 586
- Doxsey R., Bradt H., Johnston M., Griffiths R., Leach R., Schwartz D., Schwarz J., Grindlay J., 1979, *ApJ*, 228, L67
- Duncan R.C., Thompson C., 1992, *ApJ*, 392, L9
- Forman W., Jones C., Cominsky L., Julien P., Murray S., Peters G., Tananbaum H., Giacconi R., 1978, *ApJS*, 38, 357
- Friedman H., Lichtman S.W., Byram E.T., 1951, *PhRv*, 83, 1025
- Giacconi R., Rossi B., 1960, *JGR*, 65, 773
- Giacconi R., Gursky H., Paolini F.R., Rossi B.B., 1962, *PhRvL*, 9, 439
- Giacconi R., et al., 1979, *ApJ*, 234, L1
- Gnedin I.N., Sunyaev R.A., 1974, *A&A*, 36, 379
- Golenetskii S.V., Mazets E.P., Il'inskii V.N., Aptekar' R.L., Bredov M.M., Gur'yan Y.A., Panov V.N., 1971, *ApL*, 9, 69
- Grebenev S.A., Syunyaev R.A., 1987, *SvAL*, 13, 397
- Grebenev S.A., Lutovinov A.A., Tsygankov S.S., Winkler C., 2012, *Nature*, 490, 373
- Grindlay J., Gursky H., Schnopper H., Parsignault D.-R., Heise J., Brinkman A.C., Schrijver J., 1976, *ApJ*, 205, L127
- Gursky H., Giacconi R., Gorenstein P., Waters J.R., Oda M., Bradt H., Garmire G., Sreekantan B.V., 1966, *ApJ*, 146, 310
- Gursky H., Kellogg E., Murray S., Leong C., Tananbaum H., Giacconi R., 1971, *ApJ*, 167, L81
- Harrison F.A., et al., 2010, *SPIE*, 7732,
- Hasinger G., van der Klis M., 1989, *A&A*, 225, 79
- Klebesadel R.W., Strong I.B., Olson R.A., 1973, *ApJ*, 182, L85
- Krivonos R., Revnivtsev M., Churazov E., Sazonov S., Grebenev S., Sunyaev R., 2007, *A&A*, 463, 957
- Krivonos R., Tsygankov S., Lutovinov A., Revnivtsev M., Churazov E., Sunyaev R., 2012, *A&A*, 545, A27
- Курт В.Г. и др. 1976, Письма в *Астрономический Журнал*, 2, 42
- Lasota J.-P., 2001, *NewAR*, 45, 449
- Lewin W.H.G., Joss P.C., 1981, *SSRv*, 28, 3
- Мандельштам С.Л., Тиндо И.П., Черемухин Г.С., Сорокин Л.С., Дмитриев А.Б., 1968, *Космические Исследования*, т.4, вып.1, стр. 119
- Markevitch M., 1996, *ApJ*, 465, L1
- Markevitch M., Vikhlinin A., 2007, *PhR*, 443, 1
- Markevitch M., 2010, arXiv, arXiv:1010.3660
- Marshall F.E., Boldt E.A., Holt S.S., Miller R.B., Mushotzky R.F., Rose L.A., Rothschild R.-E., Serlemitsos P.J., 1980, *ApJ*, 235, 4
- Мазец Е.П., Голенецкий С.В. & Ильинский В.Н., 1974, Письма в *ЖЕТФ*, 19, 126
- Mazets E.P., Golenetskii S.V., Ilinskii V.N., Gurian I.A., Kharitonova T.V., 1975, *Ap&SS*, 33, 347
