

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## РЕНТГЕНОВСКОЕ НЕБО \*)

523.164.4(023)

Г. Шноппер, Дж. Делвай

*Сейчас известно более 120 небесных рентгеновских источников. Среди них есть по крайней мере одна нейтронная звезда, один квазар, две галактики, один двойной источник и, возможно, даже «черная дыра».*

Десять лет прошло с момента открытия первого небесного объекта, излучающего рентгеновские лучи. К настоящему времени обнаружено и частично исследовано более 120 рентгеновских источников. Информация о них получена во время около 100 полетов ракет и аэростатов и одного большого спутникового эксперимента, продолжающегося уже больше года. Разнообразный характер экспериментальных результатов является источником непреходящего изумления всех, кто имеет дело с рентгеновской астрономией. Рентгеновское излучение наблюдалось у объектов, находящихся как в нашей Галактике, так и вне ее. Размеры некоторых из объектов малы, другие занимают обширные области на небе. По крайней мере об одной нейтронной звезде (пульсар в Крабовидной туманности), одном квазаре (объект, обозначаемый 3С 273) и двух галактиках (Большое и Малое Магеллановы Облака) известно, что они излучают рентгеновские лучи. Однако большинство рентгеновских объектов не отождествлено с источниками оптического или радиоизлучения. Спектры и полная мощность излучения многих рентгеновских объектов меняются со временем. Предполагается, что один источник в Центавре (Сен X-3) представляет собой затменную двойную: два объекта вращаются вокруг общего центра масс, закрывая друг друга. Этот небесный «зоопарк» является предметом восхищения астрономов, а каждое новое усилие экспериментаторов быстро вознаграждается более ясным представлением о рентгеновском небе.

Внесолнечная рентгеновская астрономия родилась 18 июня 1962 г., когда с геофизической ракеты, запущенной с ракетного полигона Уайт-Сэндс, было обнаружено рентгеновское излучение, приходящее из созвездия Скорпиона. Эксперимент был поставлен группой Американского научно-технологического общества (ASE) и Массачусетского технологического института (MIT). Несмотря на то, что положение объекта было определено не очень точно, экспериментаторы были уверены в том, что в созвездии Скорпиона существует рентгеновский источник, и назвали его Sco X-1. В последовавших экспериментах по обзору неба была увеличена чувствительность и было открыто много новых источников, в том числе Крабовидная туманность. Первоначальная информация о положении источников

\*) Herbert W. Schnopper, John P. Delville, The X-ray Sky, Scientific American 227(4), 26 (July 1972). Перевод Я. М. Хазана.

Герберт У. Шноппер и Джон П. Делвай являются сотрудниками Массачусетского технологического института, США.

была слишком грубой. Поэтому нельзя было выяснить, существует ли видимый объект, который можно было бы идентифицировать с каждым рентгеновским источником. Ситуация, однако, быстро изменилась. Группа астрономов Морской лаборатории в Вашингтоне наблюдала покрытие Луной Крабовидной туманности. Этим экспериментом они доказали, что поперечный размер излучающей в рентгеновском диапазоне области — около одной минуты. Во время полета ракеты, запущенной 8 марта 1966 г.,

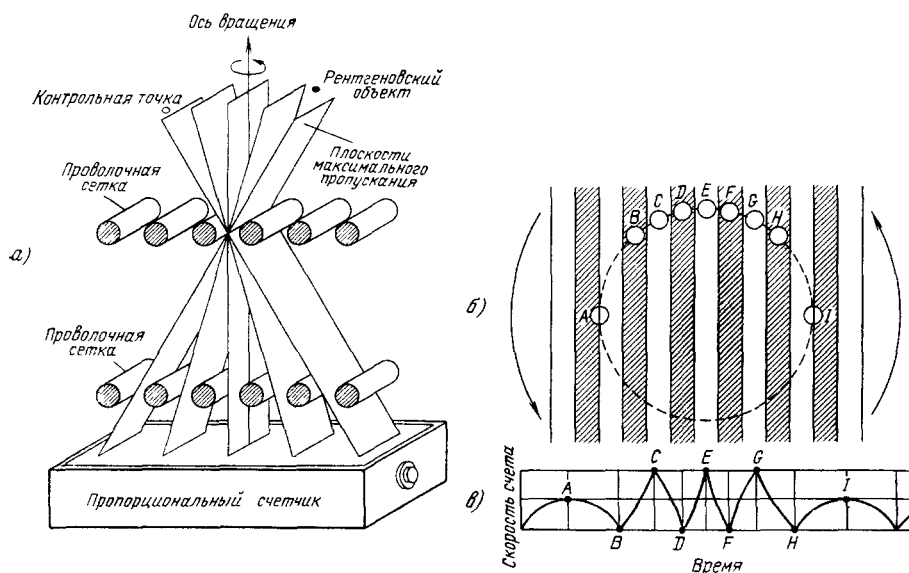


Рис. 1. Вращающийся модулирующий коллиматор (а) позволяет определить положение рентгеновского источника с точностью около  $10''$ .

Две параллельные проволочные сетки выделяют плоскости максимального пропускания. При вращении коллиматора вокруг оси величина сигнала от каждого рентгеновского источника в поле зрения детектора модулируется. Светлые полосы — проекция плоскостей пропускания на небо. Заштрихованные полосы — участки с малым пропусканием (б). Модулированный сигнал (в) является характеристикой как угла между направлением на объект и осью вращения, так и угла этой оси по отношению к некоторому направлению. Такая картина пропускания рассчитывается для каждой контрольной точки в поле зрения вращающегося коллиматора, позволяя построить корреляционную карту.

группа ASE—MIT измерила угловой размер и определила точное положение источника Sco X-1. Эти результаты немедленно привели к открытию оптического двойника Sco X-1 — слабой голубой звезды  $13^m$ .

Применение специального инструмента, названного вращающимся модулирующим коллиматором (rotating modulation collimator), открыло этап наиболее точного измерения координат рентгеновских источников (рис. 1). Во время ракетного эксперимента 2 октября 1969 г. были определены положения пяти источников, находящихся в галактической плоскости около галактического центра. Среди оптических объектов не удалось найти подходящих кандидатов для идентификации, но радиоастрономы, работающие в Национальной радиоастрономической обсерватории в Грин-Бэнк, обнаружили вблизи рентгеновских источников радиосточники.

На рентгеновском небе были обнаружены не только дискретные источники: все небо оказалось источником диффузного рентгеновского излучения. Интенсивность этого излучения была первоначально измерена для сравнительно высоких энергий. Впоследствии, во время полетов ракет, оборудованных специальными детекторами мягких рентгеновских лучей,

было выяснено, что интенсивность фона резко возрастает с уменьшением энергии фотонов. Рентгеновская группа Висконсинского университета приписала большую часть фона активности в нашей Галактике и обнаружила излучение области, названной Северным Полярным следом.

