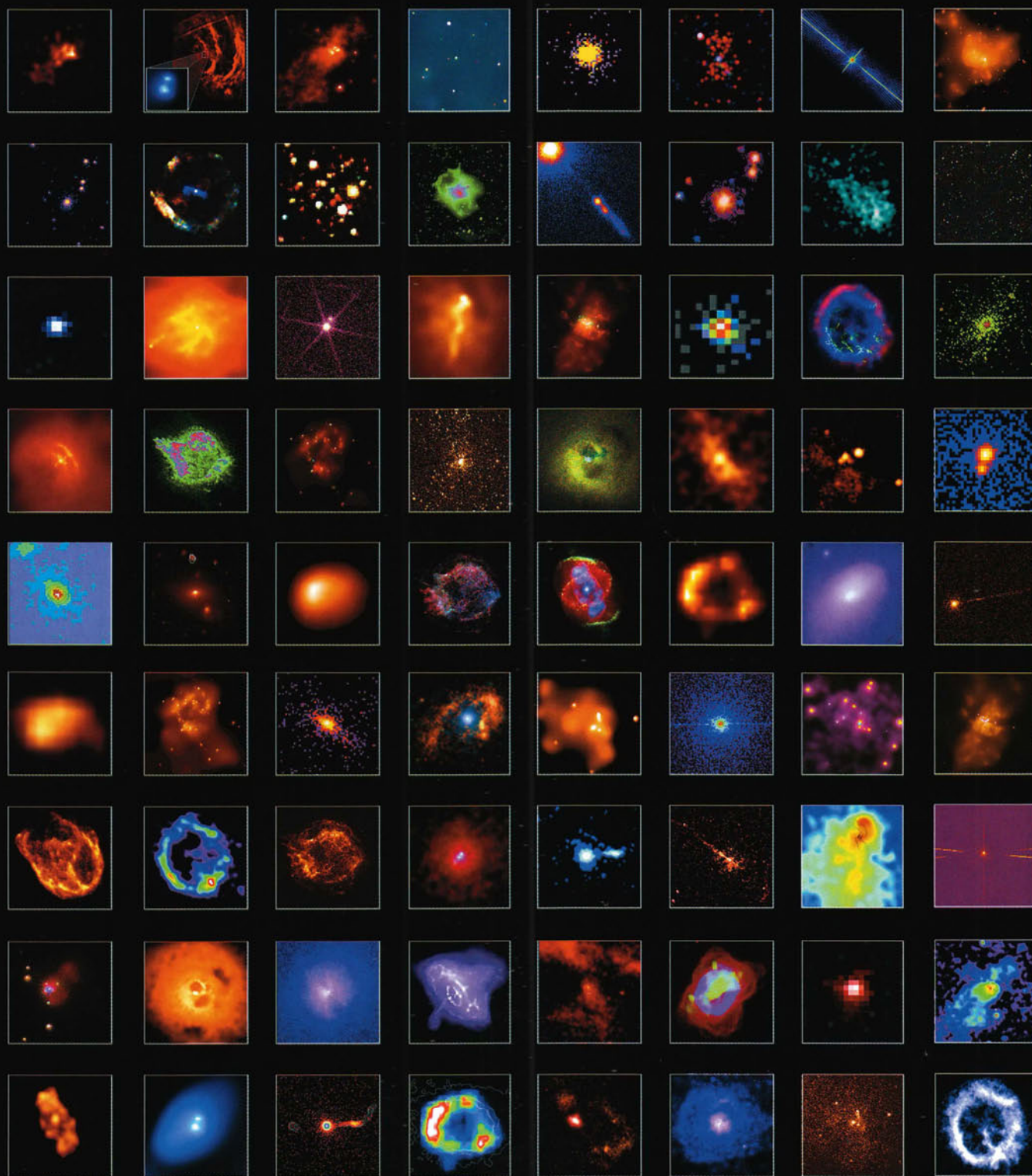


Практически до конца 40-х годов понятие «астрономические наблюдения» было равнозначно понятию «оптические наблюдения». Видимый свет в широком диапазоне длин волн электромагнитного излучения — лишь узкая щель, сквозь которую люди в течение тысячелетий заглядывали во Вселенную. А вот рентгеновские наблюдения позволяют не только раздвинуть границы «оптического окна», но и открыть, по сути, новый, неизведанный мир высоких энергий. Тот мир, где материя нагревается до миллионов градусов, где господствуют сильные магнитные поля и экстремальная гравитация, где рождаются и умирают звезды. Но космическое излучение в этом диапазоне почти полностью поглощается земной атмосферой, поэтому, несмотря на то, что рентгеновские, или X-лучи, были открыты еще в конце XIX века, рентгеновская астрономия вынуждена была ждать наступления космической эры...



