“Интеграл” проводит перепись “населения” Галактики

М. Г. РЕВНИВЦЕВ,
доктор физико-математических наук,
лауреат премии Президента РФ в области науки
и инноваций для молодых ученых
ИКИ РАН

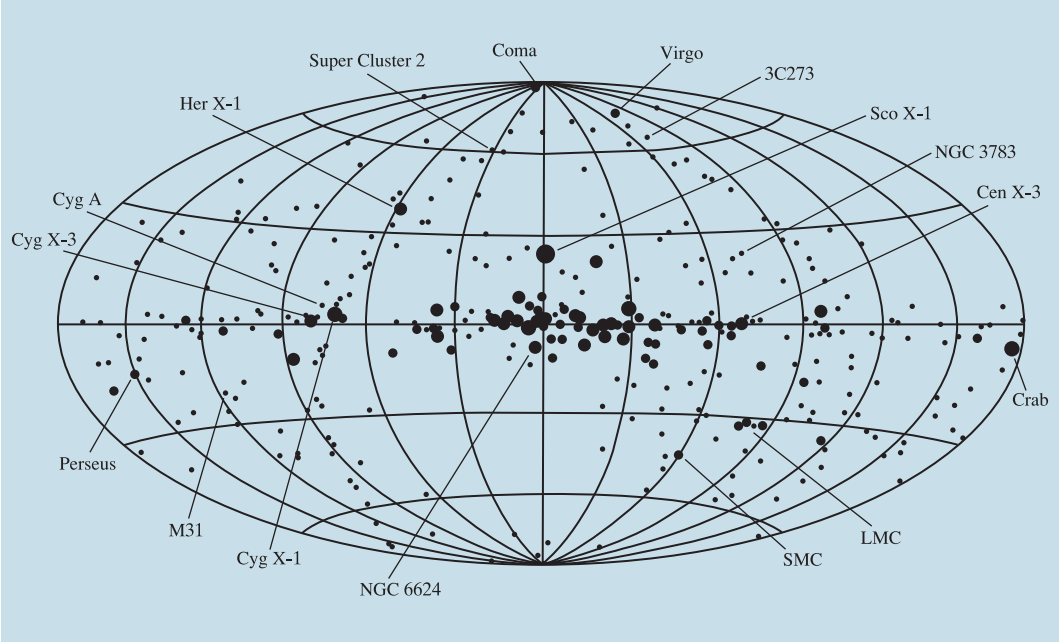
Основное “население” нашей Галактики – звезды различных классов, включая “умершие” звезды (белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры). Общее число “умерших” звезд в нашей Галактике невелико, но интерес к нейтронным звездам и черным дырам огромен. Основные причины такого интереса – их уникальные свойства. Эти объекты представляют собой природные лаборатории для изучения поведения вещества в условиях сверхвысоких температур (десятки и сотни миллионов градусов), давлений, плотностей (до ядерных в центрах нейтронных звезд, то есть до миллиарда тонн в кубическом сантиметре вещества), магнитных и гравитационных полей. Подобное невозможно создать в земных лабораториях, следовательно астрофизические компактные объекты – единственное доступное нам в настоящий момент окно в экстремальный мир.

Поиск таких “лабораторий” в нашей Галактике очень не прост. Фактически в нашей Галактике “ярких лабораторий” не более сотни. Поэтому важно не пропустить ни одного кандидата. Пожалуй, самый эффективный способ поиска компактных релятивистских звезд – наблюдать Галактику в рентгеновских лучах.

Небо в рентгеновских лучах разительно отличается от неба в оптических лучах. В рентгеновских лучах Млечный Путь не светлая полоса на небе, а лишь около сотни ярчайших “точек”. Каждая из них – это, как правило, двойная звезда, один из компонентов которой представляет собой компактный объект (нейтронная звезда или черная дыра). Компактный объект может либо перетянуть вещество с поверхности обычной звезды, если она малой массы, либо захватить вещество, истекающее с поверхности звезды в виде звездного ветра, если это молодая массивная звезда. При падении (аккреции) захваченного вещества на поверхность компактного объекта или под горизонт событий черной дыры выделяется огромная энергия – в сотни раз больше, чем выделилось бы при сгорании этого же вещества в термоядерных реакциях. Падающее вещество нагревается до температуры в десятки и сотни миллионов граду-

 © Ревнивцев М.Г.

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 19 12/24/09 2:48:09 PM



Карта рентгеновского неба по результатам наблюдений первой космической рентгеновской обсерватории "Ухуру". Отмечены наиболее известные рентгеновские источники. Рисунок NASA.

сов и начинает светиться в рентгеновских лучах. Благодаря этому компактные объекты могут быть легко обнаружены в тесных двойных системах при рентгеновских наблюдениях.

