

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

523.16+537.531

## РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ \*)

Г. Фридман

Мощные процессы, происходящие в звездах, галактиках и космическом пространстве, сопровождаются излучением избытка энергии в форме электромагнитных волн с длинами от нескольких тысячных долей ангстрема (один ангстрем равен десятиллиардной доле метра) до сотен километ-

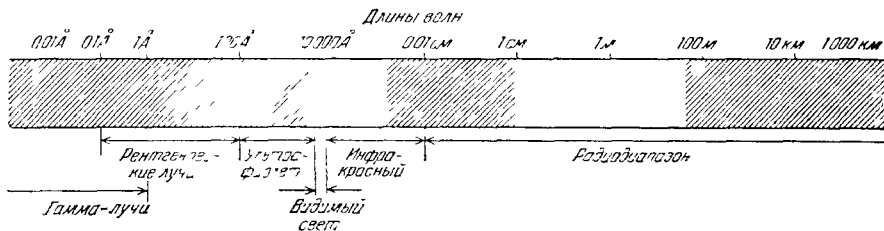


Рис. 1. Электромагнитный спектр простирается от коротковолновых высокочастотных  $\gamma$ -лучей (слева) до длинноволновых низкочастотных радиоволн (справа). Единица длины ангстрем равна одной десятиллиардной доле метра. Рентгеновская область спектра простирается от 0,1 до 100 Å. «Окна» в земной атмосфере, пропускающие электромагнитное излучение, показаны незаштрихованными участками.

ров \*\*). До последнего времени, однако, астрономы использовали в своих исследованиях лишь те длины волн, которые могут проникать через два главных «окна» в атмосфере — одно в оптической и второе в радиобласти спектра (рис. 1). Для того чтобы наблюдать полный спектр небесного излучения, приборы должны быть помещены над основной частью атмосферы. Для некоторых наблюдений могут быть использованы высотные шары-зонды, однако истинная, неискаженная атмосферным поглощением

\*) Herbert Friedman, X-Ray Astronomy, Scientific American 210(6), 36 (1964). В оригинале — резюме: «Приборы, установленные на ракете, зарегистрировали два мощных небесных источника рентгеновских лучей. Они могут быть чрезвычайно малые слабые звезды со сверхплотным ядром, состоящим в основном из нейтронов». Перевод и примечания С. П. Сыроватского.

\*\*) Фактически нижняя граница длины волны излучения, приходящего из космоса, целиком определяется максимальной энергией присутствующих во Вселенной частиц. Поскольку в составе космических лучей имеются частицы с энергией до  $10^{20}$  эв, то примерно такова же или на один-два порядка меньше максимальная энергия электромагнитных квантов (фотонов) во Вселенной. Такой энергии фотона отвечает длина волны излучения еще в сотни миллиардов раз меньше указанной автором нижней границы. В настоящее время предпринимаются попытки обнаружить такие, связанные с космическими лучами  $\gamma$ -фотоны. Верхняя граница длины волны определяется условиями распространения электромагнитных волн в межзвездной среде (слишком длинные электромагнитные волны не могут распространяться в ионизованном газе).

картина неба может быть получена лишь с помощью ракет или искусственных спутников.

Солнце было первым небесным объектом, излучение которого в рентгеновской области спектра (от 0,1 до 100 Å) интенсивно изучалось с помощью установленных на ракетах приборов. Астрофизики подсчитали количество рентгеновских лучей, ожидаемое от ряда других возможных источников, и сделали вывод, что рентгеновское излучение, приходящее в солнечную систему извне, вероятнее всего слишком слабо, чтобы быть обнаруженным в обычных ракетных измерениях. Пробные просмотры

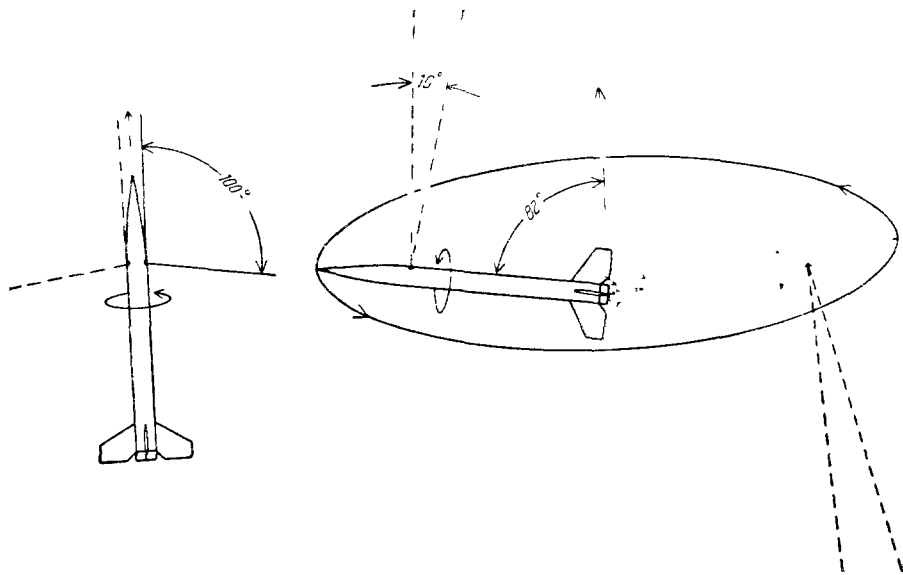


Рис. 2. Два метода ракетного сканирования.

Ракета слева стабилизирована за счет быстрого вращения так что ее ось направлена в зенит. Рентгеновский счетчик просматривает сектор с углом раствора 100°, простирающийся от зенита до горизонта. Ракета справа аналогична запущенной автором и его сотрудниками. Ей было преднамеренно задано медленное вращение с целью получить большой конус прецессии (рыскания) вокруг линии полета. В результате небесный круг просматриваемый при каждом обороте ракеты, медленно поворачивался таким образом, что за время полета было обследовано почти все небо над горизонтом. Поле зрения установленного на ракете счетчика имело 10° в поперечнике, что позволило осуществить более точные измерения, чем с помощью ракеты, показанной слева.

ночного неба, казалось бы, подтвердили это предсказание: в первых ракетных полетах не было обнаружено каких-либо новых источников рентгеновского излучения.

Позже, в июне 1962 г., при запуске оснащенной приборами ракеты на ракетном полигоне Уайт-Сэндс в Нью-Мексико был обнаружен чрезвычайно мощный источник рентгеновских лучей в общем направлении на галактический центр. Последующие полеты подтвердили существование этого источника и позволили локализовать еще несколько источников в других участках неба. Неожиданная интенсивность и характер рентгеновского излучения этих источников вызвали необходимость привлечения новых механизмов для объяснения возникновения этих рентгеновских лучей. В настоящее время представляется вероятным, что обнаруженное рентгеновское излучение возникает в сверхплотных «нейтронных звездах» — чрезвычайно малых по размерам, невидимых остатках коллапсировавших сверхновых звезд (см. прим. 1 при корректуре на стр. 519.—Перев.).

Мощный источник рентгеновских лучей вблизи центра Галактики был открыт Г. Гурским, Р. Джаккони и Ф. Паолини (Американская научно-

техническая корпорация) и Б. Росси (Массачузетский технологический институт). Открытие было сделано в ходе эксперимента, предназначенного для регистрации рентгеновского излучения, возникающего на Луне под действием солнечных рентгеновских лучей. Для этого эксперимента ракета типа «Аэроб» была оснащена двумя чувствительными к рентгеновскому излучению счетчиками Гейгера, каждый из которых имел поле зрения около 100 квадратных градусов (рис. 2). Стабилизация ракеты осуществлялась за счет быстрого вращения, причем ее ось была направлена в зенит. В ходе полета счетчики многократно просматривали большой круг на небесной сфере, который включал в себя Луну.

После того как записи, полученные от счетчиков, были проанализированы, они не дали указаний на существование рентгеновского излучения Луны, однако выявили широкий максимум интенсивности рентгеновского излучения вблизи направления на галактический центр. Длины волн этих рентгеновских лучей относятся к области вблизи трех ангстрем. Когда счетчики были нацелены в сторону от направления, соответствующего максимальной скорости счета, скорость счета спадала до малого, но постоянного «фонового» значения.