- Mazets E.P., Golenskii S.V., Ilinskii V.N., Aptekar R.L., Guryan I.A., 1979, *Nature*, 282, 587
- Mitchell R.J., Culhane J.L., Davison P.J.N., Ives J.C., 1976, *MNRAS*, 175, 29P
- Mitsuda K., et al., 1984, *PASJ*, 36, 741
- Oda M., Gorenstein P., Gursky H., Kellogg E., Schreier E., Tananbaum H., Giacconi R., 1971, *ApJ*, 166, L1
- Pavlinsky M.N., Grebenev S.A., Sunyaev R.-A., 1994, *ApJ*, 425, 110
- Ревнивцев М.Г., Сюняев Р.А. Гильфанов М.Р., Чуразов Е.М., Годвурм А., Поль Ж., Мандру П., Рок Ж.П., 2004, Письма в *Астрономический Журнал*, 30, 527
- Revnivtsev M., Sazonov S., Churazov E., Forman W., Vikhlinin A., Sunyaev R., 2009, *Nature*, 458, 1142
- Revnivtsev M., et al., 2012, *SPIE*, 8443,
- Salpeter E.E., 1964, *ApJ*, 140, 796
- Sandage A., et al., 1966, *ApJ*, 146, 316
- Schnopper H.W., Bradt H.V., Rappaport S., Boughan E., Burnett B., Doxsey R., Mayer W., Watt S., 1970, *ApJ*, 161, L161
- Schreier E., Levinson R., Gursky H., Kellogg E., Tananbaum H., Giacconi R., 1972, *ApJ*, 172, L79
- Shakura N.I., Sunyaev R.A., 1973, *A&A*, 24, 337
- Shapiro S.L., Lightman A.P., Eardley D.M., 1976, *ApJ*, 204, 187
- Skinner G.K., Willmore A.P., Eyles C.J., Bertram D., Church M.J., 1987, *Nature*, 330, 544
- Strohmayer T.E., Zhang W., Swank J.H., White N.E., Lapidus I., 1998, *ApJ*, 498, L135
- Sunyaev R.A., Truemper J., 1979, *Nature*, 279, 506
- Sunyaev R.A., Titarchuk L.G., 1980, *A&A*, 86, 121
- Sunyaev R., et al., 1987, *Nature*, 330, 227
- Сюняев Р.А. и др.. 1988, Письма в *Астрономический Журнал*, 146 327
- Sunyaev R., et al., 1991, *A&A*, 247, L29
- Sunyaev R.A., Markevitch M., Pavlinsky M., 1993, *ApJ*, 407, 606
- Suzuki K., Matsuoka M., Inoue H., Mitsuda K., Tanaka Y., Ohashi T., Hirano T., Miyamoto S., 1984, *PASJ*, 36, 761
- Tanaka Y., Shibasaki N., 1996, *ARA&A*, 34, 607
- Truemper J., Pietsch W., Reppin C., Voges W., Staubert R., Kendziorra E., 1978, *ApJ*, 219, L105
- Vaiana G.S., van Speybroeck L., Zombeck M.V., Krieger A.S., Silk J.K., Timothy A., 1977, *SSI*, 3, 19
- van der Klis M., Swank J.H., Zhang W., Jahoda K., Morgan E.H., Lewin W.H.G., Vaughan B., van Paradijs J., 1996, *ApJ*, 469, L1
- van Paradijs J., et al., 1997, *Nature*, 386, 686
- Vikhlinin A., et al., 2009, *ApJ*, 692, 1060
- Wijnands R., van der Klis M., 1998, *Nature*, 394, 344
- Zel'dovich Y.B., 1964, *SPhD*, 9, 195

