

Рентгеновская инвентаризация Галактики и окрестностей

М.Г.Ревнивцев

Астрофизика — уникальная наука. Большое несчастье астрофизики в том, что практически никакие ее объекты нельзя «потрогать руками» (что всегда предпочтительнее для более детального понимания явлений) из-за огромных расстояний до них. Однако в этом же и громадное счастье — объекты астрофизики могут быть сколь угодно чудовищными в своих проявлениях, иметь температуры в миллионы и миллиарды градусов, огромные магнитные и гравитационные поля и т.д., но при этом остаются безопасными для исследователя. Фактически астрофизика предоставляет возможность изучать физические процессы в таких экстремальных условиях, которые невозможно создать в земных лабораториях.

Астрофизика экстремальных явлений началась, когда на орбиту были запущены первые спутники Земли. До этого времени наблюдения с Земли была доступна лишь очень малая доля информации об астрофизических объектах — только излучение в оптическом и в некоторой части радиодиапазона. Электромагнитное излучение в других диапазонах, несущее в себе огромную долю астрофизической информации, полностью поглощается в атмосфере. С выходом на орбиту открылась возмож-

ность наблюдать Вселенную в рентгеновских, гамма, инфракрасных лучах. Эта информация всемерно обогатила наше понимание процессов, происходящих в Галактике и Вселенной. Например, «осмотр неба» в рентгеновских лучах позволяет очень эффективно искать черные дыры и нейтронные звезды в нашей Галактике. Почему?

Дело в том, что черные дыры и нейтронные звезды, или, как их еще называют, компактные объекты, имеют уникально сильные гравитационные поля, двигаясь в которых, вещество может нагреться до температур в десятки и сотни миллионов градусов и светиться именно в рентгеновских лучах. Рентгеновские лучи для вещества с температурой в десятки миллионов градусов характерны так же, как для металла, раскаленного в мартеновских печах до

1000°C, характерно свечение в ярко-оранжевом свете. Однако для того, чтобы компактный объект «засветился», т.е. чтобы мы могли его обнаружить, необходим своеобразный «катализатор» — вещество, которое, нагреваясь, «выдает» положение компактного объекта. Самый простой способ доставить вещество в окрестности компактного объекта — это посадить последний в двойную систему с обычной звездой. В таком случае компактный объект может либо перетягивать вещество с поверхности обычной звезды, либо захватывать вещество, истекающее с нее в виде звездного ветра. Сверхмассивные черные дыры с массами в миллионы и миллиарды масс Солнца, сидящие в центрах галактик, могут поглощать межзвездное вещество, также нагревая его до рентгеновских температур. Таким

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.

© Ревнивцев М.Г., 2009

образом, поиск «полигонов экстремальностей» требует обзоров неба именно в рентгеновских лучах; о них и пойдет речь в настоящей статье.

Обзоры неба: всматриваясь в его свечение

Первые же обзоры неба в рентгеновских лучах принесли много интересного.

Оказалось, что рентгеновское небо разительно отличается от известного нам неба в видимом диапазоне. Во-первых, оно не черное, а светлое. Так получается в результате того, что существует достаточно мощное фоновое излучение, которое в сумме по всему небу дает поток рентгеновских фотонов во много раз больше, чем все яркие рентгеновские источники вместе взятые [1]. Во-вторых, отличительная особенность рентгеновского неба — отсутствие яркой светлой полосы Млечного Пути, к которой мы так привыкли в оптическом (видимом) диапазоне; положение диска нашей Галактики в рентгеновском диапазоне отмечается лишь небольшим набором ярчайших точек — рентгеновских двойных систем, в которых компактные объекты «объедают» свои звезды-компаньоны.

Фоновое рентгеновское свечение неба сразу же привлекло

к себе внимание астрофизиков. Первым делом было необходимо максимально точно измерить его характеристики и определить его природу. Регистрация рентгеновского фона проводилась многими приборами на ракетах и спутниках (в том числе, например, очень хорошие результаты были получены на советских спутниках «Космос-163 и -461» [2]). Однако до сих пор практически самыми точными измерениями формы спектра космического фона в диапазоне энергий 3–30 кэВ (т.е. в рентгеновских лучах) остаются данные обсерватории HEAO1 (NASA, время работы на орбите 1977–1979 гг., см. рис.1). Один из приборов этой обсерватории (A2) был сконструирован специально для того, чтобы максимально точно регистрировать именно изотропный фон неба.

Основной проблемой любых измерений в рентгеновских лучах оказывается инструментальный фон регистрирующего прибора. Иначе говоря — сигнал, который прибор выдает, даже когда на него не падают никакие рентгеновские фотоны (например, когда объектив инструмента закрыт толстой крышкой). Этот паразитный фоновый сигнал возникает в результате различных процессов, но основной вклад дают срабатывания инст-

румента на прохождение через него энергичных космических лучей и частиц, рожденных при взаимодействии космических лучей с веществом спутника или телескопа. Поскольку величина этого паразитного сигнала мало зависит от направления, в котором смотрит инструмент, его очень сложно отделить от истинного фонового рентгеновского излучения, если последний достаточно изотропен.

Чтобы это все-таки сделать, детекторы прибора A2 обсерватории HEAO1 были снабжены двумя типами коллиматоров (трубок из достаточно толстого материала, которые ограничивали поле зрения прибора, см. рис.2). Была использована особенность изотропного излучения неба — если яркость фона неба не зависит от направления, полный поток рентгеновских лучей, очевидно, пропорционален размеру поля зрения прибора, в то время как инструментальный паразитный фон не знает о том, какое у детектора поле зрения. Следовательно, если идентичные части детектора помещены под коллиматоры разного размера, то разница в потоках рентгеновских фотонов в этих частях детектора будет зависеть только от истинного небесного рентгеновского потока, а никак не от инструментального фона инструмента.

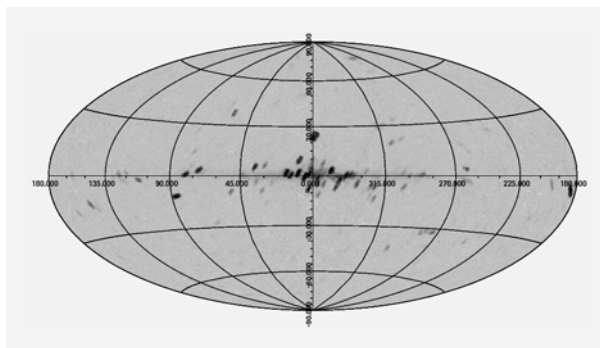


Рис.1. Обсерватория HEAO1 (NASA), сверху. Карта всего неба (в проекции aitoff), полученная прибором A2 обсерватории HEAO1 (карта службы Skyview skyview.gsfc.nasa.gov), внизу. Хорошо видно, что небо целиком заполнено свечением — фоновым рентгеновским излучением Вселенной (серая область на всей карте). Темные прямоугольники — отдельные яркие источники рентгеновского излучения, большая часть которых расположена в нашей Галактике. Большой размер прямоугольников связан с плохим угловым разрешением инструмента.