Тот же эксперимент был повторен дважды в течение следующего года Гурским и его сотрудниками. Ракета, запущенная в октябре 1962 г., не могла подтвердить существование обнаруженного ранее сильного источника излучения, так как в Нью-Мексико галактический центр осенью не виден. Однако были получены указания на существование двух более слабых источников, выделяющихся над уровнем постоянной «фоновой» скорости счета. Третий полет в июне 1963 г. был успешным в отношении регистрации сильного рентгеновского излучения из той же области, которая была обнаружена в июне 1962 г.

Тем временем мои сотрудники (С. Бойер, Е. Т. Байрэм и Т. А. Чабб) и я в Морской исследовательской лаборатории запустили еще одну ракету типа «Аэроб» с полигона Уайт-Сэндс в апреле 1963 г. (рис. 3). Наша ракета была оснащена рентгеновским счетчиком примерно в десять раз более чувствительным, чем использованные группой Гурского, и перекрывающим примерно тот же интервал длин волн — от одного до восьми ангстрем (рис. 4). Перед счетчиком был помещен шестиугольный сотовый коллиматор, который ограничивал поле зрения до десяти градусов дуги (рис. 5). Ракете было умышленно придано достаточно медленное вращение, чтобы обеспечить большой конус ее прецессии (рыскания) вокруг линии полета. В результате небесный круг, просматриваемый при каждом обороте ракеты, медленно поворачивался таким образом, что за время полета было обследовано почти все небо над горизонтом (рис. 7).

В это время галактический центр находился под горизонтом и не был виден с ракеты, однако в целом было обследовано около 58% небесной сферы. На этом большом участке неба детектор зарегистрировал один мощный рентгеновский источник в созвездии Скорпиона, примерно в 20° от направления на галактический центр. Более подробный анализ данных выявил второй источник, приблизительно в восемь раз менее яркий, совпадающий с Крабовидной туманностью. Не было обнаружено никаких других источников, выделяющихся на фоне общего излучения.

За время наблюдения область неба в направлении созвездия Скорпиона попадала в поле зрения счетчика восемь раз. Несмотря на сравнительно высокую скорость сканирования, рентгеновский сигнал был сильным и отчетливым при каждом прохождении. Карта этих восьми

прохождений была затем использована для построения контуров равной интенсивности, которые приблизительно представляются в виде концентрических окружностей с центром в точке небесной сферы с координатами 16 часов

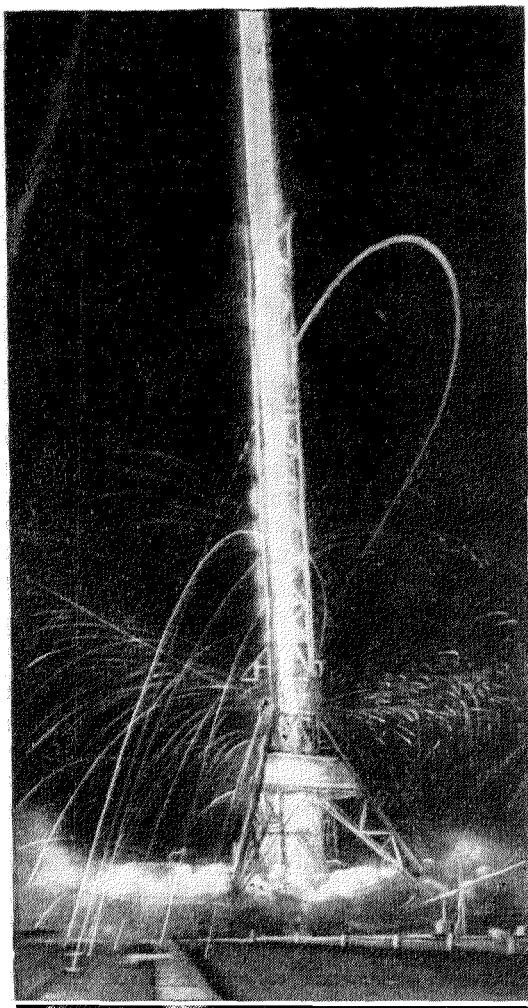


Рис. 3. Ракета «Аэробы» была запущена 29 апреля 1963 г. на ракетном полигоне Уайт-Сэндс в Нью-Мексико автором и его сотрудниками из Морской исследовательской лаборатории.

Ракета несла чувствительный рентгеновский счетчик, перекрывавший интервал длин волн от 1 до 8 Å (см. рис. 5). За время, в течение которого ракета находилась над земной атмосферой, было обнаружено два мощных небесных источника рентгеновских лучей — один в направлении созвездия Скорпиона и второй, совпадающий с Крабовидной туманностью.

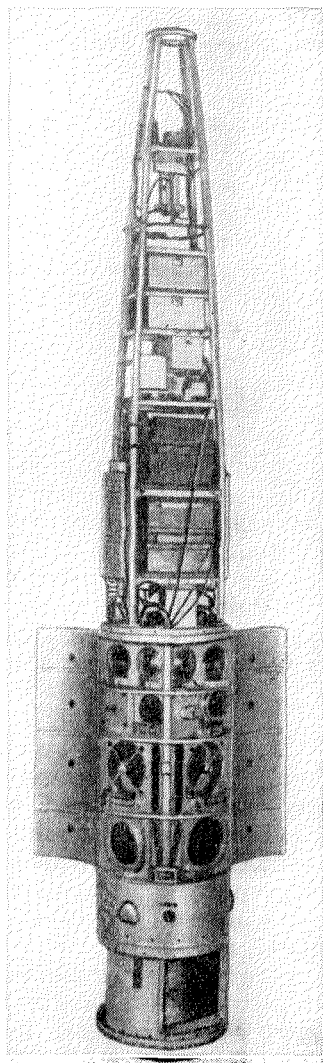


Рис. 4. Приборный отсек ракеты «Аэробы», с которого снята внешняя обшивка, чтобы показать содержимое. Рентгеновский счетчик находится за круглым окном внизу слева.

15 минут прямого восхождения и  $-15$  градусов склонения (рис. 5). Исползованный детектор не позволяет отличить точечный источник диффузного газового облака с размером до двух градусов в диамет

Интенсивность рентгеновского излучения источника в Скорпионе весьма значительна. Она сравнима с интенсивностью излучения спокойного Солнца в том же интервале длин волн. В то же время в окрестности

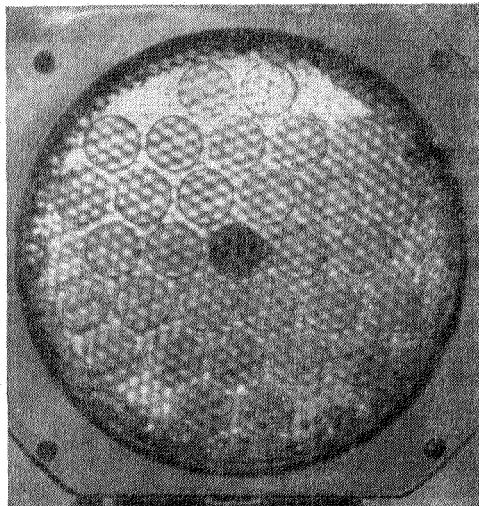
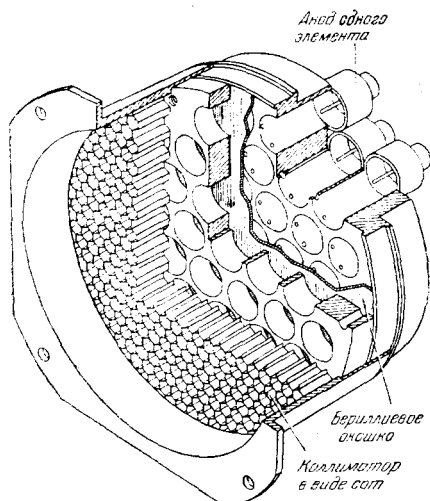


Рис. 5. Рентгеновский счетчик, использованный автором и сотрудниками, был примерно в десять раз более чувствительным, чем какой-либо из поднятых до этого. Его устройство показано в схематическом разрезе слева. Сотовый коллиматор перед счетчиком ограничивал поле зрения десятью дуговыми градусами.

найденного источника нет какой-либо видимой яркой звезды, туманности или источника радиоизлучения. Какой небесный объект мог бы дать столь мощное рентгеновское излучение и в то же время остаться невидимым в оптическом и радиодиапазонах?

