

Сергей Гребенев, Роман Кривонос, Александр Лутовинов,
Михаил Ревнивцев, Рашид Сюняев и Евгений Чуразов

Взгляд на галактику сквозь толщу пыли и газа

Подобно тому, как врач с помощью рентгеновского снимка может видеть нашу грудную клетку насквозь, обсерватория «Интеграл» сквозь завесу пыли и газа, полностью поглощающую видимый свет, способна наблюдать самые удаленные области Галактики

Тысячелетия человеческой истории были и тысячелетиями развития оптической астрономии. И только в последние 50 лет мы смогли увидеть Вселенную в широчайшем диапазоне длин волн — от радио-, инфракрасного и ультрафиолетового до рентгеновского и гамма-диапазонов. Длина волны радиоизлучения может составлять несколько метров, тогда как для самого коротковолнового излучения, исследуемого современными телескопами, она не превышает 10^{-17} см. Характерная энергия фотонов при этом меняется почти на 20 порядков величины. И в каждом из этих диапазонов энергий картина Вселенной оказывается столь же насыщенной и интересной, как и в оптическом.

Жесткие рентгеновский и гамма-диапазоны, соответствующие характерным энергиям фотонов от 10^{-8} эрг до 10^{-5} эрг, занимают особое место. Прежде всего, это связано с природой астрономических источников, способных производить излучение со столь высокими энергиями. Среди них такие компактные и массивные объекты, как черные дыры, нейтронные звезды и белые карлики. Например, типичная нейтронная звезда в нашей Галактике при массе на 40% большей, чем масса Солнца, имеет размер порядка 10 км. Вещество, падающее на подобную звезду, может разогреться до колоссальных температур, достаточных, чтобы возникло рентгеновское излучение. Кроме того, многие ядерные превращения вещества происходят с излучением квантов, имеющих определенные энергии, попадающие в диапазон от нескольких сотен кэВ до нескольких МэВ. Например, превращение радиоактивного изотопа кобальта Co^{56} , возникающего при взрывах сверхновых, в привычное нам железо (Fe^{56}) сопровождается излучением линий с энергией 847 кэВ и 1,23 МэВ. Увидеть подобные линии означает лучше понять процесс возникнове-

ния многих химических элементов в недрах звезд. Именно такие задачи и стоят перед обсерваторией «Интеграл», (*INTEGRAL, International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*), являющейся совместным проектом Европейского космического агентства, Российского космического агентства и Национального управления США по аэронавтике и исследованию космического пространства. Спутник был выведен на орбиту российской ракетой-носителем «Протон» 17 октября 2002 г., с тех пор успешно работает и каждые день передает на Землю новую информацию. Российские ученые имеют приоритетные права на использование четверти всего наблюдательного времени обсерватории.

Диапазон энергий, в котором работают основные приборы обсерватории, простирается от нескольких кэВ до нескольких МэВ. Фотоны с такой энергией могут легко проникать сквозь толщи пыли и газа, скрывающие от нас многие уникальные объекты нашей Галактики, например, ее центральную зону. В оптическом диапазоне излучение из этой области до нас не доходит, т.к. пыль ослабляет оптический поток в 10^{20} раз, а излучение в жестком рентгеновском и мягком гамма-диапазонах практически не чувствительно к ней. В то же время из-за высокой проникающей способности жесткого рентгеновского излучения почти невозможно изготовить зеркало, способное сфокусировать такое излучение, которое не отражается от зеркала, а проникает в него. Альтернативой зеркалам в жестких рентгеновских лучах служат «кодирующие» (теневые) маски. Над детектором рентгеновских лучей устанавливают пластину из вольфрама (маску) толщиной в несколько сантиметров, в которой прорезано большое число отверстий. Рентгеновское излучение проходит через эти отверстия, и на поверхности детектора возникает картина ярких пятен, расположение которых ►