Результаты измерений показали, что спектр космического фона не имеет никаких особенностей (т.е. не содержит, например, эмиссионных линий) и имеет широкий пик в области энергий 20—40 кэВ [3]. Вид спектра в диапазоне 3—50 кэВ позволил выдвинуть предположение (впоследствии не подтвердившееся), что фоновое излучение рождается в горячей (с температурой в сотни миллионов градусов) разреженной плазме, заполняющей всю Вселенную. Однако в дальнейшем оказалось, что такие горячие электроны, которые нужны были для объяснения в рамках этой модели фонового свечения рентгеновского неба, должны сильно исказить форму спектра реликтового излучения Вселенной (излучения, дошедшего до нас практически от края наблюдаемой Вселенной), а этого явно не наблюдалось (см., например, [4]).

Изучение уже открытых к тому времени в большом количестве квазаров — объектов громадных светимостей в центрах далеких галактик — позволило предположить, что, возможно, суммарное излучение (в рентгеновских лучах) большого числа квазароподобных объектов во Вселенной (аналогичных показанному на рис.3) может привести к формированию наблюдаемого фонового свечения рентгеновского неба, а его «размазанность по небу» есть просто результат того, что поверхностная плотность таких источников достаточно велика [5]. Для проверки этой гипотезы были необходимы рентгеновские наблюдения не только с хорошей чувствительностью, но и с хорошим угловым разрешением, которое позволило бы увидеть очень большое число объектов в поле зрения прибора.

Такие измерения были проведены первым рентгеновским телескопом с фокусирующей оптикой HEAO-2/«Эйнштейн», который подтвердил, что фоновое рентгеновское свечение не-

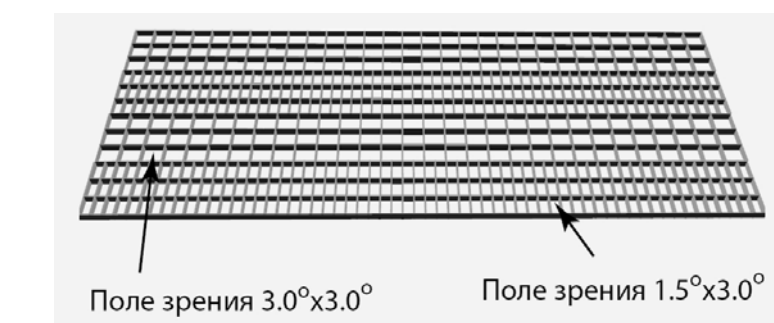


Рис.2. Схематичный вид набора коллиматоров (трубок, ограничивающих поле зрения инструмента) прибора А2 обсерватории HEAO1. Чередующиеся ряды коллиматорных трубок разного размера позволили достичь практически идеального учета паразитного фона инструмента, возникающего при прохождении через него высокоэнергичных заряженных частиц.

ба действительно складывается в основном из излучения большого числа квазароподобных объектов — сверхмассивных черных дыр в центрах галактик, или, как их еще называют — активных ядер галактик [6]. Интерес к изучению рентгеновского фона Вселенной значительно возрос. Ведь рентгеновское фо-

новое свечение дает информацию о суммарном росте сверхмассивных черных дыр во всей Вселенной!

К сожалению, измерения рентгеновского фона Вселенной в области, где он несет наибольшее количество энергии (т.е. в области 20—40 кэВ), очень трудны. Фактически в

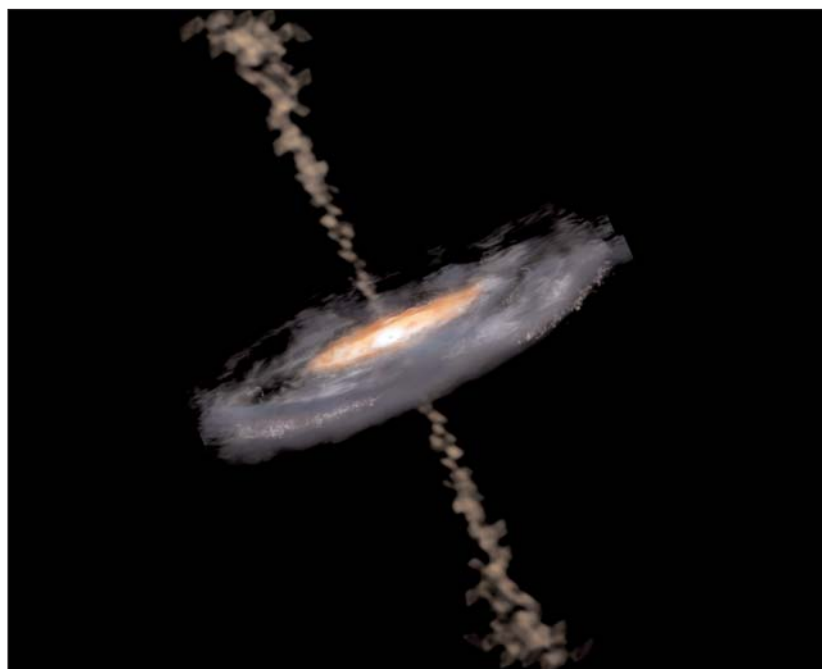


Рис.3. Вид активного ядра галактики в изображении художника. В центре находится сверхмассивная черная дыра, вокруг которой сформирован аккреционный диск. Вещество аккреционного диска в областях, близких к черной дыре, разогрето до температур в десятки и сотни миллионов градусов. Иногда активные ядра галактик испускают струи вещества — джеты (показаны на рисунке) с околосветовыми скоростями (изображение NASA).

этом диапазоне энергий существует всего несколько измерений за все время существования рентгеновской астрономии, к тому же различные данные не всегда хорошо согласуются друг с другом.

Последние новости

Одними из последних измерений рентгеновского фона Вселенной в этой области стали измерения совместного проекта Европейского и Российского космических агентств — орбитальной обсерватории «Интеграл», успешно работающей на орбите с 2003 г. Поскольку приборы данной обсерватории не были предназначены для изучения изотропного фона Вселенной, для измерений пришлось проделать определенный трюк. На службу удалось поставить тот факт, что (как уже говорилось) рентгеновское небо не черное, а светлое. Любой объект, затеняющий рентгеновское небо для измеряющего прибора, фактически выглядит как черная «крышка», будь то Земля или даже Солнце. Таким образом, измеряя поток рентгеновских лучей с закрытой и открытой «крышкой», т.е. во время, когда