Первый специализированный рентгеновский спутник «Uhuru» (на суахили — «свобода») был запущен в декабре 1970 г. с острова Сан-Маркос у побережья Кении и пока продолжает функционировать. Его задачей является обзор неба с целью поиска новых рентгеновских источников, что он с успехом и делает. Последний каталог, в который включены 125 источников, составлен после анализа только части полученной информации (рис. 2). Интересно, что четверть этих источников лежит вне плоскости Галактики. Это дает основания предполагать, что они являются внегалактическими объектами. Приведенные результаты и перспектива будущих открытий позволяют думать, что рентгеновская астрономия вступила в пору зрелости.

Традиционная схема деятельности астронома, изучающего оптический объект, состоит в измерении таких величин, как его положение на небесной сфере, угловой размер, распределение энергии по спектру, интенсивность излучения, степень поляризации и переменность. Астроном, исследующий рентгеновский объект, делает в основном то же самое. Есть, однако, одно существенное отличие. При изучении рентгеновского неба следует различать те свойства источника, которые могут быть измерены непосредственно, и те, которые могут быть только выведены из прямых измерений.

«Рабочей лошадью» рентгеновских детекторов является пропорциональный счетчик. Он дает электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна энергии рентгеновского фотона. Такие детекторы обычно наполняются газом, в котором создается сильное электрическое поле. Когда фотон проходит тонкое металлическое или пластиковое окно в стенке детектора, он сталкивается с атомом газа, что приводит к образованию каскада электронов и ионов. Событие, заключающееся в появлении сигнала в электрической схеме, регистрируется как рентгеновский фотон. При этом события, вызванные заряженными частицами и  $\gamma$ -лучами, должны быть опознаны и отвергнуты связанной с детектором электронной логической схемой.

В точности так же, как фотоны взаимодействуют с атомами газа в детекторе, они могут взаимодействовать с атмосферой Земли. Чтобы избавиться от поглощения в атмосфере, детекторы приходится поднимать на высотных аэростатах и ракетах или, что еще лучше, помещать на спутник. Поглощение также происходит в межзвездном газе и в самом рентгеновском источнике. Такое поглощение можно использовать для изучения природы рентгеновских источников и космического вещества вдоль луча зрения.

Изобретательные инженеры создали электронную схему, преобразующую в числа последовательность сигналов пропорционального счетчика. Числа передаются на Землю, где из них составляется спектр, представляющий относительный поток рентгеновских фотонов в последовательных энергетических интервалах. Такие спектры, называемые амплитудными распределениями импульсов, используются для получения характеристик рентгеновских источников. Источник, в зависимости от формы спектра, можно классифицировать как «мягкий» или «жесткий». Если зависимость потока от энергии указывает на то, что высокоэнергетичных фотонов сравнительно мало, источник называют мягким. Если спектр плоский, то источник называют жестким. В общем случае спектр, измеряемый пропорциональным счетчиком, представляет собой медленно меняющуюся функцию энергии, называемую континуумом.

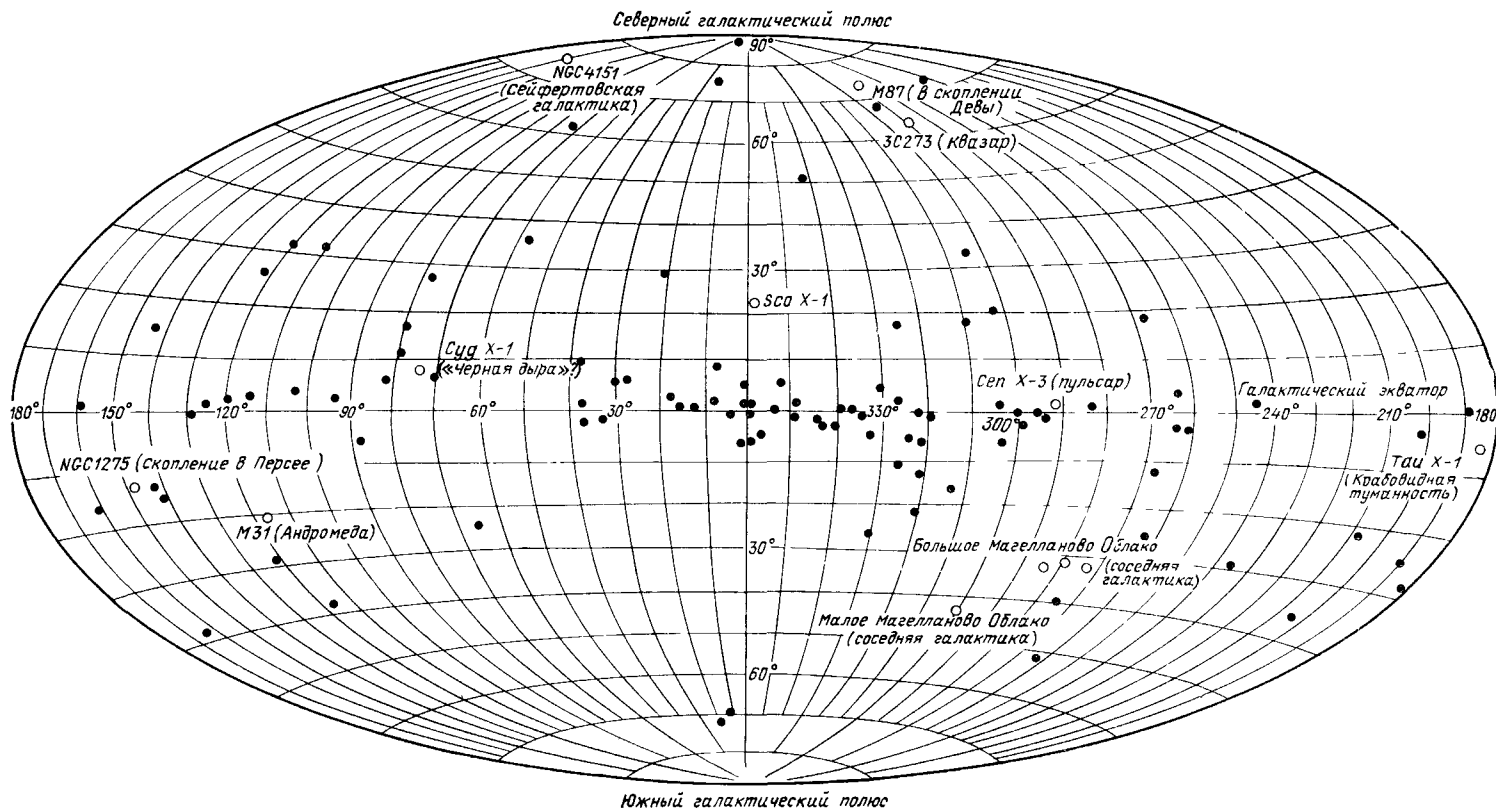


Рис. 2. На этой карте показаны в галактических координатах положения 116 рентгеновских объектов (данные взяты из каталога «Uhuru»).