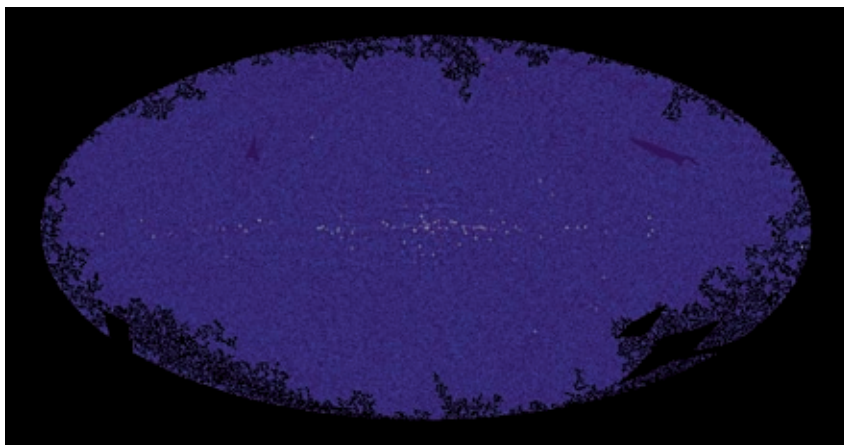


Рис. 1. Карта всего неба в диапазоне энергий 20–50 кэВ, полученная обсерваторией «Интеграл». Яркие точки — самые мощные источники рентгеновского излучения в Галактике. Карта построена в галактических координатах так, что центр Галактики соответствует середине карты. Черные пятна неправильной формы — области неба, еще не наблюдавшиеся обсерваторией. Совокупность ярких источников, образующих полосу вдоль плоскости Галактики, — это знакомый нам Млечный путь, но в жестких рентгеновских лучах

зависит от координат источника излучения. Другими словами можно сказать, что маска отбрасывает «тень» на детектор. Дальнейший компьютерный анализ тени позво-

ляет восстанавливать изображение неба (рис. 1). Метод кодированных масок хорошо знаком астрофизикам в России. Он также использовался в двух других российских орбитальных обсерваториях — «Рентген» (на модуле «Квант» станции «Мир») и «Гранат».

ОБ АВТОРАХ

Сергей Андреевич Гребенев — ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН, доктор физико-математических наук.

Роман Александрович Кривонос — научный сотрудник Института космических исследований РАН, аспирант.

Александр Анатольевич Лутовинов — старший научный сотрудник Института космических исследований РАН, кандидат физико-математических наук.

Михаил Геннадиевич Ревнивцев — старший научный сотрудник Института космических исследований РАН, кандидат физико-математических наук.

Рашид Алиевич Сюняев — академик Российской Академии наук, главный научный сотрудник Института космических исследований РАН, научный руководитель проекта *INTEGRAL* от России, директор Института астрофизики им. Макса Планка.

Евгений Михайлович Чуразов — ведущий научный сотрудник Института космических исследований РАН, доктор физико-математических наук.

Рождение и гибель позитронов

Один из основных телескопов обсерватории «Интеграл», спектрометр *SPI* на основе кристаллов германия высокой чистоты, способен регистрировать эмиссионные линии на энергиях сотен и тысяч кэВ. Эти линии — прямые источники информации о ядерных превращениях вещества в Галактике. Ярчайшей из них в гамма-диапазоне является линия аннигиляции электронов и их античастиц, позитронов, на энергии 511 кэВ. Позитроны (анти-электроны) рождаются и на Земле, и в космосе. Столкновение позитрона с обычным электроном может привести к аннигиляции — исчезновению этих двух частиц и рождению вместо них двух или нескольких гамма-квантов. Когда при аннигиляции позитрона и электрона рождаются два фотона, то каждый из них уносит энергию, равную

массе покоя электрона или позитрона, — 511 кэВ. Особенно сильное излучение в этой линии идет из центральной зоны нашей Галактики (рис. 2), где каждую секунду рождаются и исчезают более 10^{43} позитронов. Несмотря на то, что впервые линию 511 кэВ обнаружили в излучении центральной зоны Галактики более 30 лет назад, однозначного ответа о природе аннигиляционного излучения до сих пор нет, т.к. производство позитронов могут обеспечить сразу несколько конкурирующих физических механизмов.

Самый естественный механизм — рождение позитронов при ядерных превращениях вещества, например, при распаде радиоактивных изотопов ^{26}Al или ^{56}Co , возникающих во время вспышек сверхновых или новых звезд. Никто не сомневается, что такой процесс действительно происходит в Галактике, но неизвестно, обеспечивает ли он доминирующий вклад в наблюдаемое аннигиляционное излучение. Например, важнейшим поставщиком изотопа ^{26}Al являются вспышки сверхновых второго типа (конечной стадии эволюции массивных звезд), которые «живут» главным образом в диске нашей Галактики. Можно было бы предположить, что диск Галактики и должен быть особенно ярким в аннигиляционном излучении. Однако карты, полученные обсерваторией, скорее говорят о том, что наиболее мощным источником позитронов служит не диск Галактики, а ее центральная область, где мало массивных звезд (рис. 2). С этой точки зрения предпочтительна гипотеза, согласно которой позитроны порождаются термоядерными взрывами гораздо менее массивных и более старых звезд. Были и более смелые предположения, например, что позитроны рождаются при взаимодействии космических лучей с нейтральным или молекулярным газом, либо в ближайшей окрестности черных дыр или нейтронных звезд. Но самой экзотической