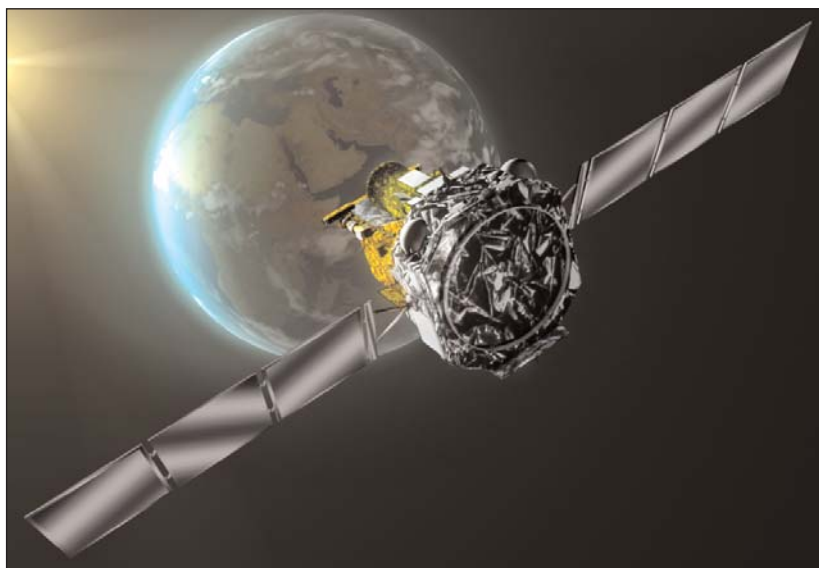


Рис.4. Наблюдения обсерватории «Интеграл» по измерению рентгеновского фонового свечения Вселенной. Рисунок ESA.

приборы обсерватории находились в тени и вне тени Земли (рис.4), удалось получить спектр рентгеновского фона Вселенной [7].

В настоящее время в Институте космических исследований РАН разрабатывается эксперимент по высокоточному измерению рентгеновского фона Вселенной в диапазоне энергий 10—50 кэВ. Для этого на Международную космическую станцию

(МКС) предполагается установить прибор МВН (Монитор всего неба, рис.5), поле зрения которого ограничено коллиматором, а входное отверстие будет периодически прикрываться специальной крышкой. Измерения потока рентгеновских лучей на детекторе в периоды открытого и закрытого входного отверстия коллиматора дадут возможность определить паразитный фон детектора и значение

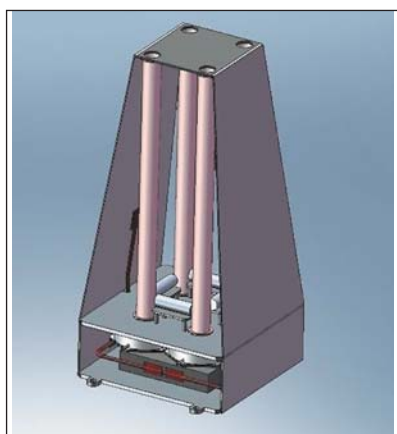
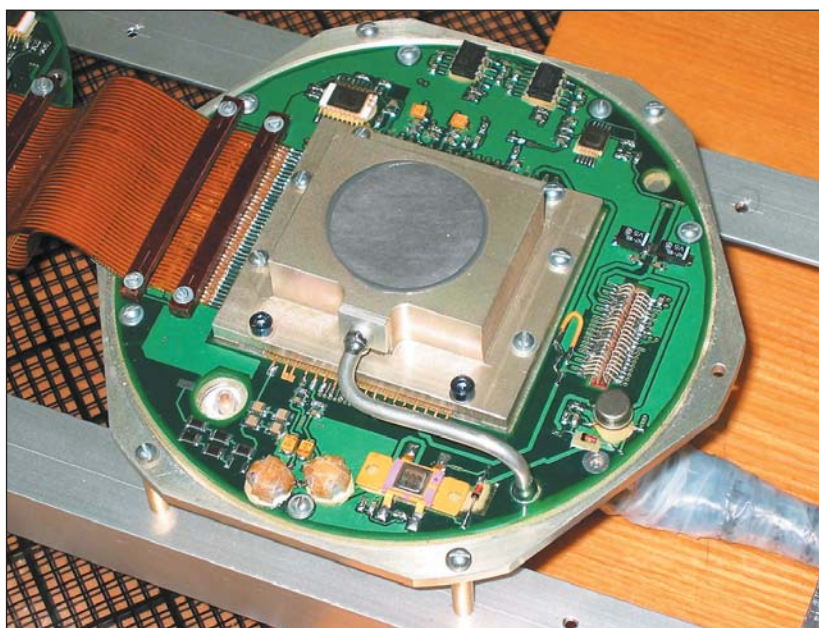


Рис.5. Общая схема инструмента Монитор всего неба (МВН, разрабатывается в ИКИ РАН), планирующегося к запуску на МКС в 2010 г. (слева). Один из детекторов инструмента МВН (справа).



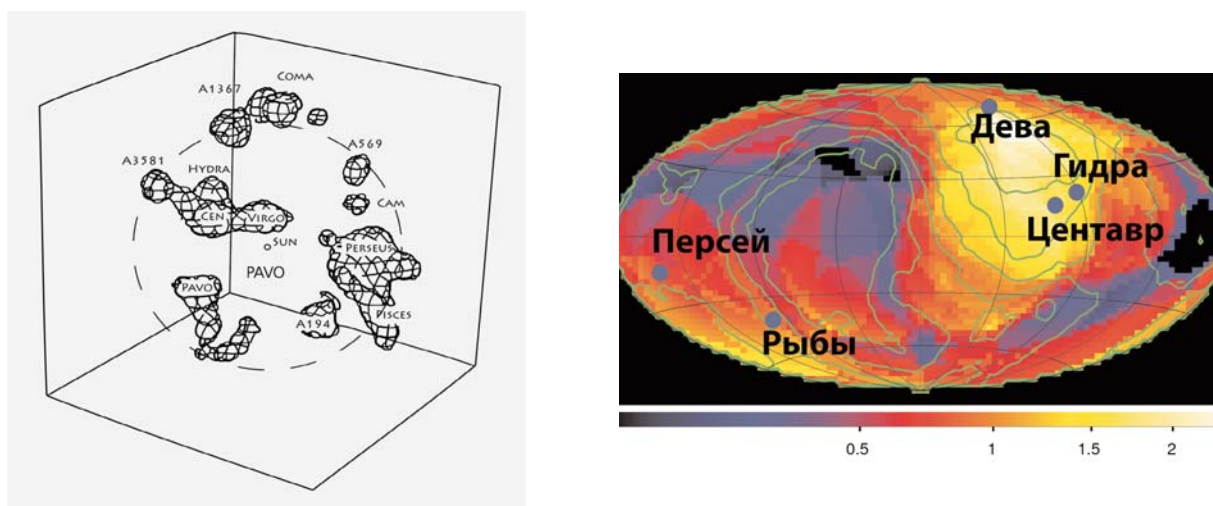


Рис.6. Схематичное изображение концентраций массы вещества в ближайшей Вселенной по результатам обзора неба в инфракрасных лучах обсерватории IRAS (вверху). Сторона куба на изображении — 200 Мпк [8]. Поверхностная плотность активных ядер галактик, обнаруженных в обзоре всего неба обсерватории «Интеграл» (внизу). Контурами показаны поверхностные плотности известных галактик в сфере размером 70 Мпк [9].

