

Загадка рентгеновского «хребта» Галактики

М.Г.Ревнивцев

Основная масса вещества в галактиках (если не считать темной материи) содержится в звездах. Однако значительная его доля распылена и в межзвездной среде. Вообще можно сказать, что для астрофизики межзвездная среда — важнейший элемент, исследуя свойства которого, можно много узнать о различных физических процессах, происходящих в галактиках и их скоплениях. Простейшим наглядным примером будут, наверное, ударные волны, которые в межзвездной среде создаются взрывами сверхновых. По динамике движения ударных волн, по измерениям температур на их фронтах и положений последних можно оценивать энергию, выделившуюся во время взрыва или столкновения — такую информацию другим образом получить очень сложно. В межзвездной среде нашей Галактики сильные ударные волны порождаются только взрывами сверхновых (рис.1, слева), а в межгалактической среде волны могут возникать также в результате столкновений галактик (рис.1, справа) и т.д. Таким образом, изучение свойств межзвездной среды представляет большой интерес для астрофизиков — ее параметры важны для понимания энергетики Галактики в целом. Поэтому неудивительно, что когда в начале 80-х годов прошлого века рентгеновские наблюдения вроде бы указали на ее темпера-



Михаил Геннадьевич Ревнивцев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий Института космических исследований РАН. Научные интересы связаны с исследованием аккреции на релятивистские объекты.

туру в 100 млн градусов, астрофизики были поставлены в тупик. Но обо всем по порядку.

Неожиданная мощь

Пространство между звездами заполнено атомарным (ионизованным и нейтральным) и молекулярным водородом, электронами — продуктами ионизации газа, микроскопическими конгломератами атомов легких элементов (включая органические молекулы) — пылью; его пронизывают потоки высокоэнергичных частиц — космические лучи. Все участники этого ансамбля способны генерировать разнообразные фотоны. И действительно, межзвездная среда нашей Галактики светит в различных участках электромагнитного спектра. В радиодиапазоне свечение возникает в результате излучения холодной пыли, излучения свободных электронов и синхротронного

излучения релятивистских электронов космических лучей. Пример такого свечения можно видеть на рис.2, где легко определяется положение нашей Галактики — его выдает светлая полоса, проходящая через середину карты.

Взаимодействие космических лучей высоких энергий с веществом межзвездной среды должно приводить к испусканию гамма-лучей (энергии фотонов более нескольких МэВ). Этот феномен был предсказан более 40 лет назад и был обнаружен уже в одном из первых экспериментов по изучению неба в гамма-диапазоне (обсерватория OSO-3, NASA, время работы на орбите 1967—1969 гг.). В настоящее время наилучшие измерения излучения неба в данной области электромагнитного спектра дает обсерватория «Ферми» (NASA), запущенная в 2008 г. Карта неба по результатам работы первых 3 мес этой обсерватории показана на рис.2.

