

## Открытия космической обсерватории “Чандра”

М.Г. РЕВНИВЦЕВ,

доктор физико-математических наук

А.А. ЛУТОВИНОВ,

доктор физико-математических наук

Институт космических исследований РАН

---

23 ноября 2016 г. после тяжелой болезни скончался Михаил Геннадьевич Ревнивцев – заведующий лабораторией экспериментальной астрофизики ИКИ РАН, ученый с мировым именем в области рентгеновской астрономии и астрофизики высоких энергий.

Михаил Геннадьевич родился в 1974 г. в г. Тольятти. В 1991 г. поступил в Московский физико-технический институт на кафедру космической физики. С 1995 г. начал работать в Институте космических исследований в Отделе астрофизики высоких энергий. В 1997 г. с отличием закончил МФТИ и поступил в аспирантуру ИКИ РАН; в 1999 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию, а в 2006 г. – докторскую; в 2015 г. был избран



профессором Российской академии наук.

М.Г. Ревнивцев начал свою научную деятельность с работы с данными космических обсерваторий “Квант” и “Гранат”. Он играл ключевую роль в успехе международной астрофизической обсерватории “Интеграл” и в подготовке к рентгеновскому обзору всего неба обсерватории “Спектр-РГ”; был идейным вдохновителем



проекта “Монитор всего неба” (МВН) на борту Международной космической станции. Михаил Геннадьевич посвящал много времени работе со студентами и аспирантами, воспитал несколько кандидатов физико-математических наук, принимал активное участие в жизни Института космических исследований, занимался популяризацией науки в России.

М.Г. Ревнивцев – автор ряда ярких научных открытий, среди которых решение многолетней загадки происхождения рентгеновского фона нашей Галактики. Построив ее уникальную рентгеновскую карту по данным космической обсерватории «RXTE», он доказал, что фон складывается из излучения аккрецирующих белых карликов и коронально активных

звезд. За это и другие открытия Михаила Геннадьевича в 2006 г. наградили медалью им. Я.Б. Зельдовича Международного комитета по исследованию космического пространства, а в 2008 г. он стал одним из первых лауреатов Премии Президента РФ в области науки и инноваций для молодых ученых.

Миша был не только выдающимся ученым,

но и потрясающим другом и коллегой, всегда готовым прийти на помощь. Отдел астрофизики высоких энергий глубоко скорбит об утрате. Светлая память о Михаиле Геннадьевиче Ревнивцеве навсегда сохранится в наших сердцах.

Это – последняя научно-популярная статья М.Г. Ревнивцева, подготовленная специально для нашего журнала.

ОТ НАЧАЛА РЕНТГЕНОВСКОЙ АСТРОНОМИИ ДО ОБСЕРВАТОРИИ “ЧАНДРА”

Рентгеновские лучи практически не проникают под земную атмосферу (например, лучи с энергией около 1 кэВ и ниже поглощаются на высотах около 100 км и выше), поэтому для проведения наблюдений в этом участке электромагнитного спектра необходимо выходить за ее пределы. Это стало возможным только с развитием необходимых ракетных технологий. Первые ракетные эксперименты по наблюдению Солнца в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн, проведенные в конце 1940 – начале 1950-х гг., уже дали интересные результаты (Фридман и др., 1951). Однако простое масштабирование светимости Солнца на расстояние до ближайших звезд не позволяло надеяться на регистрацию

рентгеновского потока от них при существовавшем уровне развития технологий. Понадобилось около десяти лет для того, чтобы обнаружить первый рентгеновский источник за пределами Солнечной системы (Джиаккони и др., 1962).

Одной из основных проблем, возникающих при регистрации рентгеновских фотонов, является фон заряженных частиц, они проникают в “тело” любого детектора. Для уменьшения вклада счета заряженных частиц в регистрируемое излучение можно организовать систему антисовпадений (из двух и более слоев детектора). Заряженные частицы с большой энергией пройдут через любую защиту и, вычитая события, произошедшие одновременно в нескольких слоях детектора, можно существенно “подавить” их вклад. Именно таким способом была повышена чувствительность

инструмента, позволившая обнаружить первый рентгеновский источник вне Солнечной системы.

Еще более кардинальный способ уменьшения вклада счета заряженных частиц – научиться концентрировать фотоны: тогда фон заряженных частиц (как и раньше) распределяется по всему детектору, а рентгеновские фотоны концентрируются на небольшой его части, тем самым значительно “поднимая” отношение полезного сигнала к шуму. Первое предложение о возможности концентрации фотонов для использования в рентгеновских обсерваториях высказали Р. Джиаккони и Б. Росси в 1960 г., за два года до открытия галактического источника рентгеновского излучения. В своей работе они ссылались на предложение Х. Вольтера (1952), рассматривавшего возможность использования

рентгеновских зеркал в качестве микроскопа.

Впервые такой принцип регистрации (концентрации) рентгеновских фотонов был применен в 1965 г., когда с борта высотной ракеты "Аеробее" было получено изображение Солнца в рентгеновских лучах (Джиаккони и др., 1965). В дальнейшем исследования продолжались с помощью космической обсерватории "OSO-4" (запущена 18 октября 1967 г.) и рентгеновского телескопа на станции "Скайлэб" (14 мая 1973 г.). Интересно, что использовавшиеся в этих экспериментах телескопы имели возможность не просто концентрировать фотоны, но и строить изображения неба с разрешением в несколько угловых секунд. В частности, 5 августа 1972 г. во время полета высотной ракеты впервые рентгеновским телескопом наблюдался небесный объект вне Солнечной системы – источник Sco X-1. За 10 с (полное время наблюдений во время полета высотной ракеты составляло около 300 с) от Sco X-1 было зарегистрировано 3 фотона.

Следующий большой шаг в наблюдении космических рентгеновских источников с помощью

фокусирующей оптики (зеркал косоугольного падения) был сделан космической обсерваторией "HEAO-2" (обсерватория им. Эйнштейна, 1978–1981 гг.). С ее помощью было обнаружено рентгеновское излучение от практически всех типов астрофизических объектов – от планет и обычных звезд, от остатков вспышек сверхновых и компактных объектов, от обычных галактик до квазаров и скоплений галактик. Стало очевидным, что высокоэнергичные процессы играют огромную роль в формировании и эволюции этих объектов, и рентгеновское излучение является естественным каналом, позволяющим их изучать.

Необходимо отметить, что с технической точки зрения возможности зеркальной системы обсерватории "HEAO-2" превосходили возможности фокальных приборов – в частности, угловое разрешение зеркальных

систем соответствовало 5–6", в то время как газовые пропорциональные счетчики, имевшие максимальную эффективность регистрации фотонов, давали около 1". Поэтому дальнейшее развитие рентгеновских телескопов шло как по пути улучшения углового разрешения, так и по пути увеличения их эффективной площади, улучшению спектрального и пространственного разрешений детекторов. В результате в разные годы на орбиту были запущены несколько космических рентгеновских обсерваторий и телескопов – таких как "ROSAT" (1990–1999), "BBXRT" (1990), "ASCA" (1993–2000), использовавших в своей работе фокусирующую оптику; для них применялись новые технологические решения, что позволило получить целый набор значимых научных результатов (Земля и Вселенная, 2014, №№ 4, 5).

Достижения инженерной мысли и технологи-



Обсерватория "Чандра" в космическом пространстве. Рисунок NASA/CXC/NGST.

ческого развития в области фокусирующих рентгеновских телескопов были максимально реализованы при создании космической обсерватории “Чандра” (“Chandra”, названа в честь выдающегося американского физика и астрофизика, лауреата Нобелевской премии С. Чандрасекара). Обсерватория была выведена на орбиту 23 июля 1999 г. с помощью КК “Колумбия” (STS-93; Земля и Вселенная, 2000, № 4, с. 59–60). “Чандра” работает на высокоэллиптической орбите высотой 10 тыс. км × × 140 тыс. км, имея возможность проводить непрерывные наблюдения длительностью до 185 тыс. секунд.

Ключевая характеристика обсерватории “Чандра” – способность фокусировать рентгеновские фотоны в кружок размером 0,5" (внутри такого радиуса содержится половина всех фотонов, регистрируемых от источника). Это примерно в 10 раз улучшило предыдущие рекорды, установленные телескопами космических обсерваторий “HEAO-2” и “ROSAT”. Система из четырех вложенных параболоидов и гиперболоидов (покрытых иридием для увеличения отражательной способности на энергиях выше 2 кэВ) имеет фокусное расстояние 10 м, на котором фокусирует рентгенов-

ские фотоны в один пиксел детектора размером 24 мкм.

В качестве регистрирующих элементов обсерватория имеет два основных типа инструментов: ПЗС-матрицы ACIS и микроканальные пластины HRC. ПЗС-матрицы ACIS были разработаны совместно Пенсильванским университетом, Массачусетским политехническим институтом и Лабораторией реактивного движения и созданы в лаборатории корпорации “Локхид-Мартин” и Массачусетском политехническом институте (лаборатория Линкольна). Матрицы дают информацию о положении и энергии (с разрешающей способностью  $E/\Delta E \sim 10-40$ ) каждого отдельного фотона в поле зрения телескопа размером 17'. Микроканальные пластины HRC, созданные в Смитсоновском астрофизическом центре, позволяют полностью реализовать разрешающую способность зеркальной системы телескопа “Чандра” – угловой размер пикселей микроканальной пластины составляет около 0,13" на пиксел.