Тринадцать самых сильных источников отождествлены с оптическими объектами. Три четверти источников концентрируются к плоскости Галактики и предположительно имеют галактическое происхождение. Остальные разбросаны выше и ниже плоскости и, видимо, являются внегалактическими объектами.

Иногда ограничения на вес или потребляемую мощность не позволяют использовать технику, измеряющую энергию фотонов. В этом случае все сигналы регистрируются одинаково, независимо от их амплитуды. При соответствующем выборе материала окна и газа, заполняющего детектор, сигналы будут соответствовать фотонам с энергиями в определенном интервале. Можно сделать сэндвич из трех или четырех детекторов так, чтобы фотоны малых энергий регистрировались (поглощались) в первом детекторе, кванты больших энергий во втором и так далее. Этот метод похож на трехцветную колориметрию оптической астрономии.

Как определяется положение рентгеновских источников на небесной сфере? Большинство астрономов используют сходные по принципу действия приборы — в них просто ограничивается поле зрения детектора, который сам по себе обычно является всенаправленным. Чтобы понять, как работает эта система, представьте, что вы смотрите на небо через стеклянный экран. Ясно, что его трудно ориентировать так, чтобы экран был перпендикулярен направлению на заранее выделенную звезду. Предположим, однако, что перед экраном расположена узкая труба. Теперь экран будет освещен только в том случае, если труба смотрит на звезду, а звезды, лежащие вне апертурного угла трубы, не будут давать вклад в освещенность.

Вместо трубы большинство приборов, используемых для поиска рентгеновских источников, снабжено серией параллельных металлических пластин, похожих на открытое жалюзи. Так как пластины параллельны, угловая зависимость отклика системы пластин такая же, как если бы было только две пластины. Все пары пластин дают изображение в точности одной и той же полосы на небе. При вращении ракеты пластинчатый коллиматор сканирует небо в направлении, перпендикулярном к большей стороне пластин, так что в каждый момент времени детектор видит на небе только одну полосу. Когда в поле зрения попадает источник, скорость счета детектора становится выше уровня фона.

Эта процедура не дает возможности определить положение источника внутри полосы зрения и не позволяет разрешить несколько источников, попадающих в одну полосу, однако, поворачивая детектор с коллиматором вокруг оси зрения в новое положение и сканируя полосу, в которой обнаружен источник, можно определить его положение с точностью до  $0^\circ$ , 1. Поперечное сканирование помогает также уменьшить неоднозначность, возникающую из-за возможности попадания нескольких источников в поле зрения. Более того, такое сканирование может дать информацию об угловых размерах протяженного источника, попадающего в несколько смежных полос при обоих направлениях сканирования. Если нет каких-либо особых причин связывать вновь открытый рентгеновский источник с находящимся поблизости видимым объектом (таким, например, как остаток Сверхновой, лежащий в пределах площадки, ограничивающей положение рентгеновского источника), точность определения координат, даваемая пластинчатым коллиматором, недостаточна для оптической идентификации. К счастью, точность может быть заметно улучшена с помощью модификации пластинчатого коллиматора, называемой вращающимся модулирующим коллиматором.

В этом приборе пластины заменяются решеткой, сделанной из близко расположенных параллельных отрезков проволоки. Вторая такая решетка, расположенная над первой, определяет полосы пропускания на небесной сфере, отстоящие друг от друга на несколько угловых минут. Детектор и система решеток непрерывно вращаются вокруг оси, перпендикулярной к решеткам, поэтому поток от источника оказывается модулированным. Не модулируется излучение только тех источников, которые

лежат точно на оси вращения, а источник, лежащий в стороне от оси, дает переменный сигнал. Анализируя этот сигнал, можно определить положение объекта относительно оси вращения. Если мы к тому же знаем, как

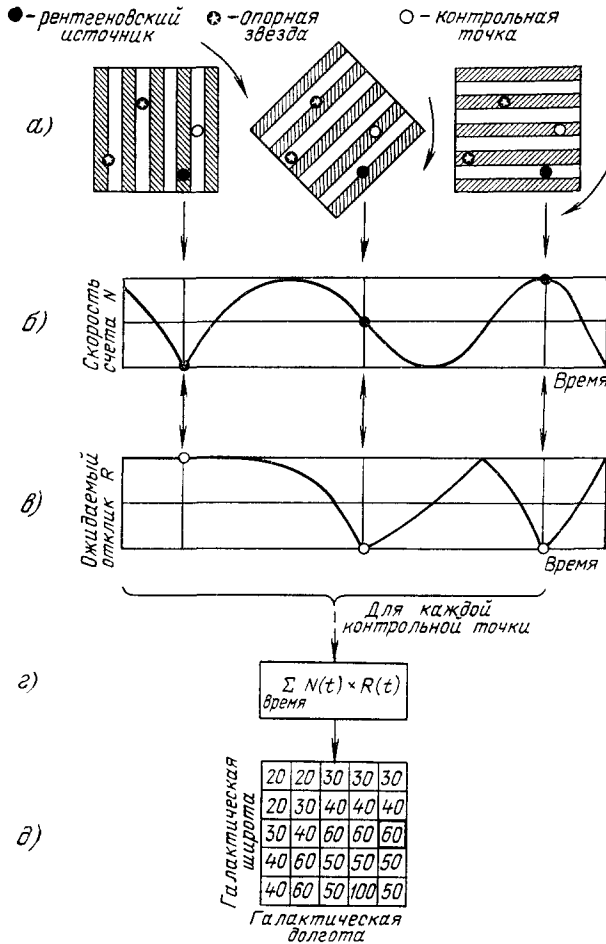


Рис. 3. Информация, получаемая с помощью вращающегося коллиматора, анализируется не непосредственно, так как коллиматор не фотографирует рентгеновое небо.

При вращении коллиматора (а) видимая через полосы пропускания часть неба меняется. Скорость счета  $N$  принимаемых рентгеновских лучей меняется со временем (б); три темных кружка показывают значения  $N$  при разных положениях лучей коллиматора. Сделав предположения о том, где находится источник (светлый кружок), вычисляют отклик коллиматора  $R$  для этой контрольной точки (в). Этот отклик является мерой скорости счета для источника, находящегося в контрольной точке. Для каждого момента времени находится произведение скоростей счета, даваемых двумя графиками, после чего эти произведения складываются (г). Эта сумма, или «корреляционная функция», определяет вероятность того, что источник действительно находится в контрольной точке. Так как положение контрольной точки по отношению к опорным звездам известно, сумма может быть нанесена на карту неба (д). Эта процедура повторяется для многих контрольных точек. Теперь, поставив в соответствие цифрам светлые или темные оттенки серого цвета, можно получить картину на экране осциллографа.