© Ревнивцев М.Г., 2009

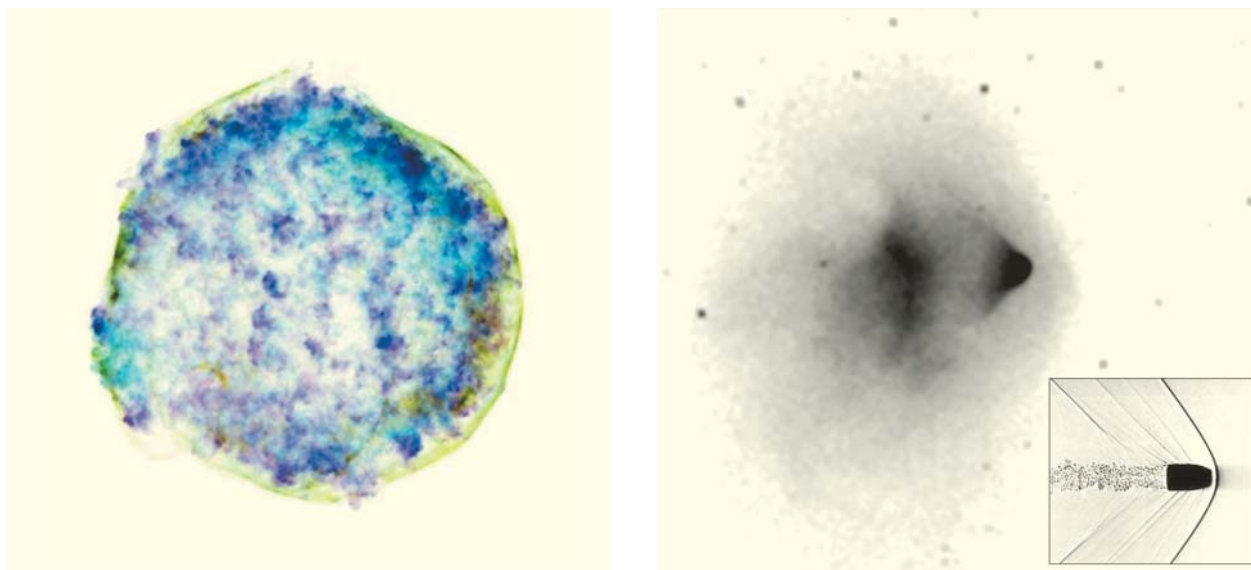


Рис.1. Изображение остатка вспышки сверхновой 1572 года (сверхновая Тихо) по данным наблюдений рентгеновской обсерватории Chandra (слева). Расширяющаяся внешняя граница излучения остатка вспышки сверхновой — ударная волна, которую взрыв сверхновой создал в межзвездной среде. Изображение скопления галактик Пуля (1E 0657—56) по данным наблюдений обсерватории Chandra (справа). Хорошо виден конус ударных волн в правой части, идущих спереди от летящей массы газа (темная «пуля», летящая на карте направо). Для сравнения в правом нижнем углу рисунка показано изображение полета сверхзвуковой пули в воздухе.

Изображение NASA

В рентгеновской части спектра основная часть излучения Галактики возникает в двойных системах с компактными объектами — черными дырами и нейтронными звездами. Эти экзотические объекты имеют уникально сильные гравитационные поля, двигаясь в которых, любое вещество приобретает скорости в десятки и сотни тысяч киломе-

тров в секунду. При соударении частиц между собой часть их энергии переходит в тепло и таким образом приводит к значительному нагреву — до температур в десятки и сотни миллионов градусов, когда характерным становится свечение именно в рентгеновских лучах. Для того чтобы черная дыра или нейтронная звезда «засветила», нужно

обеспечить поступление материи в ее окрестности. В Галактике проще всего это сделать, «посадив» компактный объект в двойную систему с обычной звездой. В такой двойной системе обычная звезда выполняет роль своего рода «бензобака», т.е. поставляет вещество для его использования в мощнейшем «реакторе» компактного объекта.

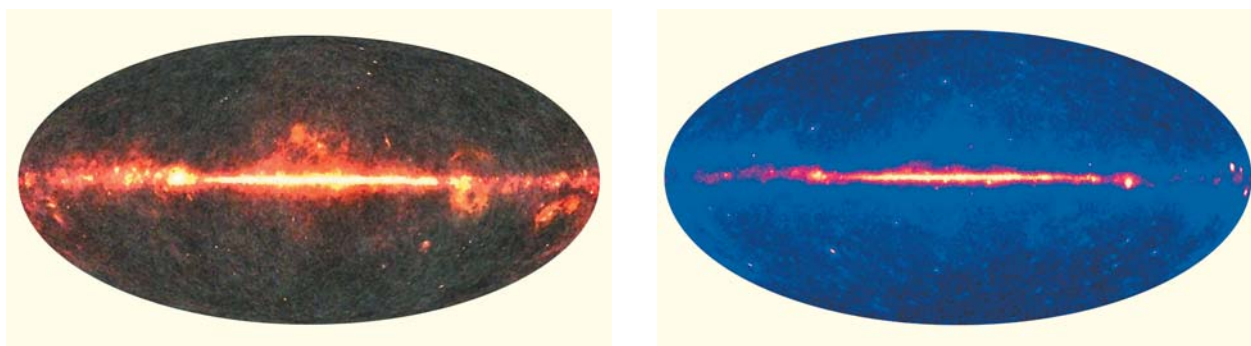


Рис.2. Карта неба в радиодиапазоне (10—100 ГГц) по данным обсерватории WMAP, NASA (слева). Хорошо заметно излучение межзвездной среды Галактики (полоса в центре карты). Карта неба в гамма-лучах по данным обсерватории «Ферми», NASA (справа). Излучение межзвездной среды Галактики, рождающееся при взаимодействии релятивистских частиц космических лучей с веществом межзвездной среды, видно как яркая полоса посередине карты. На левой и правой картах обнаруживается много общего в распределении яркости Галактики по небу — это следствие формирования свечения обоих типов с участием межзвездной среды.