Изначально гарантированный срок активного существования обсерватории “Чандра” составлял 3 года (при планируемом сроке эксплуатации – 5 лет). Однако высокоэллиптическая орбита аппарата

и высокое качество изготовления обеспечили возможность существенного продления срока работы обсерватории. По сравнению с аппаратами на более низких околоземных орбитах, где спутник постоянно вынужден проходить через циклы зарядки-разрядки аккумулятора, тень Земли, через радиационные пояса, и т.д., подсистемы аппарата на высокоэллиптической орбите “страдают” гораздо меньше. В результате прошло уже более 15 лет, и системы спутника работают в штатном режиме. Исключением стали набор гироскопов, который в настоящее время является запасным, и солнечный датчик (переключился на запасной в 2013 г.).

За годы работы на орбите обсерватория “Чандра” совершила прорыв в рентгеновской астрономии, позволив сделать важнейшие научные открытия и продемонстрировав выдающиеся результаты работы. О некоторых из них расскажем в настоящей статье – начиная с Солнечной системы и заканчивая определением глобальных характеристик Вселенной. Подробно с результатами обсерватории “Чандра” можно ознакомиться в обзорной статье Х. Тананбаума и др. (2014). Эта же работа (а также материалы с официального

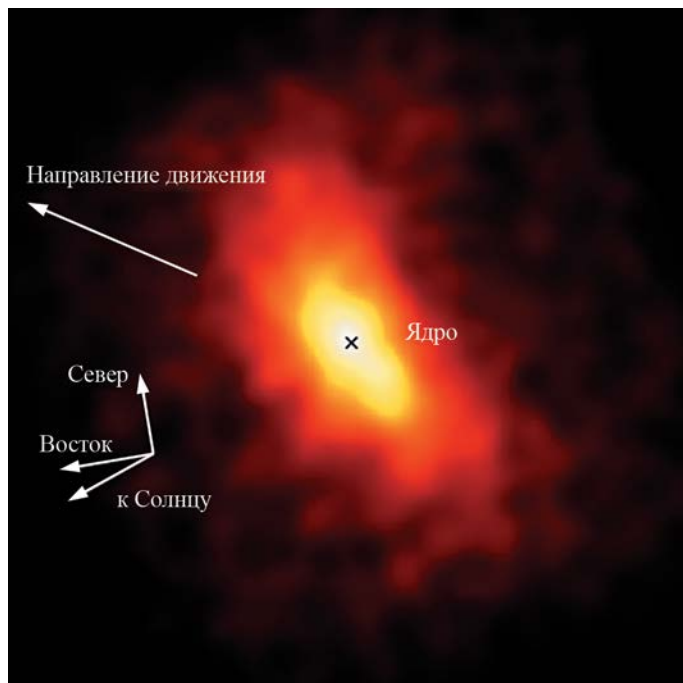
Изображение кометы C/1999 S4, полученное обсерваторией "Чандра" 14 июля 2000 г. Рентгеновское излучение возникает при столкновениях ионов при столкновениях ионов солнечного ветра с нейтральным газом кометы (NASA/CXC/C. Lisse, S. Wolk, et al.).

сайта обсерватории: <http://chandra.harvard.edu/>) легли в основу обзора.

#### РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОБЪЕКТОВ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Взаимодействие высокоэнергичных частиц и лучей Солнца с атмосферами планет, их спутниками и кометами приводит к образованию рентгеновского излучения в ходе различных физических процессов: рассеяния, флуоресценции, перезарядки, возбуждения авроральной активности. Обсерватория "Чандра" наблюдала – и во многих случаях открыла – рентгеновское излучение от планет Солнечной системы и их спутников (см., например, Бхардвай и др., 2007).

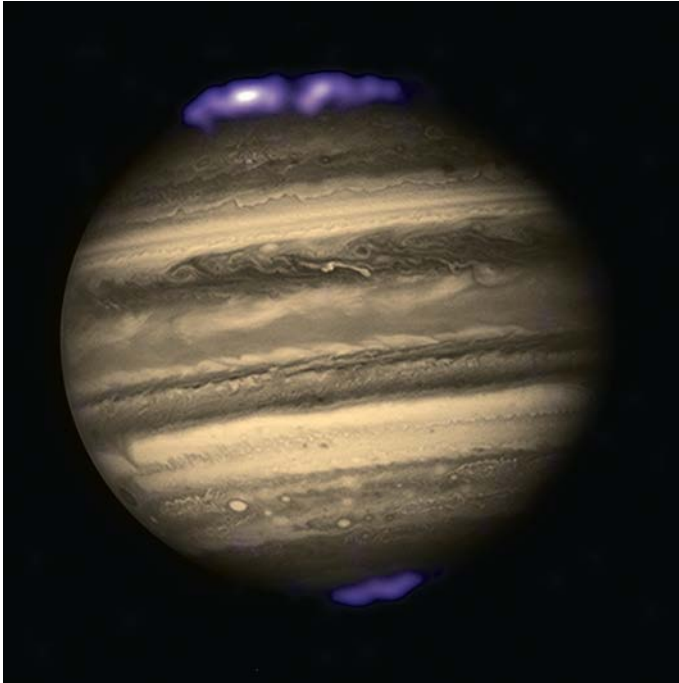
Перезарядка – важный механизм формирования рентгеновского излучения объектов Солнечной системы, в процессе которого высокоионизованный атом вещества солнечного ветра сталкивается с нейтральным атомом и "захватывает" электрон, как правило, на



самые высокие энергетические уровни. В процессе релаксации к его обычному состоянию атом излучает набор характеристических рентгеновских линий, которые могут быть зарегистрированы в рентгеновских лучах. В частности, для солнечного ветра это – линии CV, CVI, OVII, OVIII, NeIX.

Рентгеновское излучение при "перезарядке" может также рождаться в процессе взаимодействия частиц солнечного ветра с земной экзосферой (геокоорной), с веществом внутри и вне магнитного переходного слоя (области пространства между магнитопаузой и фронтом ударной волны вблизи магнитосферы), и

даже с гелиосферой (областью космического пространства вокруг Солнца, содержащей заряженные частицы и простирающейся за орбиту Плутона). Вообще, Солнечная система может быть представлена как область, на границе которой происходит "перезарядка" высокоионизованных ионов солнечного ветра с нейтральным веществом окружающей межзвездной среды и формируется мягкое рентгеновское излучение. Наблюдения обсерватории "Чандра" показали, что на энергиях около 0,75 кэВ "вклад" такого излучения играет определяющую роль, в то время как на более низких энергиях (около 0,25 кэВ) он не является



*Комбинированное изображение Юпитера, полученное космическим телескопом им. Хаббла и обсерваторией "Чандра". Хорошо видно мощное авроральное рентгеновское излучение из околполярных областей. (X-ray: NASA/CXC/SwRI/R. Gladstone et al.; Optical: NASA/ESA/Hubble Heritage, AURA/STScI).*

от рентгеновского излучения Солнца, а также обнаружена сильнейшая авроральная активность планет с магнитными полями (Гладстон и др., 2009).

#### СВЕРХНОВЫЕ И ОСТАТКИ ИХ ВСПЫШЕК

доминирующим. Полученные результаты могут быть объяснены в предположении, что суммарное излучение состоит из двух компонент – излучения теплой ( $0,6 \times 10^6$  К) плазмы, имеющейся в локальном пузыре размером 100 пк, окружающем Солнце, и излучения, возникающего в процессе перезарядки (см., например, Куртумпа и др., 2009).

Кометы, рентгеновское излучение которых формируется в процессе "перезарядки" вещества солнечного ветра на нейтральных атомах отходящего от них газа, можно считать лабораториями, позволяющими изучать поведение разреженной плазмы в естественных условиях.

До запуска обсерватории "Чандра" происхождение рентгеновского излучения комет вызвало горячие дискуссии, однако сейчас формирование излучения за счет процесса "перезарядки" лучше всего объясняют наблюдаемые данные (Бхардвай и др., 2007). Обсерваторией "Чандра" было открыто рентгеновское излучение, возникающее в атмосферах Марса и Венеры в процессе "перезарядки", что позволило начать изучение темпа потери вещества атмосферами этих планет.

