

## НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 2002

## У истоков рентгеновской астрономии

Р. Джиаккони

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2002 г.)

PACS numbers: 01.30.Rr, 07.85.Nc, 29.30.Kv, 95.55.Ka

## Содержание

1. Введение (427).
  2. Начало рентгеновской астрономии (427).
  3. Открытия обсерватории УХУРУ (429).
    - 3.1. Двойные рентгеновские источники. 3.2. Открытие горячего межгалактического газа.
  4. Рентгеновские телескопы (434).
  5. Современные наблюдения со спутника "Чандра" (436).
  6. Будущее рентгеновской астрономии (437).
- Список литературы (438).

## 1. Введение

Наблюдение небесных объектов в рентгеновском диапазоне длин волн стало возможным благодаря развитию ракетостроения и появлению спутников, способных выводить телескопы за пределы земной атмосферы, поглощающей рентгеновское излучение.

Рентгеновские фотоны с энергией выше нескольких сотен эВ могут проникать сквозь межзвездный газ, проходя расстояния, сравнимые с размерами нашей Галактики, с большим или меньшим поглощением в зависимости от направления на источник. Фотоны с энергиями порядка нескольких кэВ свободно проходят через толщу галактического газа; фактически, можно наблюдать рентгеновское излучение источников, находящихся на расстояниях, сравнимых с размерами Вселенной.

Возможность изучения небесных объектов в рентгеновских лучах имеет глубокое значение для всей астрономии. В диапазоне энергий от рентгеновских до гамма-лучей высокоэнергетические космические явления порождают наибольший поток рентгеновских квантов. Под высокоэнергетическими космическими явлениями я подразумеваю события с чрезвычайно большим выделением энергии (вспышки сверхновых, излучение ядер

активных галактик и т.д.) или явления, в которых энергия на нуклон или температура вещества крайне высоки (падение вещества на компактные объекты, высокотемпературная плазма, взаимодействие релятивистских электронов с магнитными полями или фотонами).

Начиная с 1962 г. — с момента возникновения рентгеновской астрономии — чувствительность рентгеновских телескопов возросла более чем на 9 порядков величины, что сравнимо с увеличением чувствительности оптических наблюдений телескопами 8- или 10-метрового класса по сравнению с невооруженным глазом. В рентгеновском диапазоне наблюдаются все категории космических объектов — от планет до нормальных звезд, от обычных галактик до квазаров, от небольших групп галактик до крупнейших скоплений. В результате этих наблюдений стало очевидно, что высокоэнергетические явления играют фундаментальную роль в образовании, а также в химической и динамической эволюции космических структур всех масштабов. Рентгеновские наблюдения имели решающее значение для понимания важных аспектов этих явлений. Именно из рентгеновских наблюдений мы получили первые свидетельства выделения гравитационной энергии при падении вещества на сколлапсировавшие объекты, такие как нейтронные звезды или черные дыры. Именно рентгеновское излучение от горячей плазмы в скоплениях галактик показало, что эта высокотемпературная составляющая Вселенной более чем вдвое превышает содержание "видимой" (барионной) материи в скоплениях галактик.

Не менее впечатляющие и перспективы дальнейших исследований Вселенной в рентгеновских лучах. Появление новой более совершенной экспериментальной техники, такой, как бездисперсионная спектроскопия высокого разрешения и рентгеновские телескопы, способные фокусировать все больше энергии с большего поля зрения, открывает широкие возможности для новых астрономических открытий.

## 2. Начало рентгеновской астрономии

До того, как в 1959 г. группа ученых из лаборатории American Science and Engineering (AS&E, небольшая

Р. Джиаккони (R. Giacconi), Associated Universities Inc., Suite 730, 1400 16th St., NW, Washington, DC 20036, USA and Johns Hopkins University, 3400 N. Charles Street, Baltimore, USA

Таблица 1. Оценки рентгеновских потоков от источников за пределами Солнечной системы (из работы [2])

Источник	Максимальная длина волны	Механизм излучения	Оценка потока
Солнце	$< 20 \text{ \AA}$	Корональная эмиссия	$\sim 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Солнце с расстояния 8 св. лет	$< 20 \text{ \AA}$	Корональная эмиссия	$2,5 \times 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Сириус при $L_X \sim L_{\text{Орт}}$	$< 20 \text{ \AA}$	? Нет конвективной зоны	$0,25 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Вспыхивающие звезды	$< 20 \text{ \AA}$	Вспышки типа солнечных?	?
Пекулярные А-звезды	$< 20 \text{ \AA}$	$B \sim 10^4 \text{ Гс}$	?
		Большое $B$	?
		Ускорение частиц	
Крабовидная туманность	$< 25 \text{ \AA}$	Синхротрон	
		$E_E \geq 10^{13} \text{ эВ}$ при $B = 10^{-4} \text{ Гс}$	?
		Времена жизни?	
Луна	$< 23 \text{ \AA}$	Флуоресценция	$0,4 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Луна	$\sim 20 \text{ \AA}$	Удар частиц солнечного ветра	$0 - 1,6 \times 10^3 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
		Электроны	
		$\phi_e = 0 - 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	
SCO X-1	$2 - 8 \text{ \AA}$	?	$28 \pm 1,2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

частная исследовательская корпорация в Кембридже, штат Массачусетс) начала изучать теоретические и экспериментальные возможности рентгеновских астрономических наблюдений, группа из Научно-исследовательской лаборатории военно-морских сил (Naval Research Laboratory, NRL) под руководством Герберта Фридмана около 10 лет вела рентгеновские наблюдения Солнца; кроме того, было несколько неудачных попыток обнаружить рентгеновское излучение от звездных объектов [1]. Джааккони, Кларк и Росси опубликовали *Краткий обзор достижений экспериментальной и теоретической рентгеновской астрономии* [2], содержащий оценки ожидаемых рентгеновских потоков от различных небесных источников.

Эти результаты собраны в табл. 1. Поток рентгеновских квантов от Солнца на Земле составляет  $10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и мог быть легко зарегистрирован существующими в то время счетчиками с чувствительностью 10–100 фотонов  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Однако если бы все звезды излучали такие же рентгеновские потоки, что и Солнце, ожидаемый уровень потока на Земле составил бы всего лишь  $10^{-4}$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Рассматривались также и другие возможные источники, такие как остатки сверхновых, вспыхивающие звезды, пекулярные А-звезды и т.д., однако уровень потока рентгеновского излучения от них оценивался с большой неопределенностью. Казалось, что ярчайшим рентгеновским источником на ночном небе может быть Луна из-за флуоресцентного свечения лунного грунта, облучаемого рентгеновским потоком от Солнца.

Нами был разработан эксперимент, который мог регистрировать потоки  $0,1 - 1$  фотонов  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , т.е. в 50–100 раз более чувствительный, чем все существовавшие ранее. Увеличение чувствительности достигалось за счет большей площади детектора, использования схемы антисовпадений для уменьшения фона космических частиц и широкого поля зрения для увеличения вероятности обнаружить какой-либо источник в ходе полета. Научное оборудование, показанное на рис. 1, было успешно использовано для обнаружения первого звездного рентгеновского источника во время полета 12 июня 1962 г. [3]. На ночном небе доминировал один источник (SCO X-1) с потоком  $28 \pm 1,2$  отсчетов  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ , чуть ниже порога чувствительности предыдущих экспериментов (рис. 2). Никакого особо выдающегося яркого источника радио- или видимого излучения не было известно в этой области неба (впрочем, весьма плохо определяемой).

Скорое подтверждение нашего результата было получено в апреле 1963 г. в ракетном эксперименте, проведенном группой Фридмана из NRL, в котором также было зарегистрировано рентгеновское излучение от Крабовидной туманности [4].

Поистине необычным в этом открытии было не то, что какая-то звезда излучает в рентгеновском диапазоне, а то, как именно она излучает! Рентгеновское излучение Солнца составляет  $10^{-6}$  от потока в видимом свете. В SCO X-1 рентгеновская интенсивность в  $10^3$  раз превышала интенсивность оптического потока, и позже было установлено, что его собственная рентгеновская светимость составляет  $10^3$  светимостей Солнца! Это был поистине загадочный и новый тип небесных объектов. Более того, физические процессы, порождающие рентгеновское излучение в SCO X-1, должны были отличаться от всех известных лабораторных процессов генерации рентгеновских лучей, поскольку на Земле невозможно генерировать рентгеновские лучи с эффективностью 99,9 %.

Многие ракетные эксперименты, проведенные различными исследовательскими группами в 1960-х годах, обнаружили новые звездные и первые внегалактические рентгеновские источники. Группы из NRL и корпорации Lockheed (под руководством Фила Фишера) в основном проводили широкие обзоры неба в рентгеновских лучах; замечательным исключением было наблюдение покрытия Крабовидной туманности Луной в 1964 г. (группа NRL) [5].