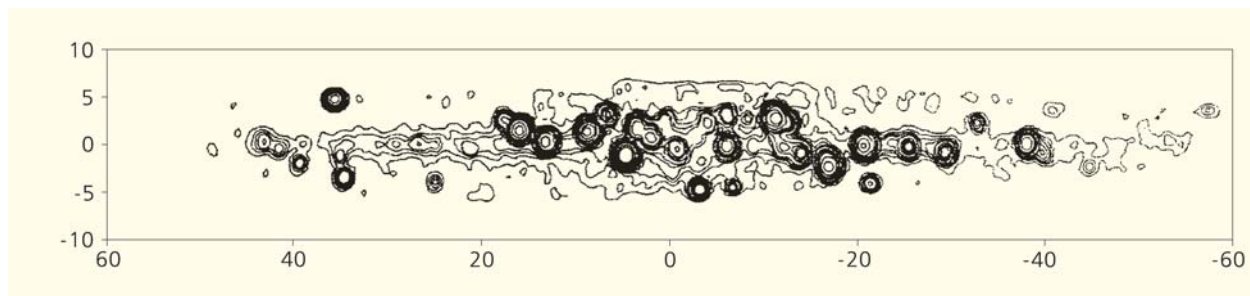


Рис.3. Карта галактической плоскости по результатам наблюдений обсерватории EXOSAT (время работы на орбите 1983—1986 гг.). Большие кружки — яркие рентгеновские источники, преимущественно двойные системы с черными дырами и нейтронными звездами. Хребет Галактики виден как полоса свечения, проходящая через середину карты.

Светимости подобных двойных систем в нашей Галактике достигают значений в 10^{38} — 10^{39} эрг/с, что в сотни тысяч и миллионы раз больше, чем светимость нашего Солнца.

Рентгеновские наблюдения, начавшиеся вскоре после появления первых ракет и спутников, сразу же показали наличие значительного числа таких систем в Галактике. Но выяснилось, что не все рентгеновское излучение Галактики можно приписать таким объектам. В области галактической плоскости остается тусклое свечение (рис.3), получившее название «рентгеновский хребет Галактики» [1, 2]. При более детальном исследовании этого излучения обнаружались эмиссионные линии сильно ионизованных атомов тяжелых элементов (например, железа), которые свидетельствовали о том, что излучение рождается в очень горячей плазме [3].

Горячая плазма вообще-то не является чем-то необычным для нашей Галактики. Процессы, происходящие в ней, нередко связаны со взрывами, с движениями с большими скоростями, которые часто приводят к нагреву окружающей объект плазмы до больших температур. Однако, как правило, это происходит в достаточно ограниченной области Галактики, т.е. основная часть межзвездной среды галактики остается относительно холодной. Теперь же оказывалось, что практически весь диск Галактики заполнен плазмой

с температурой в сотню миллионов градусов.

Самая главная загвоздка в понимании природы свечения рентгеновского хребта состояла в том, что плазму таких больших температур, как указывали наблюдения, гравитационное поле Галактики удержать не в силах. Поскольку, согласно наблюдениям, рентгеновское свечение концентрируется вблизи галактической плоскости (ширина области излучения составляет не более нескольких градусов), для того, чтобы картина рентгеновского хребта была стационарной, что-то должно предотвращать «разбегание» горячей плазмы. Гравитационного поля диска Галактики для этого явно недостаточно. Действительно, по результатам измерения движения звезд известно, что скорость убегания из диска Галактики составляет всего несколько десятков километров в секунду, в то время как тепловые скорости плазмы с температурой в сотню миллионов градусов достигают около тысячи километров в секунду. Такую горячую плазму могут удерживать лишь огромные скопления галактик с массами в $10^{15} M_{\odot}$, что примерно в 10 тыс. раз больше, чем масса нашей Галактики.

