

X-RAY AND GAMMA-RAY SKY

Yu. N. GNEDIN

This is a review of current status of new fields in the space researches: X-ray and gamma-ray astronomy. Discrete sources of cosmic X-ray radiation are briefly described. These sources are basically so-called compact stars: white dwarfs, neutron stars and black holes.

Представлен обзор современного состояния новых направлений в исследовании космоса – рентгеновской и гамма-астрономии. Кратко характеризуются дискретные источники космического рентгеновского излучения, которыми являются главным образом так называемые компактные звезды: белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры.

НЕБО В РЕНТГЕНОВСКИХ И ГАММА-ЛУЧАХ

Ю. Н. ГНЕДИН

Государственный технический университет, Санкт-Петербург

ВВЕДЕНИЕ

В 1995 году исполнилось ровно 100 лет со дня открытия великим немецким физиком Вильгельмом Конрадом Рентгеном нового вида излучения, который получил название рентгеновских лучей. В 1992 году исполнилось 30 лет со дня рождения рентгеновской астрономии. Именно в 1962 году впервые было зарегистрировано излучение космического источника Sco X-1. Справедливости ради следует отметить, что рентгеновское излучение Солнца было зарегистрировано в 1948 году. За чуть более чем двадцатилетний период становления и развития рентгеновская астрономия достигла впечатляющих успехов. Были открыты мощные источники космического рентгеновского излучения как в нашей Галактике, так и внегалактического происхождения. Об их природе мы будем подробно рассказывать дальше.

Общепринято под рентгеновским излучением понимать электромагнитные волны в области энергий 0,1–300 КэВ. Этот диапазон, в свою очередь, делится на три поддиапазона: 0,1–5 КэВ (мягкое рентгеновское излучение), 5–50 КэВ (классический рентгеновский диапазон), 50–300 КэВ (жесткое рентгеновское излучение). Электромагнитное излучение в области энергий $E \geq 300$ КэВ принято называть гамма-излучением. Такое разделение прежде всего связано с разными принципами и методами регистрации излучения. Для разных диапазонов, вообще говоря, характерны и разные механизмы генерации фотонов.

Наша Земля надежно защищена атмосферой от проникающего жесткого электромагнитного излучения. Поэтому рентгеновские источники регистрируются с помощью детекторов, установленных на ракетах и космических кораблях-спутниках. Таковыми детекторами являются газовые пропорциональные счетчики или специальные твердые кристаллы-сцинтилляторы, в которых регистрируется ток электронов, возникающих в процессе ионизации под действием рентгеновского космического излучения. В последнее время в качестве детекторов успешно используются зеркальные телескопы, сделанные из специально подобранных материалов, которые эффективно отражают и рассеивают рентгеновские лучи. При этом в фокусе такого телескопа по-прежнему располагаются высокочувствительные пропорциональные счетчики.

Успехи рентгеновской астрономии неразрывно связаны с запуском специализированных рентгеновских спутников. Первым из таких спутников был знаменитый “Ухуру”, запущенный американскими учеными в 1970 году и названный так в честь 10-й годовщины независимости Кении (на языке суахили слово “ухуру” означает “свобода”). С помощью этого спутника было зарегистрировано излучение примерно от 350 космических источников как галактического, так и внегалактического происхождения.

В последующие годы число запущенных специализированных рентгеновских спутников резко возросло. Среди них наиболее известны по полученным научным результатам такие спутники, как SAS-3, HEAO-1, орбитальная лаборатория “Эйнштейн” (HEAO-2) (США), “Ариэль” (Англия), АНС (Голландия), “ЭКЗОСАТ” и “РОСАТ” (ФРГ), “Хакучо” и “Гинга” (Япония). С помощью орбитальной станции “Эйнштейн” было открыто много новых внегалактических источников рентгеновского излучения.

В СССР подобные исследования преимущественно в гамма-диапазоне велись на спутниках серии “Космос”, а также на космических станциях “Венера”. В 1982 году в нашей стране был запущен специализированный астрономический спутник “Астрон”, который осуществил исследование неба в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах.