ориентирован детектор по отношению к небесной сфере, то мы можем найти угловые координаты любого рентгеновского источника с точностью около  $10''$  (рис. 3—4).

Кроме точного определения положения источника, вращающийся модулирующий коллиматор дает более продолжительные времена наблюдения, лучшее отношение сигнала к шуму и позволяет разрешать множе-

ственные источники. Недостатком системы является невозможность детектирования наиболее протяженных источников, покрывающих несколько полос, так как сигнал от них не модулируется при вращении детектора.

Можно спросить, почему бы вместо использования сложных коллиматоров не строить рентгеновские телескопы аналогично телескопам для видимого света. Попытки построить и запустить фокусирующие рентгеновские телескопы с целью получить рентгеновское изображение Солнца были предприняты ASE. Наилучший из этих телескопов имел угловое разрешение около  $1''$ . К сожалению, эти приборы можно устанавливать только

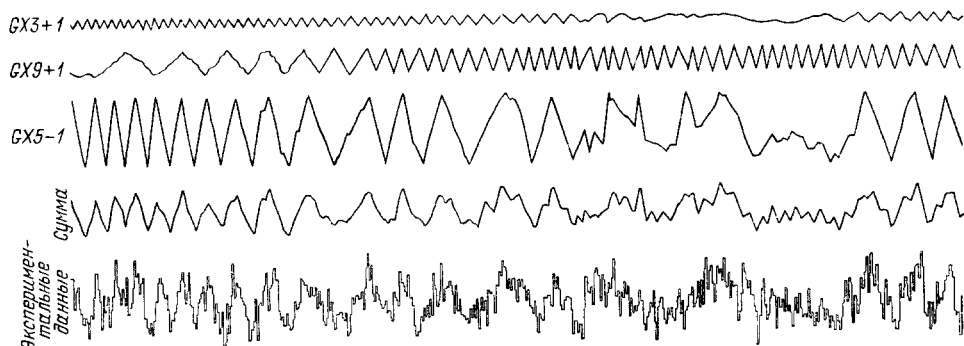


Рис. 4. Образец данных, полученных с помощью вращающегося коллиматора (внизу), показан вместе со скоростями счета для трех контрольных точек (три верхние записи).

Анализ состоит в определении ожидаемого отклика для каждой точки в поле зрения, сопоставления его с данными в других точках и построении с помощью вычислительной машины корреляционной карты. Если сложить все ожидаемые отклики для правильных контрольных точек, они хорошо совпадут с нижней записью. В обозначениях источников GX указывает на то, что объект находится вблизи галактического центра, а цифры означают галактическую долготу и широту. Корреляционные карты для этих трех источников показаны на рис. 5 и 6.

на больших спутниках, поскольку высокая чувствительность, необходимая для детектирования удаленных источников, достигается за счет увеличения размеров.

В астрофизике основным методом проверки теоретических моделей звезд и других объектов является спектроскопический анализ. В качестве лабораторной методики рентгеновская спектроскопия общепотребима. Астрономам очень хотелось бы использовать аналогичную технику при анализе излучения рентгеновских объектов. Для того чтобы обнаружить характеристическое излучение и абсорбционные детали, необходимо исследовать непрерывный спектр с очень высоким разрешением. Низкие скорости счета большинства инструментов ограничивают применимость таких исследований спутниковыми экспериментами, где продолжительные времена наблюдения и хорошая точность ориентации позволяют избавиться от статистических неопределенностей.

Высокое разрешение достигается использованием кристаллов, при отражении от которых рентгеновские лучи разлагаются в спектр подобно тому, как происходит дисперсия света на дифракционной решетке. Однако, в отличие от решетки, кристалл при каждом значении угла падения отражает только узкий интервал длин волн рентгеновских лучей, поэтому для получения полного спектра необходимо произвести сканирование по углам падения. Предпринимаются попытки решить в будущих космических полетах проблему низких скоростей счета. Они состоят главным образом в соединении кристаллического спектрометра с прибором, который может концентрировать рентгеновские лучи в пучок, после чего для

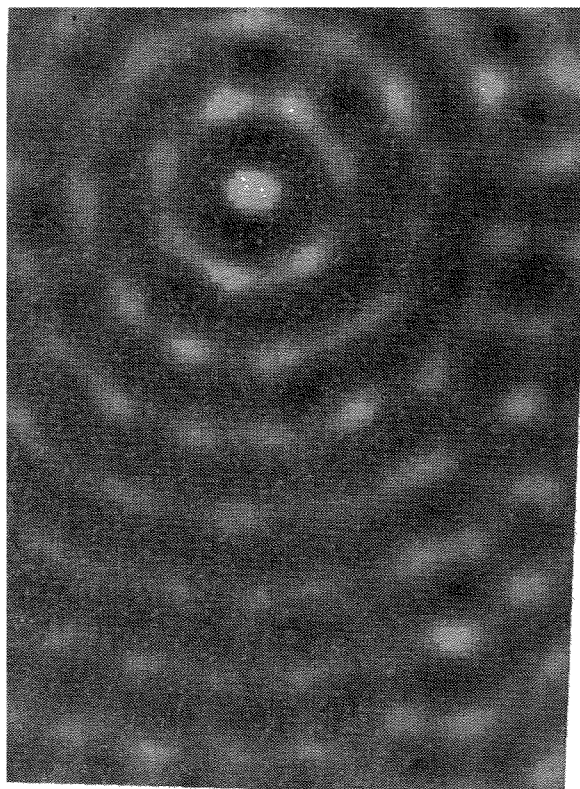


Рис 5. Такая картина, называемая корреляционной картой, используется для очень точного определения координат сильных рентгеновских источников.

На рисунке показана рассчитанная на вычислительной машине корреляционная карта для источника GX 9 + 1. При расчетах использованы данные, полученные группой Массачусетского технологического института.