Другим вариантом существования горячей межзвездной плазмы в Галактике может быть ее постоянный отток, аналогично тому, как это часто наблюдается в галактиках с мощным звездообразованием (рис.4). Од-

нако оказывается, что для восполнения энергии, уносимой вместе с оттоком со скоростями более 1 тыс. км/с, необходимо каждую секунду закачивать по всей Галактике в межзвездную среду энергию порядка 10^{45} эрг — подобная величина совершенно не вписывается в наши текущие представления об энергетике Галактики. Для объяснения излучения хребта пытались также привлечь взаимодействие малоэнергичных электронов космических лучей с межзвездной средой, но безуспешно.

В начале 80-х годов был предложен еще один альтернативный способ объяснить формирование рентгеновского хребта Галактики. Предлагалось рассматривать хребет не как результат свечения собственно межзвездной среды, а как итог сложения свечения большого числа слабых рентгеновских источников, индивидуально необнаружимых на существовавших тогда картах галактического диска. Такое объяснение полностью снимало бы проблему загадочного и до сих пор неизвестного источника огромной энергии в Галактике.

Однако до недавнего времени эта гипотеза не находила поддержки среди астрономов. Основной причиной тому была скудость сведений о демографии (статистических свойствах различных классов объектов) — было сложно предсказать, какой вклад они могут дать в масштабе всей Галактики. Настоящим прорывом в изучении рентгеновско-



Рис.4. Изображение галактики M82 в разных участках электромагнитного спектра (белый — оптическое изображение, красный — инфракрасное). Видно, что большая часть рентгеновского излучения (голубой цвет) формируется в горячей оттекающей плазме.

го хребта стало получение его высококачественной карты [4] и составление «переписи рентгеновского звездного населения» в окрестностях Солнца [5].

Под прицелом — хребет

Исследование морфологии излучения, т.е. его распределения по небу, и сопоставление полученной карты с уже известными распределениями различных объектов очень часто дают ключи к разгадке природы явления. Например, если рентгеновское свечение хребта возникает в результате взаимодействия космических лучей с веществом межзвездной среды, можно ожидать, что свечение хребта будет ярче там, где межзвездная среда более плотная и больше космических лучей. Если же свечение хребта связано с влиянием сверхновых на межзвездную среду, рентгеновское свечение должно быть ярче там, где больше сверхновых, и т.д. Так, в конце 60-х годов, после открытия свечения Галактики в гамма-лучах, распределение этого свечения было сопос-

тавлено с известными картами межзвездной среды, что сразу же указало на причину формирования гамма-излучения — взаимодействие космических лучей больших энергий с межзвездным газом (см. рис.2).

Получение хорошей карты рентгеновского хребта Галактики оказалось очень непростой задачей. Основная проблема была в том, что поверхностная яркость хребта очень мала, всего около 10^{-11} эрг/с/см²/кв. градус, или $\sim 10^{-3}$ фот./с/см²/кв. градус. При типичных размерах и полях зрения рентгеновских инструментов (эффективная площадь менее 200–500 см², поля зрения — 0.05–0.2 кв. градуса) для того, чтобы накопить разумное количество фотонов от свечения хребта (например, 1 тыс. фотонов) в определенном направлении на небе, необходимо наблюдение в течение почти половины суток! А все свечение хребта занимает на небе площадь более 300 кв. градусов. Что означает: таких наблюдений длительностью до полусуток необходимо провести не одну тысячу! Для построения хорошей карты обыч-

ными инструментами необходимо было бы потратить много лет наблюдений только хребта Галактики, что, конечно же, нереально. Разумеется, можно увеличить поле зрения инструмента, однако тогда в это поле может попасть очень яркий источник (например, аккрецирующая черная дыра или нейтронная звезда), на фоне которого излучение хребта будет совершенно незаметно.

Решением стало использование инструмента, имеющего умеренное поле зрения — 1 кв. градус, и самую большую из всех существующих инструментов рентгеновского диапазона собирающую площадь — 6500 см². Это спектрометр PCA обсерватории RXTE (NASA, находится на орбите с декабря 1995 г.). Обсерватория RXTE не имеет на борту собственно телескопов — инструментов, предназначенных для построения изображений. Инструменты обсерватории — спектрометры, т.е. детекторы, измеряющие поток с определенной площади неба (их поле зрения ограничено трубой-коллиматором). После наведения на небесный объект они собирают рентгеновские лучи с этой площадки в течение длительного времени (обычно нескольких часов), а затем перенаводятся на следующий в своей наблюдательной программе объект. Однако ввиду того, что инструменты обсерватории RXTE имеют большую собирающую площадь, даже за те несколько сотен секунд, в которые обсерватория перенацеливает свои инструменты с одного объекта на следующий, им удастся собрать много полезной информации — измерить рентгеновское излучение разных точек неба по пути между одним источником и другим. Настолько много, что с помощью таких «скользящих» наблюдений удалось построить самую лучшую на текущий момент карту всего неба в стандартных рентгеновских лучах, в том числе и карту хребта Галактики (рис.5).