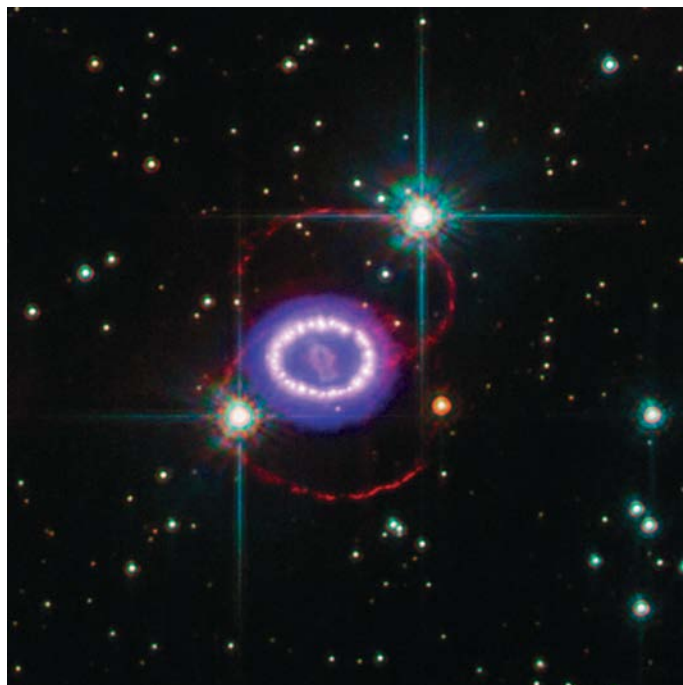
Кроме того, обсерваторией были проведены исследования атмосфер планет с помощью регистрации явления флуоресценции

Согласно теоретическим расчетам, каждые 50 лет в галактике типа нашего Млечного Пути должен происходить взрыв сверхновой, являющийся по сути сигналом о катастрофическом коллапсе ядра обычной звезды. На протяжении тысяч лет после взрыва остаток вспышки расширяется в пространстве, продолжая светить за счет вещества, разогретого ударной волной; он разгоняет заряженные частицы до релятивистских энергий, поставляет синтезированные тяжелые элементы в межзвездную среду (Земля и Вселенная, 2008, № 1).

Конечная стадия эволюции звезды зависит от ее начальной

массы. Если в начале своей жизни звезда имела массу менее  $8 M_{\odot}$ , то в процессе эволюции она потеряет значительную ее часть посредством звездного ветра, а ее ядро с массой менее  $1,4 M_{\odot}$  сколлапсирует в белый карлик радиусом в 5–10 тыс. км. Его внутреннее строение и устойчивость к дальнейшему коллапсу будет определяться давлением вырожденного электронного газа. Необходимо сказать, что это давление может удерживать в равновесии белый карлик, масса которого не превышает  $1,4 M_{\odot}$  (предел Чандрасекара). Если начальная масса звезды больше  $8–10 M_{\odot}$ , то тогда ее ядро на конечной стадии эволюции превышает предел Чандрасекара, и давление вырожденного электронного газа не способно остановить его дальнейшее сжатие. Звезда превращается либо в нейтронную звезду (в которой равновесие определяется давлением вырожденного газа нейтронов), либо в черную дыру.

Непосредственно перед коллапсом звезды ее структуру можно описать как последовательность слоев с разными продуктами термоядерного горения, изнутри наружу: элементы групп железа и кремния, кислород, неон, магний, углерод, гелий и не сгоревший до



*Комбинированное изображение остатка вспышки сверхновой SN 1987A, полученное космическим телескопом им. Хаббла в оптическом (бело-розовые цвета) и обсерваторией “Чандра” в рентгеновском (пурпурно-синие цвета) диапазонах энергий. Хорошо видна структура, состоящая из трех колец, наиболее ярким из которых является экваториальное. Наблюдения обсерватории “Чандра” показывают, что ударная волна продолжает двигаться через это кольцо (Хельдер и др., 2013). Яркие области рентгеновского и оптического излучения возникают в местах, где ударная волна сталкивается с плотными структурами окружающего газа. Размер изображения – 6' (около 16 пк). X-ray: NASA/CXC/PSU/S. Park & Burrows; Optical: NASA/STScI/CfA/ P. Challis.*

конца водород. Процессы, происходящие после этого, до сих пор вызывают жаркие споры, но все согласны в одном – происходит огромное выделение энергии: взрыв сверхновой. Такие сверхновые называются сверхновые II типа; их источниками являются молодые массивные

звезды. Большая доля энергии, выделенная в процессе коллапса ядра, уносится нейтрино, но существенная ее часть также переходит в энергию оболочки, разлетающейся со скоростью нескольких тысяч километров в секунду.

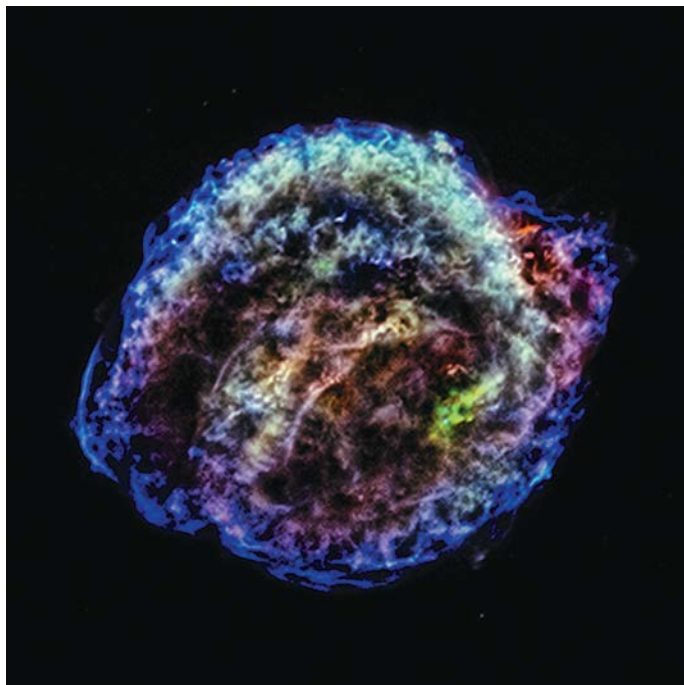
Взрывы сверхновых другого типа (Ia) проис-

ходят, когда аккреция вещества на поверхность белого карлика (или слияние двух белых карликов) позволяет ему (им) “перескочить” через предел Чандрасекара. Начавшийся после этого гравитационный коллапс запускает механизм термоядерного горения в центре белого карлика, что приводит к его полному разрушению. Расширяющийся остаток вспышки такой сверхновой еще долгое время излучает в результате энергоделегения, получаемого при распаде радиоактивного никеля в кобальт, а затем – в железо. В процессе разлета оболочки возникают две ударные волны – прямая, движущаяся по межзвездной

среде, и обратная, идущая по вылетевшему в процессе взрыва веществу. Эти волны в дальнейшем формируют остаток вспышки сверхновой, состоящей из горячего газа и высокоэнергичных частиц и излучающей в разных диапазонах – от радио- до гамма-лучей.

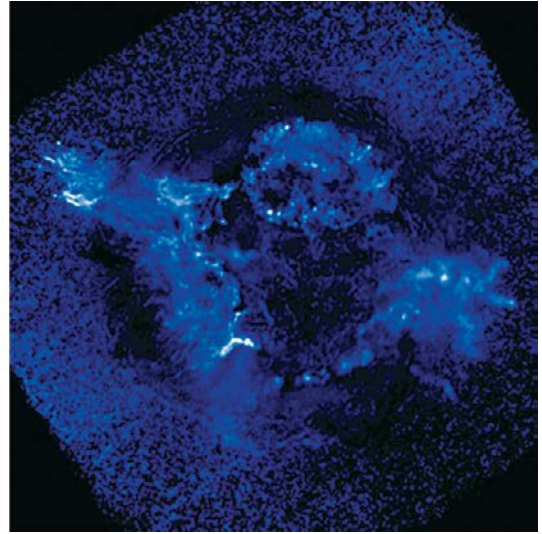
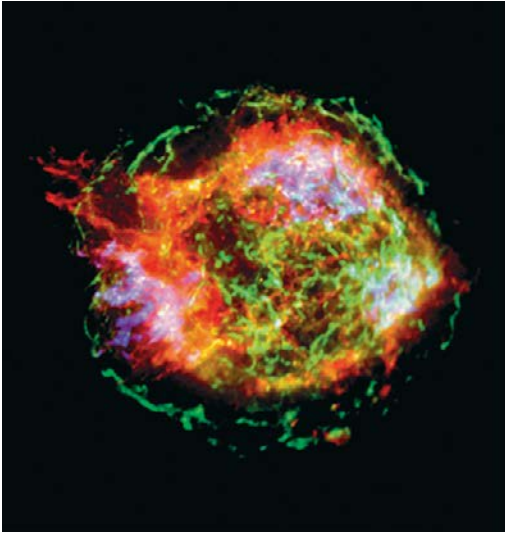
С помощью обсерватории “Чандра” впервые стало возможным непосредственно наблюдать прямую ударную волну, “идущую” впереди вылетевшего вещества, и нагретое обратной ударной волной вещество; строить детальные карты остатков вспышек сверхновых в узких спектральных диапазонах, изучать их морфологию, исследовать процессы взрыва сверхновых и природу их

предшественников. Например, предшественником остатка сверхновой Кеплера (наблюдалась и детально изучалась Иоганном Кеплером в 1604 г.; Земля и Вселенная, 1971, № 6) стала двойная система, состоящая из белого карлика и звезды-гиганта массой 4–5  $M_{\odot}$  (Рейнольдс и др., 2007). Необходимо отметить, что, хотя сверхновая Кеплера относится к типу Ia, структура ее остатка не совсем типична для таких объектов (как правило, они имеют приблизительно сферическую форму). Наблюдения на обсерватории “Чандра” показали, что остаток сверхновой Кеплера асимметричен и в нем присутствуют заметные аркоподобные структуры, особенно в его северной части. Эти структуры были интерпретированы как ударные волны, возникшие в результате движения вещества остатка сверхновой через вещество, испущенное звездой-