Всем этим требованиям, по-видимому, удовлетворяет нейтронная звезда. Представление о нейтронных звездах было впервые сформулировано в 1934 г. Вальтером Бааде и Фрицем Цвики из Обсерватории Маунт-Вильсон (см. прим. 2 при корр. на стр. 519.—*Перев.*), а детали их структуры и эволюции были впоследствии теоретически разработаны Дж. Р. Оппенгеймером и Г. М. Волковым. Если не входить в детали, нейтронная звезда представляет собой то, что остается после коллапса большой звезды в результате исчерпания источников ее энергии. Нейтронная звезда имеет приблизительно такую же массу, как и Солнце, но сжатую в пределах сферы с диаметром около 10 километров (рис. 6). Ее сверхплотное ядро должно состоять почти целиком из нейтронов и быть примерно в 10—100 миллионов раз более плотным, чем ядра очень плотных звезд — белых карликов. Поверхностная температура нейтронной звезды составляла бы около десяти миллионов градусов Кельвина (градусов по шкале Цельсия, отсчитываемых от абсолютного нуля), а температура ее ядра достигала бы шести миллиардов градусов. Вследствие столь высоких температур нейтронная звезда должна излучать приблизительно в десять миллиардов раз больше энергии в форме рентгеновских лучей, чем в форме видимого света. Это соотношение как раз противоположно тому, которое имеет место для невозмущенного Солнца.

Недавно Хонг-И Чу из Годдардского института изучения космического пространства предпринял попытку развить модель нейтронной

звезды, с помощью которой можно было бы определить некоторые из характеристик ее излучения. Он предполагал выяснить, может ли быть обнаружено излучение такой звезды в ультрафиолетовой или рентгеновской областях спектра электромагнитных колебаний. Когда мы сравнили его результаты с нашими наблюдениями рентгеновских источников в Скорпионе и Крабовидной туманности, согласие оказалось удивительно близким. В начале этого года Чиу и А. Камерон из Годдардского института и Д. Мортон из Принстонского университета опубликовали более полные расчеты рентгеновского излучения, ожидаемого от нейтронных звезд, как источников такого излучения. Эти оценки еще лучше согласуются с нашими наблюдениями.

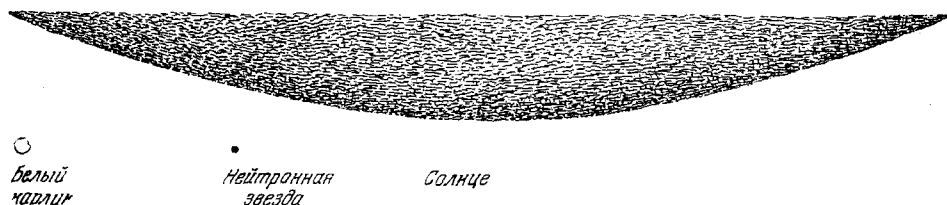


Рис. 6. Сравнительные размеры Солнца, звезды — белого карлика и нейтронной звезды.

Диаметр Солнца (в масштабе рисунка он составляет около одной трети метра) равен примерно полутора миллионам километров. Диаметр белого карлика составляет около 10 тысяч км, а диаметр нейтронной звезды примерно равен 10 км. В то же время все эти три звезды имеют приблизительно одну и ту же массу. Плотность в ядре Солнца достигает пятидесяти грамм в кубическом сантиметре, в ядре белого карлика — около одной тонны в кубическом сантиметре, а в ядре нейтронной звезды — около десяти миллионов тонн в кубическом сантиметре. В ядре белого карлика атомы лишены своих электронов, а голые ядра плотно упакованы. Нейтронная звезда состоит почти целиком из нейтронов, которые плотно прижаты друг к другу.

Чтобы понять, каким образом в нейтронной звезде могут возникать рентгеновские лучи, рассмотрим, как должна эволюционировать такая звезда. В звезде сила тяготения, направленной внутрь, противодействует внутреннее давление, обусловленное высокой центральной температурой звезды. Если этот важнейший баланс нарушается, звезда быстро переходит в новое положение равновесия путем сжатия или расширения. Даже в центре Солнца, где плотность в семь раз превышает плотность свинца, поведение газа не отклоняется от закона идеального газа (давление пропорционально плотности, умноженной на температуру). Однако внутри звезд — белых карликов, хотя температура и не намного выше, чем внутри Солнца, плотность часто достигает нескольких десятых долей тонны на кубический сантиметр, в результате чего закон идеального газа становится непригодным. Английский астрофизик Артур Стэнли Эддингтон в 1924 г. пришел к выводу, что высокая плотность белых карликов может быть объяснена только в предположении, что атомы в ядре звезды полностью освобождены от своих электронов, в результате чего оказывается возможной тесная упаковка голых атомных ядер. Сильное сжатие вещества создает условия так называемого электронного вырождения. Хотя атомные ядра сами по себе еще продолжают подчиняться закону идеального газа, вырожденные электроны теперь создают давление, во много раз большее давления газа атомных ядер, так что последнее можно считать пренебрежимо малым по сравнению с электронным давлением. Если же увеличить плотность белого карлика еще в сто тысяч раз, то даже нуклоны (т. е. нейтроны и протоны) окажутся сжатыми до такого состояния, когда они начинают соприкасаться. Подобные условия нуклонного вырождения должны осуществляться в нейтронной звезде.

Интенсивность рентгеновского излучения источника в Скорпионе весьма значительна. Она сравнима с интенсивностью излучения спокойного Солнца в том же интервале длин волн. В то же время в окрестности

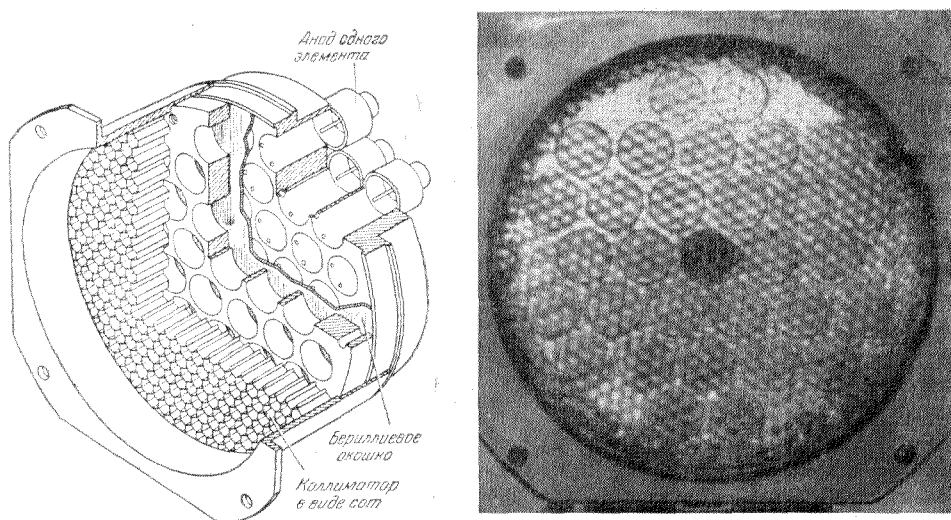


Рис. 5. Рентгеновский счетчик, использованный автором и сотрудниками, был примерно в десять раз более чувствительным, чем какой-либо из поднятых до этого. Его устройство показано в схематическом разрезе слева. Сотовый коллиматор перед счетчиком ограничивал поле зрения десятью дуговыми градусами.

найденного источника нет какой-либо видимой яркой звезды, туманности или источника радиоизлучения. Какой небесный объект мог бы дать столь мощное рентгеновское излучение и в то же время остаться невидимым в оптическом и радиодиапазонах?

Всем этим требованиям, по-видимому, удовлетворяет нейтронная звезда. Представление о нейтронных звездах было впервые сформулировано в 1934 г. Вальтером Бааде и Фрицем Цвики из Обсерватории Маунт-Вильсон (см. прим. 2 при корр. на стр. 519.—*Перев.*), а детали их структуры и эволюции были впоследствии теоретически разработаны Дж. Р. Оппенгеймером и Г. М. Волковым. Если не входить в детали, нейтронная звезда представляет собой то, что остается после коллапса большой звезды в результате исчерпания источников ее энергии. Нейтронная звезда имеет приблизительно такую же массу, как и Солнце, но сжатую в пределах сферы с диаметром около 10 километров (рис. 6). Ее сверхплотное ядро должно состоять почти целиком из нейтронов и быть примерно в 10—100 миллионов раз более плотным, чем ядра очень плотных звезд — белых карликов. Поверхностная температура нейтронной звезды составляла бы около десяти миллионов градусов Кельвина (градусов по шкале Цельсия, отсчитываемых от абсолютного нуля), а температура ее ядра достигала бы шести миллиардов градусов. Вследствие столь высоких температур нейтронная звезда должна излучать приблизительно в десять миллиардов раз больше энергии в форме рентгеновских лучей, чем в форме видимого света. Это соотношение как раз противоположно тому, которое имеет место для невозмущенного Солнца.