Группа AS&E сосредоточилась на детальном изучении индивидуальных рентгеновских источников. Наиболее значительным экспериментом была серия ракетных полетов, кульминацией которого явилось оптическое отождествление SCO X-1. Сначала группа определила, что спектр SCO X-1 не мог быть тепловым, как ожидалось в случае нейтронных звезд [6], из чего следовало, что оптический компонент SCO X-1 должен иметь 13-ю звездную величину. В первом ракетном эксперименте по измерению углового размера источника он оказался менее 7 угловых секунд [7]. Таким образом, источник должен был быть виден как звезда, а не как диффузная туманность. Это позволило группе AS&E-MIT (Massachusetts Institute of Technology) под руководством Герберта Гурского [8] измерить положение SCO X-1 с точностью, достаточной для оптического отождествления со звездой 13-й звездной величины [9], которая имела спектральные характеристики новой звезды на поздней

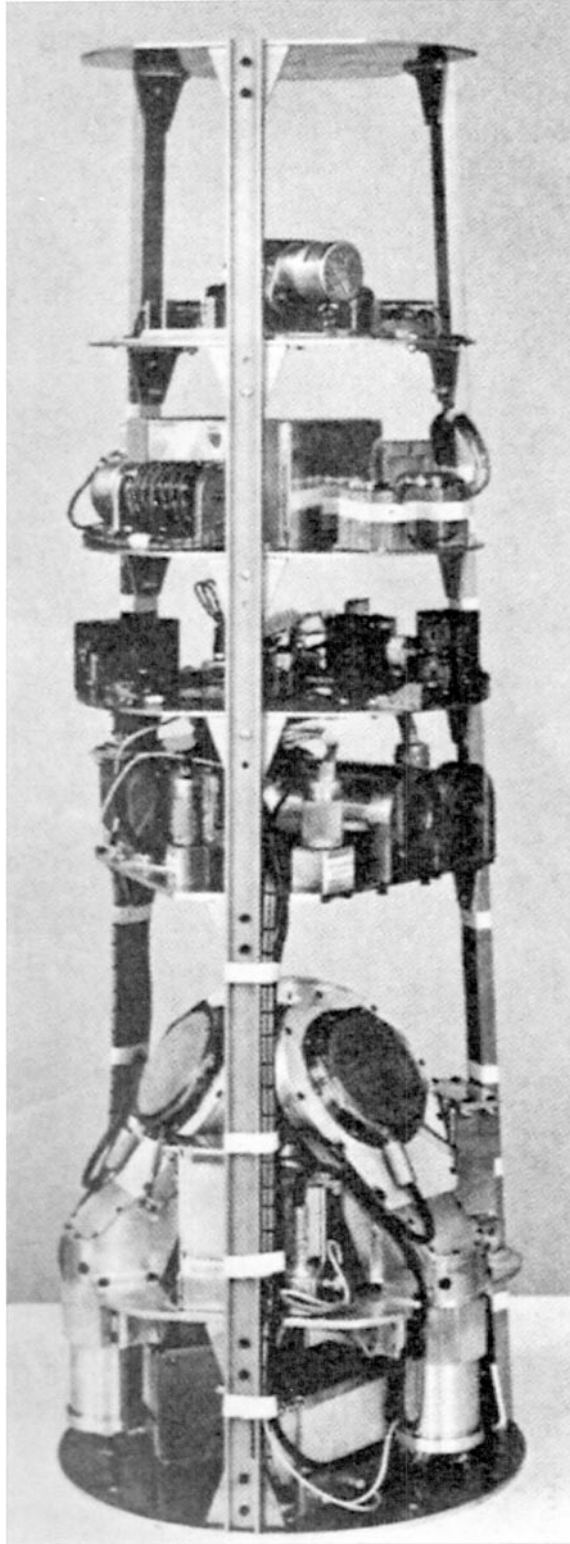


Рис. 1. Научное оборудование ракеты, запущенной корпорацией AS&E, 12 июня 1962 г. (Из книги [38], с. 9.)

стадии после вспышки. Это возобновило интерес к модели Sco X-1 как двойной системы [10], и Шкловский предложил модель двойной системы с нейтронной звездой [11]. Однако отсутствие рентгеновского излучения от других новых звезд, отсутствие явных указаний на двойственность системы из оптических спектров и рентгеновских данных, а также общее мнение, что вспышка

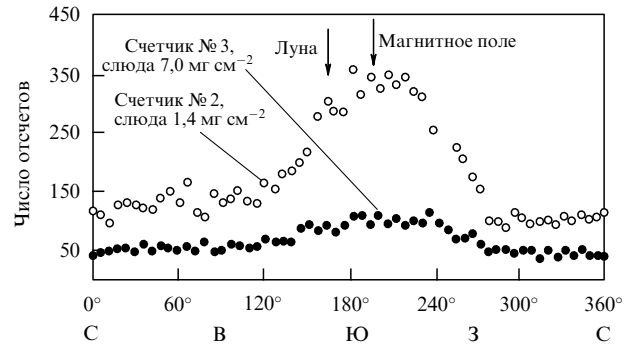


Рис. 2. Первое наблюдение Sco X-1 и рентгеновского фона в полете 12 июня 1962 г. Из работы [3].

сверхновой, которая требуется для образования нейтронной звезды, должна была разрушить двойную систему, не привело к признанию этой идеи. Открытием Хьюишем пульсаров в 1967 г. переключило внимание теоретиков на пульсарные модели рентгеновского излучения. Однако такие модели также были недостаточно убедительны из-за отсутствия наблюдений рентгеновских пульсаций. Проблема рентгеновского излучения от Sco X-1 и других источников была решена только после запуска спутника УХУРУ — первой специализированной космической рентгеновской обсерватории.

Предложение запустить "сканирующий спутник", впоследствии названный УХУРУ, содержалось в документе, составленном Гербом Гурским и мною и поданным в НАСА 25 сентября 1963 г. В этом документе мы предложили развернутую программу рентгеновских исследований, кульминацией которой являлся запуск на орбиту рентгеновского телескопа с диаметром зеркала 1,2 м. Эта юношеская мечта была реализована полностью только с запуском в 1999 г. рентгеновской орбитальной обсерватории "Чандра", которая не случайно имела зеркало диаметром 1,2 м. Но пока развивалась сложная технология изготовления рентгеновских телескопов, основополагающие успехи в рентгеновской астрономии были достигнуты с использованием относительно грубых детекторов, установленных на искусственных спутниках Земли.

### 3. Открытия обсерватории УХУРУ

Полная продолжительность наблюдений рентгеновского неба, доступная в 1960-х годах, составляла около одного часа: по пять минут на высотах свыше 100 км в каждом из приблизительно десяти запусков. Следующий шаг от первых феноменологических открытий к великим астрофизическим открытиям был сделан 12 декабря 1970 г., когда УХУРУ, первый из серии Малых астрономических спутников (Small Astronomy Satellites), был запущен с итальянской платформы Сан-Марко в Кении. УХУРУ (UHURU — свобода (*суахили*)) был небольшим спутником (рис. 3). Его производство в AS&E от появления концепции до изготовления отдельных деталей, тестирования и общей сборки, заняло семь лет.

Это была первая обсерватория, целиком посвященная рентгеновской астрономии. С ее помощью время наблюдений возросло от нескольких минут до нескольких лет, т.е. на пять порядков величины [12]. Поле зрения детектора на борту спутника медленно вращалось, охва-

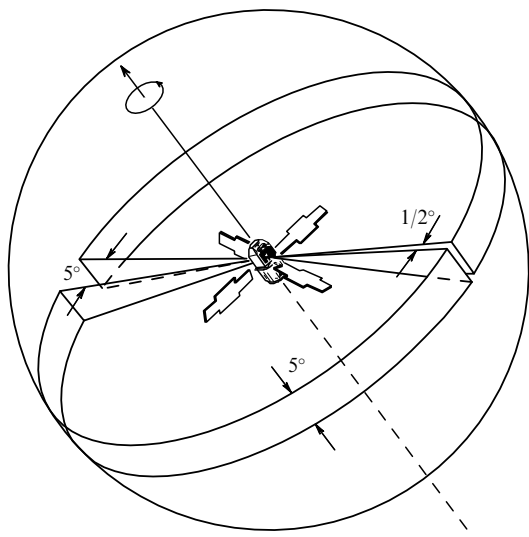


Рис. 3. Поле зрения детекторов на спутнике УХУРУ. (Из работы [39]; см. также [38, с. 95].)

тывая полосу неба шириной  $5^\circ$ , которая смещалась каждый день на  $1^\circ$ . В течение трех месяцев можно было систематически изучить все небо и локализовать с точностью до  $1'$  множество новых источников, что часто позволяло проводить их идентификацию в оптическом и радиодиапазоне. Это в свою очередь дало возможность определить расстояние, светимость и другие физические характеристики небесных объектов, излучающих в рентгене. Из 300 вновь открытых нами источников мы смогли отождествить двойные рентгеновские источники, сверхновые, галактики, активные галактики, квазары и скопления галактик (рис. 4). Но даже более важным с определенной точки зрения оказалось то, что с помощью системы контроля мы могли замедлять скорость вращения спутника вокруг оси и длительное время наблюдать за индивидуальными источниками с целью изучения их

временной переменности. Именно эта особенность спутника позволила решить фундаментальные нерешенные в то время проблемы рентгеновской астрономии, в частности, определить природу источника энергии, обеспечивающего большую собственную светимость звездных рентгеновских источников.