истинного фонового рентгеновского излучения Вселенной.

Поле зрения МВН будет двигаться по небу вместе с движением космической станции, и каждые два с половиной месяца будет покрывать всю доступную часть неба (около 78% всего неба). Мониторинг ярких и постоянных источников рентгеновского излучения позволит точно откалибровать поведение инструмента и привязать измерение рентгеновского фона Вселенной к излучению, например, «стандартной рентгеновской свечи» — Крабовидной туманности.

При достаточно длительной работе прибора на борту МКС удастся измерить не только среднее по всему небу излучение рентгеновского фона Вселенной, но также и его изотропность, т.е. сравнительно небольшую разницу в его яркости в различных направлениях на небе. Такое измерение представляет большой интерес для исследований свойств ближней Вселенной, поскольку позволяет оценить суммарный вклад всех возможных источников рентгеновского излучения, какими бы слабыми индивидуально они ни были. Каким образом?

Дело в том, что Вселенная на масштабах 100—200 Мпк сильно неоднородна, вещество на таких масштабах формирует скопления и пустоты, средняя плотность галактик в которых может отличаться в десятки раз (рис.6, вверху). Если рентгеновские источники каким-то образом следуют распределению материи во Вселенной (что является вполне разумным предположением, т.е. мы предполагаем, что в «пустоте» источников рентгеновского излучения нет), их распределение так же сильно неоднородно и должно формировать скопления и пустоты. Рентгеновский свет, который родился в дальней Вселенной, расположенной от нас на расстояниях более 200 Мпк, будет изотропен по небу, вариации яркости рентгеновского свечения неба в разных направлениях из-за таких далеких источников будут составлять малые доли процента. А источники, расположенные в ближней Вселенной, на расстояниях менее 100 Мпк, создадут на небе определенную картину. Причем яркие источники в ближней Вселенной можно будет увидеть непосредственно (см., например, результаты обсерватории

«Интеграл», рис.6, внизу), а слабые источники, до которых не позволит «дотянуться» чувствительность инструментов, проводящих обзор всего неба, создадут на небе протяженные «выпуклости», амплитуда которых будет прямо пропорциональна суммарной светимости всех таких рентгеновских объектов в ближней Вселенной.

Эксперименты по измерению неизотропности рентгеновского свечения Вселенной достаточно сложны, потому что здесь речь идет об эффектах, имеющих амплитуду всего несколько процентов от средней яркости космического фона. Такие измерения проводились с помощью обсерваторий НЕАО1 [10] и RXTE [11]. По результатам более трех лет наблюдений первой и 10 лет — второй обсерватории удалось измерить полную излучательную способность ближней Вселенной (т.е. полную ее светимость в рентгеновских лучах), однако точность этих данных оказалась невелика. Есть надежда, что измерения, которые будут проведены с помощью прибора МВН, планирующегося к запуску на МКС в 2010 г., позволят улучшить эти измерения.

Видеть сквозь стены

Изучение нашей Галактики в рентгеновском диапазоне началось с запуском первых ракет и первых спутников. Первые систематические обзоры неба в рентгеновских лучах были проведены более 35 лет назад орбитальной обсерваторией UHURU (время работы на орбите 1970—1973 гг.). Было обнаружено большое число ярких рентгеновских источников, подавляющее большинство которых оказалось двойными системами с компактными объектами.

Однако уже тогда было ясно, что межзвездная среда в диске Галактики должна препятствовать прохождению рентгеновских лучей малых энергий, в которых как раз и работали ранние рентгеновские обсерватории, — большая часть Галактики должна быть скрыта от нас. Действительно, несмотря на довольно малую плотность межзвездного вещества в нашей Галактике (типичное значение плотности межзвездного вещества — всего несколько частиц в кубическом сантиметре), расстояния здесь настолько велики — десятки тысяч световых лет, или 10^{22} см, — что на луче зрения копится большое число частиц, которые будут поглощать рентгеновское излучение. Фактически смотреть сквозь Галактику — то же, что смотреть сквозь свинцовую стену толщиной в несколько миллиметров! Конечно, такое значительное поглощение наблюдается только вдоль галактического диска, т.е. только вдоль довольно небольшой полосы на небе, остальная часть неба очень слабо подвержена вуалирующему влиянию межзвездного вещества Галактики. Но именно эта часть неба нам наиболее интересна.

Чтобы провести максимально тщательный осмотр Галактики, необходимо смотреть в рентгеновских лучах больших энергий (с увеличением энергии фотонов их проникающая способность сильно увеличивается,

в частности, фотоны с энергиями выше 10—15 кэВ беспрепятственно проходят сквозь всю Галактику). Долгое время такие обзоры Галактики были лишь мечтой астрофизиков. Основной проблемой работы с рентгеновскими фотонами высоких энергий является как раз их большая проникающая способность: такие фотоны очень трудно сфокусировать, а значит, невозможно получить качественное изображение.

Первые грубые изображения Галактики (да и всего неба) в жестких рентгеновских лучах были получены с помощью прибора-коллиматора, т.е. инструмента, поле зрения которого было ограничено коллиматором-трубой, на обсерватории HEAO1. Как чувствительность, так и угловое разрешение этого прибора были невелики и не могли удовлетворить исследователей в их желании знать о нашей Галактике больше.

Следующим большим шагом к получению высококачественной карты неба в жестких рентгеновских лучах стал французский телескоп «Сигма» на борту советской обсерватории «Гранат» (время работы на орбите 1989—1998 гг., см. рис.7). В телескопе «Сигма» для построения изображения использовался метод кодирующей апертуры, который работает по принципу — если что-то (фотон) нельзя отклонить (сфокусировать), то это можно остановить. Над детектором рентгеновских лучей устанавливается толстая пластина — «маска» — из поглощающего вещества (например, вольфрама), в которой прорезано большое число отверстий. Рентгеновское излучение проходит только через эти отверстия, и на поверхности детектора возникает картина ярких пятен, расположение которых зависит от координат источника излучения на небе. Другими словами можно сказать, что маска отбрасывает «тень» на детектор (см., например, рис.7, вверху). Дальнейший компьютерный анализ

тени позволяет восстанавливать изображение неба.

Обсерватория «Гранат» была запущена на орбиту в 1989 г. и сведена с орбиты в 1997-м. За восемь лет работы телескопом «Сигма» было получено множество уникальных результатов. Среди них — карта неба и, в частности, самая подробная на тот момент карта плоскости Галактики в жестких рентгеновских лучах, не подверженных влиянию межзвездного поглощения [12] (рис.8).

В чувствительности телескопов жесткого рентгеновского диапазона произошел большой скачок (в основном благодаря значительно увеличенным размерам) с запуском на орбиту обсерватории «Интеграл» (ESA, РКА) в 2003 г. и обсерватории Swift (NASA) в 2004 г.

