

Итоги работы орбитальной обсерватории "Рентген"

Н.Л. АЛЕКСАНДРОВИЧ,
В.А. АРЕФЬЕВ,
Институт космических исследований РАН



В конце 60-х гг. произошла революция в астрофизике и физической космологии. Были открыты реликтовое излучение, квазары, радиопульсары, компактные рентгеновские источники - аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Теория подготовила колоссальный рынок наблюдательной астрофизики и космологии. Обсерватория "Рентген", размещенная на модуле "Квант" пилотируемого орбитального комплекса "Мир", внесла немалый вклад в исследование рентгеновских источников, обнаружив несколько новых нейтронных звезд и черных дыр. Авторы рассказывают о результатах исследований 1987-1999 гг., выполненных с помощью комплексов рентгеновских приборов обсерватории.

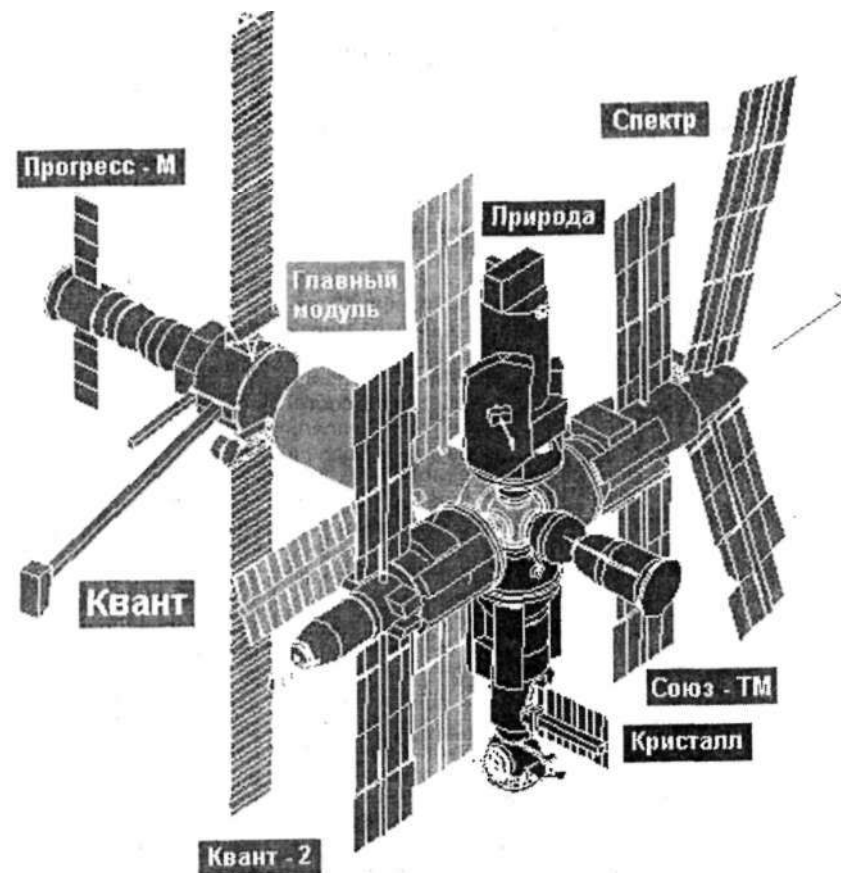
ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В начале 80-х гг. принято решение об установке на одном из модулей космической станции "Мир", подготавливаемой тогда к запуску на орбиту, рентгеновской аппаратуры из СССР, Англии, Голландии и ESA. Были разработаны и изготовлены четыре прибора, предназначен-

ные для исследования космических источников рентгеновского излучения, перекрывающих широкий диапазон энергий от 2 до 800 кэВ. Эксперименты реализованы на обсерватории "Рентген" ОК "Мир" (Земля и Вселенная, 1988, №5).