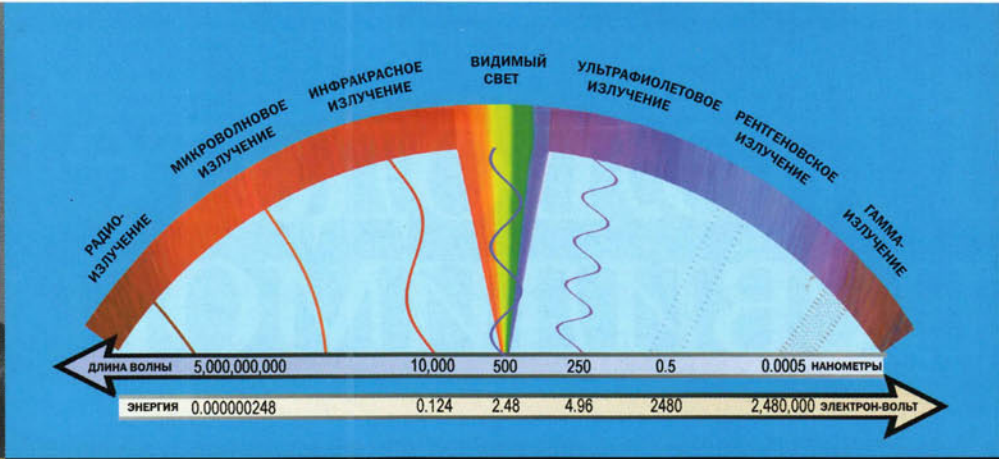
Наблюдатель НЕВИДИМОГО



Выведенная на орбиту в 1999 году космическая обсерватория «Чандра» имеет длину 13,8 метра и весит 4 620 кг. Длина двух ее солнечных панелей составляет около 20 метров.

На «Чандре» установлен мощнейший рентгеновский телескоп, разрешающую способность которого можно сравнить с возможностью человеческого глаза видеть автомобильный стоп-сигнал на расстоянии 20 км.

На странице слева — самые известные изображения, полученные «Чандрой» за два года работы на орбите.



Имя Собственное имя получают все большие телескопы. Свое название «Чандра» получила в честь выдающегося астрофизика, лауреата Нобелевской премии Субрахманьяна Чандрасекара (1910—1995), известного всему миру как Чандра.

Он родился в 1910 году в пакистанском городе Лахоре. Еще будучи студентом Мадрасского университета, за победу на одном из конкурсов в качестве приза он получил книгу Эддингтона о внутреннем строении звезд. Видимо, она и определила всю его жизнь. Он был одним из первых ученых, который сочетал астрономию с физикой. В самом начале своей научной карьеры он доказал, что существует верхний предел массы для белых карликов — это последняя стадия эволюции звезд, имеющих массу, близкую к солнечной. Это открытие явилось базисом для всей современной астрофизики, так как оно показывает, что звезды, более массивные, чем Солнце, должны либо взрываться, либо формировать черные дыры. В 1983 году Чандрасекар получил Нобелевскую премию за теоретическое исследование физических процессов, важных для структурных изменений и эволюции звезд.

▲ Схема показывает соответствие длины волны и энергии частиц. Рентгеновские лучи — это электромагнитные волны с очень малыми длинами и большой энергией квантов от 0,1 до 300 КэВ. Эта область энергий, в свою очередь, делится на три поддиапазона: 0,1—5 КэВ (мягкое рентгеновское излучение), 5—50 КэВ (классический рентгеновский диапазон), 50—300 КэВ (жесткое рентгеновское излучение).