Недавно Хонг-И Чун из Годдардского института изучения космического пространства предпринял попытку развить модель нейтронной

В процессе эволюции звезды, подобной Солнцу, ядерное горючее постепенно расходуется. По мере истощения источника энергии звезда сжимается и ее плотность возрастает до тех пор, пока не наступает состояние электронного вырождения и появляется связанное с ним электронное давление. После этого скорость остывания становится все более медленной. В пределах возраста Галактики далеко не каждая звезда имеет достаточно времени для полного остывания в результате указанного процесса, но все же значительное число звезд достигает состояния белого карлика. Типичный белый карлик имеет плотность около одной тонны на кубический сантиметр и размер сравнимый с размером планеты Юпитер, причем имеется только тонкий излучающий слой вблизи поверхности, дающий белое тепловое излучение.

Если первоначальная масса звезды более чем в 1,44 раза превышает массу Солнца (значение, известное как чандрасекаровский предел), только что описанная постепенная эволюция звезды оказывается невозможной — звезда обречена закончить свою жизнь катастрофическим взрывом, известным как вспышка сверхновой. Вследствие того, что сжимающая звезду сила тяготения слишком велика и не может быть уравновешена давлением вырожденного электронного газа, температура ядра должна увеличиться, чтобы противодействовать тяготению. При различных значениях температуры воспламеняется различное ядерное горючее. В результате звезда в процессе старения проходит ряд последовательных стадий: сначала сгорает водород, превращаясь в гелий, затем из гелия образуется углерод, из углерода — кислород, неон и магний, из магния — сера и из серы — железо. Продолжительность различных стадий горения изменяется от десяти миллиардов лет (образование гелия из водорода) до одного года (образование железа из серы).

После того, как каждая из этих стадий подходит к концу, следует период гравитационного коллапса. Каждый из таких периодов сжатия может продолжаться от 100 до 10 000 лет, в зависимости от массы звезды. Энергия, выделяющаяся при каждом сжатии, повышает температуру ядра до тех пор, пока не начинается следующая стадия ядерного синтеза. Температура изменяется от начального значения около 10 миллионов градусов, соответствующего термоядерной реакции выгорания водорода, до значения около пяти миллиардов градусов, соответствующего превращению серы в железо. На нижней границе этого температурного диапазона излишек энергии рассеивается в форме квантов видимого света — фотонов. На верхней границе протоны превращаются в нейтроны, причем этот процесс сопровождается излучением нейтрино.

Если температура в железном ядре звезды превышает пять миллиардов градусов, электронно-позитронные пары образуются в таком количестве, что их плотность достигает нескольких килограммов в кубическом сантиметре. В этих условиях становится доминирующим новый и еще более быстрый процесс. Электроны и позитроны могут сталкиваться и аннигилировать с образованием нейтрино-антинейтринных пар. Согласно Чжу и Филипу Моррисону из Корнелльского университета звезда может потерять весь запас энергии посредством этого механизма не более чем за сутки. Чтобы компенсировать быструю потерю энергии в результате излучения нейтрино, звезда должна привлечь запас гравитационной энергии. Начинается сжатие звезды и соответствующий рост температуры ядра. Этот рост температуры в свою очередь вызывает увеличение скорости образования и излучения нейтрино и приводит к еще более быстрому сжатию звезды; коллапс звезды становится все ускоряющимся процессом. Когда температура ядра приближается к шести миллиардам градусов, происходит внезапное изменение условий равновесия. Железо и родственные



ему элементы превращаются в гелий с выделением избытка нейтронов. Средняя энергия связи 56 нуклонов для обычного изотопа железа равна 8,3 миллиона электрон-вольт ( $Mэв$ ) на один нуклон, а для 13 ядер гелия и четырех нейтронов, образующихся при расщеплении ядра железа, — всего лишь 6,6  $Mэв$  на нуклон. Таким образом, процесс расщепления требует притока энергии 2,2  $Mэв$  на нуклон. Единственным доступным источником энергии, который может поддерживать эту реакцию, является тяготение в звезде. Вся энергия, использованная звездой при превращении водорода в железо, должна быть теперь возвращена, чтобы железо снова превратилось в гелий. Звезда сопротивляется этому быстрому процессу охлаждения посредством дальнейшего сжатия. Выделение гравитационной энергии при этом не сопровождается повышением температуры; в результате происходит катастрофическое спадание звезды. Когда начинается такой полный коллапс, ядро уже сжато до плотности от 10 до 100 тонн на кубический сантиметр. Спадание звезды происходит за время, требуемое для свободного падения — около одной секунды.

При коллапсе ядра давление, удерживающее внешние слои звезды, внезапно исчезает. Вещество этих слоев падает внутрь, причем почти так же быстро, как спадается само ядро, а кинетическая энергия такого падения превращается в тепло. Возникающее повышение температуры приводит к увеличению скорости ядерного горения легких элементов во внешних слоях. При трех миллиардах градусов кислородная зона вблизи поверхности полностью выгорает за время около одной секунды, в результате чего возникает вспышка сверхновой. Если масса вещества в кислородной зоне равна одной солнечной массе, выделяющаяся за одну секунду энергия сравнима с энергией, излучаемой Солнцем за миллиард лет. Взрывающаяся сверхновая в течение двух или трех недель светит как 200 миллионов солнц.

Что происходит со спавшимся ядром? Когда плотность сжимающегося вещества превышает 10 тонн в кубическом сантиметре, а температура достигает шести миллиардов градусов, протоны, соединяясь с электронами, очень быстро превращаются в нейтроны, так что ядро уже в процессе коллапса становится нейтронным. Трудно точно определить, когда ядро достигает стабильной конфигурации. Существующие оценки дают в качестве предела стабильной плотности значение около 10 миллионов тонн в кубическом сантиметре при температуре ядра около шести миллиардов градусов. При таких высоких давлениях и температуре излучение нейтрино обеспечивает столь быструю потерю энергии, что сжатие ядра не успевает смениться расширением. В результате образуется сверхплотная нейтронная звезда. (Приведенная картина образования нейтронной звезды дает, разумеется, лишь самое общее представление об этом процессе, многие детали в настоящее время еще только выясняются.)

Чиу и Мортон исследовали характер и интенсивность излучения, которое может испускаться поверхностью нейтронной звезды. Так как вырожденное вещество очень хорошо проводит тепло, температура в пределах ядра должна быть практически постоянной. Ядро окружено полукилометровой оболочкой, в которой электроны вырождены, но в остальном вещество находится в нормальном состоянии, подобно тому как это имеет место в ядре белого карлика. В пределах нескольких метров вблизи поверхности эта оболочка состоит из нормального, невырожденного вещества, излучающего энергию непосредственно в окружающее пространство. Весь перепад температуры от ядра к поверхности происходит практически целиком в этом тонком приповерхностном слое, температура которого