Телескоп ТТМ ("телескоп с теневой маской") - единственный прибор обсерватории, строящий

изображения участков небесной сферы. Он разработан в Лаборатории космических исследований в Утрехте (Голландия) и Бирмингемском университете (Англия). Это широкоугольная камера, использующая в качестве входной апертуры (диафрагмы) кодирующую маску для определения положения источников излучения. Прибор



Орбитальный пилотируемый комплекс "Мир". Направление наблюдений астрофизическими приборами модуля "Квант" показано стрелкой

работает в энергетическом диапазоне 2-30 кэВ и позволяет строить спектры ярких рентгеновских источников. Полное поле зрения телескопа 15° x 15°, угловое разрешение может достигать 2'.

Спектрометр ГЕКСЕ (HEXE, High Energy X-ray Experiment - "жесткий рентгеновский эксперимент") создан в Институте веземной физики им. М. Планка в Гаршинге и в Тюбингенском университете (ФРГ). Прибор состоит из четырех идентичных детекторов, собранных из сцинтилляционных кристаллов NaI/CsI (йодиды натрия и цезия) и чувствительных к рентгеновскому и гамма-излучению

в диапазоне от 15 до 200 кэВ. Поле зрения каждого детектора ограничено качающимся коллиматором, который, поворачиваясь с двухминутным интервалом, измеряет спектр источников и рентгеновский фон.

Рентгеновский спектрометр ПУЛЬСАР X-1 разработан под руководством А.С. Мелиоранского в отделе астрофизики высоких энергий Института космических исследова-

ний (ИКИ). Прибор состоит из четырех детекторов NaI/CsI, чувствительных к жесткому диапазону рентгеновского излучения и к гамма-излучению в диапазоне от 30 до 800 кэВ с полем зрения $3^\circ \times 3^\circ$. Детекторы изготавливались в Баку из кристаллов (г. Усолье-Сибирское), а электроника - в ОКБ ИКИ во Фрунзе.

Газовый сцинтилляционный пропорциональный счетчик (ГСПС) разработан Европейским космическим агентством в техническом центре ESTEC (Голландия). ГСПС работает в диапазоне 2-100 кэВ с разрешением 10,5% на 6 кэВ. Максимальное временное разрешение прибора - 1,25-2,5 мс.

Подготовкой к запуску всех приборов обсерватории занимался отдел астрофизики высоких энергий и комплексный отдел ИКИ. Отдел астрофизики высоких энергий, руководимый академиком Р.А. Сюняевым, отвечал также за программное обеспечение и обработку данных, полученных с этой обсерватории. Техническое курирование обсерватории "Рентген" осуществляет комплексный отдел ИКИ под руководством О.Ф. Прилуцкого и В.Г. Родина. Обсерватория успешно работает и благодаря поддержке НПО "Энергия" и ЦУПа во главе с руководителем полета В.А. Соловьевым и зам. руководителя полета В.Д. Благославным. Роль связующего звена между ИКИ и ЦУП на протяжении всех этих лет успеш-

но исполнял А.В. Прудкогляд. Создание программного обеспечения в ИКИ - колоссальная заслуга математиков отдела П.Е. Эльясберга в ИКИ и, в первую очередь, Е.А. Гавриловой.

УСЛОВИЯ РАБОТЫ ОБСЕРВАТОРИИ

Модуль "Квант-1" запущен на орбиту **31 марта 1987 г.** и состыкован со станцией "Мир" 9 апреля 1987 г., работает в составе комплекса с 12 апреля 1987 г. (Земля и Вселенная, 1987, № 4).

Комплексом научной аппаратуры обсерватории управляет ЦУП, а работу научных приборов определяет режим функционирования ОК "Мир" (высота круговой орбиты около 400 км и период обращения 92 мин). Другая особенность - жесткое соединение модуля "Квант" с остальными блоками комплекса "Мир". Поэтому наводят научные приборы на источники космического излучения, поворачивая всю станцию. При этом ОК "Мир" должен сохранять постоянную ориентацию на Солнце, иначе снизится выработка электроэнергии солнечными батареями.