Первые систематические обзоры неба в рентгеновских лучах проведены более 35 лет назад американской космической обсерваторией "Ухуру" ("Uhuru"; 1970–1973). Уже тогда было обнаружено много ярких рентгеновских источников, подавляющее большинство которых оказалось двойными системами с компактными объектами. Нейтронные звезды, открытые с помощью "Ухуру" и других космических обсерваторий и научных ИСЗ, привлекали и продолжают привлекать пристальное внимание астрофизиков всего мира.

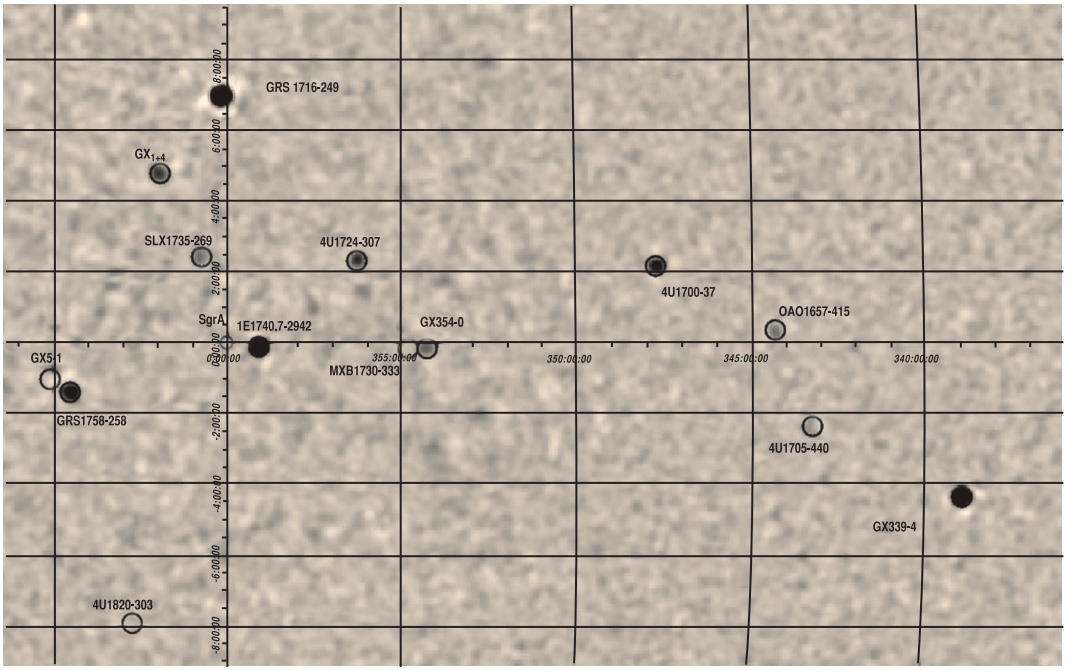
С появлением первых обзоров неба в рентгеновских лучах интерес к ним не угас, а, наоборот, возрос. За последние 10 лет практически все космические обсерватории значительное время своей работы посвятили обзорам нашей Галактики или обзорам внегалактических областей.

Один из самых глубоких обзоров всего неба в рентгеновских лучах проведен космической обсерваторией "Интеграл". Это совместный проект Европейского и Российского космических агентств. "Интеграл" успешно работает на орбите с 2003 г.

СМОТРЕТЬ СКВОЗЬ СТЕНЫ

Солнечная система располагается в диске Галактики, а потому излучение, идущее к нам из области галактического центра или из других областей диска, вынуждено проникать по дороге через довольно большую толщу вещества (с плотностью, проинтегрированной по лучу зрения около г/см^2). Фактически это эквивалентно тому, что рентгеновские лучи прошли через лист свинца толщиной несколько миллиметров. В результате значительная доля мягкого рентгеновского излучения галактических объектов до нас не доходит, поглощаясь в межзвездной среде. Поэтому уже давно стало ясно, что, если нужно проводить максимально тщательный обзор области плоскости Галактики, необходимо использовать лучи как можно больших энергий. Известно, что

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 20 12/24/09 2:48:09 PM



Область центра Галактики в диапазоне энергий 40–100 кэВ, по результатам наблюдений телескопа СИГМА космической обсерватории "Гранат". Черными кружками обозначены обнаруженные источники рентгеновского излучения – преимущественно аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Рисунок ИКИ РАН.