Ввиду того что большое количество ярких источников все-таки сильно затрудняло работу с излучением собственно хребта Галактики даже по данным наблюдений обсерватории RXTE, было решено применить дополнительный «трюк». Трюк заключался в том, чтобы строить карту не всех рентгеновских лучей, зарегистрированных инструментом, а только эмиссионной линии высокоионизированного железа (на энергии ~ 6.7 кэВ), которая характерна для свечения именно хребта Галактики и практически отсутствует в излучении ярких рентгеновских источников. Результат превзошел все ожидания — яркие источники убирались с карты очень эффективно. Первая попытка построить такую карту [6] была предпринята по данным наблюдений японского спутника GINGA (время работы на орбите 1987—1991 гг.). Однако самая лучшая карта была построена с помощью наблюдений обсерватории RXTE [7] (рис.6).

Детальные исследования хребта Галактики по картам обсерватории RXTE привели к удивительному выводу — рентгеновское излучение хребта оказалось ярче там, где ярче светят обычные звезды, и слабее ровно там, где они светят слабо. Итак, обнаружено: рентгеновское излучение хребта каким-то образом связано с массой звезд, которые мы просматриваем в своих наблюдениях.

Если предположить, что свечение хребта связано с большим количеством слабых рентгеновских источников, каким-то образом распределенным среди звезд, то точно такие же источники должны иметься и в окрестности Солнца, потому как она представляет собой довольно типичную область Галактики (возможно, за исключением присутствия немного большего числа молодых звезд). А поскольку ожидается, что их должно быть достаточно много, значит, они должны быть и на небольших расстояниях от

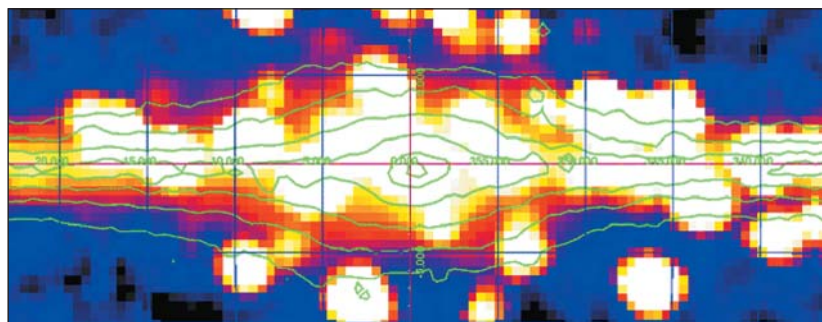


Рис.5. Карта неба в рентгеновском диапазоне, полученная с помощью данных RXTE, накопленных во время перенаведений обсерватории. Цвета указывают различную яркость объектов: темнее красного означают, что в этом месте отдельный рентгеновский источник не обнаружен. Крупные круглые пятна — яркие источники, преимущественно аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Их большой размер есть результат того, что карта имеет плохое угловое разрешение (у нее плохая «резкость»). Видно, что яркие источники сильно затрудняют получение карты собственно хребта Галактики. Зеленые контуры показывают яркость Галактики в инфракрасных лучах, т.е. фактически — распределение звезд в Галактике.

Солнца, т.е. в пределах досягаемости существующих обзоров неба. Результаты переписи звездного населения окрестностей Солнца, проделанного по результатам обзора всего неба обсерватории RXTE, подтвердили — суммарное излучение слабых рентгеновских источников во всей Галактике способно дать наблюдаемую картину хребта. Кроме того, предсказания на основе составленной переписи того, как должны выглядеть эти источники на существующих картах хребта Галактики, объяснили, почему их было так слож-

но обнаружить — не хватало чувствительности и углового разрешения приборов.