### 3.1. Двойные рентгеновские источники

Говоря кратко, анализ данных показал, что некоторые рентгеновские источники (Her X-1 и Cen X-3) (рис. 5) периодически пульсировали с периодами порядка нескольких секунд [13], тогда как другие (Cyg X-1) демонстрировали случайные пульсации с характерным временем менее десятой доли секунды. Это было впервые отмечено Минору Ода, который в то время был гостем AS&E. Этан Шрайер и я заметили, что средняя интенсивность потока от Cen X-3 была промодулирована на временах порядка нескольких суток, а сам период пульсаций изменялся в зависимости от фазы средней интенсивности, в которой также видны были затменные эффекты (рис. 6). Вскоре было найдено объяснение такого поведения: мы наблюдали звездный рентгеновский источник, обращающийся по орбите вокруг нормальной звезды (рис. 7). Значит, вариация периода пульсаций была обусловлена эффектом Доплера. В 1967 г. Хьюиш открыл радиопульсары. Был ли этот рентгеновский источник пульсаром, вращающимся вокруг нормальной звезды? В то время такую идею было трудно принять. Пульсар представляет собой нейтронную звезду, которая, как полагают, появляется в результате коллапса звезды в конце ее эволюции. Считалось, что сопутствующий коллапсу взрыв должен разрушить двойную систему, в которой он происходит. Напомню, что в то время Джозеф Тейлор еще не обнаружил двойной пульсар.

Однако неожиданно открылось нечто новое: наблюдаемый период пульсаций уменьшался, а не возрастал со временем (рис. 8). Так было не только в Cen X-3, но и, как

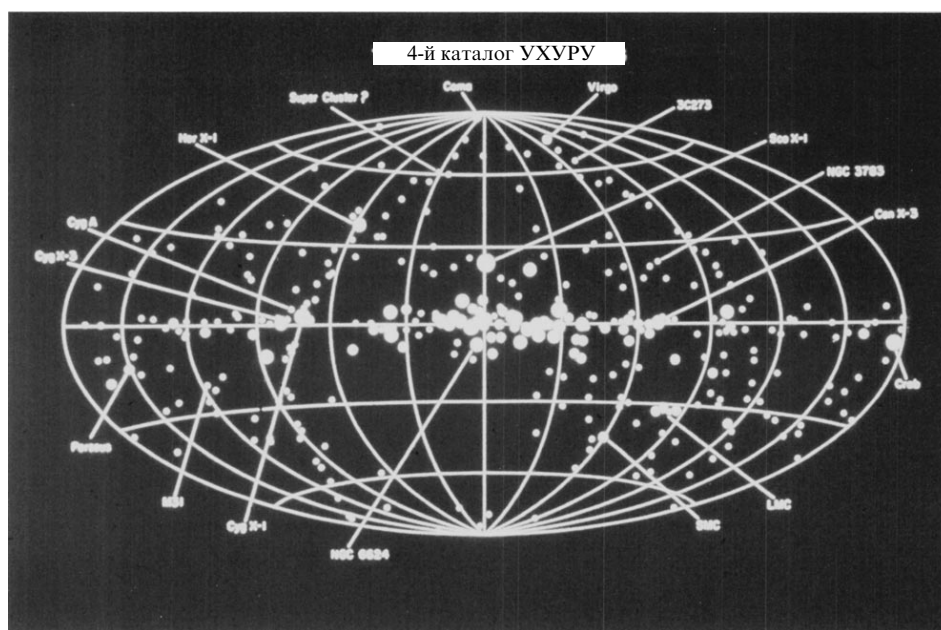


Рис. 4. Источники УХУРУ в галактических координатах. Размер кружка пропорционален интенсивности в логарифмическом масштабе. (Из книги [38], с. 156.)

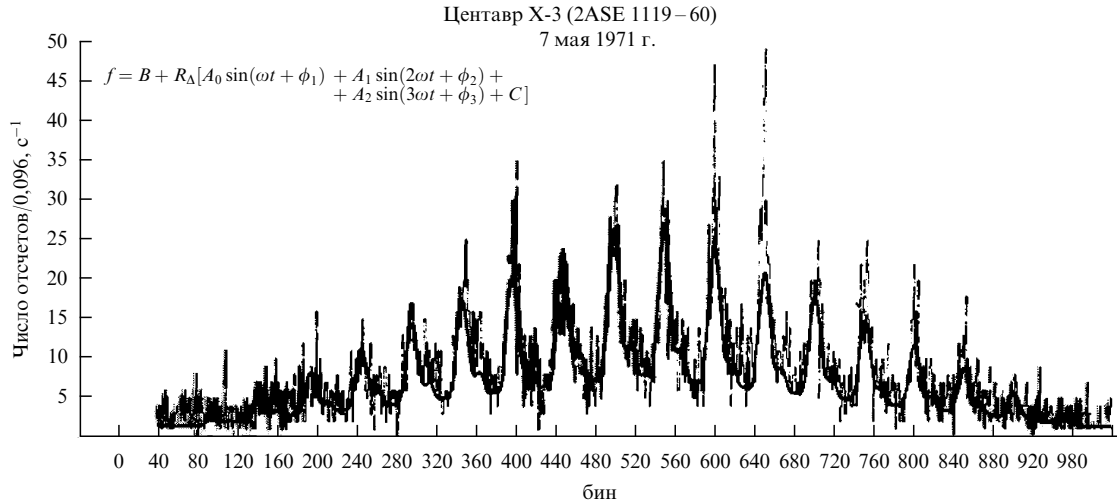


Рис. 5. Рентгеновские пульсации от Cen X-3. Из работы [28].

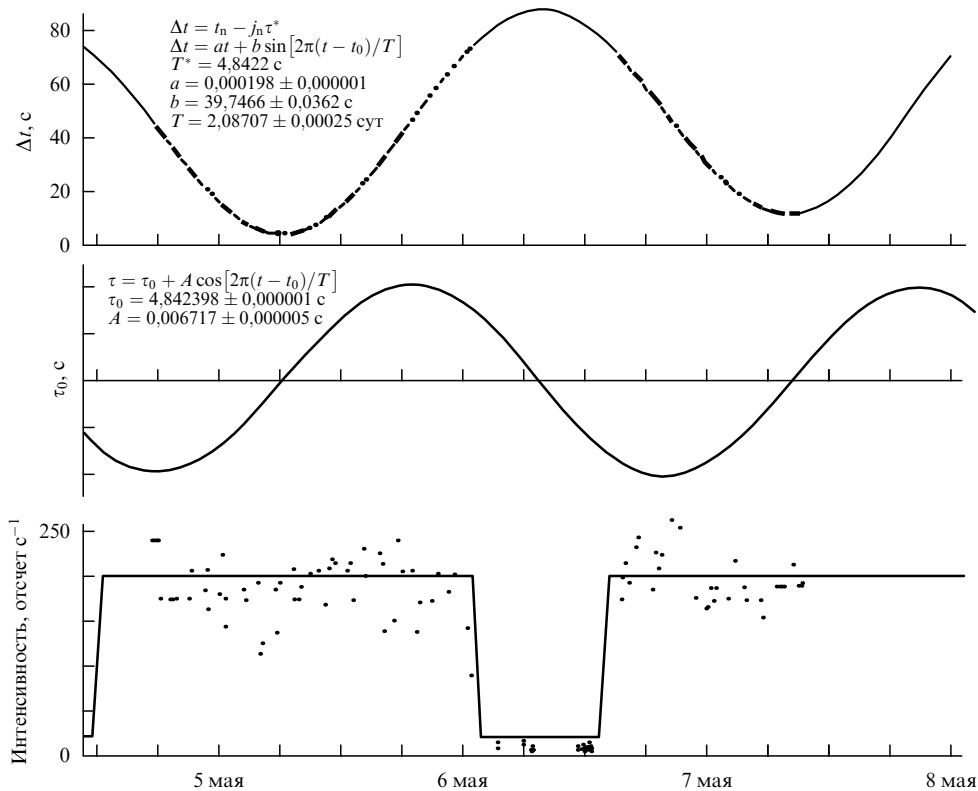


Рис. 6. Вариации периода и затмения в Cen X-3. Из работы [28].

обнаружил Харви Тананбаум, в Cen X-1 [14]. Это уже поистине было загадкой! У радиопульсаров излучение электромагнитной энергии происходит за счет уменьшения кинетической энергии вращения нейтронной звезды, а в рентгеновских источниках нейтронные звезды приобретали, а не теряли энергию вращения! Этот факт объясняется взаимодействием газа нормальной звезды с компактной сколлапсировавшей звездой. Газ из внешних слоев атмосферы нормальной звезды может падать в область сильного гравитационного поля сколлапсировавшей звезды и при этом приобретает энергию  $0,1mc^2$  на нуклон. В свою очередь, ускоренные нуклоны нагреваются в ударной волне над поверхностью нейтронной звезды, которая и излучает наблюдаемые рентгеновские лучи (рис. 9). Именно это падающее вещество увеличи-

вает энергию вращения сколлапсировавшего объекта. Такова модель Sco X-1 и большинства галактических рентгеновских источников. В случае нейтронной звезды с сильным магнитным полем ( $10^{12}$  Гс), ионизованная плазма направляется на магнитные полюсы вращающейся нейтронной звезды и генерирует наблюдаемые периодические пульсации (рис. 10). У черных дыр нет твердой поверхности с какими бы то ни было структурами, поэтому переменность излучения хаотическая (рис. 11).