*Остаток вспышки сверхновой Кеплера. Комбинированное изображение получено с помощью обсерватории “Чандра” в мягком (0,3–0,72 кэВ, красный цвет), среднем (0,72–1,7 кэВ, зеленый) и жестком (1,7–8 кэВ, синий) рентгеновских диапазонах. Размер изображения – 2,5' (8 пк). X-ray: NASA/CXC/NCSU/M. Burkey et al.; Optical: DSS.*





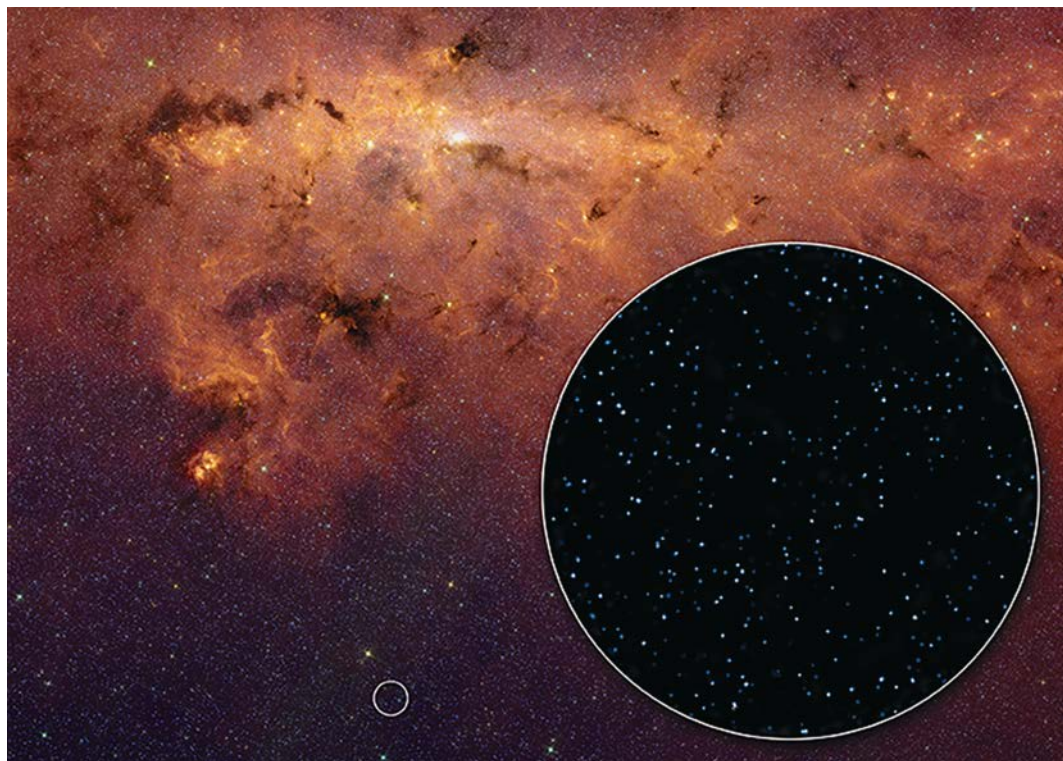
*Остаток вспышки сверхновой Cas A (слева). Внешние зеленые области в форме кольца являются следствием воздействия прямой ударной волны. Внутри этого кольца выброшенное вещество нагрето до  $10^6$  K обратной ударной волной (Хванг и др., 2004). Изображение получено с помощью обсерватории “Чандра” в разных диапазонах энергий: красный – в линии кремния  $Si\ XIII\ He_{\alpha}$  (1,78–2,0 кэВ), синий – в линии железа  $Fe\ K$  (6,52–6,95 кэВ), зеленый – излучение в континууме 4,2–6,4 кэВ. Справа: отношение изображений, полученных в линии кремния и континууме в диапазоне энергий 1,3–1,5 кэВ, демонстрирующее выброс и контрвыброс. Последние хорошо прослеживаются по излучению кремния. (NASA/CXC/GSFC/U Hwang et al.).*

предшественником на стадии гиганта. Анализ наблюдений, выполненных на обсерватории “Чандра”, показал, что взорвавшаяся звезда имела возраст всего лишь около 100 млн лет. Существование сверхновых типа Ia, взрывающихся столь быстро, оказывает серьезное влияние на точность получаемых результатов при использовании их в качестве “стандартных свечей” для оценки космологических параметров (Салливан и др., 2010).

Исследования популяции ближайших остатков вспышек сверхновых,

произошедших в результате коллапса ядра, с возрастными от нескольких сотен до нескольких тысяч лет, иллюстрируют некоторые общие свойства таких объектов, а также сложности их изучения. Используя рентгеновские данные обсерватории “Чандра” и инфракрасные данные космической обсерватории “Спитцер”, ученые построили трехмерную модель остатка вспышки сверхновой в созвездии Кассиопеи (Cas A), произошедшей, по некоторым оценкам, около 340 лет назад (Деланей и др., 2010). Эта

реконструкция показала, что структуру остатка Cas A можно охарактеризовать с помощью сферической компоненты, наклоненного толстого диска, нескольких выбросов, струй и быстро движущихся узлов, находящихся в плоскости толстого диска. Хотя взаимодействие с околозвездной средой влияет на подробную картину внешнего вида остатка, но основная часть наблюдаемых симметрий и асимметрий в остатке Cas A – следствие взрыва. Рентгеновское изображение богатых кремнием выбросов



*Изображение центральной области нашей Галактики в инфракрасных лучах, полученное по данным космического телескопа им. Спитцера. На вклейке показано изображение области неба, находящейся на расстоянии  $1,4^\circ$  от Галактического центра (маленький кружок на рисунке), в рентгеновских лучах, по данным обсерватории "Чандра". Яркими точками показаны сотни зарегистрированных точечных источников (Ревнивцев и др., 2009). X-ray: (NASA/CXC/TUM/ M. Revnivtsev et al.); IR (NASA/JPL-Caltech/GLIMPSE Team).*

в остатке Cas A показывает явную биполярную структуру, связанную с формированием струй во время вспышки сверхновой (Хванг и др., 2004). Гидродинамические расчеты образования и эволюции таких струй показывают, что звезда-предшественник Cas A во время взрыва находилась в фазе красного сверхгиганта, а ее начальная масса была меньше  $25 M_\odot$  (Шуре и др., 2008).

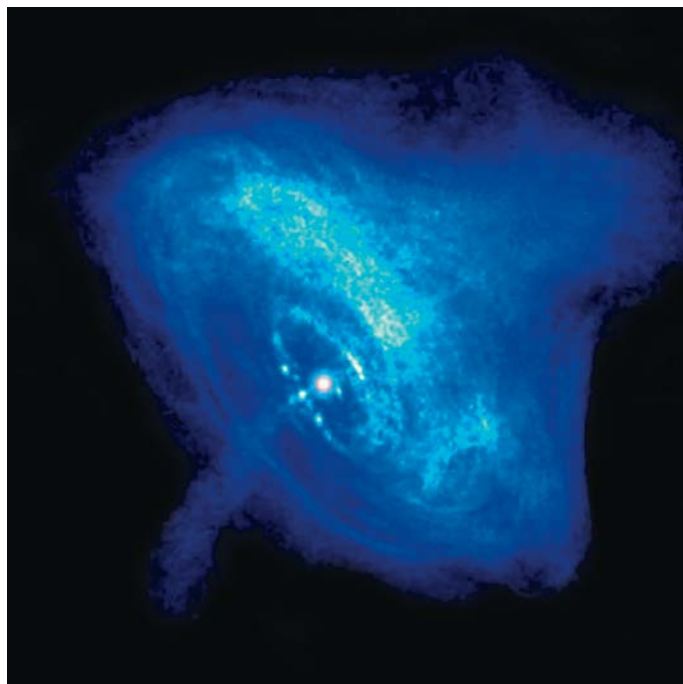
#### КОМПАКТНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ

Остатки вспышек сверхновых, произошедших в результате коллапса ядра, должны содержать релятивистский компактный объект, возникший в процессе коллапса, то есть нейтронную звезду или черную дыру. Хотя в разных теоретических моделях предсказываются несколько сценариев образования черных дыр в процессе коллапса,

существует общее понимание того, что в большинстве случаев будут рождаться нейтронные звезды. Существование этих объектов подтверждено во многих остатках вспышек сверхновых, и их проявления столь же разнообразны, как и сами остатки. Из закона сохранения момента импульса и магнитного потока следует, что нейтронные звезды будут быстро вращаться и иметь сильное магнитное

*Крабовидная туманность в рентгеновских лучах, по данным обсерватории "Чандра". На изображении хорошо видны пульсар (белая точка вблизи центра), внутреннее кольцо, возникающее вследствие ударных волн, и струи вещества и антивещества, движущиеся от северного и южного полюсов пульсара. Размер изображения – 1,6' (около 1 пк). NASA/CXC/ASU/J Hester et al.*

---



поле. Это порождает сильные электрические поля, ускорение частиц и пульсирующее излучение во всем диапазоне электромагнитного спектра. Сильные электромагнитные поля порождают так называемый пульсарный ветер, состоящий из электронов и позитронов (разогнанных до релятивистских скоростей) и истекающий в межзвездное пространство, где он замедляется в ударной волне. При этом частицы могут покидать ударную волну, создавая туманность из электронов и позитронов, движущихся по спиральям вокруг магнитных силовых линий и излучающих в диапазоне от радио- до гамма-лучей, а вследствие обратного комптоновского рассеяния – и до энергий, достигающих ТэВ. Получившийся объект носит

название пульсарной туманности или плериона.