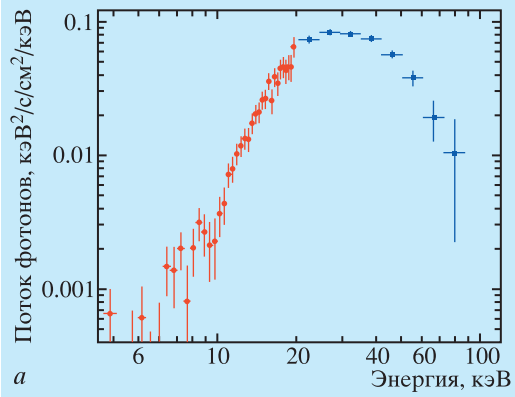
с увеличением энергии фотонов их проникающая способность сильно увеличивается, в частности фотоны энергий выше 10–15 кэВ беспрепятственно проходят сквозь всю Галактику. Однако долгое время такие обзоры Галактики были лишь мечтой астрофизиков. Основная проблема при работе с рентгеновскими фотонами высоких энергий – их большая проникающая способность. Такие фотоны очень трудно сфокусировать, а значит, невозможно получить качественное изображение.

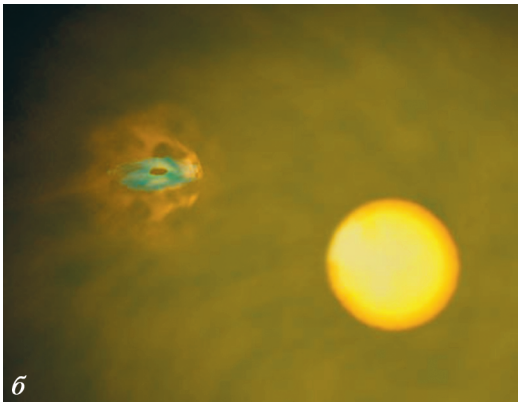
Первые грубые изображения нашей Галактики (да и всего неба) в жестких рентгеновских лучах получены с помощью коллиматоров, то есть инструментов, поле зрения которых ограничено коллиматором-трубой, как, например, на американской космической обсерватории *"HEAO-1"* (1977–1979). К сожалению, чувствительность и угловое разрешение таких приборов сильно ограничены.

Следующим большим шагом на пути к получению высококачественной карты неба в жестких рентгеновских лучах стал французский телескоп *СИГМА*, установленный на борту советской космической обсерватории *"Гранат"* (1989–1998). В телескопе СИГМА для построения изображения использовался метод кодирующей апертуры, который работал по следующему принципу. Над детектором рентгеновских лучей находилась толстая пластина из поглощающего вещества ("кодирующая маска"), в которой прорезано много отверстий. Рентгеновское излучение проходит только через эти отверстия, и на поверхности детектора возникает картина ярких пятен, расположение которых зависит от положения источника излучения на небе. Другими словами, кодирующая маска отбрасывает "тень" на детектор, а компьютерный анализ "тени" позволяет восстановить изображение неба. За восемь лет работы на орбите телескоп СИГМА получил уникальные результаты, в том числе карту плоскости нашей Галактики в жестких рентгеновских лучах.

Логическим развитием инструментов обсерватории "Гранат" стал комплекс

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 21 12/24/09 2:48:09 PM





Источник рентгеновского излучения IGR J16318-4848, прототип класса “поглощенных” источников, в большом количестве обнаруженных космической обсерваторией “Интеграл”: а) его спектр (распределение фотонов по энергии; красными точками обозначен поток, зарегистрированный космической обсерваторией “RXTE”, синими – “Интегралом”). Видно, что яркость источника сильно падает с уменьшением энергии фотонов. Обработка ИКИ РАН; б) так, возможно, выглядит эта двойная система, в которой мощный звездный ветер обычной звезды “укрывает” аккрецирующую нейтронную звезду. Рисунок ESA.

аппаратуры, установленной на обсерватории “Интеграл”. Все основные приборы этой обсерватории работают по принципу кодирующей апертуры. Чувствительность ее инструментов, благодаря значительно большим размерам и улучшенным приемным детекторам, выросла практически на порядок относительно возможностей телескопа СИГМА.