▲ ИЗЛУЧЕНИЕ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ

Крабовидная туманность состоит из пульсара — быстро вращающейся в центре нейтронной звезды, окруженной яркой газовой туманностью. Размер туманности — 6 световых лет в поперечнике, и расширяется она со скоростью 4,8 млн. км/ч. И пульсар, и туманность являются яркими источниками

излучения всех длин волн. Сравнение изображений, полученных в разных диапазонах, показывает, что Крабовидная туманность, как источник рентгеновского излучения, максимально компактна и наиболее заметна в радиодиапазоне. Размер области рентгеновского излучения составляет 40% от

размера всей видимой области, которая, в свою очередь, составляет 80% от радиоизображения. Это дает ключ к пониманию энергетики электронов, производимых нейтронной звездой. Электроны с очень высокой энергией излучают в основном в рентгеновском диапазоне. Рентгеновский снимок Крабо-

видной туманности, сделанный «Чандрой», непосредственно регистрирует энергетические частицы, которые производят пульсар. Этот снимок с невероятной точностью показывает вихри высокоэнергетических частиц и позволяет ученым проникнуть в динамику этой «космической электростанции».

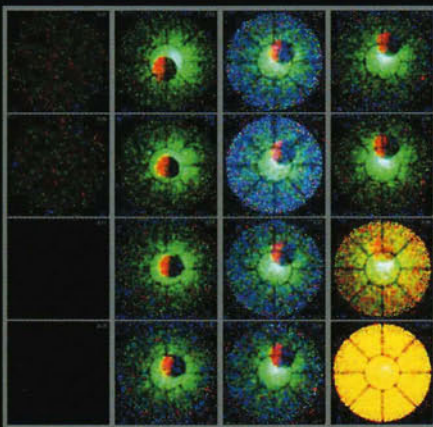


▲ ПОГЛОЩЕНИЕ АТМОСФЕРОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рентгеновское излучение поглощается далеко от поверхности Земли, что делает невозможными исследования даже с борта специально оборудованного самолета. Главный недостаток ракеты как носителя рентгеновской аппаратуры —

ее ограниченное поле зрения и очень малое время работы на тех высотах (около 80 км), где можно вести наблюдения (около 8 минут). Высотные же аэростаты, способные находиться в полете более длительное время, невозможно под-

нять выше 35 км над уровнем моря, где атмосфера еще не пропускает частицы с энергиями меньше 20—30 КэВ. Таким образом, серьезные исследования в рентгеновском диапазоне можно производить только со спутников.



▲ ЗАТМЕНИЕ ЛУНОЙ ИСТОЧНИКА SCO X-1

Наблюдения источника рентгеновского излучения в момент его покрытия Луной могут дать более тонкое пространственное распределение рентгеновского излучения вокруг его источника, подобно тому, как затмение Солнца Луной способно предоставить конкретную информацию о самых горячих участ-

ках солнечной атмосферы. И хотя такое затмение — явление редкое, а зафиксировать его удается еще реже, тем не менее 20 февраля 1998 года самый яркий источник космического рентгеновского излучения SCO X-1 (нейтронная звезда в двойной системе) был покрыт Луной, и событие это было зафик-

сировано камерой спутника ROSAT. На изображении показано, как Луна медленно перемещается перед источником излучения. Изображения, показанные в 1-м столбце, получены при наведении выключенной камеры на Scorpius X-1, во 2-м — камера включилась одновременно с началом затмения. Ущербная рентгеновская сторона Луны (показана красным цветом) движется, пересекая рассеянный ореол Scorpius X-1 (зеленый) снизу вверх. 3-й столбец изображений получен во время полета через радиационный пояс, когда шум детектора увеличивается на короткое время (синий). 4-й — это затмение наблюдаемого созвездия земной атмосферой (желтый) перед уходом за горизонт.

Излучения всех небесных тел, исследуемых астрономами до начала XX века, описывались тепловыми механизмами, поэтому серьезных причин полагать, что в космосе существует заметное рентгеновское излучение, идущее от объектов с очень высокими температурами (до миллионов градусов), не было. Первый намек на то, что такое излучение все же существует, появился в конце 40-х годов прошлого века, когда впервые было зарегистрировано рентгеновское излучение от Солнца. В конце 50-х были сделаны первые оценки рентгеновских потоков, ожидаемых от излучения обычных звезд. И только в 1962-м счетчики Гейгера, установленные на американской ракете «Аэробри-150», запущенной на высоту 200 км, обнаружили в энергетическом диапазоне от 1,6 до 6,2 КэВ не фоновое излучение, а локальный, неподвижный относительно звезд источник.

Определить его точное положение на небе было затруднительно, так как аппаратура не была рассчитана на точное наведение. Но стало ясно, что направление на источник (созвездие Скорпиона) не совпадало ни с одним из объектов Солнечной системы. Первый же взгляд на небо в рентгеновских лучах поставил задачу, на решение которой потребовались долгие годы. А точка, располагавшаяся в созвездии Скорпиона, стала отправной в истории нового направления астрономии. Существование этого источника, названного SCO X-1, было подтверждено в 1963 году.