Вскоре за сообщением о быстрой переменности Cyg X-1, найденной Одой [15] по наблюдениям со спутника УХУРУ, последовали запуски детекторов на ракетах группами из Goddard Space Flight Center (GSFC) и MIT. Эти наблюдения показали, что видимые pulsa-

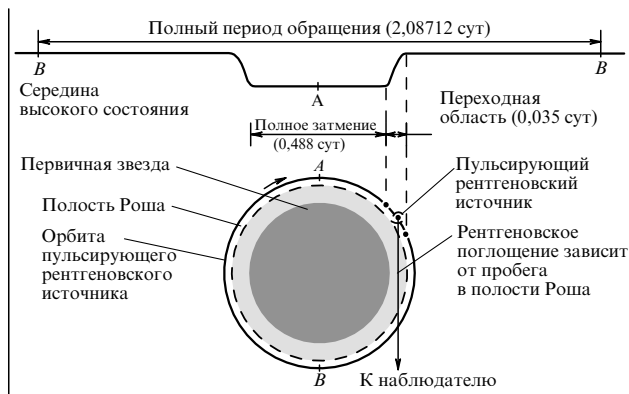


Рис. 7. Модель двойной системы Cen X-3. Иллюстрация Р. Джаиккони.

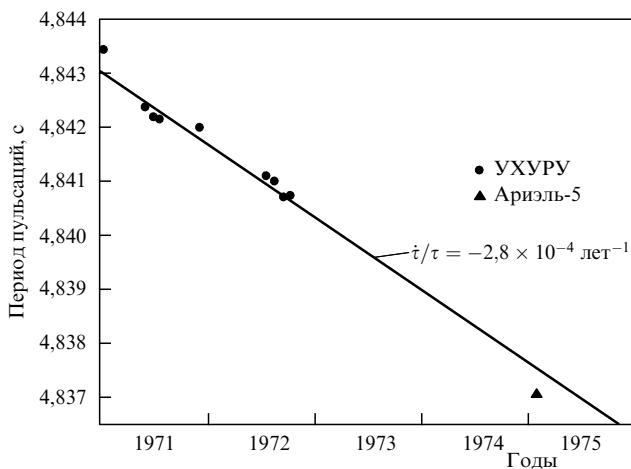


Рис. 8. Годичное изменение периода пульсаций Cen X-3. Иллюстрация Р. Джаиккони.

ции носили не периодический, а хаотический характер [16, 17]. К 1974 г. наблюдения группы GSFC достигли временного разрешения порядка 1 мс и доказали наличие сильных хаотических флуктуаций в рентгеновском потоке Суг X-1 даже на такой короткой временной шкале [18]. Такое поведение могло ожидаться только в случае, если компактный объект в двойной системе (рентгеновский источник) был не нейтронной звездой, а черной дырой. Эти открытия стимулировали в 1971–1972 гг. интенсивные исследования по идентификации Суг X-1 в оптическом и радиодиапазонах. УХУРУ получил значительно более точное положение Суг X-1, которое было предоставлено Хельмингу и Уэйду для помощи в поисках радиоисточника [19]. Уточненное положение источника было определено японской группой, возглавляемой Одой [20], и группой MIT [21] с помощью модуляционных коллиматоров. Хельминг и Уэйд [22] и Брэйс и Майли [23] сообщили о радиоотождествлении Суг X-1. Точное радиоположение позволило Уэбстеру и Мардину [24] и Болту [25] провести оптическое отождествление Суг X-1 с двойной системой HDE 226862, имеющей орбитальный период 5,6 сут. Правильность идентификации радиоисточника с Суг X-1 была подтверждена корреляцией временных вариаций в рентгеновском и радиодиапазонах [26]. Спектроскопические измерения скорости HDE 226862 также позволили Уэбстеру и Мардину установить, что Суг X-1 действительно входит в состав двойной системы. Масса невиди-

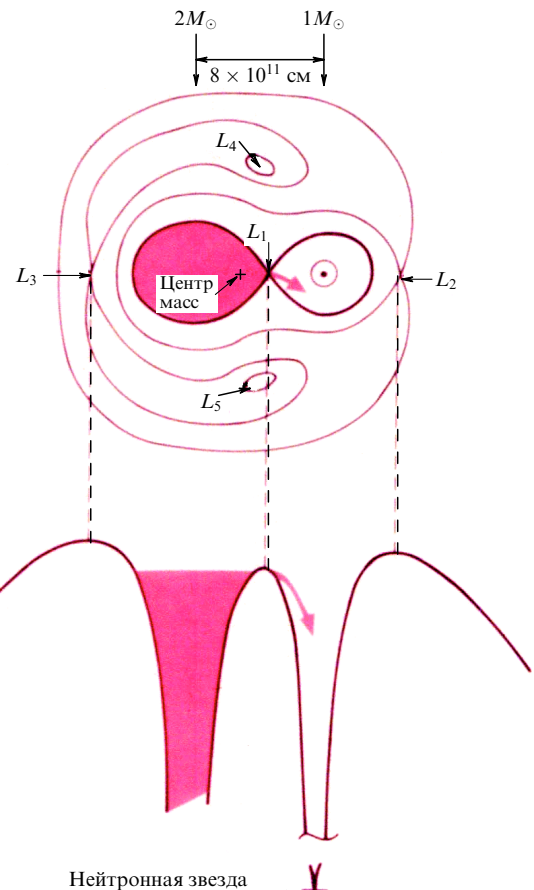


Рис. 9. Представление эквипотенциалей гравитационного поля в типичном двойном рентгеновском источнике. Вид сверху и сечение. Иллюстрация Р. Джаиккони.

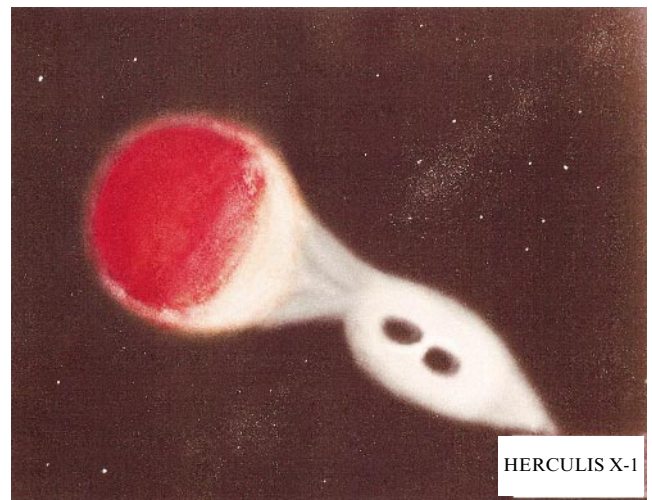


Рис. 10. Художественное представление системы Her X-1 с аккрецией на магнитные полюса нейтронной звезды. Иллюстрация — R. Plourde.

мого компонента оказалась выше  $6M_{\odot}$ . В 1972 г. Роудс и Руффини показали, что черные дыры должны иметь массу более  $3,4M_{\odot}$  [27].

Таким образом, относительно Суг X-1 мы смогли сделать следующие выводы: рентгеновский источник Суг X-1 представляет собой компактный объект с размерами менее 30 км, что следует из времени переменности

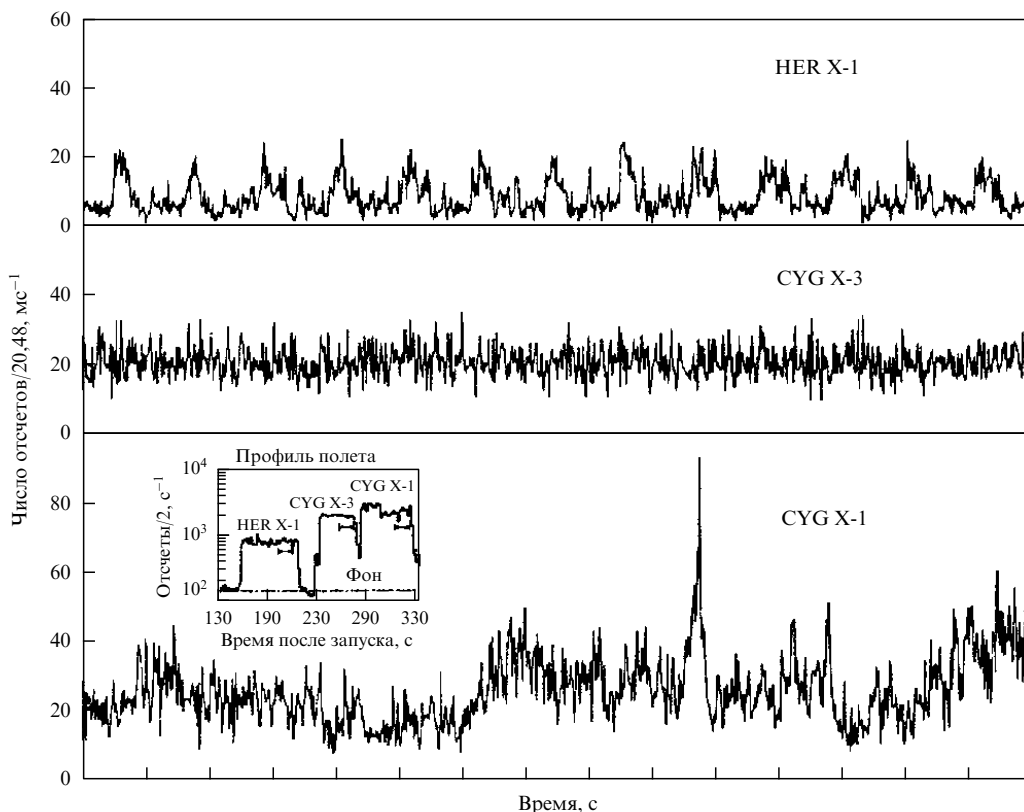


Рис. 11. Сравнение временной переменности Her X-1, Cyg X-3 и Cyg X-1. Любезно предоставлено R. Rothschild.