стала гипотеза, согласно которой позитроны рождаются при аннигиляции частиц темной материи, чья плотность должна быть максимальной в центральной зоне Галактики. Концепция «темной» материи возникла в астрофизике достаточно давно — измерения масс галактик и их скоплений неизменно приводили к значениям, значительно превышающим массу звезд и газа, видимых с помощью телескопов. Современная астрофизика постулирует наличие слабо взаимодействующих частиц (темной материи): вещества, которое имеет массу, но которое нельзя (или сложно) увидеть. Хотя природа темной материи пока понята недостаточно, теория допускает, что она может порождать и позитроны. Вышесказанное предполагает пересмотр многих общепринятых взглядов в современной физике, но именно поэтому гипотеза и интересна.

Одним из этапов на пути понимания природы позитронов в Галактике стало исследование параметров среды, в которой происходит аннигиляция позитронов. Практически все процессы рождения позитронов приводят к образованию «горячих» позитронов, т.е. частиц, чья кинетическая энергия сравнима или превышает их массу покоя. При этом вероятность аннигиляции достаточно мала, и позитроны, как правило, успевают потерять значительную часть своей энергии до того, как произойдет аннигиляция. Время между рождением и аннигиляцией может составлять от десятков тысяч до миллионов лет, в течение которых позитрон дрейфует от места своего рождения до места исчезновения. Если вещество вокруг позитрона достаточно холодное, то до аннигиляции позитрон захватывает электрон и образует так называемый «позитроний» (аналог атома водорода), в котором роль положительно заряженного ядра (протона в случае атома водорода) выполняет позитрон. Просуществовав недолгое

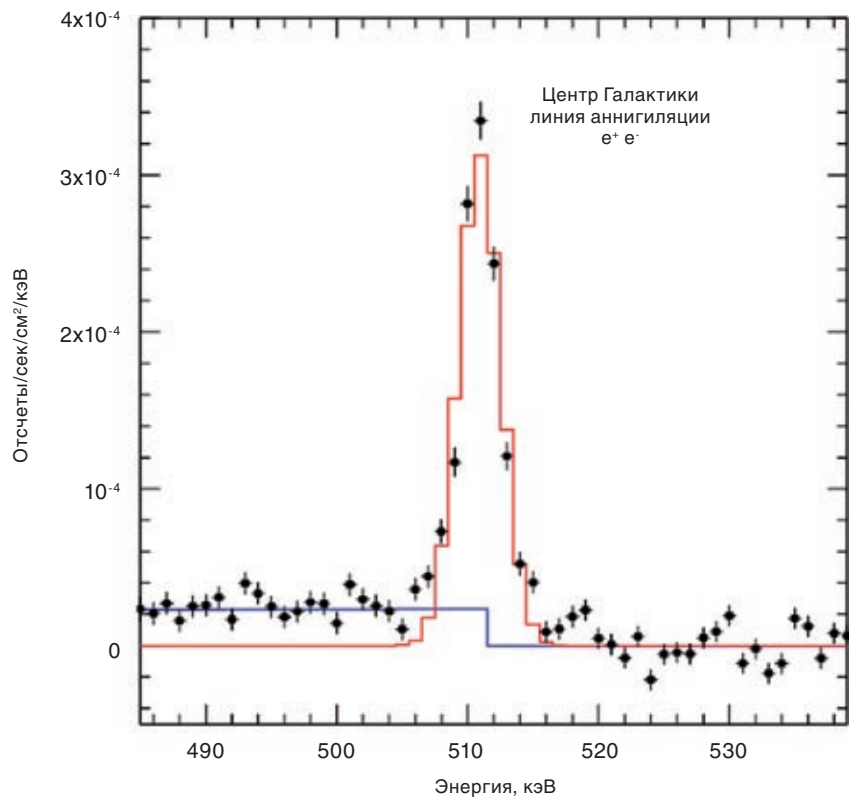
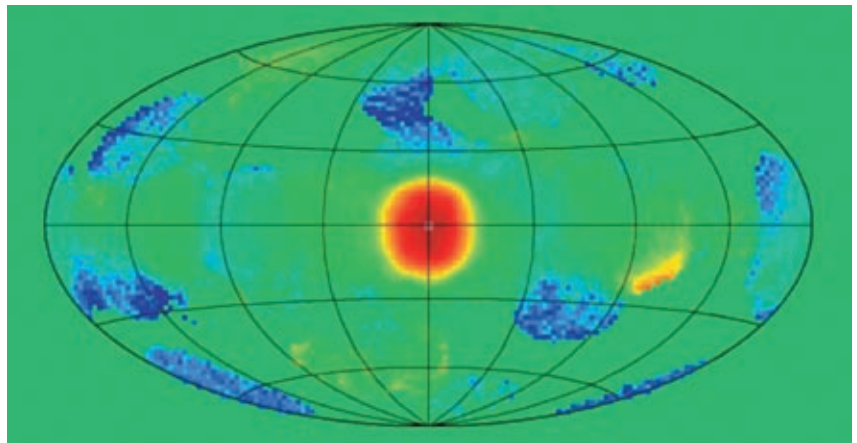