Наблюдения обсерватории «Интеграл», начавшиеся после окончания цикла проверки работоспособности инструментов, почти немедленно принесли открытие практически нового класса «поглощенных» источников. Первым из них стал IGR J16318-4848 ([13], буквы IGR в названии источника отражают то, что он был открыт обсерваторией «Интеграл», а цифры указывают его небесные координаты), разительно отличающийся от тех, которые были открыты, например, обсерваторией UHURU. В жестких рентгеновских лучах он был очень ярк, а с уменьшением энергии фотонов становился все более тусклым и фактически пропадал на энергиях ниже 4—5 кэВ, т.е. там, где работают почти все рентгеновские телескопы (рис.9).

Исследования этого источника с помощью орбитальных и наземных инструментов позволили выяснить причину такого необычного поведения — это мощный звездный ветер звезды-компаньона [14, 15]. Очень плотный звездный ветер не только питает нейтронную звезду, давая топливо для ее мощнейшего энергетического реактора, но и скрывает

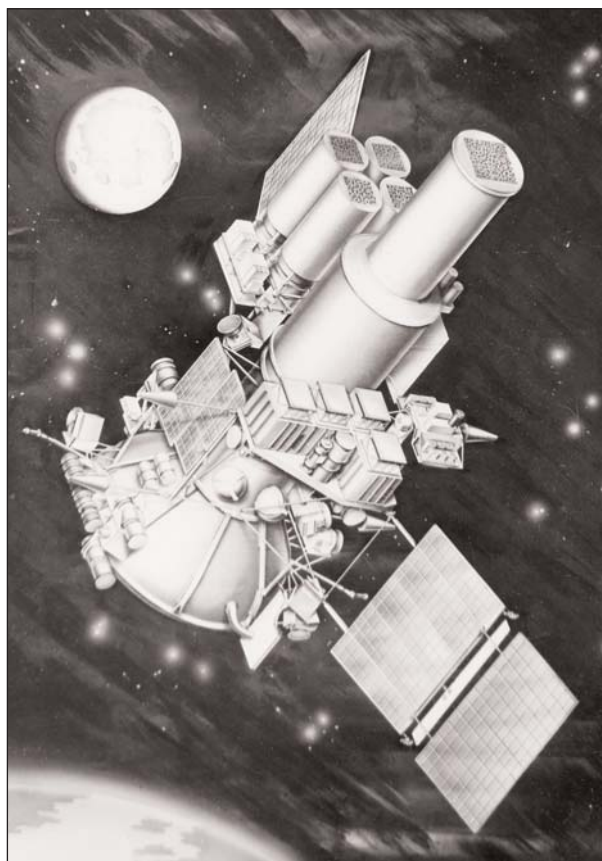
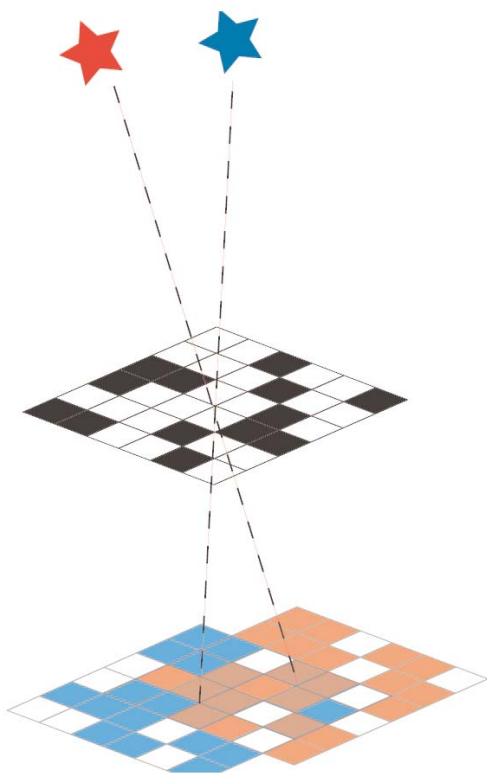


Рис.7. Схема работы телескопов с кодирующей апертурой (вверху). Источники в разных местах поля зрения телескопа отбрасывают разную тень на детектор. Компьютерный анализ изображения детектора позволяет восстановить картину на небе. Изображение советской орбитальной обсерватории «Гранат» (справа). Большая труба в центральной части спутника — телескоп «Сигма».

ее от наблюдателя, поглощая излучение мягкого и стандартного рентгеновского диапазона (энергии менее 7–10 кэВ), (рис.10). Влияние звездного ветра не ограничивается поглощением рентгеновского излучения нейтронной звезды. Холодное вещество ветра настолько плотно обволакивает двойную систему, что почти полностью поглощается также и оптическое излучение звезды-компаньона. Фактически оказалось, что только лишь инфракрасные лучи могут покинуть эту двойную систему почти беспрепятственно. Именно в этих лучах и были проведены исследования, позволившие пролить свет на природу загадочного объекта (это показывает, насколько важна работа в инфракрасных лучах; к сожалению, в нашей стране пока нет высоко-

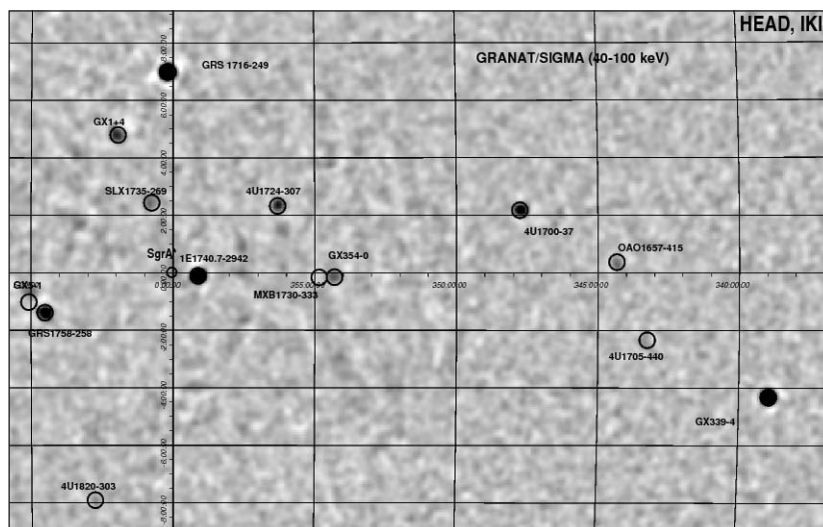


Рис.8. Область центра Галактики в диапазоне энергий 40—100 кэВ по результатам наблюдений телескопа «Сигма» обсерватории «Гранат». Черными кружками обозначены обнаруженные источники рентгеновского излучения — преимущественно аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры [12].