Рис. 12. Художественное представление системы Cyg X-1. Иллюстрация — L. Cohen.

излучения и предположения, что переменность создается всем объектом [28]. Масса этого объекта превышала теоретический верхний предел масс нейтронных звезд. Поэтому данный объект стал первым кандидатом в черные дыры (рис. 12). В настоящее время известно не менее 6 кандидатов в черные дыры среди галактических рентгеновских источников [29]<sup>1</sup>.

Открытие двойных рентгеновских источников имело далеко идущие последствия (табл. 2). Мы доказали, что существуют двойные системы с нейтронными звездами и с черными дырами. Существуют черные дыры с массами порядка нескольких масс Солнца. Двойные

рентгеновские источники стали своего рода физической лабораторией для изучения масс, моментов инерции и уравнения состояния нейтронных звезд (их плотность  $\sim 10^{15}$  г см<sup>-3</sup>). Мы открыли новый источник энергии в небесных объектах — падение аккрецирующего вещества в сильном гравитационном поле. В случае нейтронной звезды выделяемая энергия на один нуклон в 50 раз превышает энерговыделение в термоядерных реакциях. Описанная выше модель (аккреция газа на сколлапсировавший объект) стала общепринятым объяснением центрального источника энергии в квазарах и в ядрах всех активных галактик. Последние данные наблюдений с большой вероятностью подтверждают общность модели аккреции на центральную черную дыру с массой более  $10^7 M_{\odot}$  для всех ядер активных галактик.

### 3.2. Открытие горячего межгалактического газа

Открытие переменности рентгеновского излучения от космических объектов, обнаружение нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах и открытие процесса аккреции в качестве главного источника выделения рентгеновской энергии были только первыми большими

Таблица 2. Последствия открытия двойных рентгеновских систем

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Существование двойных звездных систем, содержащих нейтронную звезду или черную дыру</li> <li>• Существование черных дыр звездной массы</li> <li>• Измерение масс, радиусов, моментов инерции и уравнения состояния нейтронных звезд (плотность <math>10^{15}</math> г см<sup>-3</sup>)</li> <li>• Новый источник энергии при падении вещества в глубокие потенциальные ямы, созданные гравитацией (в 100 раз более эффективный, чем энерговыделение на один нуклон в термоядерных реакциях)</li> <li>• Модель (общепринятая) для ядер активных галактик и квазаров</li> </ul>
--

<sup>1</sup> Более полную информацию см. в недавнем обзоре: Черепашук А М УФН 173 345 (2003). (Примеч. переводчика.)

достижениями УХУРУ. Среди других открытий второе по значимости (интересное само по себе и с точки зрения последствий для космологии) — это обнаружение рентгеновского излучения от скоплений галактик. Это излучение представляло собой не просто сумму вкладов отдельных галактик, а генерировалось разреженным межгалактическим газом. Этот газ был нагрет в ходе гравитационного сжатия скопления до температур в миллионы градусов, а его масса оказалась сопоставимой с массами всех галактик скопления [30]. Это открытие сразу же более чем удвоило массу барионов в скоплении. В результате первых наблюдений УХУРУ с низким угловым разрешением порядка  $1/2^\circ$  были обнаружены только три самых богатых ближайших скопления галактик. Впоследствии рентгеновское излучение от многих скоплений галактик было открыто новой и гораздо более мощной рентгеновской обсерваторией "Эйнштейн", в которой впервые использовалась совершенно новая технология во внесолнечной рентгеновской астрономии — телескопы косоугольного падения.

#### 4. Рентгеновские телескопы

Здесь я должен сделать небольшое техническое отступление, чтобы объяснить, какую революцию в рентгеновской астрономии совершила технология изготовления телескопов. Размышляя над оценками, сделанными в 1959 г., я был убежден, что для достижения успеха в рентгеновской астрономии мы должны были создать совершенно новые приемники, отличные от использовавшихся ранее. Для солнечных исследований Фридман разработал специальный счетчик Гейгера с тонким окном, пропускающим рентгеновское излучение внутрь счетчика, заполненного газом. Такой счетчик не мог определить ни направление прихода рентгеновского кванта, ни его энергию. Для улучшения чувствительности по направлению в рентгеновской астрономии использовались коллиматоры, т.е. механические заслонки, которые определяли поле зрения с характерной точностью около  $1^\circ$ . Для улучшения чувствительности по потоку нами была разработана защита по схеме антисовпадений от случайных частиц и увеличена площадь детектора. Именно это и было сделано на первой ракете 1962 г. В 1970 г. на УХУРУ была очень похожая система регистрации. Увеличение чувствительности на УХУРУ было достигнуто благодаря гораздо большей площади ( $800 \text{ см}^2$  вместо 10) и длительности наблюдений. В результате это привело к увеличению чувствительности примерно в  $10^4$  раз. Следует отметить, однако, что при наличии фона чувствительность возрастает пропорционально квадратному корню из площади. Таким образом, дальнейшее увеличение чувствительности потребовало бы спутников с площадью детекторов размером с футбольное поле. Более того, все попытки увеличить угловое разрешение с помощью изошренной системы заслонок (как в модуляционных коллиматорах) окончились практически безрезультатно.

Решение, которое мне пришло на ум еще в 1959 г., состояло в использовании телескопа, подобно тому, как это делается в оптической астрономии [31]. Преимущество телескопов состоит в том, что свет с большой площади фокусируется на детекторе меньшей площади, при этом увеличивается отношение сигнал/шум. Кроме того, высокое угловое разрешение можно получить во всем поле зрения одновременно, без сканирования или использования растрового наведения (dithering motions) внутри поля зрения, что во много раз увеличивает время

экспозиции для каждого источника, попадающего в поле зрения.

Единственная проблема состоит в разработке такого рентгеновского телескопа и создания соответствующей технологии для его изготовления. В конечном счете, между созданием концепции рентгеновского телескопа в 1959 г. и его первым практическим применением в рентгеновской астрономии в 1979 г. прошло двадцать лет. Рентгеновский телескоп совершенно отличается от телескопа для приема видимого излучения, так как длина волны рентгеновских фотонов сравнима с атомными размерами. Из теории дисперсии Лоренца следует, что коэффициент преломления для рентгеновских лучей меньше единицы, из-за чего оптические системы, основанные на принципе преломления лучей, оказываются практически бесполезными. Это обстоятельство было понято еще самому Рентгену в его классическом эксперименте 1895 г. Однако рентгеновские лучи могут эффективно отражаться зеркалами при условии, что лучи падают на зеркало почти параллельно его поверхности. В 1940-е и 1950-е годы Ганс Уолтер уже обсуждал возможность использования рентгеновских изображений для нужд микроскопии. Он показал, что системы коаксиальных зеркал параболической и гиперболической формы имеет достаточно широкое поле зрения ( $1^\circ$ ), свободное от сферической аберрации и комы. Теоретически такую систему можно было создать, хотя трудности, возникающие при ее реализации в системе очень малого размера для использования в микроскопии, было невозможно преодолеть (рис. 13). Однако я пришел к выводу, что при использовании соответствующей оптической системы в телескопах гораздо больших размеров (метры вместо микронов) эти трудности будут не столь серьезны.

В нашей статье 1960 г. мы описали систему, обладающую чувствительностью порядка  $5 \times 10^{-14} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и угловым разрешением  $2'$ . Такая чувствительность в  $10^6$ – $10^7$  раз, а угловое разрешение в  $10^3$  раз превосходили соответствующие характеристики существовавших тогда детекторов. К сожалению, технология, требуемая для изготовления таких телескопов, появилась лишь много лет спустя (рис. 14) [32]. Первое примитивное изображение Солнца в рентгеновских лучах было получено с помощью рентгеновского телескопа в 1965 г. Джузеппе Вайана возглавил нашу солнечную программу в 1967 г. А в 1973 г. Солнце в течение многих месяцев изучалось рентгеновским телескопом высокого разрешения с достаточно большим полем зрения, так что диск Солнца и

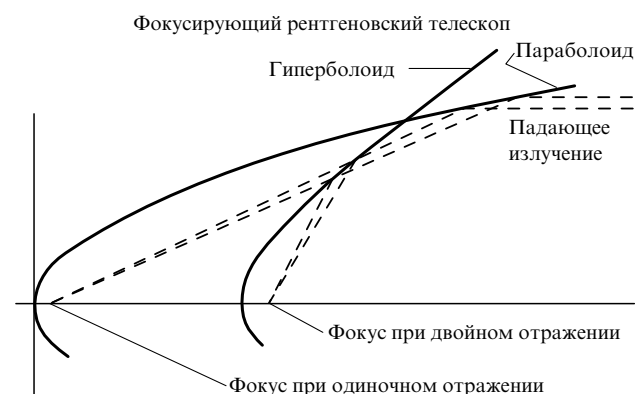


Рис. 13. Принципиальная схема рентгеновского телескопа косоугольного падения. Иллюстрация Р. Джиаккони.