В 60-е годы рентгеновские исследования проводились с помощью приборов, установленных на борту ракет и высотных аэростатов. Точность этих приборов была невысока, но тогда ученых интересовали не столько характеристики рентгеновских источников, сколько сам факт их существования и распределения по Галактике. Установка же более сложного оборудования было делом невыгодным, так как по окончании полета ракеты оно разрушалось вместе с ней. За 8 лет ракетных и аэростатных исследований на рентгеновскую карту неба было нанесено всего 40 источников. Ситуация резко изменилась с появлением спутников, способных активно работать длительное время, к тому же их положение контролировалось с достаточной степенью надежности, а значит, и направление на источник могло быть выдержано с большой точностью.

Интересные результаты были получены с борта орбитальной станции «Салют-4». Помимо этого, рентгеновские детекторы, способные исследовать излучение источников в большом энергетическом диапазоне, работали и на борту станции «Салют-7», и на советской автоматической станции «Астрон».

Первый широкомасштабный обзор «рентгеновского» неба был выполнен американским спутником «Ухуру», запущенным в декабре 1970 года, вес которого составил всего 175,5 кг, а разрешающая способность его бортового телескопа была ниже, чем у человеческого глаза в оптическом диапазоне. Результатом его работы стала первая подробная карта, где самым ярким

источником был SCO X-1, к тому же уже на пределе чувствительности были обнаружены другие источники, в 10 000 раз слабее его.

По мере совершенствования техники на орбиту поднимались все более сложные и разнообразнейшие приборы, с помощью которых были подробно изучены объекты, обнаруженные «Ухуру», и совершены новые открытия. В 1975 году секретный американский спутник «Вела» и астрономический нидерландский спутник ANS зарегистрировали рентгеновские барстеры — вспышки жесткого излучения. ANS удалось измерить рентгеновское излучение звездных корон (верхних атмосфер) у Капеллы и Сириуса.

В 1978 году отправился на орбиту спутник-обсерватория «Эйнштейн». На его борту был установлен первый большой рентгеновский телескоп с зеркалами косоуго падения с диаметром входного отверстия 60 см. По своему разрешению он был аналогичен разрешению оптического телескопа Галилея 1610 года! До «Эйнштейна» астрономы смотрели на рентгеновское небо как бы невооруженным глазом, он открыл телескопическую эру рентгеновской астрономии. В задачу «Эйнштейна» входил не только поиск новых источников, но и исследование избранных объектов, список которых включал практически все типы небесных тел. «Эйнштейну» удалось наблюдать объекты, которые в миллион раз слабее самого яркого источника SCO X-1, и определить точное положение более 7 000 источников. Наблюдения показали, что почти каждая звезда благодаря горячей газовой короне является источником рентгеновского излучения. В этом диапазоне наблюдались остатки вспышек сверхновых — сброшенные звездами расширяющиеся оболочки, заполненные горячим газом. Оказалось, что рентгеновское излучение во Вселенной — явление такое же обычное, как и оптическое. Рентгеновское небо заполнено квазарами, активными галактиками и скоплениями галактик.

В 80-е годы стартовали новые рентгеновские телескопы на японских спутниках «Генма» и «Гинга», советских — «Астроне», «Кванте» и «Гранате» и на европейском спутнике EXOSAT. В 90-е годы, когда к работе подключились совместная американско-европейская обсерватория ROSAT и японский спутник ASCA, началось изучение горячих газовых дисков вокруг нейтронных звезд, или черных дыр, входящих в состав тесных звездных пар, активных ядер галактик. На карту было нанесено уже 100 000 источников рентгеновского излучения. Цифра внушительная, но если бы оптические телескопы смогли увидеть только 100 000 звезд, они остановились бы на звездах 9-й величины, которые только в 20 раз слабее видимых невооруженным глазом в безлунную ночь. В оптическом диапазоне наблюдатели добрались уже до 24-й звездной величины и останавливаться не собираются. Мечта о большой космической рентгеновской обсерватории, которая могла бы «видеть» больше и дальше, не оставляла астрономов.