Связанная со сверхновой 1054 г. Крабовидная туманность (Земля и Вселенная, 1982, № 3) и 33,5-миллисекундный пульсар B0531+21 в ее центре представляют собой классический пример пульсарной туманности, состоящей из нескольких колец (или торов) и струй. Благодаря обсерватории "Чандра" удалось построить детальное изображение пульсара и туманности в рентгеновских лучах и изучить ее морфологию (Вайскопф и др., 2000). Полученное изображение демонстрирует осесимметричную туманность с наклонным внутренним кольцом, которое может быть связано

со стоячей ударной волной, возникающей в экваториальном пульсарном ветре. Кроме того, в структуре туманности присутствуют большой тор и две струи, исходящие вдоль оси пульсара.

Нейтронные звезды рождаются с температурой в миллиарды градусов и затем остывают вследствие излучения фотонов и нейтрино. Наблюдения и измерения скоростей охлаждения молодых нейтронных звезд дают уникальную возможность исследования поведения вещества при сверхвысоких плотностях.

Открытие нейтронной звезды в центре остатка вспышки сверхновой Cas A дало редкую возможность для

изучения охлаждения молодых нейтронных звезд с известным возрастом и определения физических условий в их внутренних областях. Анализ десятилетних наблюдений обсерватории “Чандра” показал, что модель нейтронной звезды с массой около  $1,65 M_{\odot}$  с углеродной атмосферой, температурой поверхности около  $1,5 \times 10^6$  К и слабым магнитным полем наилучшим образом описывает наблюдаемый рентгеновский спектр объекта (Хо и Хайнке, 2009). Размер излучающей области согласуется с нейтронной звездой, имеющей примерно одинаковую температуру на поверхности, что, возможно, объясняет отсутствие пульсаций рентгеновского излучения от источника. Измеренный темп охлаждения поверхности нейтронной звезды – около 3% за 10 лет (Элшамоти и др., 2013).

Если нейтронная звезда (или черная дыра) входят в состав двойной системы, то они могут быть источниками рентгеновского излучения вследствие аккреции вещества с нормальной звезды-компаньона (Земля и Вселенная, 2016, № 6). В отличие от остатков вспышек сверхновых, которые светят в течение тысяч или десятков тысяч лет, такие объекты могут излучать много миллионов

и даже миллиардов лет. Вообще, рентгеновские двойные системы в нашей Галактике – ярчайшие источники на небе, поэтому они являются первоочередными мишенями для большинства рентгеновских обсерваторий. Обсерваторией “Чандра” были проведены сотни наблюдений таких объектов, получены их астрометрические положения с высокой точностью, что позволило провести последующие отождествления в оптическом диапазоне длин волн и определить природу исследуемых объектов, измерить их спектральные характеристики. Важные достижения, полученные обсерваторией, следующие: определен возраст (менее 4600 лет) наиболее молодой аккрецирующей двойной системы Циркуль X-1 (Хайнц и др., 2012); измерен спин черной дыры Лебедь X-1; определена масса ( $15,7 \pm 1,4 M_{\odot}$ ) наиболее массивной черной дыры звездной массы M33 X-7, которая находится в спиральной галактике M33 (NGC 598) в созвездии Треугольника (около 3 млн св. лет от нас).

Помимо изучения отдельных релятивистских компактных источников, с помощью обсерватории “Чандра” исследованы характеристики разных популяций таких объектов и прослежена связь

с наблюдаемыми параметрами галактик.

Вообще, компактные рентгеновские источники можно условно разделить на два типа: это – маломассивные рентгеновские двойные системы, излучающие за счет аккреции вещества с маломассивных звезд (около  $1 M_{\odot}$ ) поздних спектральных классов, и массивные рентгеновские двойные системы, в которых нормальным компаньоном является звезда ранних спектральных классов (как правило, O или B). Маломассивные рентгеновские двойные системы светят за счет аккреции на компактный объект, возникающей из-за переполнения нормальной звездой своей полости Роша – области пространства, в которой преобладает гравитация звезды-компаньона. В массивной рентгеновской двойной системе компактный объект, как правило, аккрецирует из ветра звезды-компаньона.

Благодаря уникальной чувствительности приборов на обсерватории “Чандра” отдельные рентгеновские источники со светимостями, сопоставимыми со светимостями рентгеновских двойных систем в нашей Галактике, теперь могут быть обнаружены на расстоянии скопления в созвездии Девы (примерно 20 Мпк) и даже за его пределами. В то время, как

исследования популяций рентгеновских двойных в нашей Галактике осложняются значительными неопределенностями в расстояниях до источников и влиянием межзвездного поглощения из-за холодного газа и пыли; эти трудности минимальны при изучении рентгеновских источников в соседних галактиках. Поглощение и эффекты рассеяния существенно менее значимы на высоких галактических широтах, а неопределенности с расстоянием уменьшаются, так как все рентгеновские источники в соседней галактике находятся практически на одинаковом расстоянии от наблюдателя. Это позволило построить функции светимости на масштабах двух-трех порядков для разных популяций рентгеновских двойных систем со светимостями выше  $10^{36}$  эрг/с, и показать что, суммарное излучение всех маломассивных рентгеновских двойных систем “отслеживает” массу галактики, а суммарное излучение массивных двойных систем “отслеживает” темп звездообразования в галактике (см., например, Гильфанов и др., 2004, Фаббиано и др., 2006).

#### ПРИРОДА РЕНТГЕНОВСКОГО “ХРЕБТА” ГАЛАКТИКИ

Проблема существования и природа протяженного рентгеновского

излучения, расположенного вдоль плоскости нашей Галактики (так называемого “хребта”), а также похожих структур, обнаруженных в других галактиках, оставалась загадкой для астрофизиков более 25 лет. Ключевым экспериментом, позволившим подтвердить (или опровергнуть) гипотезу о том, что излучение “хребта” Галактики формируется в результате суммарного света большого количества слабых рентгеновских источников, стали сверхглубокие (с чувствительностью до  $10^{-17}$  эрг/с/см<sup>2</sup>) наблюдения обсерватории “Чандра” с общей экспозицией около 1 млн секунд. Анализ этих данных позволил сделать следующие выводы (Ревнивцев и др., 2009, Земля и Вселенная, 2007, № 6):

- в характерной области “хребта” Галактики обнаружено множество слабых рентгеновских источников с поверхностной плотностью до 100 тыс. источников на квадратный градус;

- до  $88 \pm 12\%$  излучения “хребта” Галактики в области энергий 6–7 кэВ разрешается на точечные источники, обнаруженные в наблюдениях обсерватории “Чандра”;

- эти источники в подавляющем большинстве являются аккрецирующими белыми карликами

или коронально активными звездами;

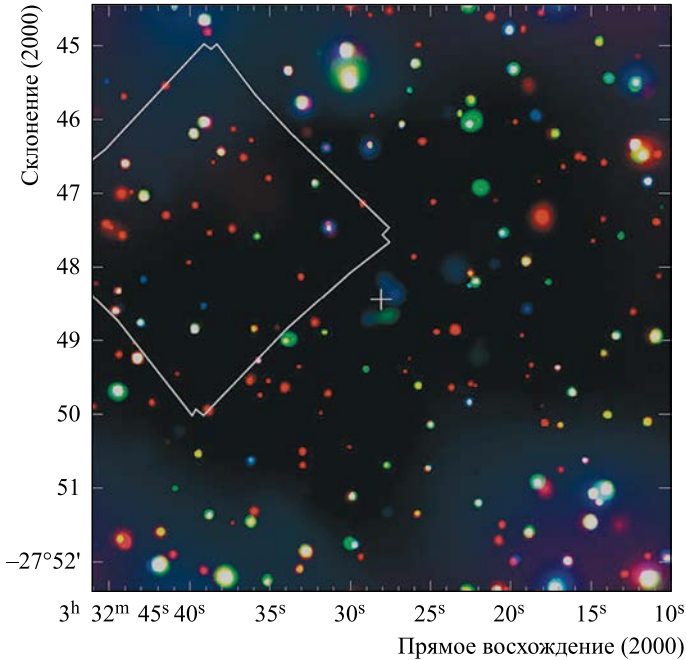
- суммарная кривая подсчетов источников хорошо согласуется с ожидаемой на основе нашего знания о рентгеновских объектах, близких к Солнцу.