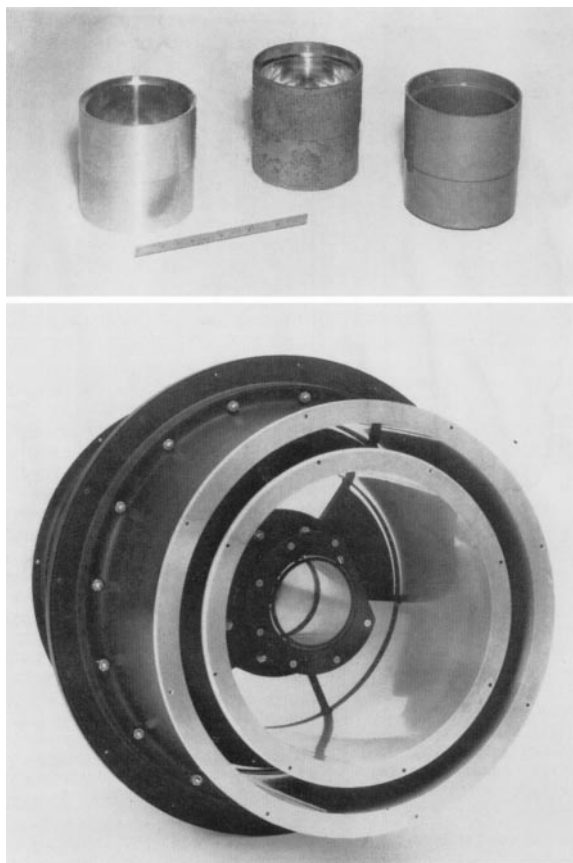


Рис. 14. Несколько первых реализаций рентгеновских телескопов. Из работы [32].

ближняя корона были видны с угловым разрешением луче 5" (рис. 15) [33].

Лишь в 1979 г. удалось запустить на орбиту хорошо оснащенный рентгеновский телескоп, с помощью которого можно было изучать гораздо более слабые звездные источники. Новый спутник, получивший название "Эйнштейн", был настоящей рентгеновской обсерваторией (рис. 16) [34]. В фокальной плоскости этого телескопа можно было помещать панорамные приемники с угловым разрешением несколько секунд, сравнимым с угловым разрешением оптических телескопов. Чувствительность для точечных источников возросла в  $10^3$  раз по сравнению с УХУРУ и была в  $10^6$  раз меньше потока от Sco X-1. Можно было проводить спектральные наблюдения с разрешением порядка 500.

Благодаря столь значительному техническому прогрессу появилась возможность исследовать все типы астрофизических источников (табл. 3). Рентгеновское излучение было обнаружено от полярных сияний в области магнитных полюсов на Юпитере, от звезд главной последовательности всех спектральных классов, от новых и сверхновых (СН) звезд. Двойные рентгеновские системы можно было изучать повсюду в нашей Галактике и за ее пределами (рис. 17). Излучение от нормальных галактик и галактик с активными ядрами, такими, как сейфертовские галактики и объекты типа BL Lac, можно было регистрировать с очень больших расстояний. В рентгеновском диапазоне также наблюдались и самые далекие квазары, обнаруженные в оптическом и радиодиапазонах. Началось разрешение на отдельные источники загадочного изотропного внегалактического рентгеновского фона.

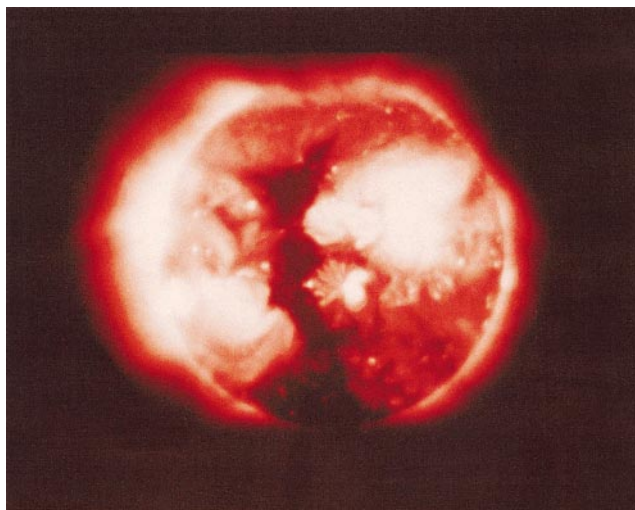


Рис. 15. Изображение Солнца в рентгеновских лучах, полученное с обсерватории Скайлэб. Любезно предоставлено L. Golub (Гарвард-Смитсоновский астрофизический центр).

Однако вернемся к исследованиям рентгеновского излучения от межгалактической плазмы. Часть наиболее фундаментальных открытий обсерватории "Эйнштейн" была сделана именно при изучении скоплений галактик. Способность строить карты изображений горячей плазмы дала нам возможность изучать детальное распределение гравитационного потенциала, в котором находились галактики и газ. По наблюдениям только индивидуальных галактик эту задачу можно решать весьма ограниченно, так как статистическая точность оказывается недостаточной даже для плотных скоплений галактик. Наблюдения показали сложную морфологию распределения яркости рентгеновского излучения в скоплениях, причем в одних скоплениях форма распределения была симметричной с центральным максимумом плотности, что указывало на поздние стадии динамической эволюции скопления. У многих других скоплений форма была неправильной с двумя или более максимумами яркости. Такая морфология показывает, что слияние подструктур скопления еще не завершилась. Относительная молодость многих таких скоплений была до этого явно недооценена. Таким образом, открытие рентгеновского излучения от скоплений галактик используется для изучения одного из самых интересных открытых вопросов современной космологии, а именно, образования и эволюции структур на ранних стадиях развития Вселенной. Используя данные наблюдений со спутника РОСАТ, который был блестящим последователем обсерватории "Эйнштейн",

Таблица 3. Классы небесных объектов, наблюдавшихся обсерваторией "Эйнштейн"

- Полярные сияния на Юпитере
- Рентгеновское излучение от звезд главной последовательности всех спектральных классов
- Новые и сверхновые
- Пульсары
- Внегалактические двойные рентгеновские источники и сверхновые
- Нормальные галактики
- Ядра активных галактик
- Квазары
- Группы и скопления галактик
- Источники внегалактического рентгеновского фона

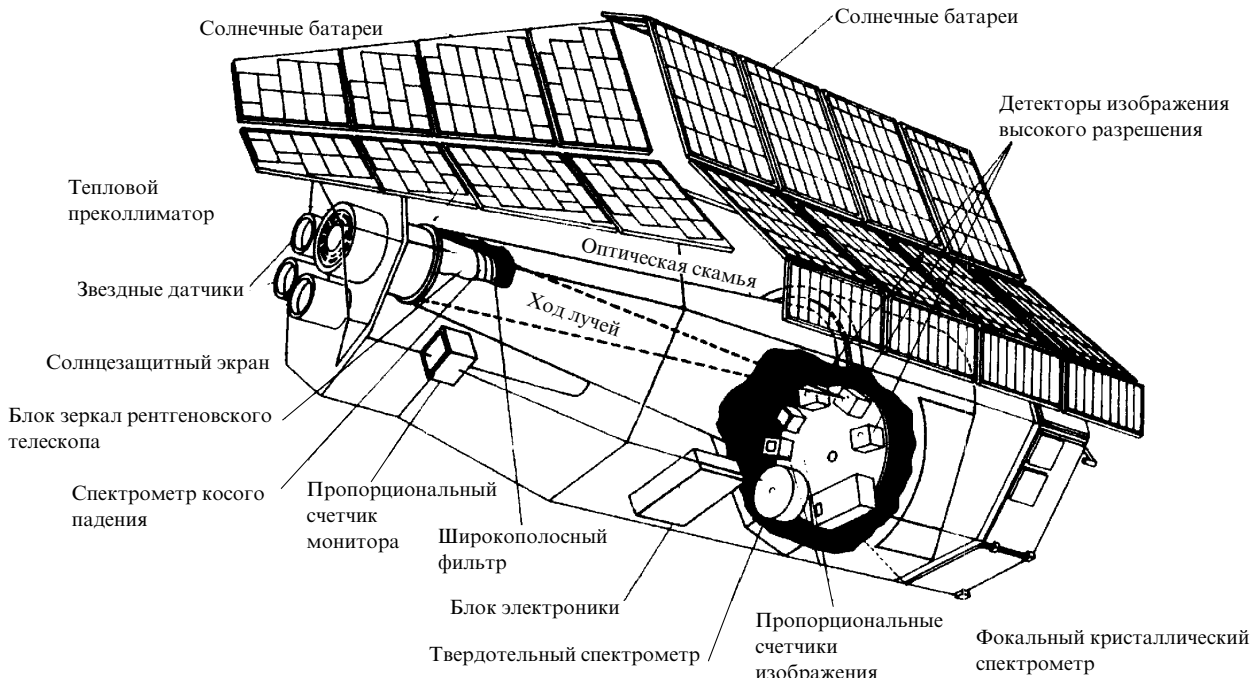


Рис. 16. Схема рентгеновской обсерватории "Эйнштейн". Из работы [34].