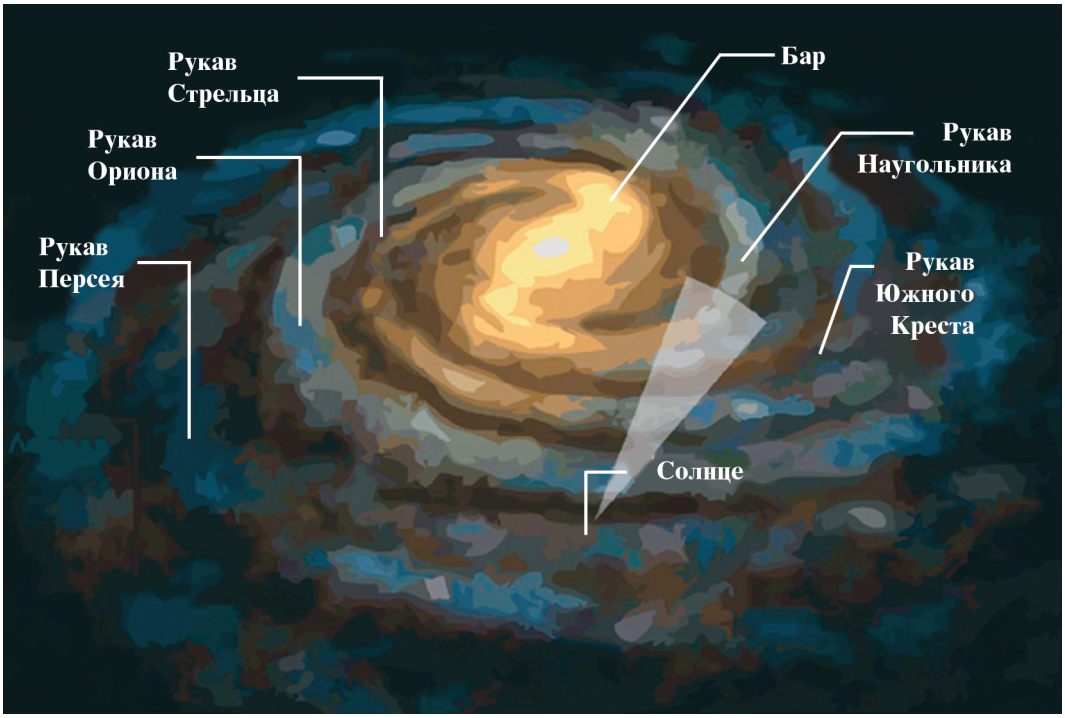
“УКРЫТЫЕ ВЕТРОМ” НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Одно из интереснейших открытий, сделанных обсерваторией “Интеграл”, – обнаружение нового класса “поглощенных” источников. Первым источником стал IGR J16318-4848 (в названии источника отражено, что он был открыт обсерваторией “Интеграл” – IGR, и указаны его небесные координаты), разительно отличающийся от открытых, например, обсерваторией “Ухуру”. В жестких рентгеновских лучах он был очень ярок, а с уменьшением энергии фотонов становился все более тусклым и фактически пропадал на энергиях ниже 4–5 кэВ, то есть в диапазоне, где работают практически все рентгеновские телескопы. Исследования этого источника с помощью космических и наземных инструментов позволили установить, что причиной такого необычного поведения является мощный звездный ветер звезды-компаньона. Очень плотный звездный ветер не только “питает” нейтронную звезду, давая топливо для ее мощнейшего энергетического реактора, но и скрывает ее от наблюдателя, поглощая излучение мягкого и стандартного рентгеновского диапазона (энергии менее 7–10 кэВ).

Влияние звездного ветра не ограничивается поглощением рентгеновского излучения нейтронной звезды. Холодное вещество ветра настолько плотно “обволакивает” двойную систему, что почти полностью поглощает и оптическое излучение звезды-компаньона. Оказалось, что только инфракрасные лучи могут покидать эту двойную систему почти беспрепятственно. Именно в этих лучах были проведены исследования, позволившие пролить свет на природу загадочного объекта. К сожалению, в нашей стране пока нет высококачественных астрономических инструментов для работы в данном участке спектра.

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

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 22 12/24/09 2:48:10 PM



Спиральные рукава нашей Галактики. Белый сектор выделяет направление в область созвездия Наугольника, в котором космическая обсерватория "Интеграл" открыла большое число "поглощенных" источников. Рисунок ИКИ РАН.

точников. Дальнейшие наблюдения с помощью 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.

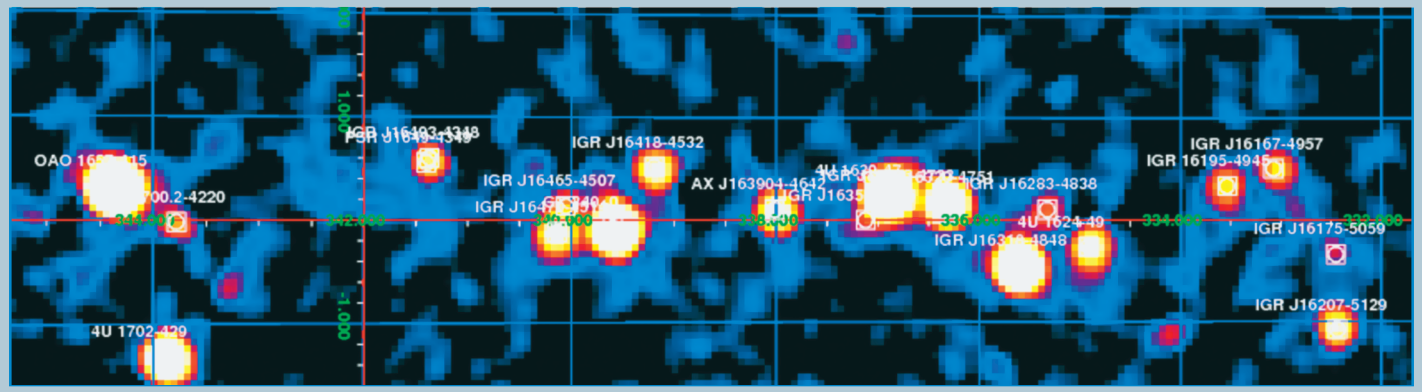
ГРАВИТАЦИОННЫЕ "МАЯКИ" ГАЛАКТИКИ?