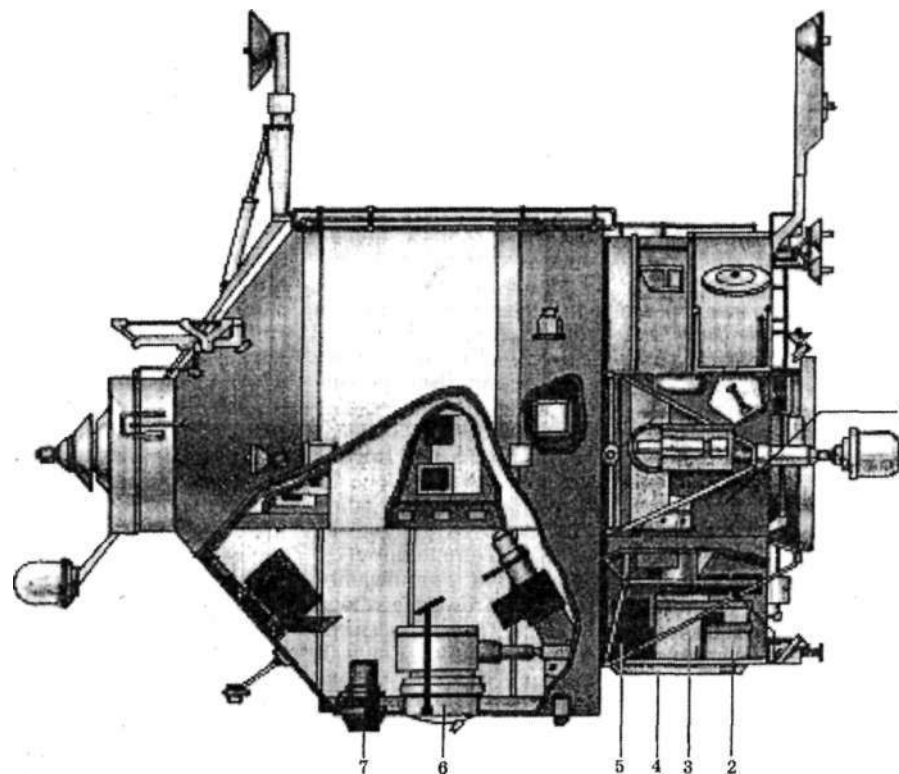
По мере пополнения станции новыми модулями условия работы "Кванта" усложнялись. Теперь в каждый момент времени наблюдениям доступна только полоса небесной сферы шириной 20° вдоль плоскости орбиты станции - такое ограничение накладывает ориен-

тация солнечных батарей. Но поскольку плоскость орбиты прецессирует с периодом 2,5 месяца, для приборов обсерватории остаются недоступными на небесной сфере только области вокруг Северного и Южного полюсов мира.

Поскольку все четыре прибора жестко связаны между собой, то эффективность спектрометров ГЕКСЕ, ПУЛЬСАР X-1 и ГСПС можно вычислить по расположению источника в поле зрения телескопа ТТМ. Математическое обеспечение для построения изображения и спектров этого прибора подготовили М.Р. Гильфанов и Е.М. Чуразов (ИКИ). После запуска обсерватории "Гранат" (Земля и Вселенная, 1989, № 3; 1994, № 2; 1998, № 6) в декабре 1989 г. эстафету успешной работы с прибором ТТМ приняли К.Н. Бороздин и его группа. Совместные усилия обсерваторий "Гранат" и "Квант" существенно повысили эффективность астрофизических исследований. Научные задачи обеих миссий определял отдел астрофизики высоких энергий ИКИ.

НАБЛЮДЕНИЯ СВЕРХНОВОЙ 1987А

Запуск модуля "Квант", к счастью для астрономов, почти совпал с редчайшим событием: незадолго до запуска, 23 февраля 1987 г., произошла вспышка **Сверхновой 1987А** в ближайшей галактике - Большом Магел-



Размещение астрофизических приборов на модуле "Квант": 1 - отсек научных приборов; 2 - оптический датчик телескопа ТТМ; 3 - рентгеновский телескоп ТТМ; 4 - рентгеновский спектрометр ГЕКСЕ; 5 - рентгеновский спектрометр "Пульсар X-1"; 6 - оптический датчик модуля; 7 - система астроориентации