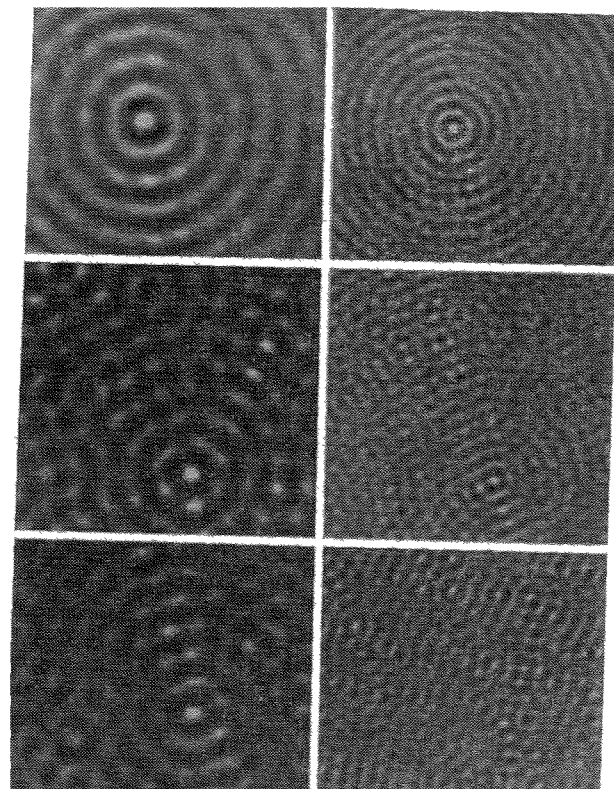


Рис. 6. Корреляционные карты для источников GX5 - 1 (два верхних снимка), GX3 + 1 (средние снимки), GX17 + 2 (внизу).

Карты построены для углового разрешения коллиматора 8' (слева) и 4'.



исследования этих пучков можно использовать компактные детекторы. Увеличение чувствительности достигается в этом случае ценой усложнения инструмента.

Интересно, что если угол падения пучка на кристалл равен  $45^\circ$ , такие кристаллические анализаторы оказываются чувствительными к плоскости поляризации падающего пучка. Угол падения соответствует узкому интервалу длин волн, центральная частота которого определяется выбором кристалла. Некоторые модели генерации космического рентгеновского излучения основаны на синхротронном излучении электронов, движущихся в магнитном поле. Такие модели предсказывают, что рентгеновское излучение источников может быть линейно поляризованным. Положение плоскости поляризации можно определить, вращая кристалл вокруг направления пучка так, чтобы угол падения пучка оставался равен  $45^\circ$ . Для таких измерений желательнее использовать кристаллы, имеющие скорее не высокое разрешение, а высокую отражательную способность. Приборы, более чувствительные к поляризационным эффектам, можно получить, если изготовить из кристаллов оптические элементы, фокусирующие рентгеновские лучи на детекторы меньшей площади.

Для интерпретации экспериментальных результатов, помимо знания непосредственно измеримых величин, необходимо построить подходящую модель рентгеновского источника. Некоторые модели относительно просты и могут быть получены из анализа размерностей или интуитивных соображений. Другие являются результатом гигантских усилий теоретической физики, причем рентгеновские наблюдения играют в цепи аргументов лишь относительно небольшую роль. В конечном счете полезность модели зависит от квалификации астронома.

Сильные рентгеновские источники являются лучшими кандидатами в объекты детальных исследований. Для таких источников надежная статистика может быть получена даже за короткие времена наблюдения на геофизических ракетах. Большинство источников этого типа характеризуется наличием непрерывного спектра, простирающегося в широком интервале энергий и медленно меняющегося со временем. Форму этого спектра можно использовать для проверки предсказаний различных моделей, привлекаемых для объяснения происхождения рентгеновского излучения. Модели характеризуются такими параметрами, как температура электронов или напряженность магнитного поля. Интерпретация экспериментальных результатов лишь в редких случаях является однозначной, и поскольку к тому же излучение многих источников очень непостоянно, модели еще не имеют завершенной формы.

Яркий источник Sco X-1 интенсивно изучался и изучается. Его излучение почти никогда не остается одним и тем же от наблюдения к наблюдению: как в рентгеновском, так и в оптическом излучении присутствуют неупорядоченные долго- и короткопериодические изменения. Сообщалось также о внезапных изменениях рентгеновского потока. В дополнение к переменности светимости от наблюдения к наблюдению меняются параметры, описывающие форму спектра. Несмотря на эти непрерывные изменения, можно сделать некоторые обобщения. Оказывается, что если для построения спектра использовать данные, полученные из одного наблюдения, спектр описывается экспонентой, в показателе которой стоит отношение энергии фотонов к характеристической температуре или энергии. Характеристическая температура является удобным параметром тепловой модели, предсказывающей экспоненциальный спектр.

В этой модели предполагается, что излучающей областью рентгеновской звезды является горячий достаточно тонкий слой плазмы, т. е. разре-

женный ионизированный газ, состоящий в основном из водорода. Если температура достаточно высока, электроны и протоны быстро движутся, испытывая частые близкие столкновения, во время которых частицы отклоняются на большие углы. Эта комбинация условий достаточна для генерации рентгеновского излучения. Такой процесс называется тепловым тормозным излучением (*thermal bremsstrahlung*). В разреженной плазме вклад в рентгеновское излучение дают многие слои, и спектр имеет экспоненциальную форму. Более плотная плазма будет во внешних слоях поглощать и рассеивать рентгеновские лучи низких энергий, возмущая экспоненциальный спектр и приводя к повороту спектра вниз при очень низких энергиях. Нам не должен удивлять тот факт, что экспоненциальная аппроксимация в действительности не является точной. Маловероятно, что источник идеально тонкий или что вся излучающая область описывается одним значением температуры. Интересным является тот факт, что наблюдаемая характеристическая температура отличается от ее нормального значения  $5 \cdot 10^7$  °К. Предполагается, что в качестве первичного источника энергии, обеспечивающего тепловые процессы, могла бы быть гравитационная энергия, освобождающаяся при перетекании плазмы между компонентами тесной двойной системы.

Совершенно иной представляется ситуация в Крабовидной туманности. О рентгеновском источнике Тау X-1 известно, что он занимает значительную часть диффузного района туманности. От 10 до 15 % рентгеновского излучения идет непосредственно от пульсара — ядра остатка сверхновой. Наблюдаемый спектр излучения простирается от радио и оптических частот до высокоэнергетичного рентгеновского и  $\gamma$ -излучения и имеет степенной характер. Основной процесс — синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитном поле. Так же как и в тепловой модели, излучающие электроны быстро теряют энергию и для поддержания излучения необходим источник релятивистских электронов.

Похоже на то, что таким источником является пульсар. Одна из моделей пульсара, в которой предполагается, что пульсар — это быстро вращающаяся нейтронная звезда, достаточно хорошо объясняет частоту пульсаций и удовлетворяет энергетическим требованиям. Дело в том, что в быстром вращении нейтронной звезды запасены огромные количества энергии. Вращение пульсара постепенно замедляется, точно так же как из-за трения между кончиком оси и полом тормозится вращающийся волчок. Роль «трения» играет сложное взаимодействие пульсара с окружающей средой. В результате этого взаимодействия часть вращательной энергии передается электронам, уходящим от объекта и излучающим в магнитном поле. Наблюдения показывают, что период пульсара увеличивается со скоростью, достаточной для подпитки рентгеновского излучения за счет вращательной энергии.