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 "топливо", необходимое для ее рентгеновского свечения. 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, то есть фактически "вытекает" из своих "границ", переливаясь в область преобладания гравитации компактного объекта.

С самого начала исследования аккрецирующих объектов в двойных системах было ясно, что такой процесс (с учетом только долговременной эволюции самой звезды) не может обеспечивать перетекание вещества сколько-нибудь долгое время. Как только какое-то заметное количество вещества перетечет с маломассивной звезды на более массивную (компактную), параметры двойной системы изменятся. Полость Роша обычной звезды слегка увеличится, и перетекание остановится, пока эволюция звезды не приведет к "распуханию" звезды до нового размера полости Роша (то есть через десятки и сотни миллионов лет).

Для того чтобы перетекание продолжалось долгое время (возраст маломассивных двойных систем составляет миллиарды лет) и с необходимым темпом, каким-то образом надо обеспечить торможение вращения двойной системы. Это, в свою очередь, приведет к постепенному сжиманию полости Роша

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 23 12/24/09 2:48:10 PM



Карта части плоскости Галактики в направлении созвездия Наугольника. В этой области находится большинство ярких источников рентгеновского излучения в массивных двойных системах. ИКИ РАН.

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 24 12/24/09 2:48:10 PM

обычной звезды, что будет эквивалентно “выдавливанию” вещества звезды в сторону компактного объекта. В 1970-х гг. был предложен механизм торможения двойной системы за счет магнитного звездного ветра оптической звезды. Согласно этому механизму, оптическая звезда, теряя вещество в виде звездного ветра, тормозится о него (о вещество ветра) за счет взаимодействия через магнитное поле, а затем торможение вращения оптической звезды передается всей двойной системе приливными силами.

Пожалуй, самый интригующий механизм торможения двойной системы – излучение гравитационных волн. Расчеты показали, что в достаточно тесных двойных системах – системах, орбитальный период которых не превышает 2–3 ч (их размер близок к радиусу орбиты Луны), – гравитационные волны должны играть основную роль в необходимом торможении двойной системы.