Рис. 2. Карта неба в аннигиляционном излучении электрон-позитронных пар. Яркое пятно в центре означает, что в центральной области нашей Галактики каждую секунду аннигилирует более 10^{43} позитронов (вверху). Спектр аннигиляционного излучения центральной зоны Галактики. Красная кривая показывает вклад пара-позитрония, синяя — орто-позитрония (внизу)

время, позитроний, наконец, аннигилирует, испуская жесткие гамма-лучи. Различают два типа позитрония — пара-позитроний и орто-позитроний, отличающихся взаимной ориентацией спинов электрона и позитрона. Пара-позитроний порождает два фотона с энергией 511 кэВ, тогда как орто-позитроний аннигилирует с образованием

трех фотонов различных энергий. В результате для наблюдателя с Земли спектр аннигиляционного излучения распадается на две компоненты. Первая — узкая линия с энергией 511 кэВ, а вторая — непрерывный спектр на более низких энергиях, связанный с аннигиляцией орто-позитрония (рис. 2 и 3). Альтернативой аннигиляции ▶

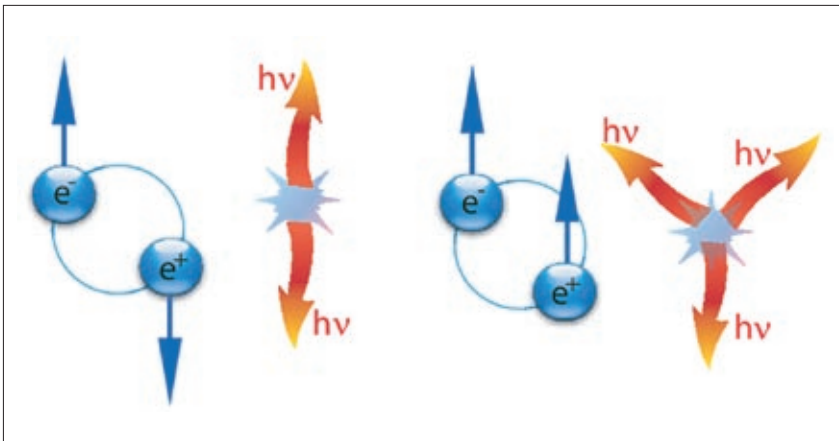


Рис. 3. Позитрон и электрон вместе могут образовать подобие атома водорода, где роль протона выполняет позитрон. Такой «атом» называют позитронием. Просуществовав ничтожную долю секунды, атом позитрония аннигилирует с образованием двух или трех фотонов, в зависимости от того, как были сориентированы спины частиц в позитронии. При гибели пара-позитрония (слева) образуются два фотона с энергией 511 кэВ. А для орто-позитрония законы сохранения углового момента запрещают его распад на два кванта, и он распадается с образованием трех фотонов. Телескоп *SPI* видит излучение каждого вида позитрония.

через образование позитрония служит прямая аннигиляция, когда электрон и позитрон погибают «на лету», порождая два фотона. Оказывается, что доля прямых аннигиляций и ширина возникающей линии 511 кэВ чувствительны к температуре среды и степени ее ионизации. Спектрометр *SPI* выполнил рекордные по точности измерения спектра аннигиляционного излучения. Выяснилось, что данные наблюдений лучше всего совместимы с аннигиляцией позитронов в «теплой» фазе межзвездной среды с характер-

погибающих в этой фазе, не превосходит 10%.

Кроме того, измеряя энергию аннигиляционной линии и ее ширину, мы можем сказать, что позитроны погибают в среде, которая как целое движется относительно Земли со скоростью, не превышающей 40–50 км/с. Действительно, измеренная энергия центра линии совпадает с энергией покоя электрона/позитрона с очень высокой точностью: $E/m_e c^2 = 0,99991 \pm 0,00015$. При общей скорости движения среды относительно нас более 50 км/с

Типичная нейтронная звезда в нашей Галактике при массе на 40% большей, чем масса Солнца, имеет размер порядка 10 км

ной температурой порядка 8 тыс. К и степенью ионизации среды порядка 10%. Среда с такими параметрами действительно часто встречается в Галактике, и на нее приходится значительная доля массы газа. А вот в самой горячей фазе межзвездной среды, имеющей температуру порядка миллиона градусов и заполняющей значительный объем, аннигиляция почти не происходит — доля позитронов,

эффект Доплера вызвал бы более значительное расхождение. Аналогично, наблюдаемая ширина линии показывает, что разброс внутренних скоростей в среде не превышает 800 км/с.