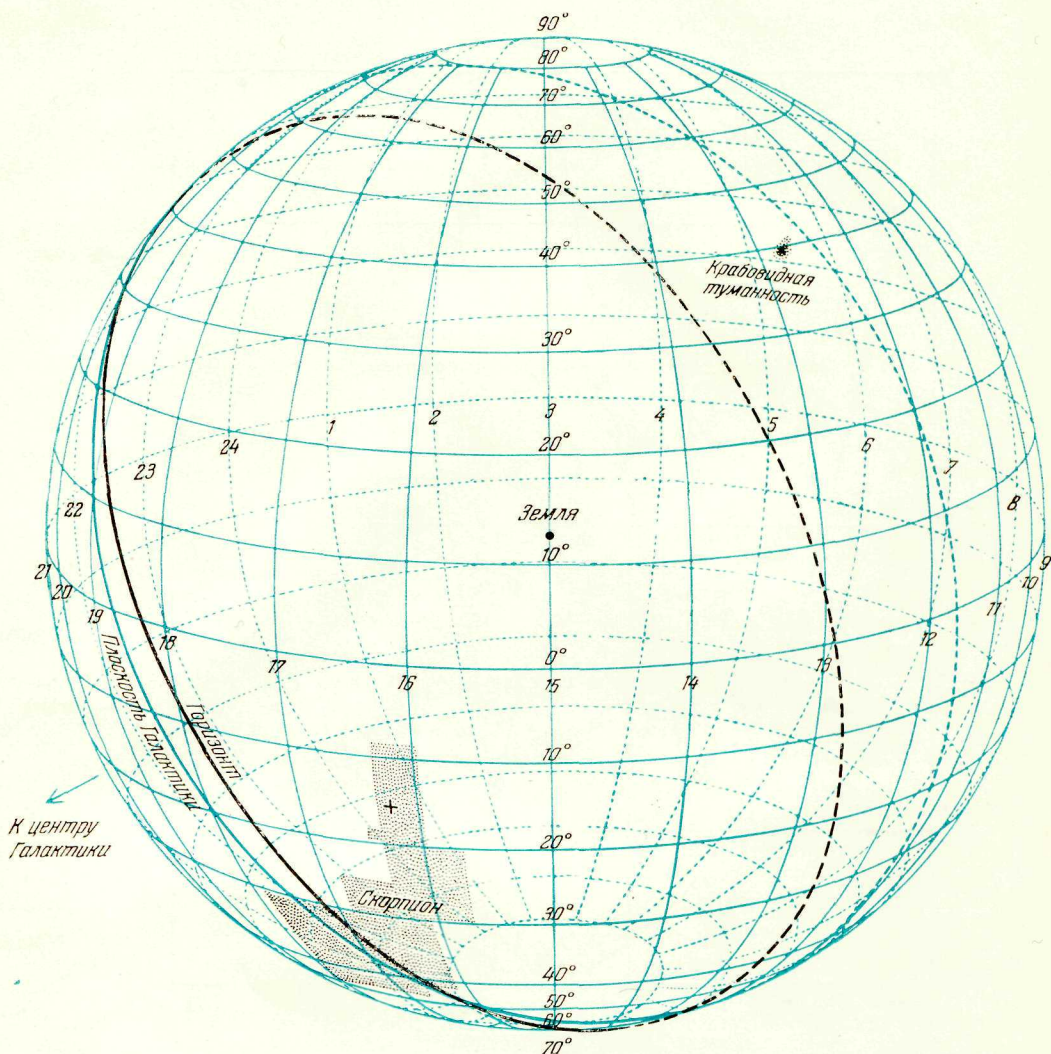


Рис. 7. Почти 60 процентов небесной сферы (площадь справа от черной окружности) было обследовано рентгеновским счетчиком автора за время ракетного полета в апреле 1963 г.

Наиболее яркий из наблюдавшихся рентгеновских источников обозначен малым крестиком в созвездии Скорпиона (большая площадь с серой штриховкой). Второй источник, приблизительно в восемь раз менее яркий, обнаружен в окрестности Крабовидной туманности (серое пятнышко на обратной стороне сферы). Во время полета галактический центр находился под горизонтом и был не виден с ракеты. Числа на оси рисунка указывают склонение (соответствующее географической широте) в градусах; числа вокруг центра рисунка обозначают прямое восхождение (соответствующее долготу) в часах. Увеличенное изображение области вокруг источника в созвездии Скорпиона показано на следующем рисунке.



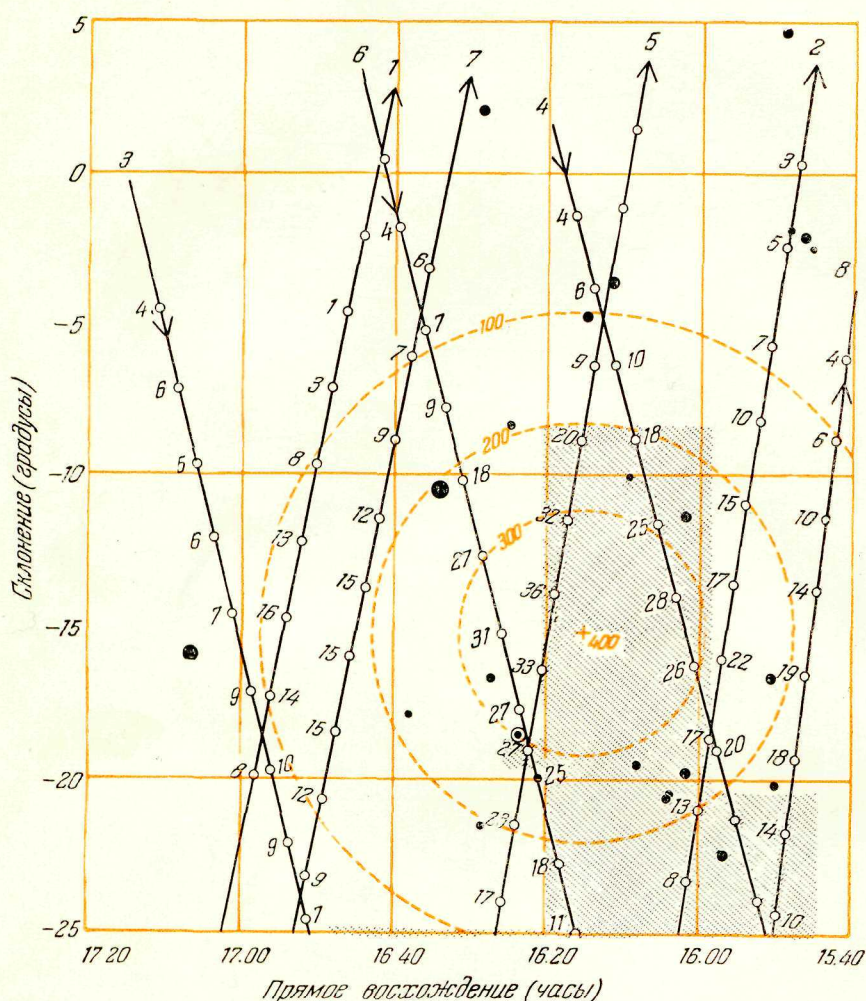


Рис. 8. Рентгеновское излучение источника в созвездии Скорпиона, видимому, приходит из области, в которой не видно какой-либо яркой звезды, туманности или радиоисточника.

Источник обозначен малым крестиком в центре трех concentрических окружностей. Жирными пронумерованными стрелками показаны сечения, просмотренные рентгеновским счетчиком при его восьмикратном прохождении через эту область в созвездии Скорпиона. Светлые цифры возле малых светлых кружков вдоль каждой траектории показывают число отсчетов, полученных за 0,09 секунды. Окружности приблизительно изображают контуры равной интенсивности, соответствующие 100, 200 и 300 отсчетам за секунду. Оцененное значение 400 отсчетов в секунду для центральной точки получено с помощью экстраполяции. Использованный детектор не мог отличить точечный источник от протяженного газового облака с диаметром до двух угловых градусов. Звезды обозначены жирными точками, размер которых соответствует их звездной величине. Кружок с жирной точкой внутри обозначает источник радиоизлучения. Площадь с серой штриховкой представляет менее половины полной протяженности созвездия Скорпиона.

в модели Чиу заключена в пределах от одного до десяти миллионов градусов.

Модель Мортон приводит к несколько более высокой поверхностной температуре — приблизительно от четырех до 16 миллионов градусов. Рентгеновское излучение, возникающее в атмосфере нейтронной звезды при таких температурах, имело бы интенсивность, измеренную для источника в Скорпионе, в том случае, если звезда находится на расстоянии от 300 до 4000 световых лет. Нейтронная звезда, находящаяся на таком расстоянии, не могла бы быть обнаружена ни одним из существующих оптических телескопов, как и телескопами, еще только задуманными для орбитальной астрономической обсерватории.