В России сейчас действует орбитальная обсерватория “Гранат”, которая была выведена на орбиту 1 декабря 1989 года. Большую часть времени космический аппарат проводит вне магнитосферы Земли,

обращаясь вокруг Земли с периодом около 4 суток. Это создает благоприятные условия для длительных наблюдений рентгеновских источников. На протяжении шести лет (1990–1995 годы) главной мишенью обсерватории являлась область центра Галактики, где было обнаружено много новых дискретных источников рентгеновского излучения.

В России успешно разрабатывается проект новой международной орбитальной обсерватории в области рентгеновской астрономии. Руководителем этого проекта является академик Р.А. Сюняев. Обсерватория весом 6 т будет запущена с помощью нового российского спутника “Спектр”. Вес научного оборудования составит 2,5 т. Обсерватория будет действовать на сильно вытянутой орбите, причем минимальное расстояние от Земли составит примерно 1000 км, а максимальное — 200 тыс. км. Предполагаемое время работы обсерватории 15 лет. Мы ожидаем, что с помощью этой замечательной обсерватории будут открыты сверхслабые источники космического рентгеновского излучения, находящиеся у самой границы Вселенной.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПО НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ

Самые детальные обзоры неба выполнены с помощью специализированных рентгеновских спутников “Ухуру” и “Эйнштейн”. Четвертый каталог “Ухуру” включает 339 источников, распределение которых по небу в галактических координатах показано на рис. 1. Размер пятна на рис. 1 прямо пропорционален логарифму интенсивности источника.

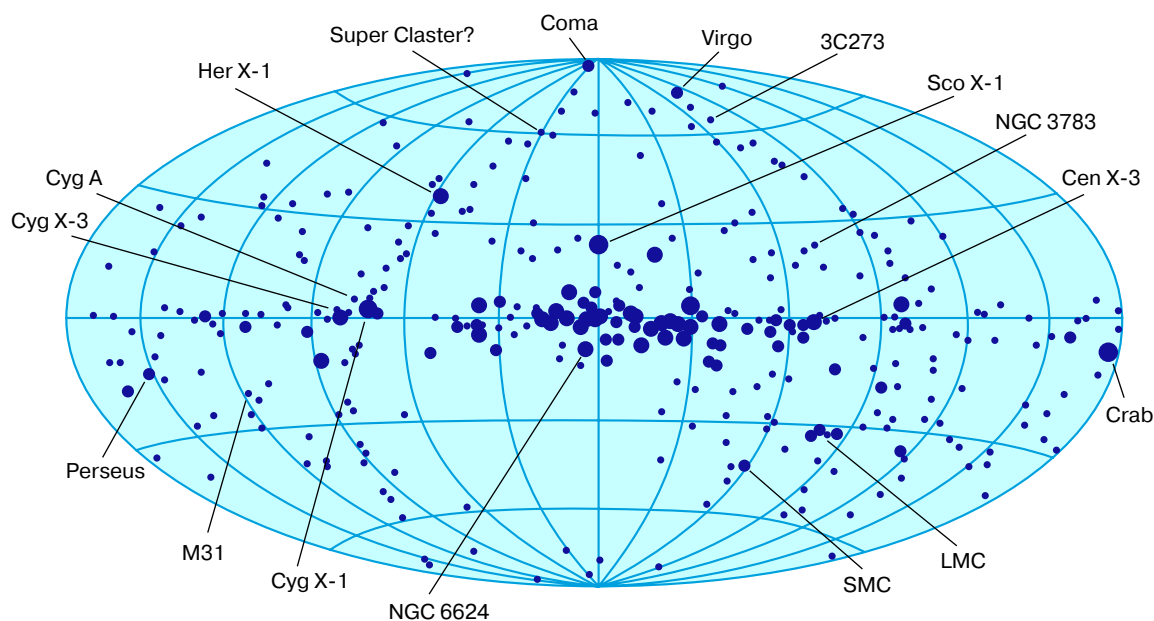


Рис. 1. Распределение рентгеновских источников по небесной сфере

Самые яркие источники концентрируются к галактическому экватору ($\pm 20^\circ$ от экватора), а также к галактическому центру. Очевидно, большинство их принадлежит нашей Галактике. Если бы источники равной светимости распределялись в диске равномерно, то зависимость числа N таких источников от величины их потока F_x подчинялась бы закону