Это открытие явилось серьезным аргументом против гипотезы о существовании в области галактического центра большого количества диффузного горячего газа с температурой около  $10^8$  К, ранее предлагавшейся для объяснения наблюдаемого излучения “хребта” Галактики.

#### РАЗРЕШЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ФОНА И ПОПУЛЯЦИЯ ПОГЛОЩЕННЫХ АКТИВНЫХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Рентгеновское небо – не “черное” (отсутствие источников), а “серое”, так как при угловом разрешении в несколько квадратных градусов поверхностная яркость фона ненулевая и практически не зависит от направления. Почти сразу после обнаружения активных ядер галактик (АЯГ) было высказано предположение, что их популяция может вносить значительный “вклад” в поверхностную яркость космического рентгеновского фона.

Прямые измерения вклада от потока большого количества дискретных источников в



Изображение внутренней части (8'×8') области CDFS, полученное за 4 млн секунд наблюдений обсерватории "Чандра". Разными цветами показаны изображения в разных диапазонах энергий: 0,5–2 кэВ (красный), 2–4 кэВ (зеленый), 4–8 кэВ (синий). Квадратом показана область ультраглубокого поля наблюдений космического телескопа им. Хаббла. (Из работы Ксуе и др., 2011).

излучение космического рентгеновского фона стали возможны после появления рентгеновских телескопов с зеркалами косоугольного падения. Рентгеновский телескоп на обсерватории "НЕАО-2" позволил достичь тогда рекордной чувствительности  $1,3 \times 10^{-14}$  эрг/с/см<sup>2</sup> в диапазоне энергий 1–3 кэВ. На этом уровне чувствительности поверхностная плотность обнаруженных источников составила примерно 20 объектов на квадратный градус.

Благодаря низкому уровню фона ( $\sim 10^{-6}$  отсч/с/пиксел) чувствительность наблюдений обсерватории "Чандра" остается ограниченной только статистикой фотонов (вплоть до рекордных экспозиций

в 4–6 млн секунд). Например, 4 млн секунд наблюдений площадки CDFS (Chandra Deep Field South – южное глубокое поле "Чандры", координаты центра RA = 3<sup>h</sup> 32<sup>m</sup> 28,0<sup>s</sup>, Dec = –27°48'30", площадь около 0,11 квадратных градуса) позволили достичь чувствительности  $9 \times 10^{-18}$  эрг/с/см<sup>2</sup> и обнаружить 776 источников рентгеновского излучения (Ксуе и др., 2012). Более 97% из них имеют надежные отождествления и более 75% являются активными ядрами галактик на красных смещениях  $0,2 < z < 5$ . Поверхностная плотность активных ядер галактик на таких потоках составляет более 10 тыс. источников на квадратный градус. Таким образом, на пределе

детектирования источников "Чандра" "разрешает" около 90% рентгеновского фона.

Ввиду того, что рентгеновское излучение в активных ядрах галактик возникает в результате аккреции вещества на сверхмассивные черные дыры, поверхностная яркость космического рентгеновского фона может рассматриваться в качестве суммарного мерила роста всех сверхмассивных черных дыр в истории Вселенной. Комбинирование измерений поверхностной яркости космического рентгеновского фона с исследованиями подсчетов отдельных классов источников в разных глубоких обзорах неба позволяет изучать долговременную эволюцию

роста сверхмассивных черных дыр.

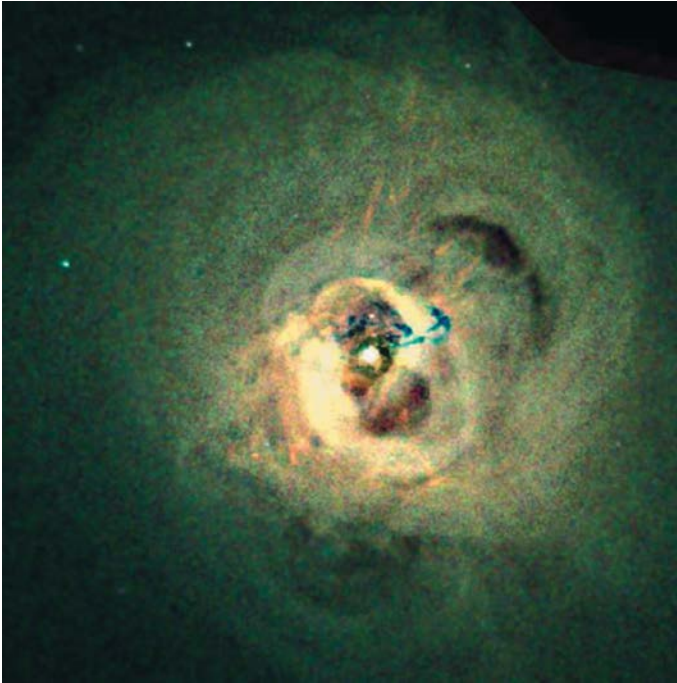
Изучение последних показало, что с наблюдательной точки зрения их можно разделить на несколько больших классов. В рамках так называемой “модели объединения” наблюдательные проявления активных ядер галактик в широкой полосе длин волн (от радио- и ИК- до рентгеновского диапазона) зависят от угла наклона ядра к лучу зрения наблюдателя. Излучение центральных областей активных ядер галактик, наблюдаемых под углом, близким к  $90^\circ$ , проходит через плотный пылевой тор, поглощается вплоть до жесткого рентгеновского диапазона, “перерабатываясь” в ИК-спектр (сейфертовские галактики второго типа, поглощенные АЯГ). В спектрах АЯГ, наблюдаемых под малыми углами к лучу зрения, хорошо видны проявления аккреционного диска в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах (сейфертовские галактики первого типа). Активные ядра галактик, наблюдаемые вдоль направления вылета релятивистской струи из центральной черной дыры АЯГ, регистрируются в виде блазаров в очень широком диапазоне длин волн – от радио- до сверхвысокого гамма-излучения.

Доля поглощенных объектов среди всех АЯГ имеет решающее значение для оценки общего энерговыделения в результате аккреции и, таким образом, “вклада” АЯГ в энергетический баланс Вселенной. Это соотношение остается предметом дискуссий, так как многочисленные исследования в разных диапазонах длин волн приводят к различным выводам, осложняющимся тем, что оптические и инфракрасные исследования позволяют измерять поглощение света “пылью”, а в рентгеновских исследованиях измеряется колонковая плотность (количество тех или иных частиц – молекул, ионов, атомов – на луче зрения в столбике с сечением  $1 \text{ см}^2$ ) холодного газа. В частности, из оптических и инфракрасных обзоров следуют оценки, что 65–75% всех АЯГ являются “поглощенными” (см., например, Симпсон, 2005). В отличие от этого, наблюдения обсерватории “Чандра” (подтвержденные результатами обсерватории “XMM-Newton”) показывают сильную зависимость доли поглощенных АЯГ от их светимости – 10–20% поглощенных АЯГ с высокими светимостями ( $10^{44-46}$  эрг/с), в то время как при более низких светимостях эта цифра возрастает до примерно 80% (см., например, Сазонов и др., 2012).

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ  
АКТИВНЫМИ ЯДРАМИ  
ГАЛАКТИК  
И СКОПЛЕНИЯМИ ГАЛАКТИК

Известно, что галактики распределены по небу не равномерно, а концентрируются в группах и скоплениях, которые являются наиболее массивными гравитационно-связанными объектами во Вселенной. Группы и скопления содержат много горячего газа с температурой  $10^6-10^8 \text{ K}$  и темной материи. Масса барионной компоненты в скоплениях галактик достигает значений  $10^{14-15} M_\odot$ , при этом масса горячего газа в скоплениях галактик примерно в шесть раз больше массы звезд. Масса темной материи, в свою очередь, еще в 5–6 раз больше массы горячего газа. Именно темная материя является тем связующим звеном, которое позволяет “держаться” все галактики скопления вместе. Поскольку горячий газ излучает свою тепловую энергию медленно, то он сохраняет “запись” активности в течение миллионов лет, показывая, как развивалась история аккреции на сверхмассивную черную дыру, как проходили слияния с другими частями “сети” скоплений галактик.