Если рентгеновский источник в Скорпионе обнаруживается только благодаря его рентгеновскому излучению, то Крабовидная туманность представляет собой источник, хорошо наблюдаемый в широком интервале длин волн. Крабовидная туманность является третьим из наиболее мощных источников радиоволн на небе \*). Поперечник видимой туманности составляет около шести световых лет; туманность расширяется со скоростью, равной примерно тысяче километров в секунду. Эта туманность является остатком сильной вспышки сверхновой, наблюдавшейся китайскими и японскими астрономами в 1054 г. н. э., когда она внезапно появилась на небе и временно имела яркость, превосходящую яркость Венеры. В туманности никогда не наблюдался какой-либо видимый остаток первоначальной звезды.

Мортон вычислил, что нейтронная звезда в центре Крабовидной туманности должна иметь поверхностную температуру в 7,6 миллиона градусов, чтобы обеспечить наблюдаемую интенсивность рентгеновских лучей. Видимая звездная величина такой звезды была бы равна 28, что много ниже предела чувствительности современных телескопов.

Хотя данные наших наблюдений рентгеновского излучения прекрасно согласуются с предсказаниями теории нейтронных звезд, еще нельзя отвергнуть и другие гипотетические механизмы генерации рентгеновского излучения неба. Возможно, что наблюдаемое излучение возникает в результате спирального движения электронов высокой энергии в сильных магнитных полях. Такое излучение называется синхротронным излучением (рис. 9, а). Поляризация света в перепутанных волокнах Крабовидной туманности является весьма характерной для синхротронного излучения. Вопрос о том, возникает ли рентгеновское излучение Крабовидной туманности в тепловом источнике, каким является нейтронная звезда, или оно является синхротронным излучением, может быть выяснен в конечном счете путем более тщательных спектральных измерений.

Если мы будем считать оба источника рентгеновских лучей — в созвездии Скорпиона и в Крабовидной туманности — нейтронными звездами, нужно будет объяснить, почему эти два источника так сильно отличаются в других диапазонах длин волн (см. прим. 3 при корр. на стр. 519. — *Перев.*). В частности, почему источник в созвездии Скорпиона не дает радиоизлучения и не имеет видимой туманности? Мортон предположил, что поскольку сверхновая, образовавшая Крабовидную туманность, вспыхнула в центральной плоскости Галактики, галактическое магнитное поле было достаточно сильным, чтобы затормозить расширяющийся газ и образовать видимую туманность. Наоборот, источник в Скорпионе

\*) Более яркими в радиодиапазоне являются лишь Кассиопея-А — остаток сверхновой второго типа и радиогалактика Лебедь-А, тогда как менее ярких радиоисточников известно около десяти тысяч.

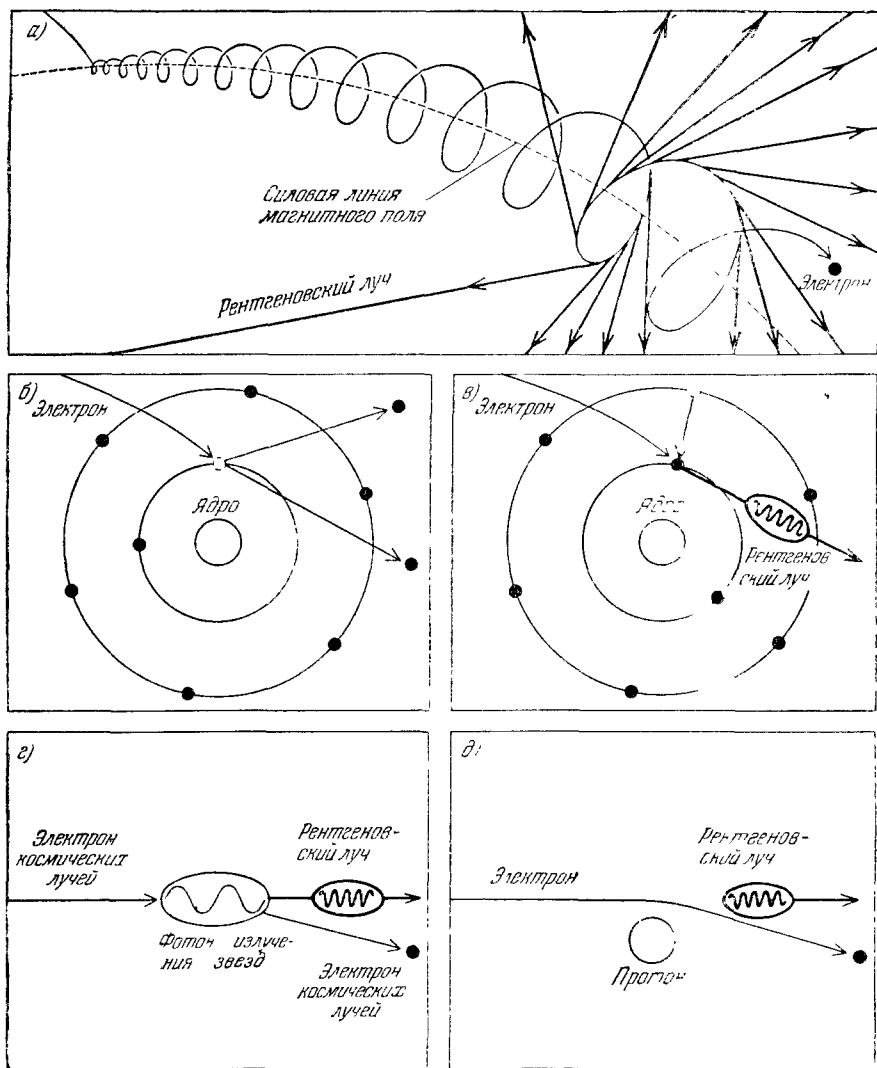


Рис. 9. Гипотетические механизмы возникновения небесного рентгеновского излучения, которые могут конкурировать с гипотезой нейтронных звезд.

Электрон высокой энергии, быстро вращающийся в сильном магнитном поле (а) разбрасывает как брызги рентгеновские лучи во всех направлениях (показаны только рентгеновские лучи, испускаемые за один оборот электрона). Этот процесс, известный как синхротронное излучение, может иметь место практически в любом горячем космическом газе. Рентгеновские лучи могут возникать также в газе вблизи центра Галактики в результате процесса (б), который начинается с ионизации внутренней оболочки какого-либо атома, например атома железа, протонами или электронами, выбрасываемыми старыми звездами в области вблизи галактического центра. Рентгеновский квант образуется при заполнении вакансии на внутренней оболочке электроном, захватываемым извне атома или с внешней оболочки атома (в). (В действительности, может существовать значительно больше оболочек, чем две показанные на этом рисунке.) Вероятным источником слабого фоновое рентгеновского излучения, наблюдавшегося во всех полетах, может служить рассеяние электронов, входящих в состав космических лучей, на фотонах звездного света в разреженном галактическом газе (г). Космические электроны, образующиеся в процессе распада нейтронов, также могли бы генерировать рентгеновские лучи при столкновениях с протонами в горячем межгалактическом газе (д). Рентгеновские кванты на рисунках в) — д) представлены как крошечные пакеты энергии, которые включают некоторые характеристики как частиц, так и волн.

находится в 20 градусах над галактической плоскостью и мог вспыхнуть в области, где магнитное поле слишком слабо, чтобы сдерживать туманность. Во всяком случае, статистика вспышек сверхновых основывается еще на слишком ограниченном материале, чтобы можно было сделать четкие выводы об их виде и поведении.

Имеются ли какие-либо указания на появление вспышки сверхновой в непосредственной окрестности рентгеновского источника в созвездии Скорпиона? Восточные летописи содержат несколько указаний на вспышки ярких новых или сверхновых в этом созвездии. Мортон указывает четыре возможные вспышки сверхновых, упоминаемых в китайских и японских хрониках, которые произошли достаточно близко к наблюдаемому источнику рентгеновских лучей. Особенно интригуют средневековые арабские упоминания — в 827 г. Али и Джафар Бен Мохаммед Альбумазар из Вавилона сообщили о новой звезде в созвездии Скорпиона, которая имела яркость Луны в одну из четвертей и была видна в течение четырех месяцев. Этот объект, однако, мог быть и кометой.