Первый проект большого орбитального

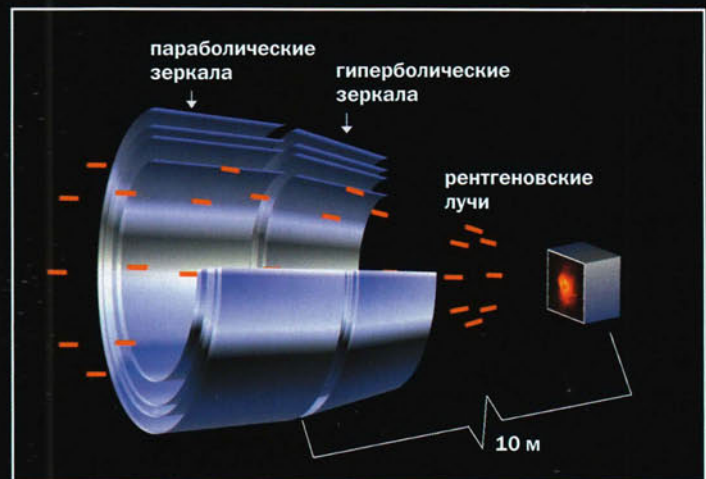


ЗЕРКАЛА

Рентгеновская астрономия долго не могла стать телескопической из-за особых свойств отражения рентгеновских фотонов, которые в большинстве случаев благодаря своей большой энергии не отражаются от поверхности зеркала, а проникают в его толщу. И только лучи, падающие под очень малыми углами, почти скользят вдоль поверхности зеркала, а проникают в его толщу. Поэтому зеркала, способные сфокусировать потоки рентгеновских частиц, совершенно не похожи на знакомые всем «тарелки» оптических зеркал. Они называются «зеркалами косоуго падения» и напоминают трубу, слегка сужающуюся к одному концу. Собственно, это два зеркала с раз-

ной формой поверхности, расположенные на одной оптической оси друг за другом. Дело в том, что зеркало в форме параболоида, попросту не способно создать в фокальной плоскости никакого изображения, потому что лишь луч, идущий точно по оптической оси и попадающий точно в центр фокальной плоскости, дает изображение в виде точки. Лучи, проходящие вне этой оси, строят кольцо с центром на оптической оси. Чтобы получить точечное изображение в фокальной плоскости, за параболическим ставят гиперболическое зеркало, корректирующее первое. Сначала луч отражается от параболического зеркала, затем — от гиперболического и лишь пос-

ле этого создается изображение в новой, фокальной плоскости. Использование в астрономии зеркал косоуго падения — четырехпараболы, вставленных друг в друга, и четырех — гиперболических, установленных таким же образом. Подобная конструкция необходима для увеличения собирающей поверхности телескопа. Зеркала имеют длину 80 см, диаметры их составляют от 0,6 до 1,2 метра. Отполированы они были с высочайшей точностью, так как любая неровность в 10 ангстрем (одна

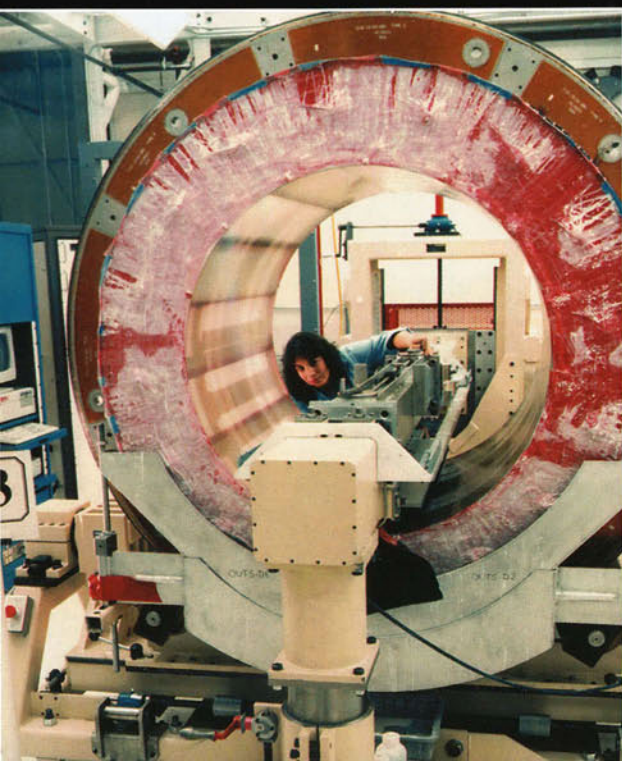


миллиардная доля метра) будет аналогична вершине для рентгеновского излучения с длиной волны 2 ангстрема и может вызвать его отклонение с нужного пути. Для того чтобы при формировании зеркал обеспечить необходимый уровень точности, было создано новое специальное калибровочное оборудование. Вместо золота для покрытия зеркал был использован иридий, отражательная способность

которого несравнимо выше. Затем зеркала были собраны вместе и сцентрированы с высочайшей точностью (1,3 микрометра, или 1/50 толщины человеческого волоса). Благодаря высокому качеству зеркала способны сконцентрировать более половины фотонов, исходящих от точечного источника в круге радиусом в половину секунды дуги, что и делает телескоп максимально чувствительным.