$$N(F_x) \propto F_x^{-1}.$$

Для однородного сферического распределения такая же зависимость имела бы другой вид:

$$N(F_x) \propto F_x^{-3/2}.$$

Сферическое гало слабых источников (рис. 1) в основном состоит из объектов, расположенных вне нашей Галактики.

ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ И НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ (РАДИОПУЛЬСАРЫ)

Более десятка галактических рентгеновских источников отождествлены с остатками так называемых сверхновых звезд. Сверхновыми астрономы называют такие звезды, блеск которых при вспышке увеличивается на десятки звездных величин (что соответствует возрастанию энергии примерно в 10^8 раз!) в течение нескольких суток. В максимуме блеска сверхновая звезда сравнима по яркости с галактикой, в которой она вспыхнула. Остатки сверхновых в нашей Галактике имеют угловые размеры, превышающие несколько градусов. В большинстве случаев источником рентгеновского излучения является горячая плазма за фронтом ударной волны, которая служит границей раздела между межзвездной средой и расширяющейся газовой оболочкой, возникшей после вспышки сверхновой.

Пожалуй, важным исключением является знаменитая Крабовидная туманность. Ее излучение (от радио- до рентгеновского) интерпретируется как синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитном поле туманности. В центре этой туманности находится радиопульсар. Этим радиопульсаром является нейтронная звезда, вращающаяся с периодом $p = 33$ мс. Это единственный радиопульсар, излучающий во всех диапазонах, включая и гамма-излучение сверхвысокой (до 10^{16} эВ) энергии. Ускорение электронов в туманности до релятивистских энергий происходит именно за счет энергии вращения нейтронной звезды. В результате выделения этой энергии нейтронная звезда замедляется и период ее вращения уменьшается. Для пульсара в Крабовидной туманности $\dot{p}/p \approx 3 \cdot 10^{-11} \text{ с}^{-1}$, а соответственно обратная ей величина 10^3 лет определяет возраст пульсара.

Напомним, как образуются нейтронные звезды. Звезды — это огромные раскаленные газовые шары. Мощное гравитационное поле звезды стремится сжать ее. Чтобы звезда находилась в равновесии, ка-

кая-то сила должна противодействовать гравитации. Это сила — давление горячей плазмы и излучения, которые образуются при переносе через толщу звездного вещества энергии, возникающей в результате протекания в центре звезды термоядерных реакций. Однако ядерное горючее безгранично. После того как звезда его израсходует, она уже не сможет противостоять силе тяготения и начнет сжиматься.

Во что превратится при этом звезда, зависит от ее начальной массы. Если масса не превосходила 1,2 массы Солнца, то звезда превратится в белый карлик размером с Землю. В этом случае сжатие останавливается давлением электронов, находящихся в особом квантовом состоянии. Если же масса звезды больше, но не превосходит трех масс Солнца, то сжатие будет продолжаться до тех пор, пока уже ядерные силы не скомпенсируют силу тяготения. В таком состоянии звездное вещество уплотнено настолько, что все электроны вдавливаются в протоны, превращая их в нейтроны, в результате чего и возникает нейтронная звезда с радиусом всего около 10 км. Гравитационное сжатие звезды с массой более трех масс Солнца уже не может быть остановлено никакими силами, и звезда превращается в черную дыру — объект, на границе которого вторая космическая скорость равна скорости света. Черная дыра имеет “радиус” примерно 3 км.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ

В настоящее время значительное количество рентгеновских источников отождествлено с тесными двойными системами. Почти все они являются рентгеновскими пульсарами, то есть быстро вращающимися замагниченными нейтронными звездами, входящими в состав двойных систем. Значения периодов пульсаров лежат в интервале от 0,7 до 835 с.