Все факты свидетельствуют о том, что производство позитронов не связано с самыми массивными звездами в диске Галактики. Наблюдаемое аннигиляционное излучение концентрируется в ее центральной области

размером около килопарсека. При этом аннигиляция происходит скорее всего в диффузной среде. Модели, связывающие позитроны с маломассивными звездами или темной материей, выглядят предпочтительными. Задача, которая сейчас стоит перед обсерваторией, — попытаться найти надежные свидетельства за или против предложенных моделей.

Нейтронные звезды в звездном ветре

Одним из неожиданных и интересных результатов, полученных обсерваторией, стало открытие нового класса рентгеновских источников, получивших название «поглощенных».

В нашей Галактике ярчайшие источники рентгеновского излучения — это особый класс двойных звездных систем, в которых один из компаньонов представляет собой обычную звезду, как наше Солнце, а второй компаньон — компактный объект: черную дыру или нейтронную звезду. Вещество с обычной звезды захватывается гравитационным полем компактного объекта и падает на него, выделяя при этом огромное количество энергии, вплоть до 10–50% от энергии покоя падающего вещества $E=mc^2$. При этом оно разогревается до температур в десятки и сотни миллионов градусов и становится мощным источником рентгеновского излучения. Сотни подобных объектов были открыты одним из первых специализированных рентгеновских спутников «Ухуру» (в переводе с суахили — «свобода», запущен в Кении) в 70-х гг. прошлого века. Однако источник *IGR J16318-4848* (цифры, напоминающие телефонный номер, говорят о положении источника на небе), открытый обсерваторией, оказался совсем другим. В жестких рентгеновских лучах это яркий источник, но чем ниже энергия фотонов, тем слабее он становится. В результате многочисленные наблюдения той же области неба

спутниками, работающими в стандартном рентгеновском диапазоне (как, например, упомянутая выше обсерватория «Ухуру»), просто были не в состоянии обнаружить подобный объект. Весьма характерная форма спектра источника *IGR J16318-48-48* означает, что на низких энергиях излучение поглощено газом или пылью (рис. 4). Вслед за первым «поглощенным» источником последовал второй, третий, и к настоящему времени обсерватория открыла уже более десятка представителей этого уникального класса объектов.

Природа источников стала понятна после исследования в широком диапазоне длин волн (от радио- до жесткого рентгеновского диапазона). Было обнаружено, что рентгеновский поток большей части новых источников испытывает регулярные колебания с периодом в сотни секунд. То, что период таких колебаний с высокой точностью остается постоянным, указывает на то, что компактным объектом в двойной системе является нейтронная звезда с сильным магнитным полем ($>10^{12}$ Гс). Столь сильное поле заставляет вещество, падающее на нейтронную звезду и дающее рентгеновское излучение, собираться в трубки и каналы вблизи магнитных полюсов звезды. Вращение звезды приводит к наблюдаемым пульсациям. Принципиальным для решения вопроса о природе этих объектов является сильное поглощение. Новый класс источников, открытый обсерваторией, это, скорее всего, молодые звездные системы, в которых масса обычной звезды во много раз превышает массу Солнца. Массивные звезды обладают мощным звездным ветром, истекающим с их поверхности и окружающим нейтронную звезду плотным слоем вещества, которое поглощает излучение (рис. 5). На более высоких энергиях поглощение в звездном ветре ослабевает и источник становится ярким.

Термоядерные реакции, протекающие в недрах звезд, обеспечивают энергией и наше Солнце, и более массивные звезды, но в них термоядерное горение происходит значительно более эффективно. Например, звезда, в 10 раз массивнее Солнца, каждую секунду производит в 10 тыс. раз больше энергии, чем Солнце. Очень массивные звезды быстро расходуют свой запас термоядерного горючего и живут сравнительно недолго. То, что открытые обсерваторией источники входят в двойные системы с очень массивными звездами, означает, что они образовались 10 млн. лет назад. Области Галактики, где наблюдается процесс интенсивного звездообразования, хорошо известны. Прежде всего, речь идет о спиральных рукавах Галактики, где возмущения плотности, бегущие по газу, провоцируют неустойчивости, ведущие к формированию звезд. Подобные рукава хорошо видны на снимках многих спиральных галактик, например, в галактике

Туманность Андромеды. Сравнение карты рукавов нашей Галактики и распределения «поглощенных» источников действительно показало, что они тяготеют к галактическим рукавам. Это развеяло последние сомнения относительно того, что обсерватория обнаружила новую популяцию очень молодых и мощных рентгеновских источников, скрытых облаком звездного ветра от телескопов, работающих на более низких энергиях.