Чтобы напрямую разрешить излучение хребта Галактики на отдельные источники (показать, что излучение не размазано по небу, а сосредоточено в большом количестве отдельных точек-источников), необходимо было значительно увеличить чувствительность наблюдений и при этом иметь угловое разрешение не хуже 1–2 секунд дуги (1/3600–1/1800 доли градуса). Эта задача могла быть решена только с помощью сверхдолгих

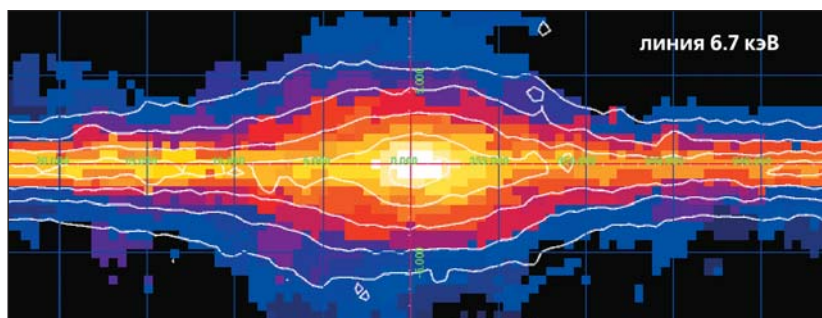


Рис.6. Карта хребта Галактики в излучении эмиссионной линии высокоионизированного железа (6.7 кэВ), очень характерной для свечения хребта, но отсутствующей в ярких рентгеновских источниках. Контурами показана яркость Галактики в инфракрасных лучах (фактически это распределение звезд). Видно хорошее соответствие между двумя наложенными картами.

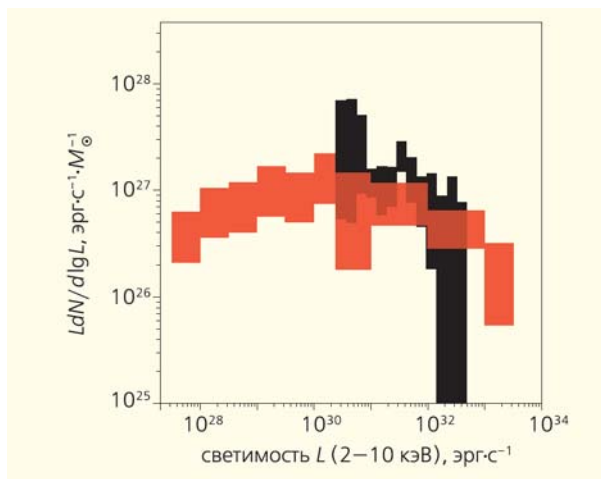
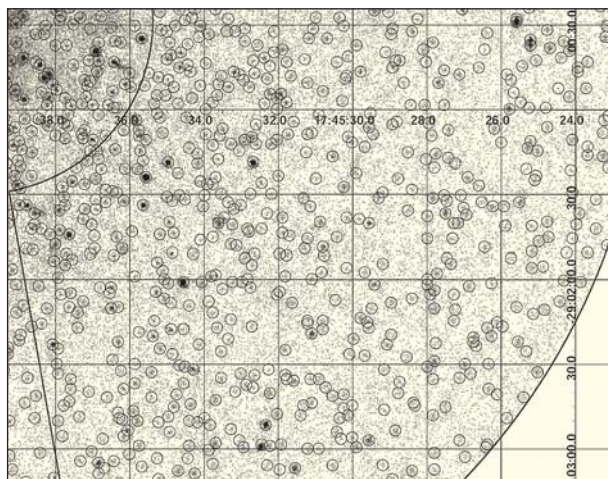


Рис.7. Рентгеновская карта области вблизи центра Галактики по результатам наблюдений обсерватории Chandra (слева). Кружками показаны обнаруженные на карте рентгеновские источники. Каждый источник скорее всего представляет собой двойную систему, в которой белый карлик перетягивает вещество со звезды-компаньона. Падая на поверхность белого карлика, это вещество нагревается до температур в десятки и сотни миллионов градусов и светит в рентгеновских лучах. Функция светимости рентгеновских звезд в Галактике (справа). Красным цветом показаны измерения, проведенные в окрестностях Солнца, серым — в области центра Галактики. N — число звезд в данном интервале светимостей.

наблюдений орбитальной обсерватории Chandra (NASA). Эта обсерватория в настоящее время имеет самое лучшее угловое разрешение среди существующих рентгеновских инструментов, а именно это свойство наиболее важно для решения загадки хребта Галактики.