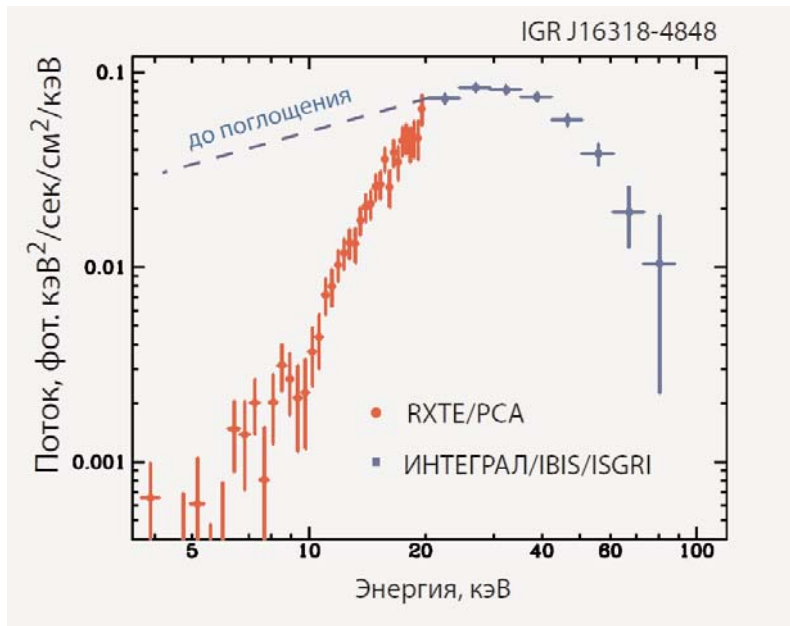


Рис.9. Спектр фотонов, испускаемых источником IGR J16318—4848, прототипом класса «поглощенных» источников, в большом количестве обнаруженных обсерваторией «Интеграл». Хорошо видно, что яркость источника сильно падает с уменьшением энергии фотонов, на энергии <5 кэВ (где работают основные телескопы рентгеновского диапазона) источник практически не виден.



Рис.10. Рисунок, показывающий, как могла бы выглядеть двойная система IGR J16318-4848. Мощный звездный ветер обычной звезды укрывает аккрецирующую нейтронную звезду (изображение ESA).

качественных астрономических инструментов, имеющих возможность работать в этом участке спектра)

Мощный звездный ветер, который может скрыть мягкие рентгеновские лучи источника, возникает обычно лишь у молодых массивных звезд. Ввиду их небольшого возраста они, как правило, не могут улететь далеко от места своего рождения, а такие области в нашей Галактике расположены преимущественно в спиральных рукавах. Следовательно, спиральные рукава должны быть излюбленным местом обитания «поглощенных» источников.

Дальнейшие наблюдения обсерватории «Интеграл» полностью подтвердили эти ожидания — в областях спиральных рукавов было открыто более десятка новых «поглощенных» источников рентгеновского излучения, компактных источников, «погребенных» под ветром молодых звезд. Молодые двойные системы с массивными звездами были обнаружены преимущественно в областях, в которых луч зрения проходит по касательной к спиральным рукавам в нашей Галактике, в то время как двойные системы с маломассивными звездами (а значит — старые двойные системы) распределены в Галактике так же, как и обыч-

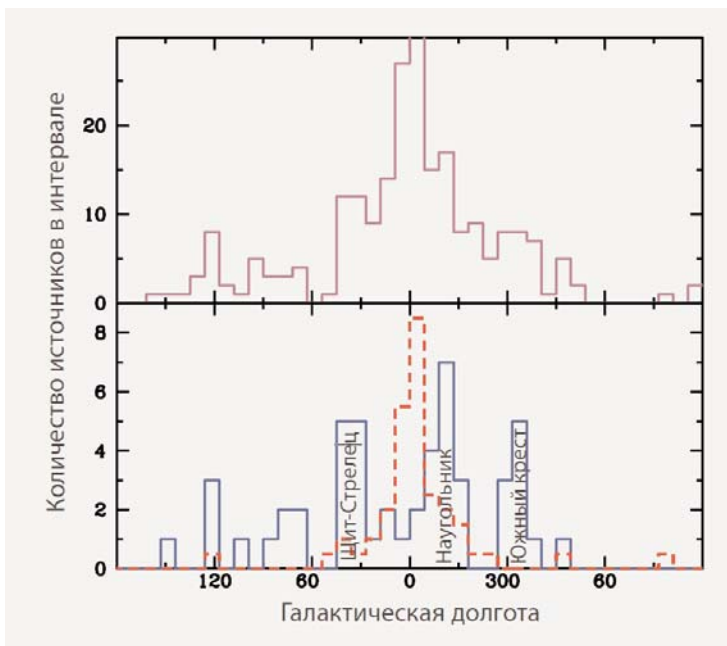


Рис.11. Распределение количества источников вдоль плоскости Галактики как функция галактической долготы по результатам обзора неба обсерватории «Интеграл». Вверху: все обнаруженные источники; внизу: 1 — рентгеновские двойные системы, у которых оптическая звезда имеет малую массу (масштаб рисунка по вертикали уменьшен); 2 — системы с массивной звездой-компаньоном [16]. Видно, что массивные двойные системы концентрируются к областям прохождения спиральных рукавов (названия рукавов подписаны) .