Гиганты и карлики

По-настоящему ярких рентгеновских источников — черных дыр или нейтронных звезд, активно поглощающих вещество с соседней звезды-компаньона, — в Галактике сравнительно немного, не больше нескольких сотен. Но именно эти источники обеспечивают более 95% рентгеновского излучения Галактики. Это поистине гиганты в мире рентгеновских источников, особенно по сравнению с оптическим диапазоном, в котором светимость ▶

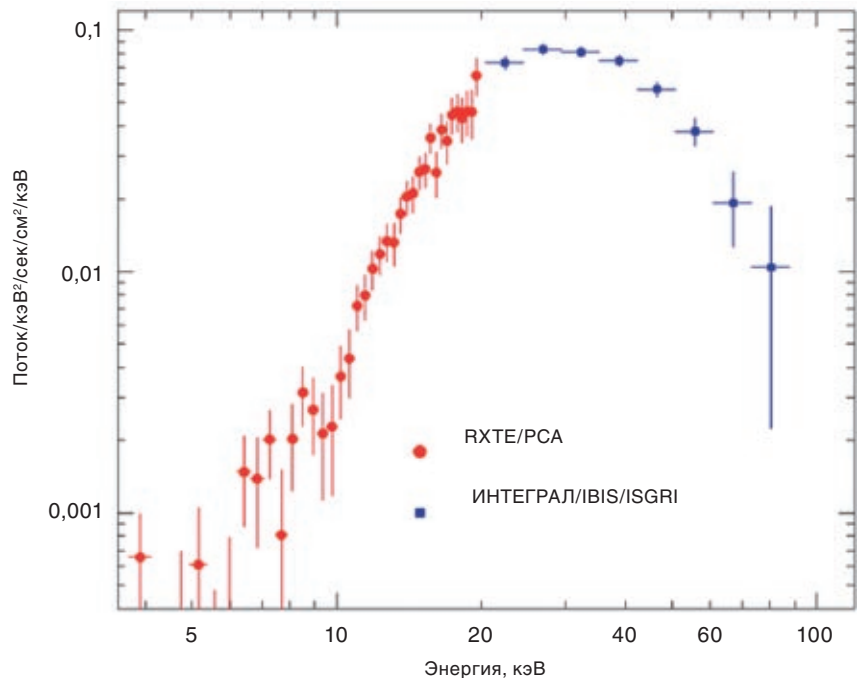


Рис. 4. Спектр первого «поглощенного» источника *IGR J16318-4848*, открытого обсерваторией «Интеграл». Жесткая часть спектра ($E > 20$ кэВ) получена с помощью телескопа *IBIS* обсерватории «Интеграл» (синие точки); спектр ниже 20 кэВ построен по данным обсерватории *RXTE* (красные точки). Ниже 10 кэВ излучение практически полностью поглощено, что и обусловило название для этого класса объектов

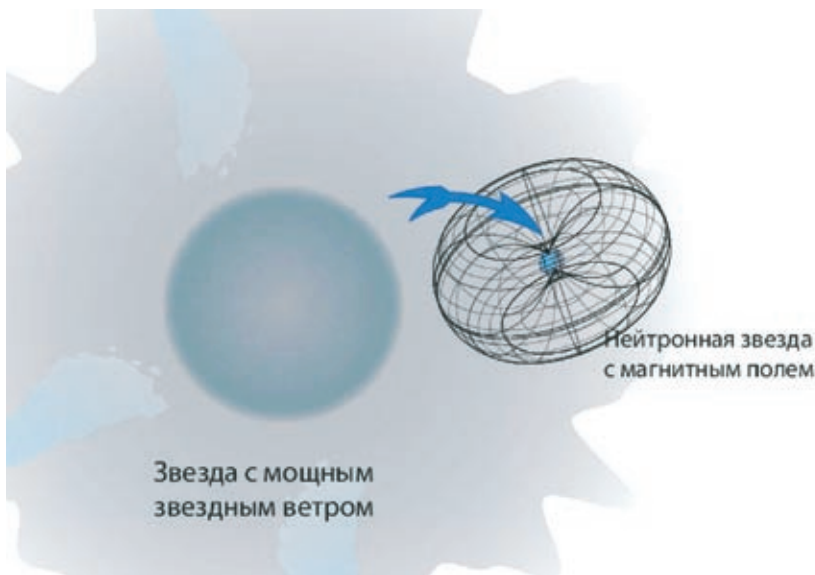


Рис. 5. Схематическое изображение «поглощенного» рентгеновского источника, компактным объектом в котором является молодая нейтронная звезда с магнитным полем. Мощный звездный ветер оптической звезды питает аккрецию на нейтронную звезду с магнитным полем и в то же время создает оболочку, в которой поглощается мягкое рентгеновское излучение, исходящее с магнитных полюсов нейтронной звезды

Галактики определяется совокупностью 100 млрд. звезд, подобных Солнцу. Природа оставшихся нескольких процентов от полного рентгеновского излучения Галактики долгое время оставалась загадкой.