Наибольшее удаление «Чандры» от Земли составляет 140 000 км (почти треть расстояния до Луны). Для сравнения: высота геостационарных орбит коммуникационных спутников — 36 000 км, а высота полетов космических челноков «Шаттл» — 600 км. Самое близкое расстояние, на которое «Чандра» приближается к Земле, 10 000 км.



▲ Шлифовка зеркал для «Чандры»

ОРБИТА

Чтобы компенсировать сокращение числа зеркал и приборов, для «Чандры» была предусмотрена очень высокая и вытянутая орбита. Дело в том, что наземные телескопы могут быстро переключаться с одной цели на другую, а большинство космических телескопов поворачиваются вокруг неба очень медленно, тратя для того, чтобы навестись с одной стороны неба на другую, приблизительно 30 минут. Таким образом, когда Земля блокирует поле зрения низкоорбиталь-

ного телескопа на несколько сотен километров, достаточного времени просто не хватает для того, чтобы перевести их на другую цель в противоположной области неба, поэтому изображение или запись спектра обрывается, а наблюдения возобновляются лишь после того, как Земля уходит из поля зрения. Из-за этого низкоорбитальные спутники теряют почти половину своего потенциального наблюдательного времени. Высокая орбита «Чандры» позволяет использо-

вать 80% наблюдательного времени для сбора научной информации. Недостаток же столь высокой орбиты заключается в том, что ее не может достичь «Шаттл», а поэтому инструменты на «Чандре» в случае неисправности или появления новых модификаций заменить нельзя. Поэтому к качеству конструирования, строительства и тестирования телескопа, рассчитанного на 5-летнюю работу в космосе, предъявлялись очень высокие требования.



◀ Движение спутников вокруг Земли, так же как и движение планет вокруг Солнца, подчиняется второму закону Кеплера, гласящему, что воображаемая линия, соединяющая Землю и Солнце, описывает равные площади за равные промежутки времени. Это означает, что на своей вытянутой орбите «Чандра» будет проводить большую часть времени на максимальном удалении от Земли. Земля же с этого расстояния выглядит как диск с 5-градусным диаметром. Поэтому «Чандра» может наблюдать на небе любую цель без досадного экранирования Землей ее поля зрения, как это, например, происходит в случаях, связанных с низкоорбитальными спутниками. Это делает производительность телескопа очень высокой.

► **ТЕСТИРОВАНИЕ**

В июле 1998 года собранную и полностью готовую к работе «Чандру» поместили на несколько недель в огромную вакуумную камеру, попеременно то нагревая, то остужая телескоп, дабы проверить его чувстви-

тельность к условиям открытого космоса. Телескоп, приборы и сопутствующее оборудование были помещены в космический модуль, обеспечивающий их безопасность и необходимые для работы на орбите условия.