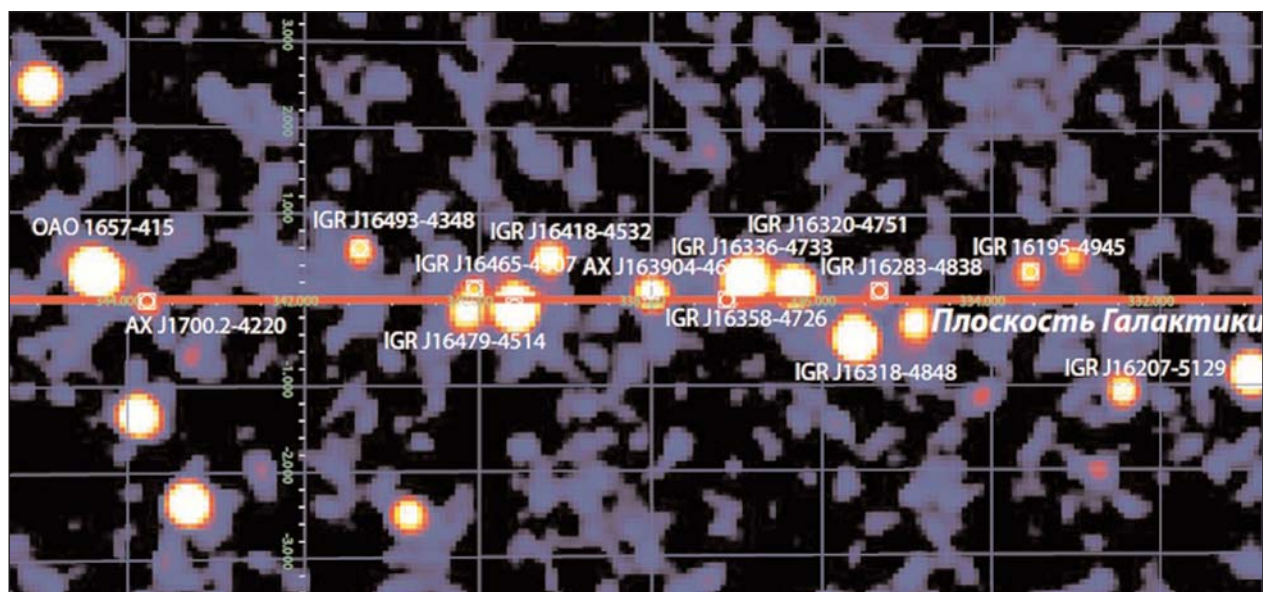


Рис.12. Карта части неба в области Галактической плоскости в направлении созвездия Наугольника по результатам наблюдений обсерватории «Интеграл». Красные и желтые пятна на карте обозначают рентгеновские источники. Своими названиями обозначены источники, у которых оптическая звезда молодая и массивная. Хорошо видно, что в этой области их число очень велико и большая часть из них открыта именно обсерваторией «Интеграл» (названия таких источников начинаются с IGR). Плоскость Галактики проходит через центр изображения.

ные звезды (рис.11). Более детальный вид одной из областей в плоскости Галактики, в которой было обнаружено большое число молодых двойных систем с массивными звездами, показан на карте на рис.12.

Гравитационные «маяки» Галактики?

Основное количество ярких (в рентгеновских лучах) нейтронных звезд находится в двойных системах с маломассивными звездами. В таких системах вещество обычной звезды постепенно перетекает на компактную, поставляя таким образом «топливо», необходимое для рентгеновского свечения компактной звезды. Перетекание происходит в результате того, что звезда переполняет свою полость Роша — геометрическую область, в которой притяжение звезды преобладает над притяжением компактного объекта и центробежными силами во вращающейся двойной системе (рис.13).

С самого начала исследования аккрецирующих объектов в двойных системах было ясно: такой процесс сам по себе (т.е. с учетом только долговременной эволюции самой звезды) не может дать темп перетекания, необходимый для того, чтобы обеспечить наблюдаемую яркость рентгеновских двойных систем. Как только какое-то заметное количество вещества перетечет с маломассивной

звезды на более массивную (компактную), параметры двойной системы изменятся таким образом (просто из-за законов сохранения), что полость Роша обычной звезды слегка увеличится и перетекание остановится до тех пор, пока последующая эволюция звезды не приведет к ее распуханию до нового размера полости Роша (т.е. на десятки и сотни миллионов лет).



Рис.13. Двойная звездная система с маломассивной оптической звездой (справа), вещество которой постепенно перетекает на компактный объект, вокруг которого формируется аккреционный диск (слева). Рисунок художника F.Suhleria. www.novacelestia.com.

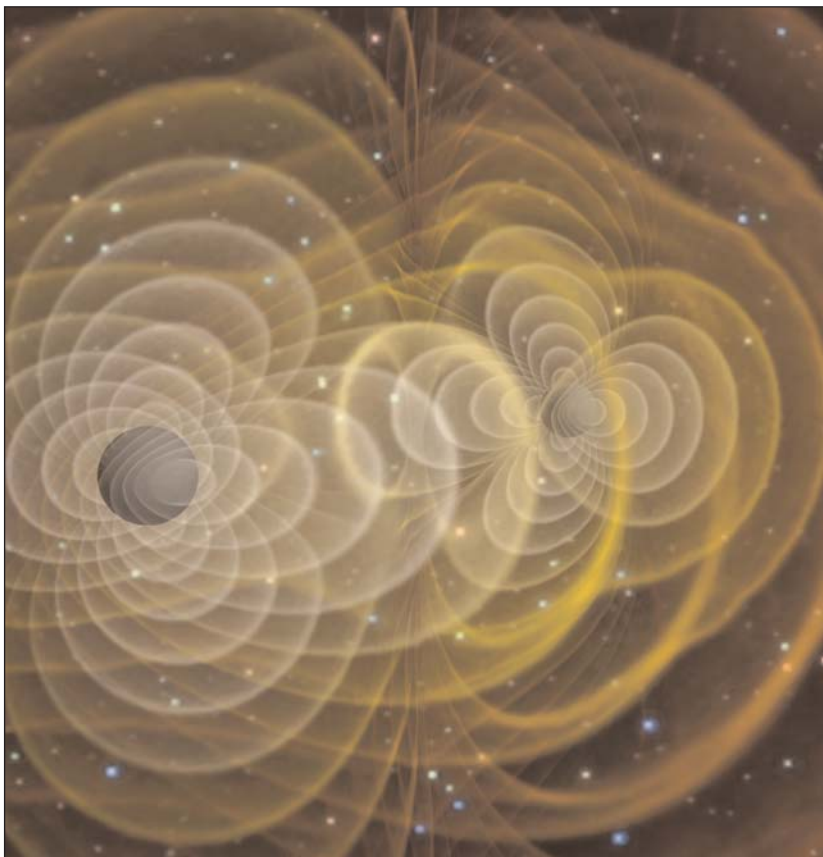


Рис.14. Схематичный вид гравитационных волн, излучаемых в тесной двойной системе. Рисунок NASA.

Чтобы перетекание продолжалось долгое время (а возраст маломассивных двойных систем составляет миллиарды лет) и с необходимым темпом, необходимо каким-то образом обеспечить потерю двойной системы своего углового момента, т.е. обеспечить торможение вращения двойной системы. В 70-х годах был предложен механизм, который позволял эффективно тормозить широкие двойные системы — торможение за счет магнитного звездного ветра оптической звезды [17]. В нем оптическая звезда, теряя вещество в виде звездного ветра, тормозилась за счет взаимодействия с ним через магнитное поле, а затем торможение вращения оптической звезды передавалось всей двойной системе приливными силами.

Пожалуй, самым интригующий механизм торможения

двойной системы — излучение двойной системой гравитационных волн. Расчеты показывали, что в достаточно тесных двойных системах (системах, орбитальный период которых не превышает 2–3 ч, т.е. с размером порядка орбиты Луны) именно гравитационные волны должны уносить их угловой момент (тормозить вращение) с темпом, достаточным для поддержания аккреции в двойных системах малой рентгеновской светимости.

Обнаружить гравитационное излучение таких двойных систем в настоящее время еще не представляется возможным (хотя такие попытки и предпринимаются, например, в эксперименте LISA). Но можно попытаться обнаружить влияние гравитационного излучения на долговременную эволюцию всей популяции рентгеновских двойных систем с маломассивными

компаньонами (см., например, [18, 19]). Так, можно систематически исследовать системы с малой рентгеновской светимостью (т.е. с малым темпом перетекания массы с оптической звезды на компактную) и показать, что они являются достаточно тесными, чтобы эффективно тормозиться за счет излучения гравитационных волн (рис. 14).

Это задача — не из легких. Мало того что нужно обнаружить такие слабые рентгеновские источники, необходимо также и измерить параметры их орбит.