Уже более 20 лет назад было обнаружено, что наряду с яркими рентгеновскими источниками, о которых шла речь выше, вся галактическая плоскость — источник слабого рентгеновского излучения. Попытки

«увидеть», что излучение создается совокупностью компактных рентгеновских источников, не дали результатов. Даже при высочайшей чувствительности и угловом разрешении телескопы видели лишь слабое и протяженное свечение, идущее от плоскости Галактики. Исследователи предположили, что наблюдаемое излучение рождается в горячей и разреженной плазме, заполняющей значительный объем в диске Галактики, о чем свидетель-

ствовали наблюдения спектра излучения диска, имеющего все характеристики излучения горячей плазмы. Практически единственной, но серьезнейшей проблемой в этом подходе было то, что, судя по наблюдаемому спектру, эта плазма должна быть разогрета до температуры порядка 100 млн. °С. Гравитационное поле Галактики не способно удержать в диске плазму с такой температурой, следовательно, плазма должна постоянно истекать из диска Галактики, унося с собой огромное количество энергии. Для поддержания концентрации плазмы в диске Галактики требуется источник энергии, на несколько порядков превышающий ожидаемое энерговыделение при взрывах сверхновых, если наши оценки частоты их появлений верны. Еще более экзотическим выглядит предположение о каком-то принципиально новом источнике энергии, компенсирующем потери энергии оттекающей плазмы. В таком виде дилемма природы слабого рентгеновского свечения плоскости Галактики (так называемый «хребет Галактики») просуществовала много лет. Но так ли неизбежен вывод о том, что свечение не связано с отдельными рентгеновскими источниками? Ведь совершенно уверенно мы знаем лишь то, что эти гипотетические источники не могут быть слишком яркими (со светимостью больше, чем 10^{35} эрг/с), иначе они уже были бы обнаружены (рис. 6).

Телескопы обсерватории «Интеграл» оказались наилучшим образом приспособлены для исследования природы хребта Галактики в жестком рентгеновском диапазоне. В самом деле, свечение хребта Галактики очень слабое, а значит, для того, чтобы собрать большой поток от него, телескоп должен иметь широкое поле зрения (например, как поле зрения телескопа IBIS обсерватории «Интеграл», 29x29 градусов). Одновременно необходимо избавиться от вклада

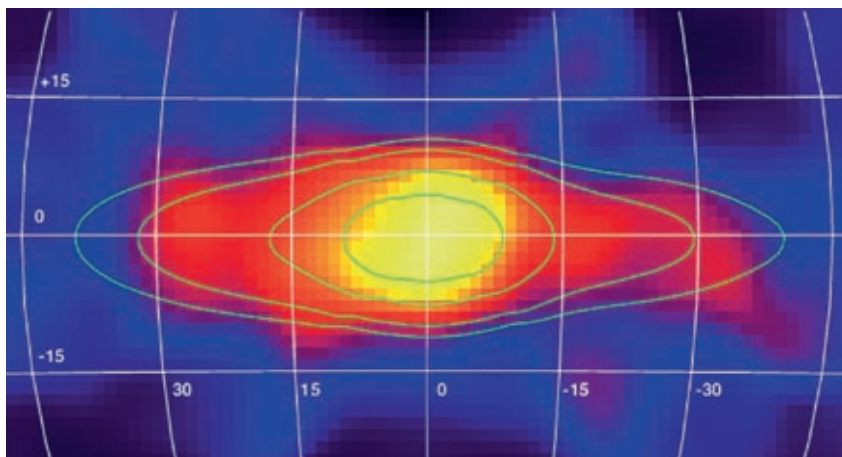


Рис. 6. Карта излучения хребта Галактики, полученная обсерваторией «Интеграл». Контурами показано распределение поверхностной яркости Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне, который хорошо отслеживает распределение звезд