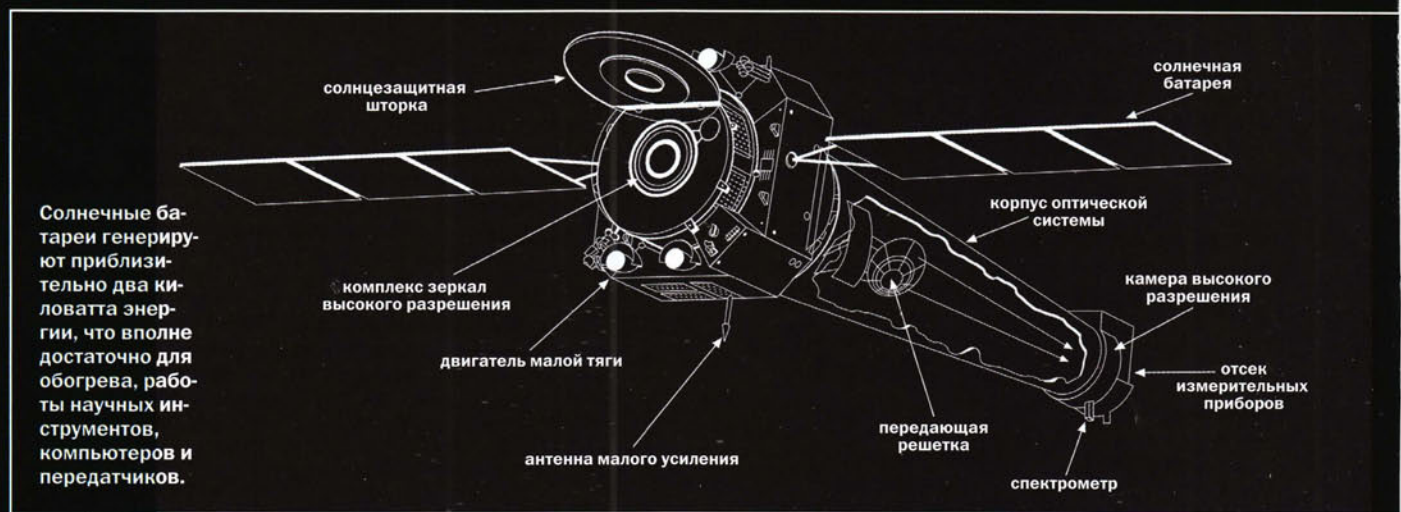
«Чандра» в грузовом отсеке «Шаттла»

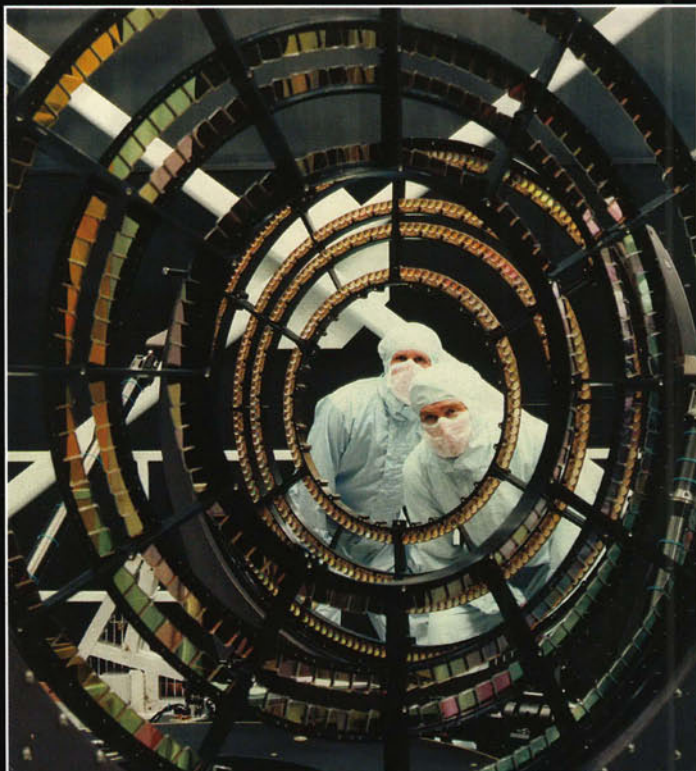


▼ **УСТРОЙСТВО**

Обсерватория «Чандра» состоит из 3 основных частей: рентгеновского телескопа, научных инструментов и космического аппарата, обеспечивающего доставку телескопа на орбиту. Инструментальный модуль позволяет перемещать инструменты как в фокальную плоскость телескопа, так и обратно. Кроме того, модуль содержит электронику, контролирующую работу инструментов. Большое внимание уделено системе теплового

контроля, обеспечивающей температурный контроль на всей обсерватории и особенно вблизи рентгеновских зеркал, так как даже незначительные изменения температуры могут повлечь за собой изменение фокуса зеркал и ухудшение качества изображений. Бортовой компьютер станции с программой наблюдения хранит собираемую информацию, которая регулярно передается на Землю во время сеансов связи.





▲ Передающие решетки спектрометров

ИНСТРУМЕНТЫ «ЧАНДРЫ»

Камера высокого разрешения «Чандры» (HRS) имеет широкое поле зрения и высокое угловое разрешение. Она способна «построить» изображения столь высокого качества, что на них можно разглядеть детали размером меньше половины секунды дуги. Кроме того, камера может зарегистрировать время прибытия каждого рентгеновского луча с интервалом в 16 микросекунд, что крайне важно для изучения коллапсирующих объектов.