Расстояния до рентгеновских объектов определяются непосредственно, если источник легко идентифицировать с оптическим или радиообъектом, расстояние до которого известно. Внегалактические источники и большинство выдающихся объектов в нашей Галактике является наиболее многообещающими кандидатами для такой интерпретации. Существуют также и другие методы определения расстояний, в том числе и расстояний до неидентифицированных объектов. Один из таких методов — определение расстояния по поглощению рентгеновского излучения в межзвездном газе. Если количество газа между источником и наблюдателем достаточно велико, в низкоэнергетичной части непрерывного спектра будет замечен завал. Конечно, для точного расчета влияния газа на спектр источника необходимо надежно определить плотность газа и его химический состав. Кроме того, нужно учитывать влияние вещества, окружающего источник. Таким спо-

собом были оценены расстояния до нескольких источников, расположенных главным образом в направлении галактического центра.

Резкие обрывы при низких энергиях были замечены в спектрах нескольких объектов. Один из наиболее замечательных среди них — *Cyg X-3*. Если в этом источнике, как и в  *Sco X-1*, излучает тонкий горячий слой плазмы, то завал в спектре при низких энергиях может быть приписан механизму поглощения, обсуждавшемуся выше.

Существует, однако, другая тепловая модель генерации рентгеновского излучения, в которой есть «встроенный» завал. Если плазма очень плотная, то она поглощает излучение всех частей объекта, кроме наружной оболочки. Объект излучает в этом случае примерно так, как теоретическое «абсолютно черное тело», и его можно описывать теми же формулами. Следовательно, спектр звезды будет в этом случае планковским. И чернотельная модель, и излучение тонкого слоя плазмы с поглощением одинаково хорошо описывают спектр *Cyg X-3* (рис. 7). Поэтому, для того чтобы сделать выбор, необходимо найти дополнительные параметры.

Среди многих объектов, у которых обнаружен завал спектра в сторону малых энергий, по крайней мере некоторые должны быть источниками с тонким слоем плазмы. Для них из характеристик завала можно определить число атомов водорода на отрезке луча зрения от Земли до источника. Распределение межзвездного водорода можно оценить, исходя из радиоастрономических данных (так, например, в направлении галактического центра на луче зрения набирается несколько раз по  $10^{22}$  атомов/см<sup>2</sup>). Имея эту информацию, мы сможем сделать заключение о расстояниях до рентгеновских источников.

Диффузное рентгеновское излучение — достаточно трудный объект исследований. В настоящее время из наблюдений следует, что в диапазоне энергий фотонов 1—100 кэв рентгеновский фон изотропен и зависимость интенсивности от энергии хорошо описывается степенным законом. Из изотропии фонового излучения следует его внегалактическое происхождение. Рассматривались два возможных варианта генерации фона. В первом предполагается, что фон образуется за счет излучения неразрешенных дискретных источников. Во втором принимается, что диффузное рентгеновское излучение — результат процессов, происходящих в межгалактической среде.

Было показано, что излучения всех галактик во Вселенной, если они не очень сильно отличаются от нашей, не хватает для объяснения наблюдаемой величины потока. Возможно, что основной вклад в фон дают галактики намного более яркие, чем наша собственная, однако в этом случае мы могли бы видеть значительные отклонения от гладкого распределения интенсивности рентгеновского фона по небу.

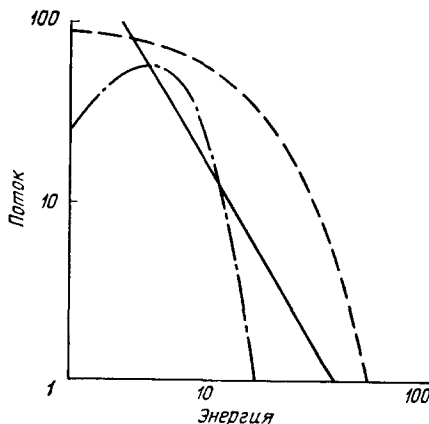


Рис. 7. Форма спектра излучения для различных механизмов.

Чернотельный спектр (штрих-пунктирная линия) образуется в источнике, окруженном плотной плазмой, а тепловой тормозной спектр (штриховая линия) — в горячей, оптически тонкой плазме. Сплошной линией показан синхротронный спектр. Спектр реальных рентгеновских источников может отличаться от этих кривых из-за поглощения в межзвездной среде.

Наблюдение вблизи низкоэнергетичного конца спектра (энергии фотонов меньше  $1 \text{ кэВ}$ ) может разрешить эти проблемы. При низких энергиях межзвездное поглощение становится существенным. Тщательное изучение данных заставляет предполагать, что не все диффузное рентгеновское излучение приходит извне. Часть его может образовываться внутри Галактики.

Один из механизмов генерации диффузного рентгеновского излучения — тепловое тормозное излучение внегалактических электронов — нуждается в существовании очень плотного и горячего межгалактического газа. Этого, однако, можно избежать, так как рентгеновское излучение может образовываться тормозным образом при взаимодействиях электронов с высокоэнергетичными протонами космических лучей. Основой другого предложенного механизма является обратный комптон-эффект — взаимодействие энергичных электронов с фотонами реликтового трехградусного излучения, заполняющего пространство. В этом случае требуется, чтобы концентрация релятивистских электронов в межгалактическом пространстве составляла около 1% галактической.

За исключением фокусирующего телескопа, ни одна из используемых или предложенных коллимирующих систем не может разрешить рентгеновские звезды. Размер рентгеновского объекта либо полностью определяется моделью (как в случае гипотезы нейтронной звезды для рентгеновского пульсара в Крабовидной туманности), либо должен быть выведен из наблюдений. Если, например, тепловая модель дает подходящий спектр, то можно установить поверхностную яркость источника, т. е. излучение единицы поверхности. При известном расстоянии до источника по потоку, принимаемому детектором, можно определить полный поток, излучаемый объектом, а значит, и площадь его поверхности. Отсюда непосредственно находится диаметр. Аналогичные аргументы справедливы для источников, в которых рентгеновское излучение образуется в результате магнитных эффектов.

Важную роль играет также переменность рентгеновских источников. Несмотря на то, что пульсар в Крабовидной туманности был впервые открыт на радиочастотах, а затем в видимой области, основную часть энергии он излучает в рентгеновском диапазоне. Гипотеза нейтронной звезды для этого пульсара подтверждается блестящим согласием между рентгеновскими, оптическими и радиоданными. Однако механизм преобразования вращательной энергии нейтронной звезды в пульсирующее электромагнитное излучение остается неясным. Синусоидальная переменность короткопериодического поведения Сеп X-3 (рис. 8) была интерпретирована как указание на то, что источник входит в состав затменной двойной. Наблюдения замечательно согласуются с этой простой моделью. Аргументы в пользу двойной системы были найдены также для источника Суг X-1.