Источником энергии рентгеновского пульсара является, однако, не энергия вращения нейтронной звезды, а гравитационная энергия газа, перетекающего на нейтронную звезду из оптического компонента двойной системы, выделяющаяся при падении на ее поверхность. Величина этой энергии

$$E = \frac{G m_p M_s}{R_s} \approx 135 \left(\frac{M_s}{M_\odot} \right) \left(\frac{10^6}{R_s} \right) \text{ МэВ}, \quad (1)$$

где m_p — масса протона, G — гравитационная постоянная, а M_s и R_s — масса и радиус нейтронной звезды.

Для появления рентгеновского пульсара необходимо, чтобы на поверхности нейтронной звезды было сильное магнитное поле $B \approx 10^{11} - 10^{13}$ Гс. Тогда картина аккреции представляется так, как показано на рис. 2. Как только в процессе эволюции нормальной звезды в тесной двойной системе ее поверхность достигает границы полости Роша, начинается сильное истечение газа. Ионизированный газ свободно падает на замагниченную нейтронную

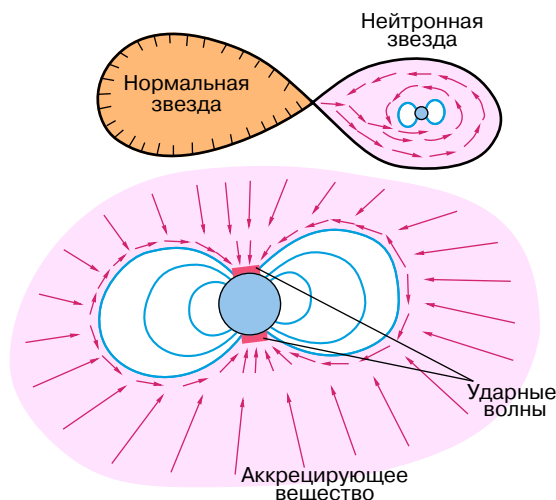


Рис. 2. Картина аккреции в тесной двойной системе

звезду вплоть до так называемой альевенской поверхности, радиус которой r_A определяется из условия равенства магнитного и газового давлений:

$$\frac{B^2(r_A)}{8\pi} = \left(\frac{1}{2}\right)\rho V^2(r_A), \quad (2)$$

где B — магнитное поле звезды, ρ и V — соответственно плотность и скорость потока аккрецируемой плазмы. На расстоянии r_A от нейтронной звезды магнитное поле останавливает поток плазмы и направляет его вдоль магнитных силовых линий на магнитные полюсы звезды. Таким образом, альевенский радиус определяет границу магнитосферы нейтронной звезды. Его величина составляет примерно 100 радиусов нейтронной звезды, то есть ~ 1000 км. Само явление рентгеновского пульсара имеет место только при очевидном условии, что оси магнитного поля звезды и ее собственного вращения не совпадают друг с другом.

ТРАНЗИЕНТНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ — РЕНТГЕНОВСКИЕ НОВЫЕ

Транзиент, или рентгеновская новая, — это рентгеновская звезда, которая внезапно вспыхивает в каком-либо участке неба, где она раньше не наблюдалась. Интенсивность излучения такой звезды возрастает с характерным временем порядка недели, а затем блеск звезды постепенно, за несколько месяцев, падает до уровня фона. Кривая блеска рентгеновского транзита удивительно напоминает кривую оптического блеска новой. Вот почему транзисты имеют второе название — рентгеновские новые. Блеск транзита в момент максимума вспышки может значительно превышать яркость самых мощных постоянных рентгеновских источников.