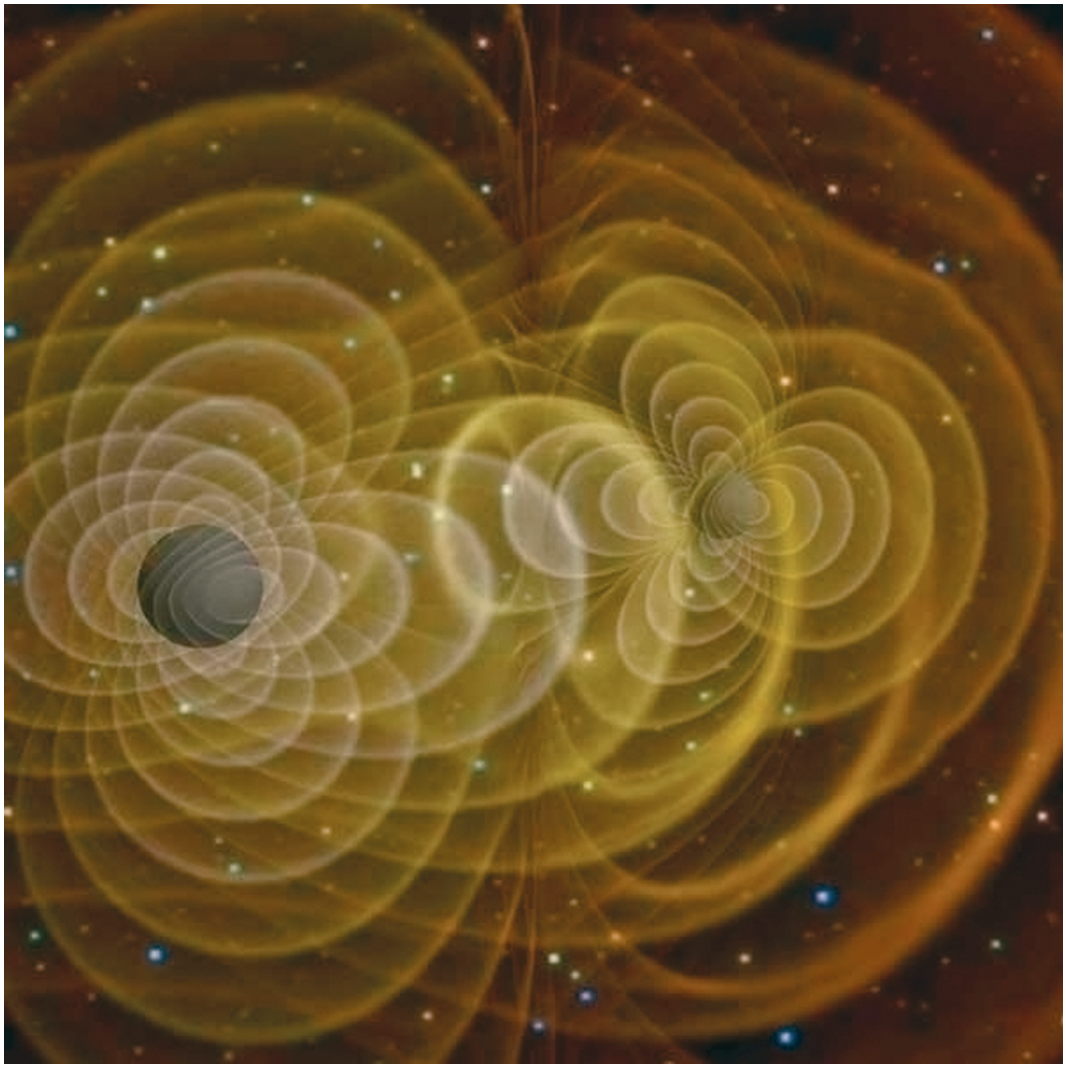
Обнаружить гравитационное излучение таких двойных систем в настоящее время еще не представляется возможным, хотя попытки и предпринимаются, например эксперимент LISA (Laser Interferometer Space Antenna – лазерная интерферометрическая космическая антенна, проект NASA). Но можно попытаться обнаружить влияние гравитационного излучения на долговременную эволюцию всей популяции рентгеновских двойных систем с маломассивными компаньонами. Например, можно систематически исследовать системы с малой рентгеновской светимостью (с малым темпом перетекания вещества с оптической звезды на компактную) и показать, что такие системы являются достаточно тесными, чтобы эффективно тормозиться за счет излучения гравитационных волн. Это задача не из легких, ведь нужно не только обнаружить такие слабые рентгеновские источники, но и измерить параметры их орбит. Обычно орбитальные параметры двойных систем измеряют в оптическом диапазоне с помощью различных наземных телескопов. А для двойных систем малых размеров эти наблюдения представляют очень большую сложность. Оптическое излучение маломассивных двойных систем рождается преимущественно в результате переработки рентгеновского и ультрафиолетового излучений компактного объекта в холодных областях аккреционного диска. Следовательно, если размер двойной системы мал (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 значительный прогресс в этом направлении есть. Для первичного поиска рентгеновских объектов – кандидатов в тесные двойные системы – был использован обзор центральной части Галактики (балджа), проведенный с помощью обсерватории “Интеграл”. Этот обзор в настоящее время является самым чувствительным обзором такой большой части Галактики и практически идеально подходит для наших целей. Единственный существенный его “минус” – недостаточная точность определения положения обнаруженных источников. Но это плата за большое поле зрения основных приборов обсерватории “Интеграл”. Для исправления данного недостатка были подключены “собратья” обсерватории “Интеграл” – космические рентгеновские обсерватории “*Чандра*”, “*Свифт*”, “*ХММ-Ньютон*”, которые снабжены фокусирующей оптикой. С их помощью в 2009 г. положения открытых рентгеновских источников будут уточнены вплоть до 1–0.5 секунды дуги (примерно две десятитысячные доли градуса), что позволит в дальнейшем провести глубокие оптические наблюдения соответствующих областей неба. Есть все основания полагать, что эти гравитационные “маяки” Галактики будут обнаружены.

НЕБОЛЬШИЕ “КОСТОЧКИ” ГАЛАКТИЧЕСКОГО “ХРЕБТА”

Белые карлики (начальная масса звезд при “рождении” менее 8 $M_\odot$) – наиболее многочисленная группа среди “умерших” звезд, их в Галактике может быть не один миллиард. Если белый карлик находится в тесной двойной системе с обычной звездой, он, как и нейтронные звезды и черные дыры, может пере-