ярких галактических источников, на фоне которых излучения галактической плоскости практически не видно. Все эти задачи могут быть успешно решены при помощи обсерватории «Интеграл». Обсерватория методично осматривала один участок плоскости Галактики за другим, убирая вклады ярчайших источников и накапливая информацию об излучении хребта. Результатом этих наблюдений стал однозначный вывод — распределение слабого рентгеновского свечения плоскости Галактики точно следует распределению инфракрасного излучения, создаваемого обычными звездами типа Солнца (рис. 6). Другими словами, существует прямая пропорциональность между числом звезд в данном объеме и рентгеновским излучением этого же объема. Таким образом, вместо предположения о диффузном излучении разреженной плазмы на первый план выходит гипотеза о том, что рентгеновское излучение связано с особым подклассом звезд или звездных систем, являющихся очень слабыми рентгеновскими источниками. Но если это так, то подобные системы, причем в четко определенной пропорции, можно обнаружить и в «ближайшей» — в пределах сотни парсек — окрестности Солнца, где мы наперечет знаем даже слабые

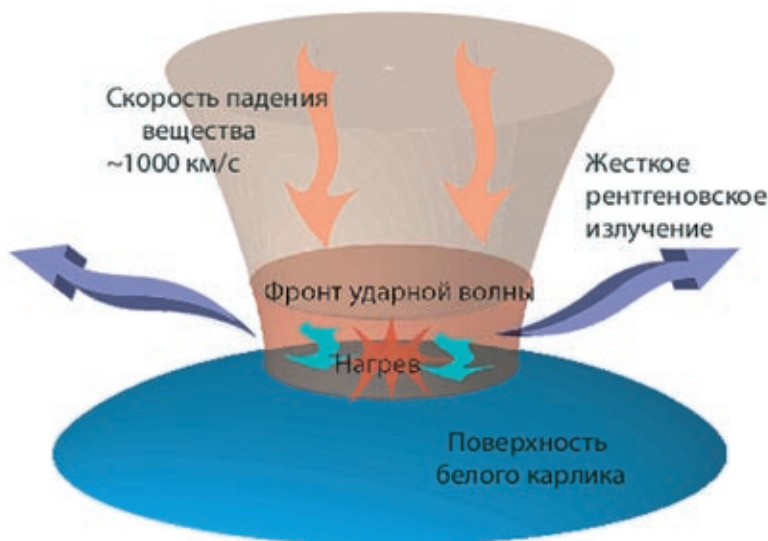


Рис. 7. Вещество, падающее на белый карлик с больших расстояний, разгоняется до скоростей в тысячи километров в секунду. Удар о поверхность белого карлика создает ударную волну, разогревающую вещество до сотен миллионов градусов. Рентгеновское излучение миллионов таких источников регистрируется приборами обсерватории «Интеграл», как слабое свечение хребта Галактики.

основные инструменты обсерватории, главный вклад в фоновое излучение дают аккрецирующие белые карлики. По результатам, полученным обсерваторией, можно оценить их полное число в Галактике — несколько миллионов. Именно такое количество очень слабых источников и стало реальной альтернативой гипотезе о диффузной природе хребта Галактики.

Оказалось, что и проблема формы спектра рентгеновского излу-

градусов — ровно такая температура и нужна для объяснения формы рентгеновского спектра хребта Галактики. Т.е. источником свечения действительно оказалась горячая плазма, но ее удерживает не слабое притяжение Галактики, а мощное гравитационное поле белых карликов; проблема удержания плазмы исчезает сама собой.

Таким образом, гипотеза о том, что миллионы крайне слабых источников обеспечивают рентгеновское свечение плоскости Галактики, оказалась весьма плодотворной. Дело за малым — попытаться увидеть напрямую, что излучение хребта Галактики действительно распадается на огромное число отдельных источников. Такая задача может быть решена современными телескопами, но на абсолютном пределе их возможностей.

Приведенные выше темы были достаточно произвольно выбраны авторами статьи из всего разнообразия задач обсерватории, которая продолжает успешную работу на орбите сегодня и будет работать еще многие годы. ■

Типичный белый карлик имеет массу порядка половины массы Солнца и радиус примерно 10 тыс. км

источники рентгеновского излучения. И действительно, подробный анализ полученных данных показал, что в нашей окрестности звезды с активными коронами и аккрецирующие белые карлики со светимостями на уровне 10^{30} – 10^{33} эрг/с дают ровно столько рентгеновского излучения, сколько нужно, чтобы объяснить слабое свечение хребта Галактики. В жестком рентгеновском диапазоне, там, где работают

чения решается почти автоматически. Типичный белый карлик имеет массу порядка массы Солнца и радиус порядка 10 тыс. км. Нетрудно подсчитать, что вещество, падающее на поверхность белого карлика, может разогнаться до скорости порядка нескольких тысяч километров в секунду. Столкновение с поверхностью карлика (рис. 7) приводит к разогреву вещества до температуры около сотни миллионов