Начиная с 1970 г., когда был запущен спутник “Ухуру” (“Uhuru”, или SAS-A), – первый специализированный спутник,



*Изображение скопления галактик в созвездии Персея, полученное обсерваторией “Чандра”. Хорошо видны пузыри и каверны в северном и южном направлениях. (NASA/CXC/IoA/A. Fabian et al.).*

предназначенный для изучения рентгеновских объектов вне Солнечной системы, астрофизики стали заниматься моделированием рентгеновского излучения горячего газа. Считалось, что энергия, излученная в виде рентгеновских фотонов, должна приводить к падению давления в центральной части скопления и его замещению более горячей плазмой из внешних частей. С появлением обсерватории “НЕАО-2” были измерены профили яркости многих скоплений, показавшие, что в них существуют центральные горячие области, вносящие основной “вклад” в рентгеновское излучение. Излучательная способность оптически тонкой

плазмы –  $j \propto n^2 \Lambda(T)$  эрг/с/см<sup>3</sup>, где  $n$  – плотность плазмы, а  $\Lambda(T)$  – функция остывания плазмы, учитывающая потери энергии во всем диапазоне. В диапазоне температур  $(10-20) \times 10^6$  К для плазмы с солнечным обилием элементов преобладает остывание на эмиссионных линиях, с температурой выше  $2 \times 10^7$  К из-за тормозного излучения. Тепловая энергия плазмы  $n \propto nT$ , поэтому получается, что время остывания  $t_{rad} \propto (u/j) \propto T/n\Lambda(T)$ . По данным обсерватории “НЕАО-2”, удалось измерить профили плотности  $n$  и температуры плазмы  $T$ , то есть определить их зависимость от расстояния до центра скопления и показать,

что время остывания составляет менее  $10^{10}$  лет для ряда скоплений. Такое время остывания оказывается существенно меньше, чем время жизни скопления. В таком случае возникает вопрос о дальнейшей судьбе этого газа. Это может быть либо “течение охлаждения” с образованием большого количества новых звезд (оно не наблюдается), либо – с образованием обширных областей молекулярного газа.

В 1990-х гг. наблюдения скопления галактик в созвездии Персея, проведенные обсерваторией “ROSAT”, показали, что плазма скопления взаимодействует со сверхмассивной черной дырой в его центре (Берингер и др., 1993). Полученные данные совпадали с предположением о том, что энергия, теряемая плазмой в скоплении в ходе остывания, может быть замещена энерговыделением центральной черной дыры. Однако доказательств такому утверждению предоставлено не было. Эта загадка оставалась неразгаданной до запуска в 1999 г. на орбиту



обсерваторий “Чандра” и “ХММ-Newton”. Спектральные исследования обсерватории “ХММ-Newton” позволили сделать утверждение, что остывание плазмы не переходит в неустойчивый режим (останавливаясь на температурах около 2–3 кэВ, Тамура и др., 2001). В то же время наблюдения на обсерватории “Чандра” (совместно с исследованиями в радиодиапазоне) позволили обнаружить струи, каверны, пузыри и волны, показывающие множественные эпизоды прошлой активности центральной черной дыры, как в скоплениях галактик, так и в галактиках (см., например, Фабиан и др., 2001). Практическое равенство энергии, которая теряется горячей плазмой в ходе остывания, и энергии, закачиваемой в скопление галактик сверхмассивной черной дырой, указывает на то, что в цепочке скопление галактик – сверхмассивная черная дыра существует обратная связь, препятствующая росту ярких молодых галактик в центрах скоплений.

#### “ХОЛОДНЫЕ ФРОНТЫ” В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК

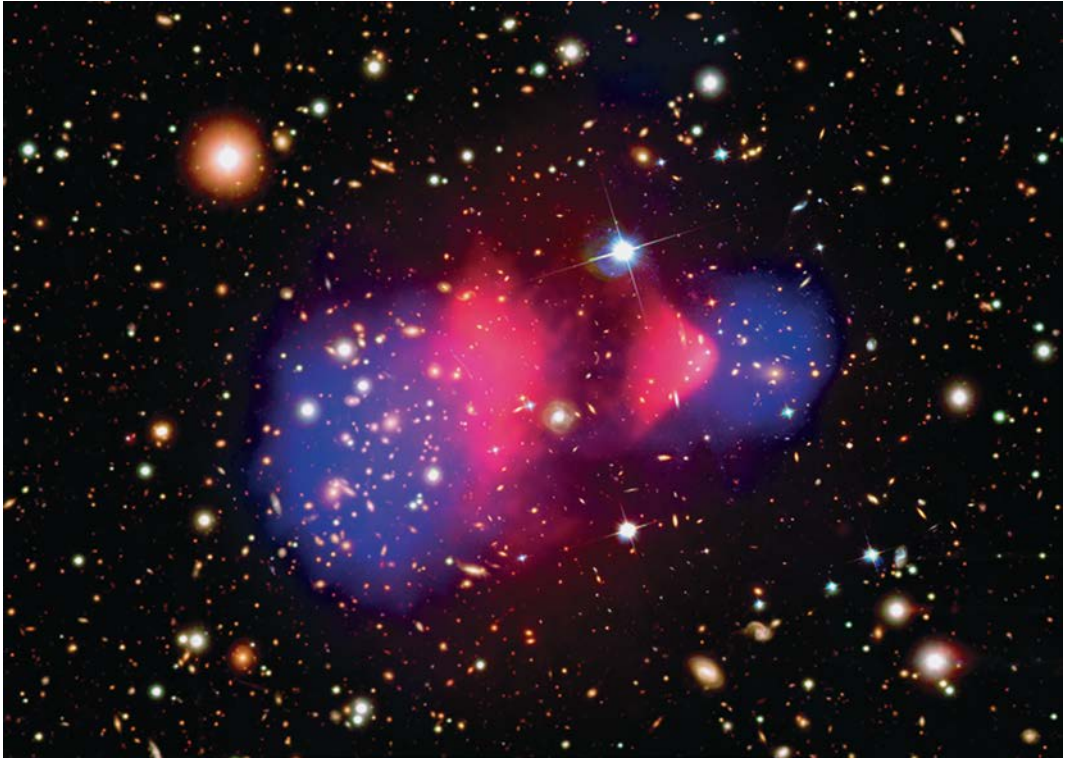
Современная теория эволюции Вселенной предсказывает, что массивные скопления галактик формируются в результате слияния

малых групп (галактик), а процессы столкновений и слияний определяются параметрами космологической модели. Выделяющаяся в процессе таких взаимодействий энергия огромна – около  $10^{65}$  эрг. Большая часть этой энергии выделяется в ходе дальнейшего распространения системы ударных волн и возникающей турбулентности, что приводит к нагреву газа в скоплениях. Часть энергии также может идти на ускорение заряженных частиц до релятивистских энергий, на усиление магнитного поля и т.д. (Маркевич, Вихлинин, 2007).

Полученная возможность – на основе данных обсерватории “Чандра” строить карты распределения газа и его температуры в скоплениях галактик – позволила по-другому взглянуть на процессы, происходящие в них. Например, до этого резкие скачки яркости, наблюдаемые обсерваторией “ROSAT” без возможности измерять температуру в них, считались проявлениями ударных волн, вызванных процессами слияния частей скоплений. С помощью обсерватории “Чандра” удалось показать, что большая часть из них не является истинными ударными волнами. Так, например, для скопления Абель 2142 (6 млн св. лет от нас) было показано, что

области повышенной поверхностной яркости одновременно и холоднее, и плотнее, чем окружающая их плазма (Маркевич и др., 2000). Отсутствие существенных скачков давления в плазме (при пересечении границ этих особенностей) говорит о том, что они представляют собой области контактного разрыва между горячей разреженной плазмой и холодными плотными сгустками. Эти особенности скоплений называли “холодными фронтами”. Во многих случаях феномен “холодного фронта” объясняется пролетом более легкой части вещества скопления с пониженной температурой через горячую разреженную плазму основного скопления.

Обнаружение “холодных фронтов” в скоплениях галактик позволило проводить диагностику плазмы ранее не доступными методами. Например, на границе “холодного фронта” требуется, чтобы давление плазмы с одной стороны фронта равнялось бы давлению плазмы с другой, плюс динамическое давление, которое оказывает летящее облако. По измерениям обсерватории “Чандра”, можно определить давление с одной и с другой стороны “холодного фронта” и оценить “динамическое” давление (скорость движения облака).



Комбинированное изображение скопления галактик “Пуля”, полученное обсерваторией “Чандра” и оптическими телескопами. Розовым цветом показано положение горячего газа в скоплении, а синим – области сосредоточения основной массы скопления, определенные из эффектов гравитационного линзирования (X-ray: NASA/CXC/CfA/M. Markevitch et al.; optical: NASA/STScI; Magellan/U.Arizona/D Clowe et al.; lensing map: NASA/STScI; ESO WFI; Magellan/U Arizona/D Clowe et al.).

“Холодные фронты” помогают также определять эффективность переноса тепла в скоплениях галактик. Тепло в разреженной плазме переносится электронами и, в случае отсутствия магнитного поля, “классическая” теплопроводность зависит от температуры как  $T^{5/2}$ . Однако для скопления Абель 2142 оказалось, что скачок температуры является гораздо более резким – всего

несколько килопарсек – что требует подавления теплопроводности в 100 и более раз по сравнению с “классической” величиной. Для другого скопления – Абель 3667 (содержит около 500 галактик, находится на расстоянии 700 млн св. лет от нас,  $z = 0,055$ ) оказалось, что масштаб, на котором происходит скачок температуры, также очень мал – в несколько раз меньше длины свободного пробега элект-

ронов (эффективная длина, которую электрон пролетает, не встречая никаких препятствий). По всей видимости, это происходит из-за того, что магнитные поля на границе “холодного фронта” выстраиваются вдоль него, не позволяя переносить тепло в направлении поперек магнитного поля, тем самым эффективно подавляя теплопроводность.