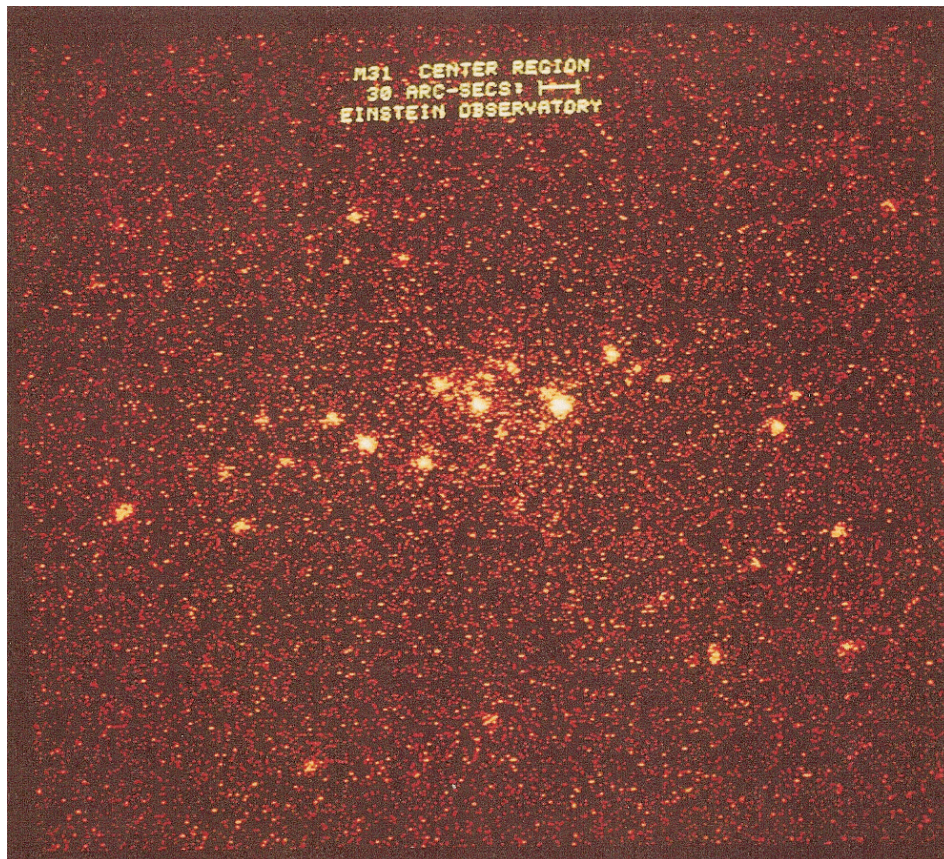
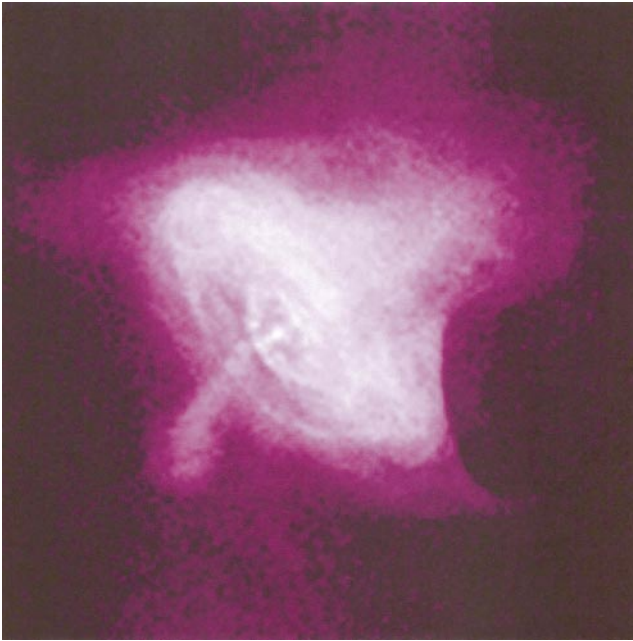


Рис. 17. Рентгеновские двойные в галактике М31. Снимок сделан рентгеновской обсерваторией "Эйнштейн".

Пьеро Росати [35] изучил очень далекие скопления галактик ( $z \sim 1,2$ ). Этот спутник был сконструирован в Институте внеземных исследований общества Макса Планка (Max Planck Institute for Extraterrestrial Research) группой Иоахима Трюмпера и Гюнтера Хазингера.

## 5. Современные наблюдения со спутника "Чандра"

В 1976 г. Харви Тананбаум и я вновь подали в НАСА проект рентгеновского телескопа с диаметром 1,2 метра. Тананбаум, который был главным исследователем в



**Рис. 18.** Рентгеновский снимок Крабовидной туманности, полученный телескопом "Чандра". Любезно предоставлено НАСА.

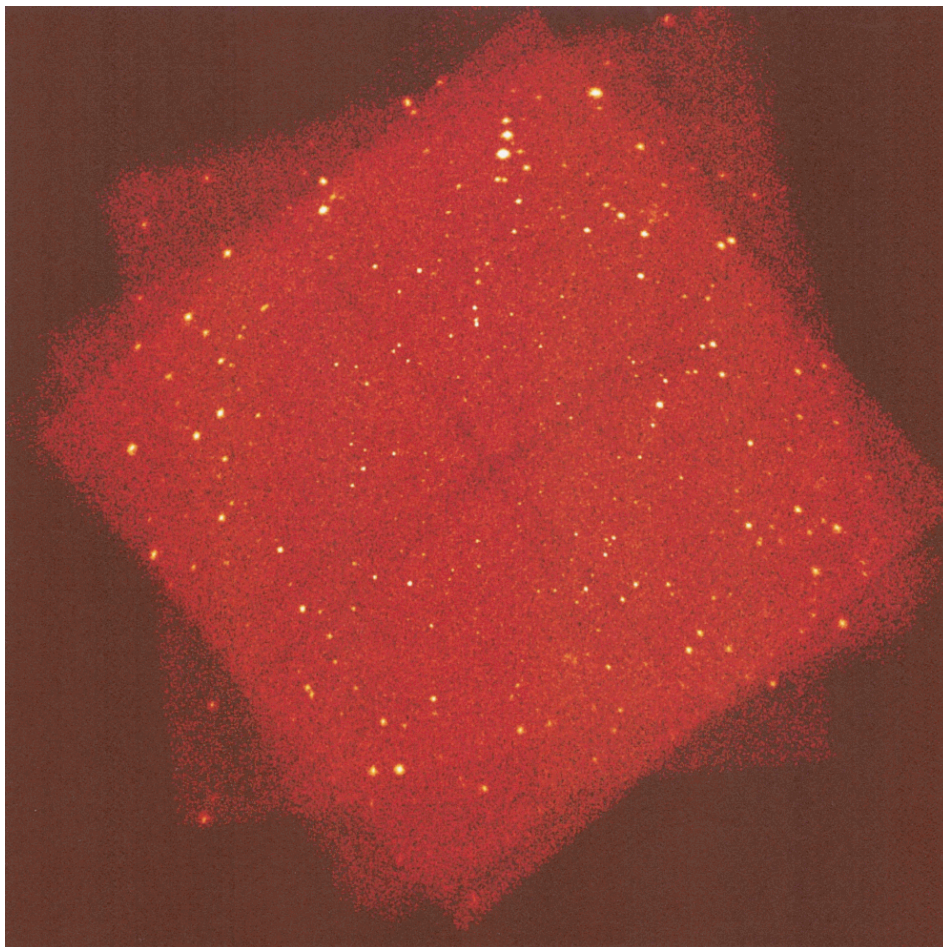
проекте УХУРУ и научным руководителем программы "Эйнштейн", отдал предпочтение программе обсервато-

рии "Чандра" и довел ее до успешного завершения уже после того, как я покинул Гарвард в 1981 г. "Чандра" оправдала и даже превзошла все наши ожидания. Сравнение фотографий Крабовидной туманности, полученных телескопами "Эйнштейн" и "Чандра" (рис. 18), демонстрирует достигнутый прогресс в чувствительности и угловом разрешении [36].

Я воспользовался одним миллионом секунд наблюдений на телескопе "Чандра" для решения проблемы источников космического рентгеновского фона — проблемы, которая оставалась нерешенной с момента открытия фона в 1962 г. (рис. 19) [37]. Благодаря высокой чувствительности и угловому разрешению этого телескопа, нам удалось разрешить кажущееся диффузным излучение на миллионы индивидуальных источников. Они представляют собой ядра активных галактик (ЯАГ), квазары и нормальные галактики. Достигнутое при этом увеличение чувствительности проиллюстрировано на рис. 20. Рисунок 21 напоминает о многих различных проектах, которые внесли замечательный и существенный вклад в область рентгеновской астрономии.