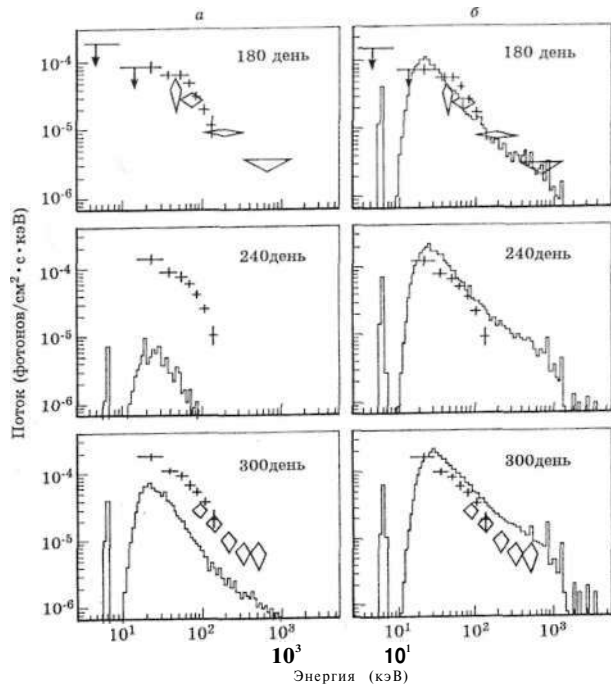
лановом Облаке. Стало ясно, что "Квант" может получить уникальные данные о природе этой Сверхновой, ярчайшей за последние 400 лет.

Готовясь к наблюдениям, теоретики отдела сделали расчеты ожидаемого потока рентгеновских лучей от Сверхновой. Они ожидали мощнейших ударных волн, ускорения космических лу-

чей, теплового и нетеплового рентгеновского излучения, бурных проявлений молодого быстровращающегося пульсара или черной дыры, аккрецирующей остатки сброшенной оболочки. Между тем природа излучения оказалась другой. Доктор физико-математических наук С.А. Гребенев (в то время аспирант) провел вычисления и построил

приближенную теорию спектра излучения, выходящего из оболочки. Первичным источником, предположил он, являются **гамма-лучи**, рождающиеся при распаде радиоактивного никеля-56, синтезированного перед гибелью звезды и превращающегося в радиоактивный кобальт, а затем в железо. Расчеты показали, что рассеяние жест-

Сравнение экспериментальных данных о потоке жестких рентгеновских лучей от SN1987A и теоретических моделей: а - поток рентгеновского излучения, предсказанный на 180-е, 240-е и 300-е сут (модель, в которой кобальт сосредоточен на внутренней границе расширяющейся оболочки сверхновой); б - модель с перемешиванием кобальта во внутренней области оболочки, содержащей массу 8 M_{\odot} . На верхних графиках приведены результаты измерений, полученные приборами ТТМ, ГЕКСЕ и Пульсар X-1. На средних - данные ГЕКСЕ (ноябрь 1987 г.), на нижних - данные ГЕКСЕ (январь 1988 г.) и Пульсара X-1 (декабрь 1987 г. и январь 1988 г.). Теоретические модели, приведенные на графиках а, противостоят экспериментальным данным



ких фотонов на холодных электронах разлетающейся оболочки Сверхновой и фотопоглощение на атомах тяжелых элементов не позволяют жесткому излучению выходить из оболочки в течение первых месяцев после взрыва. Поток излучения на наблюдаемом уровне может появиться лишь через полгода после взрыва. Теоретики отдела опирались на численную гидродинамическую модель взрыва, созданную группой доктора физико-математических наук В.С. Имшенника в Институте теоретической и экспериментальной физики РАН.

В середине июня 1988 г. начались практически ежедневные наблюдения Сверхновой. Руководство НПО "Энергия", в первую очередь доктор технических наук Ю.П. Семенов

(ныне академик) осознавали важность наших наблюдений и всемерно помогали нам. Обработку и анализ данных ТТМ вели молодые теоретики М.Р. Гильфанов и Е.М. Чуратов (ныне - доктора физико-математических наук). Данные приборов ГЕКСЕ и ПУЛЬСАР X-1 обработали В.В. Ефремов и А.С. Каниовский. Телескоп ТТМ, работавший в более мягком диапазоне энергий, ничего не зарегистрировал. Такой характер излучения от Сверхновой может возникнуть лишь при распаде радиоактивных изотопов. Ни ударные волны, ни обратное комптоновское излучение релятивистских электронов не могли соз-

дать столь жесткий спектр излучения.