Колебательные движения налетающей плаз-

мы в гравитационном потенциале основного скопления являются причиной, по которой мы можем видеть проявления “холодных фронтов” до времен порядка 100 млн лет. Энергия колебательных движений налетающей плазмы велика и может быть одним из механизмов подогрева центральных областей скоплений.

#### УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Несмотря на то, что часть резких скачков яркости относится к “холодным фронтам”, ударные волны все же образуются при быстрых сверхзвуковых столкновениях. Разные части скопления движутся в одном и том же гравитационном потенциале, определяющем температуру плазмы “основного скопления”, поэтому, как правило, оказывается, что взаимные скорости движения различных частей скопления не превышают нескольких скоростей звука. Взаимное движение частей в скоплении галактик “Пуля” (1E0657-56, находящегося в 3,4 млрд св. лет от нас) существенно превышает скорость звука (число Маха для скопления составляет  $M = 3,0 \pm \pm 0,4$ ). Измерения профилей температуры излучающей плазмы (в комбинации с информацией о скорости взаимного дви-

жения) позволяют “поставить ограничения” на время выравнивания температур в области за ударной волной. В случае скопления “Пуля” можно поставить уникальные ограничения на время выравнивания тепловых энергий протонов и электронов. С вероятностью до 95% время выравнивания тепловых энергий протонов и электронов меньше, чем кулоновское время (время, рассчитанное в предположении только Кулоновского взаимодействия частиц).

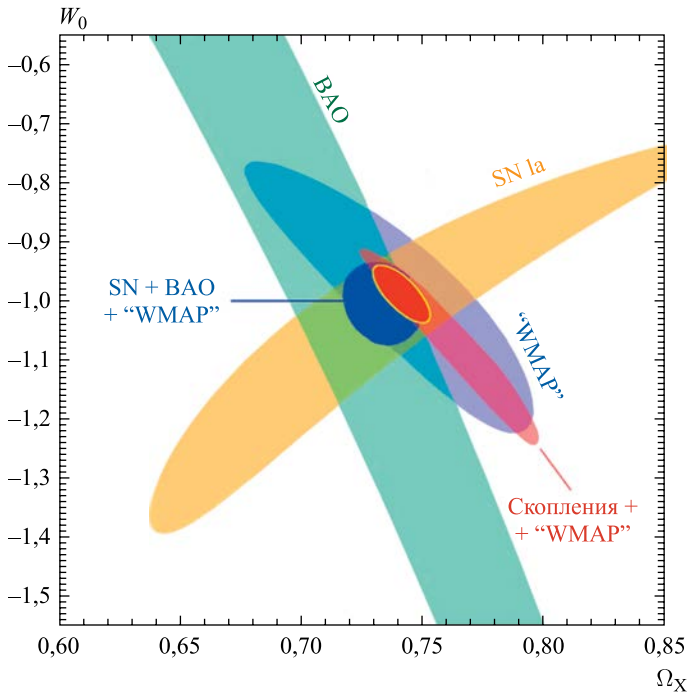
Необходимо отметить, что скопление галактик “Пуля” представляет собой практически “чистый” случай с минимальными проекционными эффектами и поэтому он может быть использован для поиска и изучения свойств темной материи. И такие исследования распределения обычной и темной материи были проведены в оптическом и рентгеновском диапазонах. В оптическом диапазоне были построены карты распределения темной материи на основе эффектов гравитационного линзирования, в рентгеновском диапазоне – карты распределения обычной, барионной материи (доля горячего газа преобладает в скоплениях галактик). Наблюдаемое различие этих карт – одно из самых убедительных доказательств

существования темной материи (Маркевич и др., 2004).

Звезды в галактиках, по сути, являются бесстолкновительными частицами, поэтому отсутствие смещения распределения звезд и распределения темной материи неудивительно. Более удивительным является тот факт, что основная масса барионов, которую мы наблюдаем по положению пика рентгеновского излучения в скоплении, смещена относительно этого положения. Сравнение наблюдаемого смещения с известными значениями скорости движения части скопления “Пуля” позволяет получить верхний предел на сечение взаимодействия темной материи на единицу массы  $\sigma/m < < 1.25 \text{ см}^2/\text{г}$ .

#### РОСТ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Наблюдения обсерватории “Чандра” продолжают играть существенную роль в определении космологических параметров Вселенной. Один из наиболее эффективных и комплексных методов их определения, использующий данные “Чандры”, состоит в том, что подсчет количества массивных скоплений галактик сравнивается с предсказаниями различных моделей. Массивные



Ограничение на величину параметра уравнения состояния темной энергии  $w$ . Значения, полученные разными методиками, обозначены разными цветами (желтым – по наблюдениям сверхновых Ia, зеленым – по измерению барионных акустических осцилляций, голубым – по данным обсерватории WMAP, оранжевым – по комбинации данных обсерватории “WMAP” и измерений скоплений галактик). Красным эллипсом в центре показано значение, полученное из комбинации всех экспериментальных данных (Вихлинин и все, 2009).

скопления, как самые большие гравитационно-связанные объекты во Вселенной, критическим образом связаны с космологическими параметрами. Пространственно-разрешенные изображения, полученные с помощью обсерватории “Чандра”, а также соответствующие спектральные данные, позволяют оценить массу скоплений.

В результате исследования функции масс скоплений галактик (в зависимости от их красного смещения), по данным наблюдений 86 таких объектов обсерваторией “Чандра”, было подтверждено существование темной энергии и получено “ограничение” на ее долю в космологическом балансе

Вселенной. В частности, удалось показать, что параметр  $w = p/\rho$ , представляющий собой отношение давления темной энергии и ее плотности, равен  $w = -0,991 \pm 0,045$  (статистика)  $\pm 0,039$  (систематика; Вихлинин и др., 2009). Важно отметить, что в этих расчетах приняты во внимание не только данные измерений скоплений галактик, но также и данные по анизотропии микроволнового фона, по барионным акустическим осцилляциям, по наблюдениям сверхновых типа Ia. Полученное значение для параметра  $w$  согласуется с величиной  $w = -1$ ; это означает, что темная энергия может быть описана космологической постоянной

в рамках общей теории относительности.

Необходимо также отметить, что данные обсерватории “Чандра” (в комбинации с данными обсерватории “WMAP”) позволяют получить самую точную оценку (лучше 2%) на линейную амплитуду возмущений на масштабе  $8h^{-1}$  Мпк на красном смещении  $z = 0$ , где  $h$  – постоянная Хаббла в единицах 100 км/с/Мпк.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успешная работа обсерватории “Чандра” на орбите и проведенные с ее помощью исследования оказали огромное влияние на разные области астрономии. Помимо уникальных характеристик самой обсерватории, важную роль играет и то, что заявки на

наблюдательное время обсерватории принимаются от ученых всего мира. За 15 лет успешной работы более 3500 ученых получили наблюдательное время на обсерватории; по результатам проведенных исследований опубликовано более 6 тыс. статей в рецензируемых журналах.

Обсерватория “Чандра” с ее угловым разрешением лучше секунды дуги и непревзойденной

чувствительностью к слабым источникам уникальна не только среди всех ныне действующих рентгеновских обсерваторий, но также и в сравнении с любой планируемой для возможного запуска в течение, по крайней мере, еще десяти лет, а, вероятно, и больше.

Когда-то, когда обсерватория “Чандра” только планировалась, говорить о возможности ее работы на орбите в течение

десяти лет было слишком оптимистично. Сейчас же, принимая во внимание пятнадцатилетний срок работы, прекрасное состояние инструментов и энтузиазм от выдающихся научных результатов, уже не кажется “несбыточной мечтой” говорить о продлении работы обсерватории и после 2020 г., а, значит, нас ждет еще множество удивительных открытий.

---

## *Информация*

---

### **Рентгеновский источник в Андромеде**

Происхождение яркого источника рентгеновского излучения высокой энергии Swift J0042.6+4112 в галактике M31 Андромеда (2,5 млн св. лет от нас) для астрономов долго оставалось загадкой. Недавно на основе изображений, полученных космической обсерваторией “NuSTAR” (см. стр. 2 обложки, сверху), они смогли объяснить

причину такой яркости этой нейтронной звезды и определить ее природу. Это оказался пульсар – плотный остаток мертвой звезды, обладающей высокой намагниченностью и стремительно вращающейся вокруг своей оси; он входит в двойную систему, газ перетекает на него со звезды-компаньона, разогревается и излучает жесткое высокоэнергетическое рентгеновское излучение, теряя при этом энергию. Swift J0042.6+4112 имеет самую низкую массу из всех черных дыр Андромеды, но превосходит по яркости все другие источники, включая центральную сверхмассивную черную дыру этой галактики.

Исследование пульсара Swift J0042.6+4112 основывается на множестве других наблюдений за ним с помощью космических рентгеновских обсерваторий “Чандра” и “ХММ-Newton”. В 2013 г. космическая обсерватория “Swift” (запущена в 2004 г.) смогла отождествить его как высокоэнергетический источник. Излучение более низких энергий от пульсара было зарегистрировано еще в конце 1970-х гг. с помощью космической обсерватории “HEAO-2” им. Эйнштейна (1978–1981).

*Пресс-релиз Университета  
Джона Хопкинса,  
27 марта 2017 г.*