Разрешение удалось!

Предварительные исследования области центра Галактики и галактической плоскости, проведенные с помощью уже существовавших наблюдений обсерватории Chandra, обнаружили очень хорошее согласие регист-

рации рентгеновского «населения» в окрестностях Солнца и в области центра Галактики, по меньшей мере в области светимостей, до которых «дотягивались» эти наблюдения (рис.7). Иначе говоря, наши оценки вклада слабых источников в свечение хребта Галактики, сделанные только по исследованиям окрестностей Солнца, верны. Таким образом, чтобы окончательно решить проблему свечения хребта Галактики, было необходимо лишь увеличить чувствительность наблюдений.

Для этого требовалось выбрать площадку на небе, в которой влияние межзвездного поглощения было бы минимальным. Проблема здесь состоит в том, что межзвездная среда в диске Галактики существенно препятствует прохождению рентгеновских лучей малых энергий, т.е. как раз там, где чувствительность обсерватории Chandra максимальна. Действительно, несмотря на довольно малую плотность межзвездного вещества в нашей Галактике (типичное значение плотности межзвездного вещества всего несколько частиц в кубическом

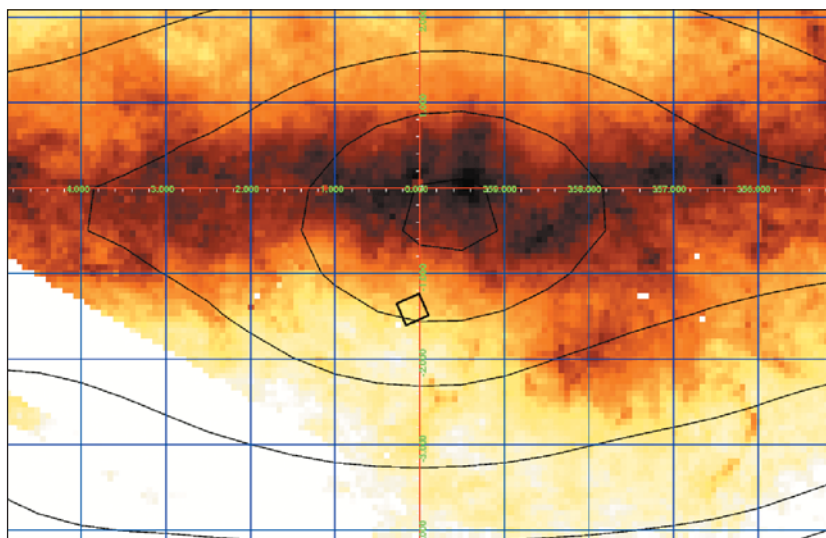


Рис.8. Карта межзвездного поглощения в центральной части Галактики [8]. Область неба, выбранная для глубоких наблюдений обсерватории Chandra, обозначена черным квадратом. Контурсы показывают яркость Галактики в инфракрасных лучах, т.е. дают распределение звезд в этой части неба.

сантиметре), расстояния в Галактике настолько велики — десятки тысяч световых лет, или 10^{22} см, — что на луче зрения накапливается большое число частиц, которые поглощают рентгеновское излучение. Фактически смотреть сквозь Галактику — это смотреть сквозь свинцовую пластину толщиной в несколько миллиметров! Поэтому, чтобы избежать существенных потерь в чувствительности наблюдений, была выбрана самая близкая к галактическому центру область с окном поглощения (рис.8).

Такие наблюдения общей длительностью около 12 дней (!) были проведены в 2008 г. (рис.9), с их помощью удалось, что называется, «забить последний гвоздь в гроб» загадки происхождения хребта Галактики. Чтобы подчеркнуть уникальность наблюдений, достаточно, наверное, сказать, что самые слабые обнаруженные рентгеновские источники дали за все время наблюдений лишь несколько фотонов — имели поток менее 10^{-17} эрг/с/см², что чуть больше, чем поток у поверхности Земли от 200-ваттной лампочки, расположенной на Венере!