Авторы:

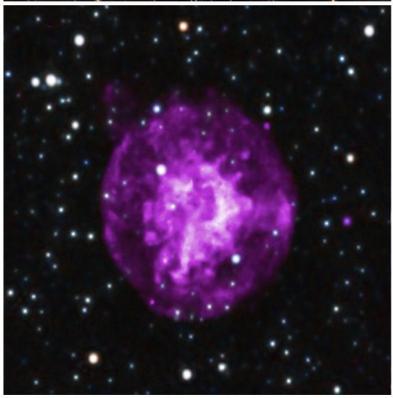
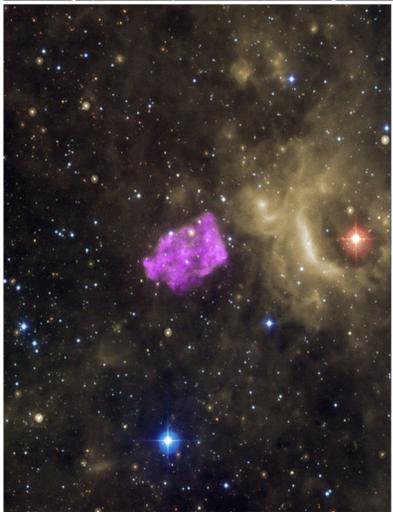
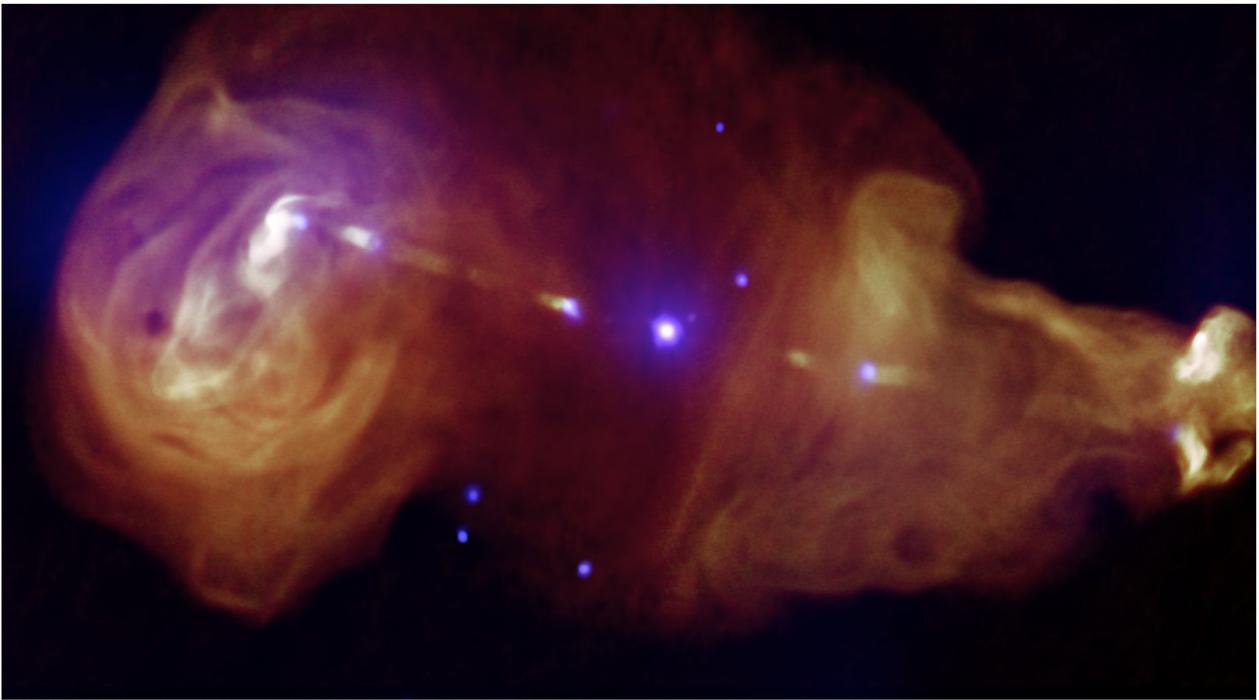
М.Г.Ревнивцев, А.А. Лутовинов, М.Н.  
Павлинский (ИКИ РАН)

С использованием материалов, под-  
готовленных авторами для монографии  
«Фундаментальные космические иссле-  
дования»

Верстка: М.Г.Ревнивцев

Дизайн обложки: А.Н.Захаров

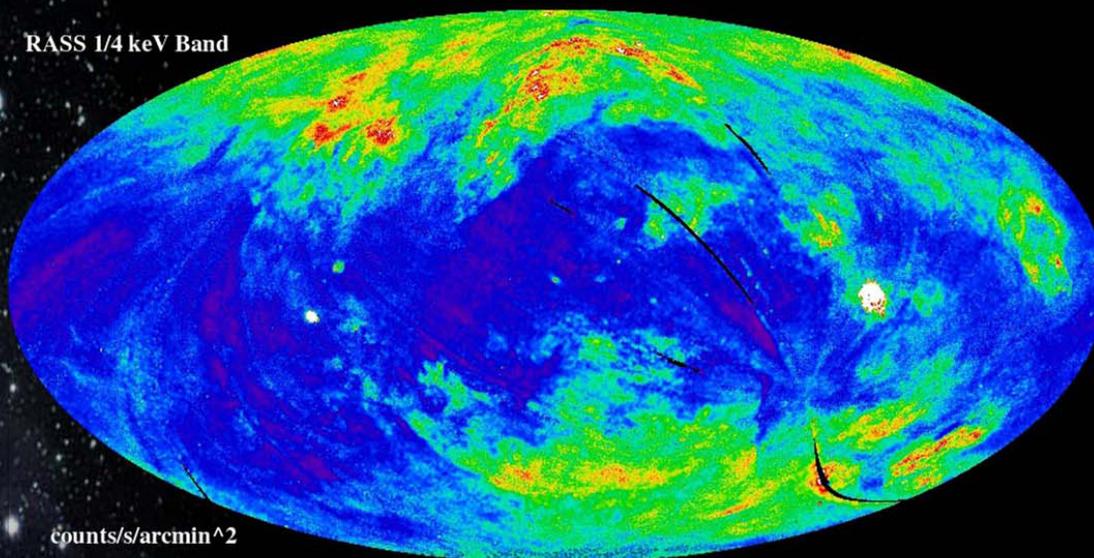
Буклет изготовлен при поддержке  
Российского Фонда Фундаментальных  
Исследований (РФФИ)



# РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ

ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА

RASS 1/4 keV Band



counts/s/arcmin<sup>2</sup>



RXTE All Sky Survey (3-20 keV)