Рентгеновское излучение, регистрируемое ГЕКСЕ, нарастало. Через несколько дней оно было зафиксировано прибором ПУЛЬСАР X-1 в еще более жестких лучах (выше 50 кэВ). Японские ученые зарегистрировали чрезвычайно слабый сигнал в последних, самых жестких каналах пропорциональных счетчиков японской обсерватории "GINGA". По данным "Кванта" построены кривые блеска Сверхновой в жестких рентгеновских лучах, найдены верхние пределы отношения долговременного изотопа кобальт-57 к кобальту-56. Оставалась надежда за-

фиксировать излучение центрального пульсара или черной дыры, возникших после коллапса ядра звезды. Но и по сей день (через 13 лет после взрыва!) ничего не наблюдается на ожидавшемся уровне. **Оболочка Сверхновой** представляет сегодня **облако холодного молекулярного газа**, медленно расширяющегося перед столкновением с плотным звездным ветром красного сверхгиганта, существовавшего на стадии, предшествовавшей взорвавшемуся голубому сверхгиганту.

Сверхновая 1987А - первая, от которой зафиксировано рентгеновское излучение. Природа излучения связана с процессом синтеза 0,07 M_{\odot} радиоактивного никеля в процессе гибели звезды и его последующим распадом. Это открытие "Кванта" вошло в историю рентгеновской астрономии.

РЕНТГЕНОВСКИЕ НОВЫЕ

После наблюдений Сверхновой 1987А начался этап активных наблюдений рентгеновских новых. Такие объекты неожиданно появляются на небе, за несколько дней становятся ярчайшими источниками в рентгеновских лучах, затем медленно, в течение 25-40 сут, уменьшают блеск и исчезают с небосвода, чтобы вернуться через 30-50 лет. Широкий энергетический диапазон чувствительности, большое поле зрения и способ-

ность строить изображения в рентгеновских лучах позволили обсерватории "Рентген" обнаружить немало рентгеновских источников. Оказалось, что черные дыры легче всего искать по их проявлениям в жестких рентгеновских лучах. "Гранат" и "Квант" нашли 7 рентгеновских новых и приняли активное участие в исследовании еще нескольких источников, открытых другими спутниками. Построены кривые блеска наблюдавшихся вспышек, и, главное, обнаружены переходы из мягкого спектрального состояния в жесткое, подобные наблюдавшимся у Лебеда X-1.

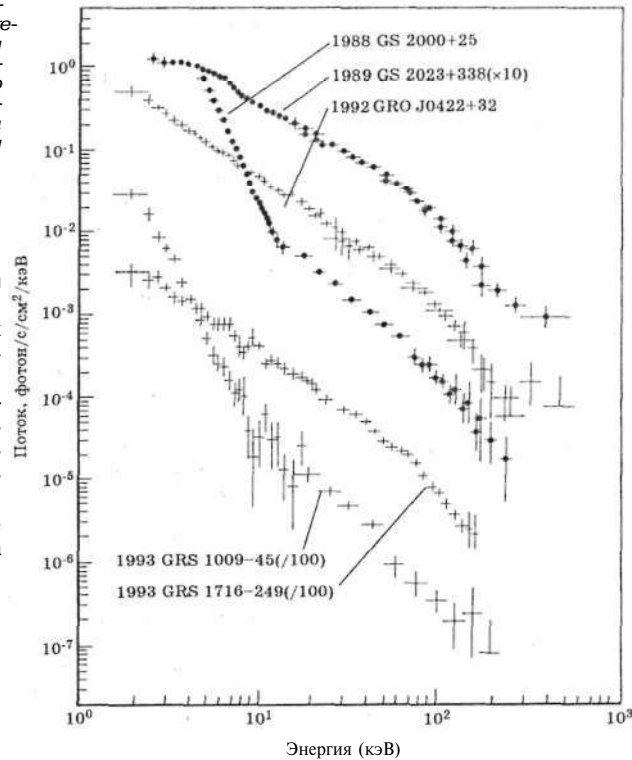
Предполагается, что большинство рентгеновских новых - двойные системы с черной дырой и обычной звездой малой массы. Многие имеют мощную мягкую рентгеновскую компоненту в спектре с характерной энергией около 1 кэВ. Предположив, что излучение соответствует чернотельному спектру, мы выделили эти объекты в подкласс мягких рентгеновских новых. До вспышки GS 2023+338 (а впоследствии также GRO J0422+32 и GRS 1716-249) наличие яркой мягкой компоненты считалось признаком, характерным для всех рентгеновских новых. После наблюдений стало ясно, что существуют и рентгеновские новые с аномально жестким спектром без мягкой компоненты, подобные спектру источника Лебедь X-1 в его обыч-