Общепринятое сейчас объяснение этого явления было предложено А.И. Цыганом. Рентгеновские новые — это также двойные системы, но в отличие от предыдущего случая нейтронная звезда движется по сильно вытянутой орбите с большим эксцентриситетом. Пока нейтронная звезда находится далеко от оптического компонента, скорость истечения вещества из нормальной звезды невелика и соответственно мал поток возникающего в результате аккреции рентгеновского излучения. Как только нейтронная звезда входит в периастр (то есть подходит близко к нормальной звезде), из-за уменьшения расстояния между звездами и соответствующего возрастания гравитационного воздействия нейтронной звезды на оптический компонент мощность истечения резко возрастает, увеличивается темп аккреции и соответственно резко растет рентгеновский поток. В области периастра расстояние между звездами настолько мало, что значительная доля рентгеновского потока может перехватываться оптической звездой. Это перехваченное рентгеновское излучение обеспечивает дополнительный подогрев атмосферы нормальной звезды, в результате чего ее блеск может возрасти во много раз.

ВСПЫХИВАЮЩИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ ИСТОЧНИКИ — БАРСТЕРЫ

Барстер — это неудачная транскрипция английского слова “burst”, существительного, образованного от слова “burst” — вспышка, вспыхивать, взрываться. Сейчас редакцией журнала «Письма в «Астрономический журнал»» предложено называть их вспыхивающими рентгеновскими источниками (ВРИ). Явление вспышки — это внезапное возрастание рентгеновской интенсивности за время порядка нескольких секунд (рис. 3) или даже меньше. Затем происходит понижение интенсивности с характерным временем в несколько десятков секунд (несколько минут).

Светимость барстера в максимуме сравнима со светимостью самых ярких рентгеновских источников в нашей Галактике. Общий интегральный поток во вспышках имеет типичное значение $10^{-8} - 10^{-7}$ эрг/(см² · с), что для расстояния 10 кпк дает значение светимости $L_x \approx 10^{37} - 10^{38}$ эрг/с. Таких вспышек одного источника может быть несколько,

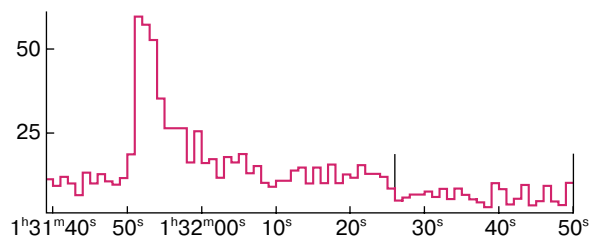


Рис. 3. Кривая блеска вспыхивающего рентгеновского источника

временной промежуток между вспышками порядка нескольких часов, а иногда и дней. Такие вспышки называются вспышками I типа. Сейчас известно более 30 таких медленных барстеров. Медленные барстеры находятся вблизи галактического экватора и концентрируются к галактическому центру, входя в группу рентгеновских источников так называемого галактического горба (балджа). Эта группа насчитывает примерно 70 источников, из которых детально исследованы далеко не все.

Рентгеновские источники балджа существенно отличаются от рассмотренных рентгеновских двойных систем, в которых оптический компонент, как правило, имеет большую массу, а рентгеновское излучение пульсирует (вращается нейтронная звезда) и характеризуется довольно жестким спектром. Кроме того, для этих источников характерны довольно глубокие рентгеновские затмения, обусловленные двойственностью этих источников. Рентгеновские источники балджа, как правило, имеют более мягкие спектры, а пульсирующая компонента рентгеновского излучения отсутствует. В течение длительного времени у этих источников не обнаруживались рентгеновские затмения. И лишь в последнее время у источника 4U1915-05 найдены слабые рентгеновские затмения с периодом $P = 2985$ с. Это позволяет думать, что источники галактического балджа также являются рентгеновскими двойными, но, по-видимому, с маломассивными оптическими компонентами.

Барстеры, как правило, имеют мягкий рентгеновский спектр ($kT \sim 3-10$ КэВ), у них отсутствуют периодические пульсации излучения. Существуют сильные аргументы в пользу того, что эти источники являются нейтронными звездами, а не белыми карликами или черными дырами. Основной аргумент состоит в том, что спектры вспышек с хорошей степенью точности оказываются планковскими. С учетом того, что примерно семь барстеров надежно отождествлены с шаровыми скоплениями, а для других барстеров имеются довольно разумные оценки их расстояний, оказывается возможным определение радиуса излучающей области. Его значение ~ 7 км, что близко к величинам радиусов нейтронных звезд. Наличие мягкого рентгеновского спектра и отсутствие периодических пульсаций могут быть связаны с тем обстоятельством, что у нейтронных звезд таких источников нет сильного магнитного поля: $B \sim 10^8-10^9 \ll 10^{12}$ Гс.