Благодаря данным, полученным в этих наблюдениях, удалось показать, что более 88% излучения хребта разрешается на вклад отдельных рентгеновских источников [9]. Согласно оценкам, основная часть этих источников должна быть либо аккрецирующими белыми карликами, либо звездами с активными коронами. Оставшаяся малая доля

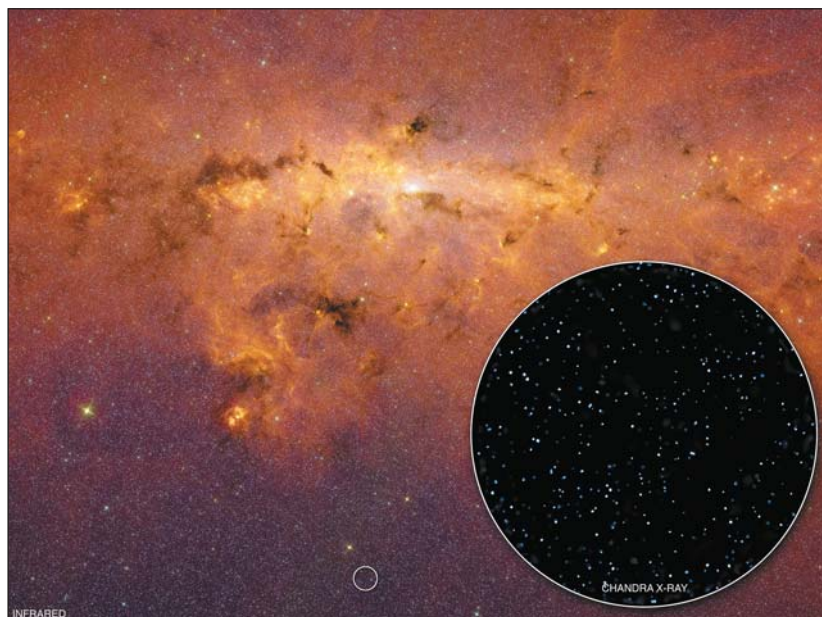


Рис.9. Область неба вблизи центра Галактики по данным наблюдений телескопа Spitzer (NASA) в инфракрасном диапазоне. Кружком показана область, наблюдавшаяся обсерваторией Chandra в течение 12 дней. На врезке показано изображение этой области в рентгеновских лучах.

излучения хребта может быть результатом сложения излучения еще более слабых объектов, не обнаруженных даже в этих сверхглубоких наблюдениях.

Таким образом, проблема неизвестного резервуара энергии Галактики, возникшая практически на заре эры рентгеновской астрономии, решена. Показано, что рентгеновское свечение хребта Галактики есть суммарное излучение огромного числа слабых рентгеновских источников, среди которых чувствительный вклад дают даже настолько рентгеновски слабые объекты, как наше Солнце. Пол-

ное число источников, которые заметно участвуют в свечении хребта во всей Галактике, более миллиарда!

Исследования, аналогичные описанным выше, явно показывают, насколько важно знать демографию различных объектов во Вселенной. Огромным шагом вперед в этом направлении должен стать рентгеновский обзор всего неба астрофизической орбитальной обсерваторией «Спектр-РГ», которая в настоящее время разрабатывается Россией совместно с Германией и запланирована к запуску в 2012 г. ■

Литература

1. Worrall D.M., Marshall F.E., Boldt E.A., Swank J.H. // *Astrophysical Journal*. 1982. V.255. P.111—121.
2. Warwick R.S., Turner M.J.L., Watson M.G., Willingale R. // *Nature*. 1985. V.317. P.218—221.
3. Koyama K., Makishima K., Tanaka Y., Tsunemi H. // *Publications of Astronomical Society of Japan*. 1986. V.38. P.121—131.
4. Revnivtsev M., Sazonov S., Gilfanov M. et al. // *Astronomy & Astrophysics*. 2006. V.452. P.169—178.
5. Sazonov S., Revnivtsev M., Gilfanov M. // *Astronomy & Astrophysics*. 2006. V.450. P.117—128.
6. Yamauchi S., Koyama K. // *Astrophysical Journal*. 1993. V.404. P.620—624.
7. Revnivtsev M., Molkov S., Sazonov S. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006. V.373. P.L11—L15.
8. Dutra C.M., Santiago B.X., Bica E.L.D., Barbuy B. // *Monthly Notices of Royal Astronomical Society*. 2003. V.338. P.253—262.
9. Revnivtsev M., Sazonov S., Churazov E. // *Nature*. 2009. V.458. P.1142—1144.