Многое еще предстоит сделать для того, чтобы понять поведение вещества в условиях, характерных для рентгеновских звезд. Было бы чрезвычайно интересно воспроизвести «кусочек» рентгеновской звезды в лабораторных условиях. Подобный эксперимент готовится группой МИТ в связи с проблемой удержания плазмы в термоядерных реакторах. Большое количество подробной информации, ожидаемое от этого эксперимента, могло бы дать возможность построить более точные модели, с предсказаниями которых будут сравниваться данные о рентгеновских звездах.

Если в спектре рентгеновского объекта будут, наконец, обнаружены эмиссионные линии, то это даст возможность выяснить многое, помимо самого факта присутствия соответствующего элемента в составе вещества источника. Характеристическое рентгеновское излучение появляется, если из атома удален внутренний электрон, а освободившуюся вакансию занимает с излучением рентгеновского фотона другой электрон. Такая

ситуация может возникнуть при столкновении атома с одним из энергичных электронов в горячей плазме рентгеновского источника. При этом на нижний уровень переходит один из электронов, находящихся на верхней оболочке, или один из электронов плазмы. Изучение формы спектральных линий позволит получить важную информацию о плотности, частоте столкновений, температуре. Значения некоторых из этих параметров можно

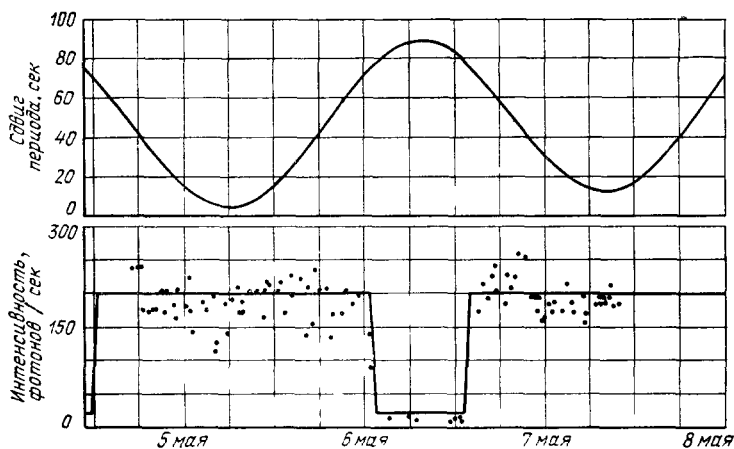


Рис. 8. CenX-3 — затменная двойная.

На нижнем рисунке приведена зависимость скорости счета от времени. Уменьшение потока происходит в то время, когда рентгеновский источник закрыт вторым компонентом. CenX-3 — пульсар с периодом 4,8<sup>1</sup>/<sub>4</sub> сек. На верхнем рисунке изображен сдвиг момента времени прихода импульсов по отношению к расчетному из-за движения рентгеновского источника на орбите.

определить, исследуя непрерывный спектр. Но данные, полученные из анализа непрерывного и дискретного спектров, не обязательно должны совпадать, поскольку за различные виды излучения могут быть ответственны различные области источника. Подобная неравновесная ситуация знакома, например, из рентгеновских исследований Солнца. В нескольких лабораториях проводятся сейчас работы по созданию приборов, которые во время будущих космических полетов проведут подробный спектральный анализ излучения рентгеновских звезд.

В настоящее время в полете находится орбитальная солнечная обсерватория (OSO-7). На ее борту группа MIT проводит эксперимент по обзору рентгеновского неба в пяти широких энергетических интервалах, охватывающих диапазон энергий от 1 до 60 кэв. На 1973 г. запланирован запуск второго из малых астрономических рентгеновских спутников (SAS-C) (рис. 9). Он разработан в Массачусетском технологическом институте и представляет собой многоцелевой космический аппарат. Задачей этого спутника является определение с очень высокой точностью положений источников, анализ их спектров и исследование переменности, а также изучение углового распределения диффузного рентгеновского излучения. Аналогичные эксперименты будут проведены в 1974 г. на английском спутнике (UK-5) и на голландском национальном спутнике (ANS). В середине или в конце 70-х годов появятся аппараты новых серий. Серия астрономической обсерватории высоких энергий будет самой большой и в научном отношении наиболее перспективной из беспилотных спутниковых программ. В первых двух полетах запланировано провести обзоры неба с помощью аппаратуры, которая уже была проверена на других спутниках. На третьем, наиболее сложном, этапе на орбиту будет поднят большой фокусирующий рентгеновский телескоп диаметром около одного метра с фокусным

расстоянием около семи метров. Его угловое разрешение сможет соперничать с угловым разрешением намного больших по размеру наземных телескопов. Будут проведены также серии одновременных наблюдений спектров, переменности и поляризации. Космический корабль сможет

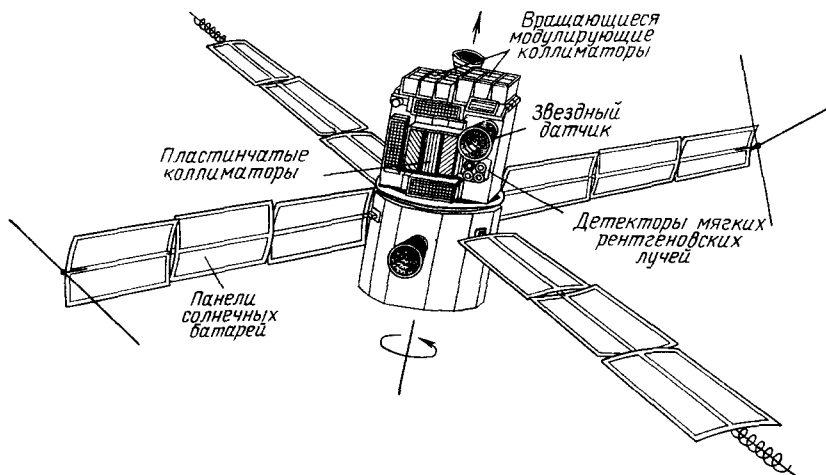


Рис. 9. Спутник SAS-C будет запущен в конце 1973 г. для более детального исследования рентгеновского неба.

На рисунке изображен спутник с развернутыми солнечными батареями. Три тубуса (eye stalks) защищают от Солнца звездные датчики ориентации. Четыре маленьких детектора, расположенных в средней части корабля, предназначены для исследования излучения галактического экватора в мягких рентгеновских лучах. Вращающиеся коллиматоры находятся в двух ящиках в верхней части и направлены вдоль оси вращения.