ном жестком состоянии. В обозначении рентгеновских источников первые буквы - сокращенное обозначение обсерватории, на которой они впервые обнаружены. Например, GRO - обсерватория им. Комптона, GRS - "Гранат", 4U - рентгеновский спутник "Ухуру" (четвертый каталог), KS - "Квант". Последние цифры - экваториальные координаты, число цифр зависит от выявленной точности координат.

Исследования рентгеновских новых начались в 1988 г. с источника в созвездии Лисички, для которого И.Ю. Лапшов, С.А. Гребенев и А.С. Каниовский получили качественный широкополосный спектр от 2 до 200 кэВ. В 1989 г. последовали детальные исследования самого достоверного кандидата в черные дыры - источника GS2023 + 338 в созвездии Лебеда. Следует упомянуть рентгеновские новые в Персее GRO J0422 + 32 (в 1992 г.), две вспышки в 1993 г. в Парусах (GRS 1009-45), Змееносце (GRS 1716-249) и в 1994 г. в Скорпионе - KS 1730-312. Во время наблюдений приборы ТТМ и СИГМА ("Гранат") зафиксировали переход KS 1730-312 из жесткого спектрального состояния в мягкое. Исследования, проведенные обсерваториями "Квант" и "Гранат", позволили заключить, что KS 1730-312 - также кандидат в черные дыры.

В марте 1996 г. приборами "Граната" и "Кванта" обнаружена рентгенов-

График широкополосных рентгеновских спектров пяти рентгеновских новых, наблюдавшихся "Квантом". Для наглядности некоторые спектры сдвинуты по вертикальной оси. Видно отличие формы спектров подкласса мягких новых (GS 2000 + 25 и GRS 1009-45) от жестких



екая новая в созвездии Змееносца GRS 1739-278. Ни одна из иностранных космических обсерваторий, запущенных в 90-х гг. и обладающих более высокой чувствительностью, не смогла по различным причинам зарегистрировать этот источник. Только в апреле 1996 г. прибор BATSE (на американской обсерватории "GRO") сумел выделить рентгеновское излучение от GRS 1739-278 на фоне яркого барстера-пульсара GRO J1744-28, используя данные ТТМ.

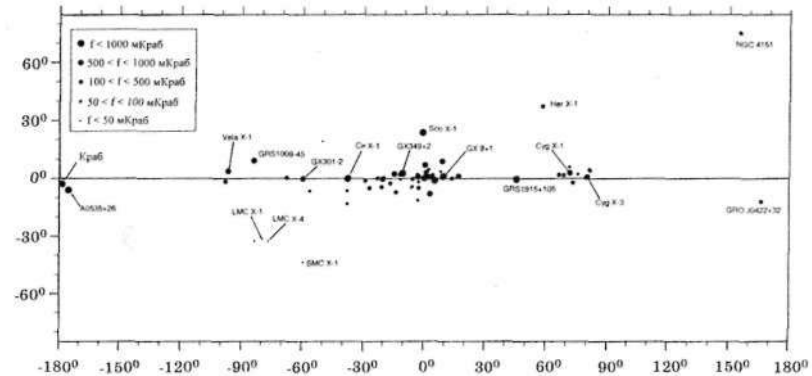
Рентгеновские новые появляются на небе достаточно регулярно, их изучение приборами обсерватории "Рентген" продолжается. Летом 1998 г. проведена серия наблюдений источника ХТЕ J2012+381, а весной 1999 г. - ХТЕ J1550-564.