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 25 12/24/09 2:48:11 PM

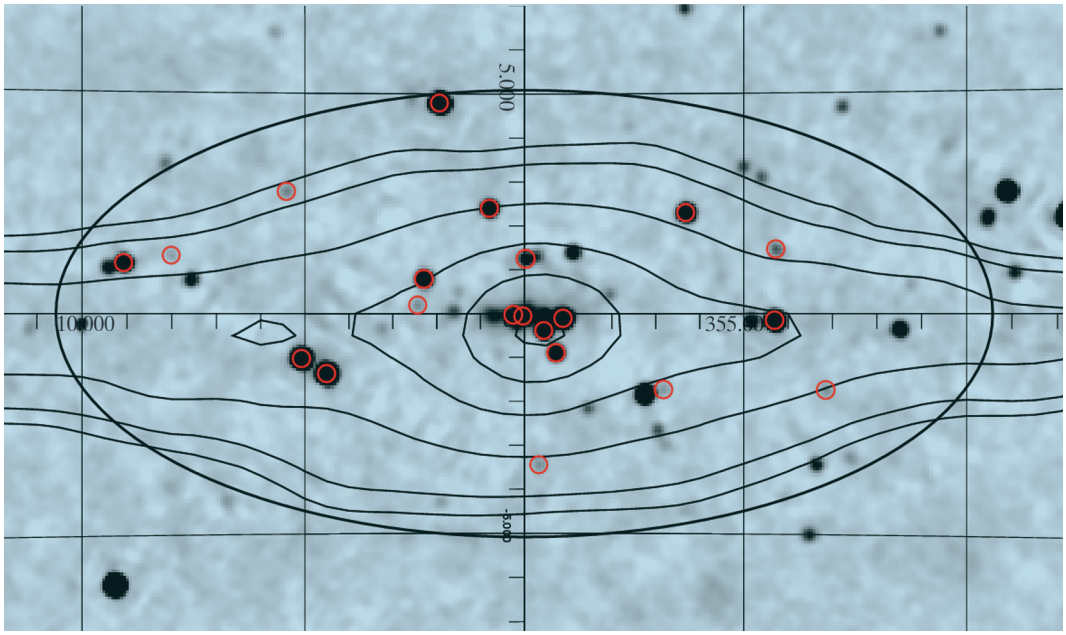


Гравитационные волны, излучаемые в тесной двойной системе. Рисунок Хензе, NASA.

тягивать на себя вещество обычной звезды и превращаться в источник рентгеновского излучения. Число таких “рентгеновски ярких” белых карликов – предмет длительных оживленных дебатов среди астрономов. Если число таких систем велико, то суммарно они должны создать достаточно мощное свечение, которое для нас как для наблюдателей, располагающихся в диске Галактики достаточно далеко от ее центра, будет формировать полосу, проходящую через половину неба. Такая полоса рентгеновского свечения в Галактике действительно была обнаружена – это “хребет” Галактики, однако до недавнего времени астрономы не понимали, чем вызвано это свечение (Земля и Вселенная, 2007, № 6). Например, широко обсуждалось, не может ли излучение “хребта” Галактики быть результатом взаимодействия частиц космических лучей малых энергий с межзвездной средой. В значительной степени это было связано с тем, что оценить число “рентгеновски ярких” белых карликов достаточно сложно.

Один из широко распространенных способов расчета численности такого “населения” Галактики – метод популяционного

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 26 12/24/09 2:48:11 PM



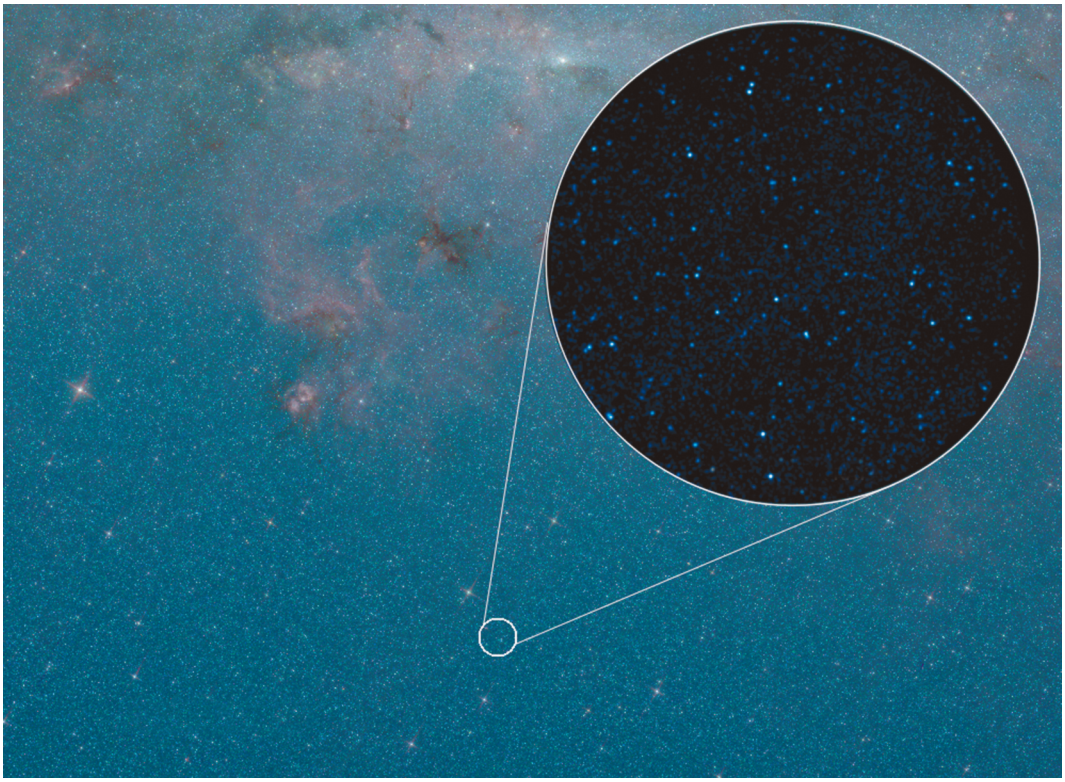
Область центра Галактики (балдж Галактики обозначен овалом), по результатам наблюдений обсерватории "Интеграл". Чем больше рентгеновский поток из какой-то области неба, тем темнее цвет на карте. Контуры показывают области одинаковой яркости Галактики в инфракрасных лучах. Красными кружками обозначены системы, предположительно состоящие из компактного объекта и звезды-компаньона малой массы. Слабейшие из них – потенциальные гравитационные "маяки" Галактики. ИКИ РАН.