Допуская, что частота вспышек сверхновых в нашей Галактике равна одной вспышке в столетие, мы получим, что в настоящее время во всей Галактике должно существовать около 100 миллионов нейтронных звезд. Из них лишь немногие могли образоваться в течение последней тысячи лет и, следовательно, иметь достаточно высокую поверхностную температуру для того, чтобы излучать заметное количество рентгеновских лучей. Излучение этих источников может быть зарегистрировано на расстояниях до 3000 световых лет. Даже если между Землей и нейтронной звездой находится большое пылевое облако, оно поглотит лишь очень малую долю рентгеновских лучей с длиной волны короче 10 ангстрем. Таким образом, с помощью усовершенствованной техники можно надеяться обнаружить до 50 нейтронных звезд в нашей части Галактики.

Наблюдения Гурского и его сотрудников указывают на возможность того, что галактический центр сам является источником сильного рентгеновского излучения. В соответствии с гипотезой японских астрофизиков С. Хайакавы и М. Мацуоки, рентгеновские лучи могли бы возникать в газовых облаках в центральной части Галактики под действием протонов и ядер гелия, входящих в состав космических лучей. Возникающее таким образом рентгеновское излучение может быть достаточно интенсивным с точки зрения возможности его обнаружения существующими ракетными приборами.

Альтернативный механизм генерации рентгеновских лучей в области галактического центра был предложен Р. Гоулдом и Дж. Бербиджем из Калифорнийского университета в Сан-Диего. Они предположили, что в этой области различные элементы, включая алюминий и железо, могут переходить в пониженное состояние путем потерп электрона с одной из внутренних оболочек. В рассматриваемом случае ионизация вызывается потоком протонов и электронов, испускаемых старыми звездами в окрестности галактического центра, а не частицами, входящими в состав космических лучей. Заполнение вакансии на внутренней оболочке свободным (внеатомным) электроном или электроном с внешней оболочки сопровождается выделением энергии в форме рентгеновского кванта (рис. 9, б и в). Интенсивность таких рентгеновских лучей также находится в пределах возможности обнаружения.

Происхождение слабого, но постоянного фона рентгеновского излучения, обнаруживаемого во всех полетах, объяснить трудно. Хотя это излучение и может возникать в земной атмосфере, все же имеются

существенные доводы в пользу его внеземной природы. Так, Гоулд и Бербидж допускают даже возможность его возникновения за пределами Галактики. Они вычислили рентгеновское излучение от гипотетического распределения нейтронных звезд во всех внешних галактиках в совокупности; полная интенсивность оказалась сравнимой с наблюдаемым фоном рентгеновского излучения.

Возможно также, что равномерный фон обусловлен синхротронным излучением, возникающим при движении электронов, входящих в состав космических лучей, в слабом магнитном поле галактического гало (галактической короны). Галактическое гало представляет собой сферу, заполненную сильно разреженным газом и окружающую галактический диск. Однако расчеты показывают, что интенсивность образующегося таким образом рентгеновского излучения была бы в миллион раз слабее наблюдаемого рентгеновского фона для направления на полюс Галактики и в 10 000 раз слабее для направления на галактический центр \*).

Значительно более вероятным источником слабого фона рентгеновских лучей является рассеяние космических релятивистских электронов на фотонах звездного света (рис. 9, 2). При столкновении электрона, входящего в состав космических лучей, и светового фотона последнему передается около одной сотой процента энергии электрона \*\*); при этом фотон превращается в рентгеновский луч. Ф. Моррисон и Дж. Фелтон вычислили ожидаемую от галактического гало интенсивность таких рентгеновских лучей; полученное ими значение от 100 до 1000 раз меньше интенсивности, измеренной в ракетных экспериментах. Если бы, однако, все пространство было заполнено космическими релятивистскими электронами с концентрацией, составляющей примерно один процент от их концентрации в гало, вычисленная интенсивность рентгеновских лучей в точности совпадала бы с наблюдаемой интенсивностью рентгеновского фона.

Постоянный фон рентгеновского излучения может быть привлечен для проверки некоторых из существующих космологических теорий. Например, в особенности сложной проблемой оказывается необходимость одновременного объяснения как расширения Вселенной, так и конденсации Галактик, если тяготение является единственной рассматриваемой силой: энергия, необходимая для поддержания общего расширения вопреки силам тяготения, препятствовала бы локальному гравитационному сжатию. Это обстоятельство ставит нас в сомнительное положение, заставляя постулировать не очень ясные флуктуационные явления, которые послужили бы началом конденсации. Чтобы избежать этой дилеммы, Томас Голд и Фред Хойл из Калифорнийского технологического института предположили, что галактики конденсируются в результате локального охлаждения в горячем межгалактическом газе, который оказывает давление на поверхность более холодного участка. После того, как газ в сжатой

\*) Речь идет о расчетах, в которых предполагается, что релятивистские электроны в Галактике являются вторичными, т. е. возникают при соударениях космических лучей с ядрами межзвездного газа. Таких электронов с требуемыми для рассматриваемого процесса энергиями оказывается слишком мало. Если же допустить, что пока ничему не противоречит присутствие в Галактике большого количества первичных, т. е. возникающих независимо от космических лучей, электронов с высокими энергиями, их синхротронное излучение может оказаться достаточным для объяснения наблюдаемого рентгеновского фона. Заметим также, что синхротронное излучение чаще называют магнитотормозным; последний термин лучше отражает природу явления.

\*\*) Передаваемая фотону энергия пропорциональна квадрату начальной энергии электрона; в тексте имеются в виду электроны с энергией в несколько десятков  $Mev$  (миллионов электрон-вольт). В настоящее время нет каких-либо надежных данных о количестве таких электронов в Галактике. Приведенные Моррисоном и Фелтоном значения (см. конец абзаца в тексте) получены путем экстраполяции данных, относящихся к электронам с энергиями в несколько миллиардов электрон-вольт.

области достигает некоторой критической плотности, вступают в игру силы тяготения и завершают процесс конденсации.

Голд и Хойл подсчитали, что температура межгалактического газа, необходимая для осуществления первой стадии этого процесса, должна составлять около миллиарда градусов. В одной из моделей стационарной Вселенной, допускающей, что происходит непрерывное рождение вещества в форме нейтронов (а не протонов), такая температура может поддерживаться в результате распада нейтронов на протоны и электроны. Эта модель, которую называют гипотезой «горячей Вселенной», привлекательна тем, что требуемая тепловая энергия межгалактического газа сравнима с наблюдаемой энергией космических лучей\*); тем самым обеспечивается надлежащий источник энергии для ускорения частиц космических лучей до их огромных энергий.

Электроны с большой энергией, образующиеся в горячем межгалактическом газе в процессе распада нейтронов, испускают рентгеновские лучи при столкновениях с межгалактическими протонами (рис. 9, *д*). Обусловленная этим процессом интенсивность рентгеновских лучей должна быть, однако, приблизительно в 20 раз выше, чем наблюдаемый рентгеновский фон. Таким образом, измеренная интенсивность по-видимому, свидетельствует о том, что температура «горячей» Вселенной не может превышать 10 миллионов градусов вместо принятого Голдом и Хойлем миллиарда градусов.

Методы рентгеновской астрономии могут быть использованы также для определения плотности и распределения водородного газа в пределах нашей Галактики. Прозрачность межзвездного газа увеличивается с уменьшением длины волны излучения, проходящего через этот газ. Поэтому граничная длина волны, для которой излучение проходит через газ еще без поглощения, характеризует количество газа вдоль луча зрения. Точное положение этой границы в спектре излучения зависит, конечно, от интенсивности наблюдаемого источника. Для источников рентгеновского излучения может быть получено довольно хорошее разрешение по длинам волн, поэтому анализ ракетных данных дает возможность с хорошей точностью определить плотность межзвездного газа в различных направлениях (рис. 10).

Указанный метод может быть использован также для выяснения природы источников наблюдаемого рентгеновского фона, если последний действительно имеет внегалактическое происхождение. Интенсивность фоновое излучения на различных длинах волн в рентгеновском диапазоне должна зависеть от того, возникает это излучение в галактических гало и межгалактическом пространстве или оно связано с центральными частями внешних галактик. Наличие максимума для длин волн вблизи 50 Å свидетельствовало бы о возникновении этого излучения в галактических гало или межгалактическом пространстве: излучение из центральных частей галактик вплоть до длин волн около 15 Å поглощалось бы газом в этих галактиках еще до выхода в нашем направлении.