Обычно орбитальные параметры двойных систем измеряют в оптическом диапазоне с помощью различных наземных телескопов. Для двойных систем малых размеров эти наблюдения представляют очень большую сложность. Свет маломассивных двойных систем рождается преимущественно в результате переработки рентгеновского и ультрафиолетового излучения компактного объекта в относительно холодных (с температурой всего несколько тысяч градусов) областях аккреционного диска. Следовательно, если размер двойной системы мал (а именно за такими двойными системами мы и хотим охотиться), то и их оптическое излучение будет чрезвычайно слабо и такой объект очень легко потерять на фоне огромного количества звезд, которые мы наблюдаем в направлении галактического центра и галактической плоскости.

Тем не менее есть надежда на значительный прогресс в этом направлении в самое ближайшее время. Для первичного поиска рентгеновских объектов — кандидатов в тесные двойные системы — был использован обзор центральной части Галактики (Галактического балджа) обсерватории «Интеграл» (рис.15). Этот обзор в настоящее время остается самым чувствительным обзором такой большой части Галактики и практически идеально подходит для наших целей.

Единственный существенный его минус — недостаточная точность определения положения обнаруженных источников. Фактически это — расплата за большое поле зрения основных приборов обсерватории. Для исправления ситуации были предложены собрать «Интеграл» — орбитальные рентгеновские телескопы с фокусирующей оптикой, Chandra, Swift/XRT, XMM-Newton. Планируется, что с их помощью в 2009 г. положения на небе открытых рентгеновских источников будут уточнены вплоть до $1-0.5''$ (примерно две десятитысячные доли градуса) и с помощью наземных телескопов будут проведены глубокие оптические наблюдения нужных областей неба. Есть все основания полагать, что эти гравитационные «маяки» Галактики будут обнаружены.

Рекламная пауза

Еще 30 лет назад было обнаружено, что не все рентгеновское излучение Галактики можно объяснить вкладом «титанов» — ярких аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд. Исследование областей, в которых не было явных рентгеновских источников, показало,

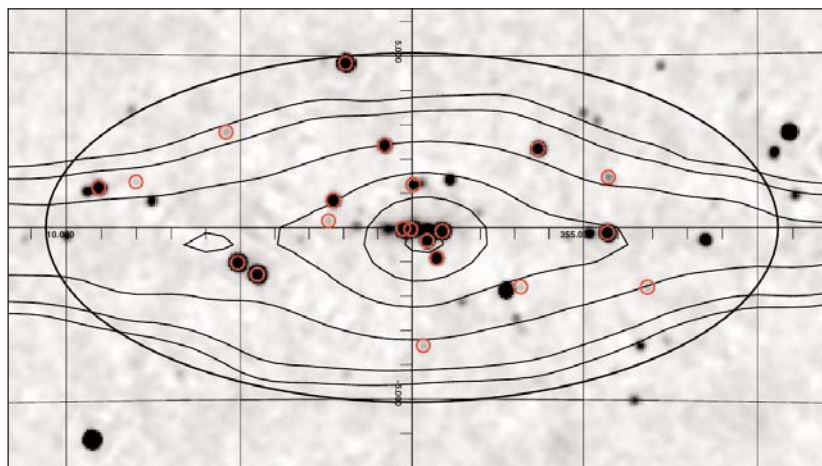


Рис.15. Изображение центральной части Галактики по результатам наблюдений обсерватории «Интеграл». Темные кружки показывают источники рентгеновского излучения, их относительно большой размер — результат ограниченного углового разрешения инструмента. Кружками обозначены объекты, оптические звезды в которых предположительно имеют малую массу. Контурсы показывают яркость Галактики в инфракрасных лучах [19].

ло, что вдоль плоскости галактики есть некое рентгеновское свечение, сконцентрированное в пределах достаточно узкой полосы. «Рентгеновский хребет Галактики», как его назвали, поставил в тупик астрофизиков всего мира. По всем свойствам это излучение очень похоже на излучение очень горячего газа с температурой около 10 млн градусов. Но наша Галактика совершенно не способна удерживать

столь стремительную плазму (характерные тепловые скорости в ней порядка 1000 км/с)! Это по силам лишь огромным скоплениям галактик с общей массой, тысяч в десять превышающей нашу. Загадка была разгадана совсем недавно, о чем сообщалось в предыдущем номере «Природы». Но эта тема заслуживает отдельной статьи, которую мы вскоре предложим вниманию читателя. ■

Литература

1. *Giacconi R., Gursky H., Paolini F.R., Rossi B.B.* // Physical Review Letters. 1962. V.9. №11. P.439—443.
2. *Mazets E.P., Golenetskii S.V., Ilinskii V.N. et al.* // Astrophysical & Space Science. 1975. V.33. P.347—357.
3. *Marshall F.E., Boldt E.A., Holt S. et al.* // Astrophysical J. 1980. V.235. P.4—10.
4. *Barcons X., Fabian A.C., Rees M.J.* // Nature. 1991. V.350. P.685—687.
5. *Setti G., Woltjer L.* // International Astronomical Union Circular. 1973. V.55. P.208—211.
6. *Giacconi R., Bechtold J., Branduardi G. et al.* // Astrophysical J. 1979. V.234. P.L1—L7.
7. *Churazov E., Sunyaev R., Revnivtsev M. et al.* // Astronomy & Astrophysics. 2007. V.467. P.529—540.
8. *Hudson M.J.* // Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 1993. V.265. P.43—71.
9. *Krivonos R., Revnivtsev M., Lutovinov A. et al.* // Astronomy & Astrophysics. 2007. V.475. P.775—784.
10. *Miyaji T., Labav O., Jaboda K., Boldt E.* // Astrophysical J. 1994. V.434. P.424.
11. *Revnivtsev M., Molkov S., Sazonov S.* // Astronomy & Astrophysics. 2008. V.483. P.425.
12. *Ревнивцев М., Сюняев Р., Гильфанов М. и др.* // Письма в Астрономический журнал. 2004. Т.30. С.527—535.
13. *Courvoisier T.J.-L., Walter R., Rodriguez J. et al.* // IAUC. 2003. V.8063. P.3.
14. *Ревнивцев М., Сазонов С., Гильфанов М., Сюняев Р.* // Письма в Астрономический журнал. 2003. Т.29. С.664.
15. *Chaty S., Filliatre P.* // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica. 2004. V.20. P.65—66.
16. *Lutovinov A., Revnivtsev M., Gilfanov M., Sunyaev R.* // arXiv, arXiv:0801.3589. 2008.
17. *Verbunt F., Zwaan C.* // Astronomy & Astrophysics. 1981. V.100. P.L7—L9.
18. *Постнов К., Куранов А.* // Письма в Астрономический журнал. 2005. Т.31. С.7—14.
19. *Revnivtsev M., Lutovinov A., Churazov E. et al.* // Astronomy & Astrophysics. 2008. V.491. P.209—217.