синтеза, который рассматривает эволюцию популяций двойных систем во времени (начиная с их зарождения) и в рамках своих модельных предположений может предсказать, какое количество каких двойных систем с какими свойствами мы должны наблюдать. Различные группы специалистов во всем мире, применяющие данный метод, часто получают различные оценки. Основной проблемой здесь является то, что параметры модели эволюции двойных систем известны в настоящее время плохо, поэтому их вариации приводят к существенно разным ответам.

Как известно, практика – критерий истины, единственный способ проверки правильности модельных расчетов – измерение свойств популяции аккрецирующих белых карликов в Галактике. Для этой цели необходимы чувствительные обзоры всего неба. Ожидаемая светимость слабых рентгеновских источников – всего 10^{30}–10^{34} эрг/с, то есть в тысячи раз меньше полной светимости нашего Солнца. С помощью современных рентгеновских обсерваторий такие источники можно обнаружить на расстояниях не более нескольких сотен парсек. Сфера такого радиуса почти полностью помещается внутри диска Галактики, следовательно объекты, лежащие внутри такой области, будут разбросаны для нас по всему небу. Кроме того, нужно не только получить чувствительный обзор всего неба, необходимо также провести классификацию всех обнаруженных объектов.

Обзор неба, выполненный с помощью обсерватории "Интеграл", идеально подходит для этой цели. Мало того, что он покрывает все небо с хорошей чувствительностью и неподвержен влиянию межзвездного поглощения, его жесткий рентгеновский диапазон (энергии фотонов 20–100 кэВ) является очень хорошим фильтром для выделения именно аккрецирующих систем. Огромное число звезд, у которых есть заметная корональная активность (как у нашего Солнца), излучает в мягком рентгеновском диапазоне (энергии фотонов менее 1–5 кэВ). Таких звезд много,

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 27 12/24/09 2:48:11 PM



Область неба вблизи центра Галактики (вверху), по результатам наблюдений космической обсерватории "Спитцер" в ИК-спектре. На врезке показан фрагмент участка неба (обозначен маленьким кружком внизу), наблюдавшегося около двух недель в рентгеновских лучах космической обсерваторией "Чандра". Видно множество рентгеновских источников, составляющих излучение "хребта" Галактики. Фото NASA.

и не столь большое "население" аккрецирующих белых карликов просто потеряется среди них. А основная доля энергии аккрецирующих белых карликов приходится именно на стандартный (2–10 кэВ) или жесткий (20–100 кэВ) рентгеновский диапазон электромагнитного спектра, что и позволяет обсерватории "Интеграл" эффективно отфильтровывать их от остальных, менее "горячих" источников рентгеновского излучения.

По результатам обзора всего неба обсерватории "Интеграл" были получены наиболее точные в настоящее время оценки популяции ярких в рентгеновском диапазоне белых карликов, определены их плотности и характеристики распределения по небу. Оказалось, что, действительно, их число достаточно для того, чтобы сложиться в "хребет" рентгеновского свечения галактического диска.

Дополнительным и уже, наверное, самым "неперебиваемым" аргументом в пользу того, что рентгеновский "хребет" Галактики складывается из излучения большого числа отдельных источников, в том числе и аккрецирующих белых карликов, явились исследования, проведенные недавно с помощью уникальных длительных наблюдений области галактической плоскости космической обсерватории "Чандра" (Земля и Вселенная, 2007, № 4). Посвятив в общей сложности около двух недель (!) наблюдениям определенной области Галактики, обсерватория "Чандра" напрямую смогла увидеть те источники, из которых состоит излучение галактического "хребта".

Zeml_Vsel_Verst_1.indd 28 12/24/09 2:48:12 PM