Вспышки барстеров происходят, как правило, на фоне слабо модулированного потока излучения. Интересно, что соотношение проинтегрированных за один час вспышечного и постоянного потоков составляет 8%. Это почти точно соответствует отношению ядерной энергии связи (8 МэВ) к гравитационной энергии протона, выделяемой при аккреции (~ 130 МэВ). Вот почему считается, что вспышки происходят в результате ядерного горения в оболочке нейтронной звезды вещества, накопленного

в результате аккреции. Термоядерная вспышка накопленного вещества может реально объяснить наблюдательные свойства барстеров. Наиболее подходящий материал для вспышки — гелий. Однако и горение водорода играет немаловажную роль.

ВЫРОЖДЕННЫЕ КАРЛИКИ – ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Вырожденные карлики в тесных двойных системах образуют широкий класс звезд, известный как взрывные переменные (Cataclysmic variables). Они делятся на следующие четыре группы: новые, повторные новые, карликовые новые и новоподобные. Эти группы отличаются энерговыделением, амплитудой и частотой вспышек. От многих взрывных переменных зарегистрировано рентгеновское излучение, которое возникает в результате аккреции на белый карлик вещества, перетекающего из нормального компонента двойной системы.

В последнее время среди взрывных переменных особый интерес вызывает недавно обнаруженный класс звезд типа AM Геркулеса (Her). Они выделяются большой поляризацией оптического излучения, достигающей нескольких десятков процентов. В спектрах этих звезд наблюдаются сильные эмиссионные линии, вид которых изменяется с периодом, равным орбитальному периоду двойной системы. От этих звезд зарегистрированы потоки пульсирующего рентгеновского и даже мягкого гамма-излучения. Хотя установлено, что они обусловлены главным образом очень сильным магнитным полем белых карликов, входящих в тесные двойные системы (по разным оценкам, напряженность поля составляет 10^7-10^8 Гс), детальное объяснение пока отсутствует. Во всем мире продолжается интенсивное исследование этих объектов. Интересные спектральные данные получены в наблюдениях на 6-метровом телескопе России.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

Выдающимся достижением рентгеновской астрономии явилось открытие черных дыр в двойных системах (если проявить осторожность, то следует говорить о кандидатах в черные дыры).

Характер аккреции плазмы из оптического компонента на черную дыру отличается от случая нейтронной звезды, так как у черной дыры не может быть сильного магнитного поля. Поэтому рентгеновское излучение аккрецирующей черной дыры никогда не будет пульсировать. Однако решающим аргументом, конечно, является определение массы рентгеновского компонента, например по кривой лучевых скоростей оптического компонента.

До последнего времени наилучшим кандидатом в черные дыры считался рентгеновский источник Лебедь X-1 (Cyg X-1). Именно этому источнику посвящено довольно много работ и обзоров. Cyg X-1 — мощный источник рентгеновского излучения с

довольно жестким спектром. Его излучение представляет собой нерегулярную последовательность во времени импульсов различной мощности и длительности (вплоть до миллисекунд). Его оптическим компонентом является голубой сверхгигант — звезда НДЕ 226868. Ее спектральные линии меняются вследствие эффекта Доплера с периодом $P = 5,6$ суток, что соответствует орбитальному периоду двойной системы. По кривой лучевых скоростей можно найти функцию масс, которая позволяет установить нижний предел и массу невидимого объекта как ~ 10 масс Солнца. Это и есть главный наблюдательный аргумент в пользу существования черной дыры в этой двойной системе.