Из приведенного обзора ясно, что уже первые, грубые результаты рентгеновской астрономии дали астрофизикам много новой информации. Едва ли можно представить себе более захватывающий дебют новой ракетной астрономии, чем открытие нейтронных звезд. Наиболее существенной

\*) При этом предполагается, что космические лучи заполняют равномерно всю Вселенную с концентрацией, равной их наблюдаемой концентрации у Земли. Для такого предположения, однако, нет никаких оснований: в среднем во Вселенной концентрация космических лучей, вероятнее всего, во много раз меньше, чем в Галактике.



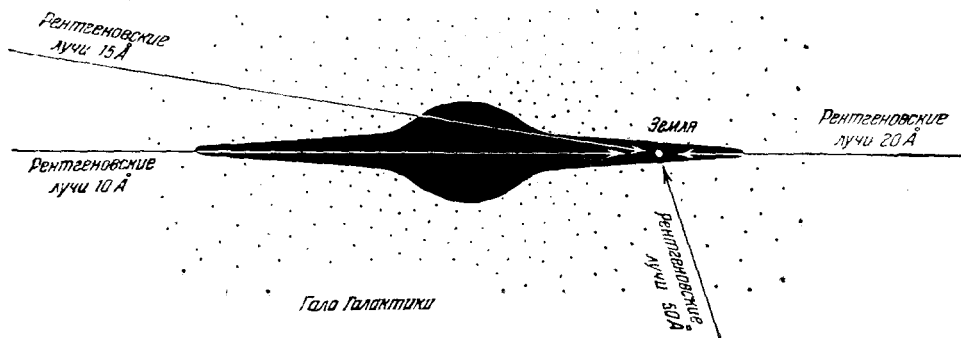


Рис. 10. Прозрачность Галактики для рентгеновских лучей, приходящих на Землю от внегалактических источников, зависит от направления.

Только рентгеновские лучи с длиной волны менее  $10 \text{ Å}$  могут пройти к Земле от источника, находящегося за отдаленным краем галактического диска. Для направлений вне галактического диска поглощение значительно меньше и могут наблюдаться рентгеновские лучи с длинами волн вплоть до  $50 \text{ Å}$ . Вследствие спиральной структуры Галактики поглощение зависит также от направления в пределах галактической плоскости. Галактическое гало является относительно прозрачным.

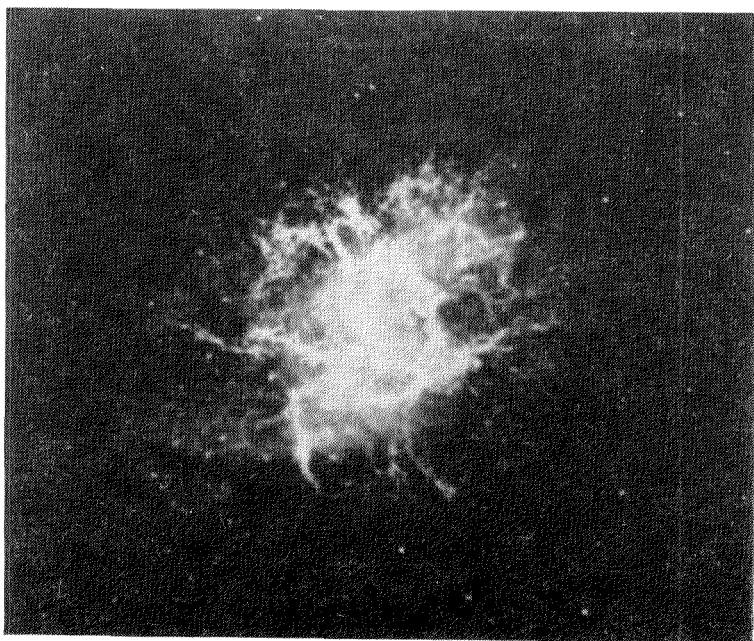


Рис. 11. Крабовидная туманность в созвездии Тельца является вторым по мощности источником рентгеновского излучения на небе.

Пока еще не ясно, возникают эти рентгеновские лучи в тепловом источнике типа нейтронной звезды или в результате синхротронного излучения расширяющегося газа. Эта туманность представляет собой остаток грандиозной вспышки сверхновой звезды, наблюдавшейся восточными астрономами в 1054 г. н. э. Приведенная фотография была сделана в красных лучах с помощью 200-дюймового телескопа в обсерватории Маунт-Паломар

задачей на ближайшее будущее остается повторение и проверка первых наблюдений. Легко осуществимо значительное увеличение чувствительности приборов, что может привести к обнаружению многих новых источников. Уже созданы лабораторные варианты рентгеновских телескопов с хорошей фокусировкой, обеспечивающие угловое разрешение, не меньшее 20 секунд дуги. Решающим моментом для проверки гипотезы о нейтронных звездах, как источниках наблюдаемого рентгеновского излучения, является доказательство того, что источники в созвездии Скорпиона и в Крабовидной туманности (рис. 11) действительно точечные. Потребуется, однако, несколько лет, прежде чем установленный на спутнике рентгеновский телескоп сможет обследовать с достаточно хорошим разрешением большие участки неба, чтобы выделить нейтронные звезды.

Тем временем, возможно, удастся добиться успеха с помощью метода лунного затмения источника; этот метод был весьма удачно использован для измерения положений и размеров недавно обнаруженных квазизвездных радиоисточников (см. Дж. Гринстейн, *Сверхзвезды*, УФН 63 (3), 549 (1964)). Например, затмение Луной всей Крабовидной туманности продолжается около пяти минут, т. е. как раз то время, в течение которого ракета «Аэроб» находится над поглощающей рентгеновские лучи атмосферой. В последнее время сконструирована стабилизированная ракета типа «Аэроб», которая может следить за избранным объектом на небе с точностью не менее двух дуговых градусов. Можно запустить такую ракету, нацеленную в направлении Крабовидной туманности, как раз перед началом затмения этой туманности Луной. Если интенсивность рентгеновского излучения будет уменьшаться по мере затмения пропорционально площади туманности, закрытой Луной, это будет указанием на то, что источником служит протяженная область, дающая синхротронное излучение. В том же случае, если источник исчезнет быстро, на протяжении одной или двух дуговых секунд, мы получим веский аргумент в пользу того, что источником рентгеновского излучения служит нейтронная звезда \*). Мы будем иметь возможность осуществить этот эксперимент в следующем месяце и надеемся, что ракета и приборы будут к этому времени готовы. Если, к сожалению, это время будет упущено, придется ожидать следующего затмения Крабовидной туманности Луной, которое наступит лишь в 1972 г. (см. прим. 4 при корр. на этой стр.— *Перев.*).

*Примечания переводчика при корректуре.* 1. Сейчас уже ясно, что по крайней мере для одного из наблюдавшихся дискретных источников рентгеновских лучей — источника в Крабовидной туманности — это предположение не проходит (см. примечание 4).

2. В нашей стране примерно в то же время и независимо этим вопросом занимался Л. Д. Ландау.

3. Этот вопрос остается и в том случае, если рентгеновское излучение указанных источников не связано с нейтронными звездами (см. примечание 4).

4. Как недавно стало известно, описанный эксперимент был успешно осуществлен автором и его сотрудниками. При этом оказалось, что размеры дискретного источника в Крабовидной туманности составляют приблизительно одну пятую размера всей туманности, т. е. несравненно больше размера предполагаемой нейтронной звезды. Таким образом, по крайней мере для Крабовидной туманности наблюдаемое рентгеновское излучение нельзя связывать с предположением о существовании

\*) Малым угловым размером будет обладать также область с сильным магнитным полем вблизи коллапсировавшей звезды, которая может давать мощное магнитотормозное рентгеновское излучение. Поэтому такую звезду, как источник рентгеновского излучения, нельзя отличить от нейтронной звезды путем только измерения угловых размеров. Подробнее эти вопросы обсуждаются в статье В. Л. Гинзбурга и С. П. Сыроватского (УФН 84(2), 201 (1964)).

в этой туманности горячей нейтронной звезды. В связи с этим результатом более вероятным становится магнитотормозной (синхротронный) или тормозной (столкновения быстрых частиц) механизм рентгеновского излучения.

Вместе с тем следует отметить, что детектирование рентгеновского излучения по-прежнему остается единственным доступным в настоящее время методом обнаружения нейтронных звезд, существование которых пока следует только из теоретических соображений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini and B. B. Rossi, Phys. Rev. Letts. 9 (11), 439 (1962).
  2. A. G. W. Cameron, Astrophys. J. 130 (3), 884 (1959).
-