маневрировать, наблюдая рентгеновские источники, причем в случае необходимости за источником можно будет непрерывно следить в течение дней или недель. Эти эксперименты позволят ответить на многие сложные вопросы, касающиеся рентгеновских источников, и поставят новые проблемы, решить которые предстоит следующему поколению астрономов.

#### ЛИТЕРАТУРА

H. W. Schnopper, K. Kalata, *Astron. J.* 74, 854 (1969). — H. W. Schnopper, H. V. Bradt, S. Rappaport, E. Boughan, B. Burnett, R. Doxsey, W. Mayer, S. Watt, *Astrophys. J.* 161, L161 (1970). — A. Bunner, P. Coleman, W. Kraushaar, D. McCammon, *ibid.* 172, L67 (1972).

523.164.4(023)

#### ДОПОЛНЕНИЕ К СТАТЬЕ Г. ШНОППЕРА И ДЖ. ДЕЛВАЯ «РЕНТГЕНОВСКОЕ НЕБО»

Рентгеновская астрономия развивается сейчас исключительно быстрыми темпами. Достаточно сказать, что в период наибольшей активности «Uhu» сообщения о новых результатах появлялись практически ежедневно. Естественно поэтому, что в одной статье невозможно всесторонне осветить вопрос, тем более, что авторы акцентируют в основном внимание на экспериментальной стороне дела. В настоящем дополнении очень коротко рассказывается о наиболее интересном в рентгеновской астрономии последнего времени.

Открытие ScoX-1 явилось первым успехом рентгеновской астрономии, однако, несмотря на огромное количество полученной за 10 лет информации, ситуация остается очень неопределенной<sup>1</sup>. Рентгеновская светимость ScoX-1  $\sim 10^{36}$  эрг/сек при расстоя-

нии 200 *пс*. Оптические данные указывают на то, что расстояние может быть существенно больше. Можно предполагать, что рентгеновое излучение является тепловым с  $T = 5 \cdot 10^7$  °K и образуется в объеме с размерами  $10^8$ — $10^9$  см. Эта точка зрения подтверждается тем, что в интервале энергий фотонов 1—10 *кэв* рентгеновский спектр хорошо описывается экспоненциальной зависимостью от энергии, причем непрерывный спектр в оптическом диапазоне совместим с экстраполяцией теплового спектра из рентгеновского диапазона, а инфракрасные данные можно объяснить поглощением во внешних слоях источника за счет свободно-свободных переходов. Необъясненными, однако, остаются происхождение нетеплового хвоста рентгеновского спектра ( $E_X > 20$  *кэв*) и вся совокупность очень интересных наблюдательных данных, относящихся к переменности ScoX-1 и указывающих на вспышечный характер его активности.

CygX-1 — объект с непериодическим быстропеременным рентгеновским излучением. При сопоставлении радио- и рентгеновских наблюдений было обнаружено, что резкое падение (примерно в 3 раза) рентгеновской светимости весной 1971 г. сопровождалось увеличением радиосветимости. Это дало основание предполагать, что существует связь между рентгеновским и радиосточником. В дальнейшем радиоданные послужили базисом для оптической идентификации со звездой спектрального класса В01. Анализ спектральных линий показал, что оптическая звезда входит в состав двойной системы с периодом орбитального движения 5,6 дня и отношением масс компонентов 1,4. Следующая отсюда оценка нижнего предела масс рентгеновского компонента —  $8M_{\odot}$  — подтверждена в последнее время расчетами В. Н. Лютого, Р. А. Сюняева и А. М. Черепашука<sup>2</sup>. Размеры рентгеновского источника, как это вытекает из малого характерного времени переменности, не превышают размеров белого карлика. Поэтому большая величина массы является сильным аргументом в пользу того, что CygX-1 может быть сколлапсировавшим объектом («черной дырой»). В этом случае рентгеновое излучение может возникать в диске из аккрецируемого вещества и должны существовать флуктуации потока с характерными временами  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  сек<sup>3</sup>.

Наблюдательные проявления двух недавно открытых объектов — Cen X-3 и Her X-1 очень сходны. Оба они являются рентгеновскими пульсарами. Первый из них имеет период пульсаций 4,84 сек, второй — 1,24 сек. Оба объекта входят в состав двойных систем, что подтверждается затменным характером зависимости средней интенсивности от времени (промежуток между затмениями у Cen X-3 равен 2,08 дня, а у Her X-1 — 1,7 дня) и доплеровским сдвигом частот пульсаций при движении объекта вокруг общего центра масс двойной системы.

Период пульсаций Cen X-3 достаточно велик, поэтому рентгеновое излучение этого объекта можно объяснить, считая источник белым карликом<sup>4</sup>, однако такая интерпретация затруднительна в случае Her X-1, период которого почти в 4 раза меньше. Из-за сходства этих объектов можно предположить, что оба они являются вращающимися нейтронными звездами (их массы меньше, чем необходимо для коллапса). В частности, предложен конкретный механизм<sup>5</sup> образования узкой «ножевой» диаграммы направленности при аккреции на нейтронную звезду с сильным магнитным полем. При вращении звезды эта диаграмма «чиркает» по наблюдателю и он видит пульсирующее излучение. Интересно отметить также, что интенсивность рентгеновского излучения Her X-1 обнаруживает 35-дневное квазипериодическое изменение. Из этих 35 дней объект 12 дней «виден», а остальное время «молчит».

Очень интересным представляется весь комплекс проблем внегалактической рентгеновской астрономии: интенсивность, форма спектра и угловое распределение фонового излучения, избыток в мягкой части спектра рентгеновского фона (часть этого избытка имеет, возможно, галактическое происхождение), интерпретация излучения внегалактических дискретных источников, в частности, излучение скоплений галактик и проблема скрытой массы. В заключение отметим, что рентгеновскую астрономию нельзя рассматривать в отрыве от гамма-астрономии, первые шаги которой являются очень многообещающими.

*И. М. Хазан*

#### ЛИТЕРАТУРА К ДОПОЛНЕНИЮ

1. H. G u r s k y, Lectures presented at the Summer School of Theoretical Physics at Les Houches, France, August 1972.
2. В. Н. Л ю т ы й, Р. А. С ю н я е в, А. М. Ч е р е п а щ у к, Препринт ИПМ АН СССР № 61, Москва, 1972.
3. В. Ф. Ш в а р ц м а н, Канд. диссертация (ГАИШ, 1971).
4. G. R. B l u m e n t h a l, A. C a v a l i e r e, W. K. R o s e, W. H. T u c k e r, *Astrophys. J.* 173, 213 (1972).
5. Ю. Н. Г н е д и н, Р. А. С ю н я е в, Препринт ИПМ АН СССР № 69, Москва, 1972.