Спектрометр (ACIS), формирующий изображения, может одновременно строить изображение и измерять энергию каждого пришедшего луча. Это позволит астрофизикам получить изображения одного и того же объекта в линиях отдельных химических элементов и сравнивать их затем между собой. Этот прибор очень удобен для изучения

температурных колебаний внутри таких источников рентгеновского излучения, как огромные облака горячего газа в межгалактическом пространстве, или изменения химического состава в облаках, оставшихся от взрывов сверхновых. Таким образом, эти две камеры строят изображение источника и сообщают всю информацию о приходящих рентгеновских лучах.

Чтобы лучше понять Вселенную, астрономам, помимо изображений, крайне необходимы также и спектры. Для получения спектроскопии высокого разрешения на борту «Чандры» используются низко- и высокоэнергетичные спектрометры высокого разрешения. Чтобы достичь приемлемого для астрономов спектрального разрешения, используются специальные передающие решетки, изменяющие на-

правление пришедших рентгеновских лучей, в соответствии с их энергиями, точно так же, как призмы и решетки в оптических спектрографах разделяют свет по цветам. Решетки покрывают область энергий в диапазоне от 0,07 до 10 КэВ. Высокое качество решеток позволяет обнаружить различие между энергиями в 1 000 и 1 001 КэВ. Одна из вышеописанных камер определяет положения разделенных рентгеновских лучей, давая возможность оценить их энергии. Столь высокое разрешение позволяет обнаруживать и более слабые линии спектра, чем те, что были известны до сих пор, и предоставлять новые средства для определения температуры, степени ионизации, плотности, химического содержания и движения вещества в рентгеновских источниках.

рентгеновского телескопа появился в 1970-м, еще до запуска «Ухуру», когда было известно лишь 40 рентгеновских источников. Разработка, конструирование и строительство телескопов, которые должны разместиться в космосе, работая в условиях враждебной среды при огромном перепаде температур и вакуума под контролем с Земли, обычно занимает многие годы и требует огромных затрат. А так как в то время велась подготовка к запуску космической обсерватории «Эйнштейн», то к вопросу о большом космическом телескопе NASA вернулось только в 1976-м. Финансирование проекта AXAF началось в 1977 году, и Центр космических полетов им. Маршалла начал предварительное проектирование телескопа. Его создание задержалось более чем на десятилетие, во-первых, из-за финансовых проблем, а во-вторых, из-за трагедии, произошедшей с «Челленджером». Зеленый свет был дан проекту конгрессом США лишь в 1988 году.

В 1992-м, опять же из-за сложностей с финансированием, для уменьшения стоимости орбитальной обсерватории было решено сократить количество используемых зеркал с 12 до 8, а вместо 6 предусмотренных научных инструментов задействовать всего 4. В течение 20 лет группы ученых, инженеров, техников и менеджеров в многочисленных правительственных центрах, университетах и корпорациях были вовлечены в строительство и сборку большой рентгеновской обсерватории, получившей название «Чандра».

Телескопическая система и научные инструменты прошли тысячи индивидуальных тестов в рентгеновском калибровочном оборудовании, специально сконструированном для этой цели в Маршалловском центре космических полетов. Тесты, которые завершились в мае 1997-го, показали, что «Чандра» имеет прекрасную чувствительность и высокое угловое и спектральное разрешение, а значит, сможет обнаружить в 10 раз более слабые рентгеновские источники, чем ее ближайший предшественник — космический исследовательский аппарат ROSAT. В 1999 году обсерватория была доставлена на мыс Канаверал для отправки в долгое путешествие. «Чандра» стала самым большим спутником, из всех когда-либо выводимых на орбиту «Шаттлами», а экипаж «челнока» впервые возглавила женщина.

Вот уже третий год «Чандра» несет свою службу на орбите, добывая из глубин Вселенной все новую информацию. Уникальные данные, которые уже обнаружены обсерваторией и, видимо, еще будут ею обнаружены, помогут ученым найти ответы на фундаментальные вопросы о возникновении, эволюции и судьбе Вселенной. Для исследователей же космического рентгеновского излучения переход от «Ухуру» к «Чандре» вполне может быть сравним со скачком от применения наземных оптических телескопов к работе космического телескопа «Хаббл». Разница лишь в том, что оптической астрономии для этого пришлось пройти путь длиной в четыре столетия, тогда как рентгеновской астрономии хватило всего 30 лет.

ЛЮДМИЛА КНЯЗЕВА