## 6. Будущее рентгеновской астрономии

Мне хотелось бы завершить свой рассказ попыткой ответить на следующий простой вопрос: в чем важность рентгеновской астрономии? Ответ состоит в том, что рентгеновское излучение позволяет изучать астрофизиче-



**Рис. 19.** Экспозиция в один миллион секунд глубокого рентгеновского снимка телескопом "Чандра".

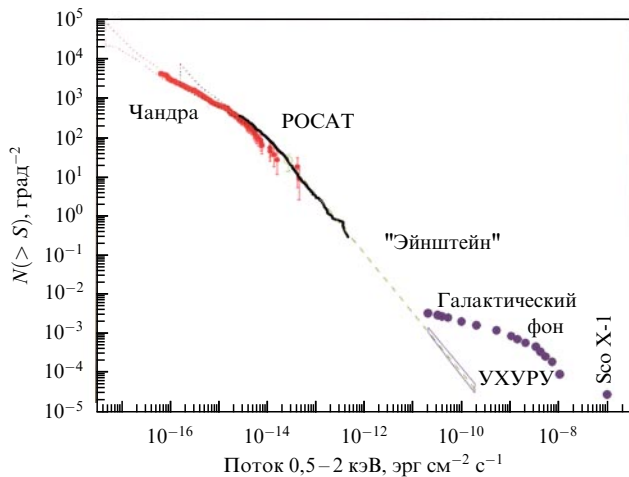


Рис. 20. Изменение чувствительности с 1962 по 2000 гг. (от Sco X-1 до "Чандры"). Любезно предоставлено G. Hasinger.

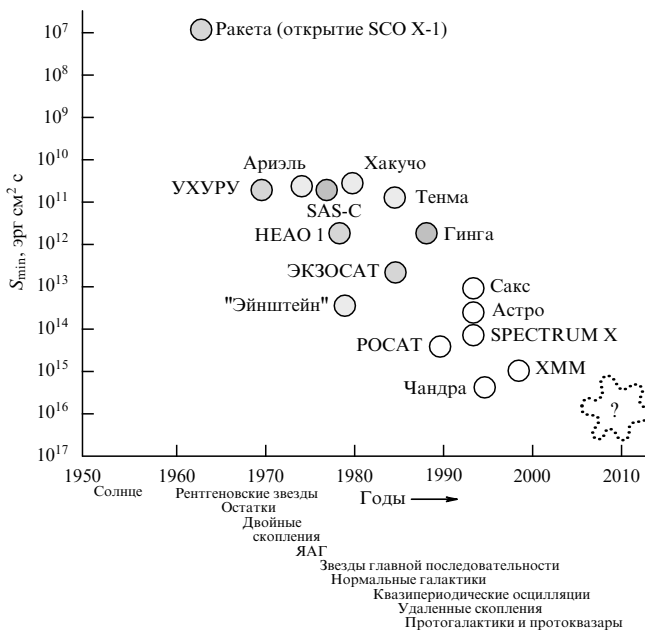


Рис. 21. Чувствительность, достигнутая различными рентгеновскими телескопами (с 1970 по 2000 гг.). Иллюстрация Р. Джаиккони.

ские процессы, в которых вещество разогрето до температур в миллионы градусов или в которых частицы были ускорены до релятивистских энергий. Рентгеновские фотоны особенно подходят для изучения таких процессов, потому что они многочисленны, свободно приходят с космологических расстояний и могут быть сфокусированы специальными телескопами. Последнее свойство существенно отличает рентгеновскую астрономию от гамма-астрономии. Однако с более фундаментальной точки зрения астрономия высоких энергий важна для изучения Вселенной потому, что высокоэнергетические явления играют решающую роль в динамике Вселенной.

Классическая концепция Вселенной как спокойной и величавой системы, медленная эволюция которой регулируется потреблением ядерной энергии, ушла в прошлое. Вселенная, которую мы знаем сегодня, пронизана отзвуками грандиозных взрывов и резкими изменениями светимости на больших энергетических масштабах. От начального взрыва и до образования галактик и скоплений галактик, от рождения и до смерти звезд высоко-

энергетические процессы являются нормой, а не исключением в ходе эволюции Вселенной.

Перевел с английского К.А. Постнов

## Список литературы

- Hirsh R F "Science, technology and public policy: the case of X-ray astronomy, 1959–1972", PhD Thesis (Madison, WI: Univ. of Wisconsin, 1979)
- Giacconi R, Clark G W, Rossi B B "A brief review of experimental and theoretical progress in x-ray astronomy", Technical Note of American Science and Engineering, ASE-TN-49, Jan. 15 (1960)
- Giacconi R, Gursky H, Paolini F R, Rossi B B *Phys. Rev. Lett.* **9** 439 (1962)
- Bowyer S, Byram E T, Chubb T A, Friedman H *Astron. J.* **69** 135 (1964)
- Bowyer S, Byram E T, Chubb T A, Friedman H *Science* **146** 912 (1964)
- Giacconi R, Gursky H, Waters J *Nature* **207** 572 (1965)
- Oda M, Clark G, Garmire G, Wada M, Giacconi R, Gursky H, Waters J *Nature* **205** 554 (1965)
- Gursky H, Giacconi R, Gorenstein P, Waters J R, Oda M, Bradt H, Garmire G, Sreekantan B V *Astrophys. J.* **146** 310 (1966)
- Sandage A et al. *Astrophys. J.* **146** 316 (1966)
- Burbidge G R "Theoretical ideas concerning x-ray sources", in *Radio Astronomy and the Galactic System* (Proc. IAU Symp., No. 31, Ed. H van Woerden) (London: Academic Press, 1967) p. 463
- Shklovsky I S *Astrophys. J. Lett.* **148** L1 (1967)
- Giacconi R, Kellogg E, Gorenstein P, Gursky H, Tananbaum H *Astrophys. J. Lett.* **165** L27 (1971)
- Schreier E, Levinson R, Gursky H, Kellogg E, Tananbaum H, Giacconi R *Astrophys. J. Lett.* **172** L79 (1972)
- Tananbaum H, Gursky H, Kellogg E, Levinson R, Schreier E, Giacconi R *Astrophys. J. Lett.* **174** L143 (1972)
- Oda M, Gorenstein P, Gursky H, Kellogg E, Schreier E, Tananbaum H, Giacconi R *Astrophys. J. Lett.* **166** L1 (1971)
- Holt S S, Boldt E A, Schwartz D A, Serlemitsos P J, Bleach R D *Astrophys. J. Lett.* **166** L65 (1971)
- Rappaport S, Doxsey R, Zaumen W *Astrophys. J. Lett.* **168** L43 (1971)
- Rothschild R E, Boldt E A, Holt S S, Serlemitsos P J *Astrophys. J. Lett.* **189** L13 (1974)
- Tananbaum H, Kellogg E, Gursky H, Murray S, Schreier E, Giacconi R *Astrophys. J. Lett.* **165** L37 (1971)
- Miyamoto S, Fujii M, Matsuoka M, Nishimura J, Oda M, Ogawara Y, Ohta S, Wada M *Astrophys. J. Lett.* **168** L11 (1971)
- Rappaport S, Zaumen W, Doxsey R *Astrophys. J. Lett.* **168** L17 (1971)
- Hjellming R M, Wade C M *Astrophys. J. Lett.* **168** L21 (1971)
- Braes L, Miley G *Nature* **232** 246 (1971)
- Webster B, Murdin P *Nature* **235** 37 (1972)
- Bolton C T *Nature* **235** 271 (1972)
- Tananbaum H, Gursky H, Kellogg E, Giacconi R, Jones C *Astrophys. J. Lett.* **177** L5 (1972)
- Rhoades C E (Jr), Ruffini R *Phys. Rev. Lett.* **32** 324 (1974)
- Giacconi R "Binary x-ray sources", in *Gravitational Radiation and Gravitational Collapse* (Proc. IAU Symp., No. 64, Ed. C DeWitt-Morette) (Dordrecht: D. Reidel, 1974) p. 147
- Tanaka Y "Black hole X-ray binaries", in *Proc. of Ginga Memorial Symp.: from Ginga to ASTRO-D and Further to DUET, ISAS Symp. on Astrophysics* (Eds F Makino, F Nagase) (Tokyo: Inst. of Space and Astronautical Science, 1992) p. 19
- Gursky H, Solinger A, Kellogg E M, Murray S, Tananbaum H, Giacconi R, Cavaliere A *Astrophys. J. Lett.* **173** L99 (1972)
- Giacconi R, Rossi B *J. Geophys. Res.* **65** 773 (1960)
- Giacconi R, Reidy W P, Vaiana G S, van Speybroeck L P, Zehnpfenning T F *Space Sci. Rev.* **9** 3 (1969)
- Vaiana G S, Rosner R *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **16** 393 (1978)
- Giacconi R et al. *Astrophys. J.* **230** 540 (1979)
- Rosati P, Borgani S, Norman C *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **40** 539 (2002)
- Tananbaum H, Weisskopf M, in *New Century of X-Ray Astronomy* (Astron. Soc. Pacific Conf. Ser., Vol. 251, Eds H Inoue, H Kunieda) (San Francisco, Calif.: Astron. Soc. of the Pacific, 2001) p. 4
- Giacconi R et al. *Astrophys. J. Suppl.* **139** 369 (2002)
- Giacconi R, Gursky H (Eds) *X-Ray Astronomy* (Dordrecht: Reidel, 1974)
- Gursky H, in *A Survey of Instruments and Experiments for X-ray Astronomy: IAU Symposium No. 37* (Ed. L. Gratton) (Dordrecht: Reidel, 1970) p. 19