В последнее время найдены и другие кандидаты в черные дыры — это рентгеновский источник в Большом Магеллановом Облаке LMC X-3 и рентгеновская новая V404 Суг. Определенные массы компактных звезд — источников рентгеновского излучения оказались намного выше трех масс Солнца — предельного значения массы нейтронной звезды. Поэтому они с большой степенью достоверности являются черными дырами.

ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источниками рентгеновского излучения являются нормальные и радиогалактики, квазары и сейфертовские галактики. Современная рентгеновская астрономия достигла такого высокого уровня углового разрешения, который позволяет выделять отдельные дискретные источники внутри ближайших к нам галактик.

Пожалуй, самым интересным событием явилось открытие мощного рентгеновского излучения квазаров и ядер активных галактик. Каталог лаборатории им. А. Эйнштейна насчитывает более 3000 дискретных рентгеновских источников. Предполагают, что это квазары, но оптически они пока неотожествлены. Рентгеновские светимости квазаров и ядер сейфертовских галактик в энергетическом интервале $0,5 \leq E_x \leq 4,5$ КэВ лежат в пределах $10^{43} \leq L_x \leq 10^{47}$ эрг/с. Существенно, что в рентгеновском диапазоне была найдена более быстрая переменность ($\tau \sim 10^4$ с), чем в оптическом диапазоне ($\tau \sim 1$ месяц). Наконец, в самое последнее время появились сообщения об обнаружении более быстрой рентгеновской переменности квазаров: $\tau \sim 100$ с! Такая быстрая переменность позволяет оценить характерные размеры области излучения как $R_x \sim 10^{13} - 10^{14}$ см. Исключительная компактность галактических ядер, а также их высокая энергетика в рентгеновском диапазоне, которая может быть объяснена только механизмом аккреции, позволяют предполагать, что галактические ядра являются сверхмассивными черными дырами. Рентгеновское излучение возникает в результате аккреции межгалактического газа и вещества звезд на сверхмассивную черную дыру.

Выдающимся достижением рентгеновской астрономии было открытие протяженных источников рентгеновского излучения в скоплениях галактик. Самые мощные из них — скопления Волосы Вероники, Персея и Девы. Характерные размеры протяженных источников составляют $0,1 - 1$ Мпк, а их светимость лежит в пределах $10^{43} - 10^{45}$ эрг/с. Детальное исследование их спектров показало, что источником излучения является горячий межгалактический газ с температурой $10^7 - 10^8$ К, захваченный скоплением как гравитационной ямой.

Центральная проблема происхождения этого газа: является ли он реликтовым, то есть остался еще от эпохи до рождения галактик, или он имеет галактическое происхождение, то есть выброшен из галактик тем или иным путем (например, с помощью “галактического ветра”)? Критическим тестом для решения этой проблемы является определение отношения Fe/H. Количество железа было определено благодаря обнаружению высокоионизированных линий железа Fe XXV и Fe XXVI. Величина этого отношения оказалась близкой к значению, характерному для нормальных галактик. Таким образом, горячий газ внутри скопления, несомненно, имеет галактическое происхождение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, современная астрономия имеет дело с мощными источниками космического рентгеновского излучения, которыми являются необычные звезды, такие, как нейтронные звезды и черные дыры, а также сверхмассивные черные дыры (ядра галактик). Как правило, эти объекты являются также источниками гамма-излучения. Вместе с тем в последние годы открыта новая необычная популяция источников космического гамма-излучения, природа которых неизвестна. Я предполагаю рассказать об этих источниках в отдельной статье.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Шкловский И.С. Звезды, их рождение, жизнь и смерть. М.: Наука, 1984.
2. Липунов В.М. Астрофизика нейтронных звезд. М.: Наука, 1986.
3. Гнедин Ю.Н. Современная астрономия: Новые направления и новые проблемы // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 8. С. 76—83.
4. Черепашук А.М. Тесные двойные звезды на поздних стадиях эволюции // Там же. С. 84—92.

* * *

Юрий Николаевич Гнедин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры “Космические исследования” Санкт-Петербургского технического университета, зам. директора Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН, член Академии наук Нью Йорка, США. Область научных интересов: астрофизика, физика плазмы. Автор более 150 научных работ.