КАНДИДАТЫ В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Рентгеновские новые считаются одним из подклассов рентгеновских источников - кандидатов в черные дыры. Массивные звезды, заканчивая свою эволюцию, могут сколлапсировать и превратиться в черную дыру. В 60-х гг. астрофизики до-

казали: если черная дыра входит в **двойную систему**, притяжение этого массивного объекта способно вызвать перетекание вещества со звезды-компаньона и образование аккреционного диска. Горячая плазма аккреционного диска излучает в рентгеновском диапазоне. Нагревается плазма из-за динамической вязкости (трение между отдельными слоями диска, находящимися на разных расстояниях от центрального тела и потому имеющих разную скорость обращения). Теория дисковой аккреции была построена доктором физи-

ко-математических наук Н.А. Шакурой и академиком Р.А. Сюняевым в группе академика Я.Б. Зельдовича в 1972-73 гг. Наиболее надежный аргумент принадлежности источника к черным дырам - изменение массы компактного объекта. Это возможно, только если источник отождествлен в оптическом диапазоне. Расчеты показывают, что 3 M_☉ можно принять как жесткий верхний предел для массы нейтронной звезды. Характерной чертой кандидатов в черные дыры является **бимодальное поведение**, т.е. переход из мягкого состояния



Карта 67 рентгеновских источников, наблюдавшихся телескопом ТТМ обсерватории "Рентген" в 1987-1998 гг. По осям - галактические координаты. Размеры кружков соответствуют максимальной за время наблюдений яркости источников

в жесткое излучение и обратно. Классическим объектом такого рода считается известный квазистационарный источник рентгеновского излучения Лебедь X-1 (Суд X-1). Суд X-1 - двойная система с орбитальным периодом 5,6 сут, состоящая из голубого сверхгиганта и компактного объекта. Большое значение массы

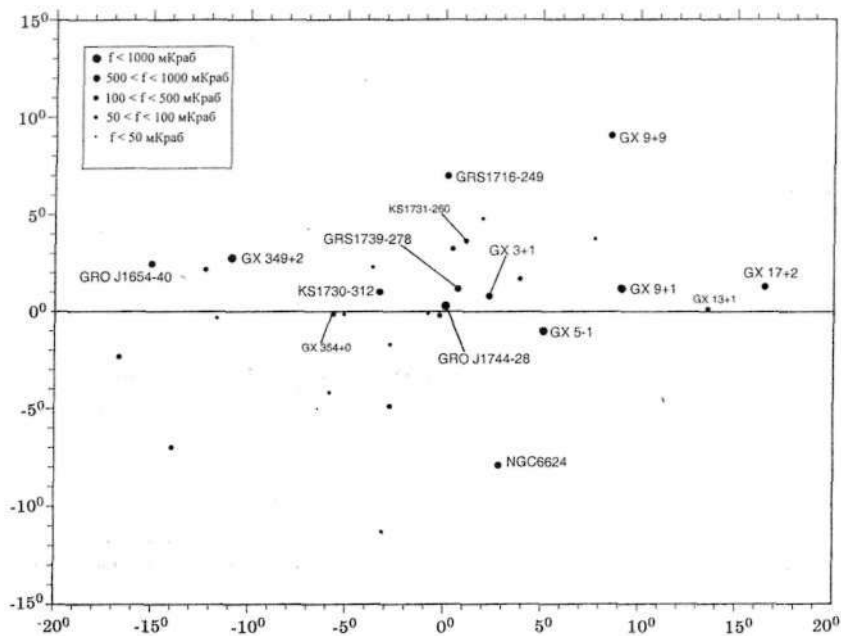
последнего (M > 9,5 M_☉) делает его одним из наиболее надежных кандидатов в черные дыры. В стандартном рентгеновском диапазоне (до 20 кэВ) источник наблюдался в двух состояниях: "высоком", в котором он обладает сильной мягкой и слабой жесткой компонентами, и "низком", с противоположным соотношением компонент. В "низком" состоянии Лебедь X-1 проводит около 90% времени.

ПАТРУЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО НЕБА

Обсерватория "Рентген" регулярно наблюда-

ет в рентгеновском диапазоне "густонаселенные" области неба, и в первую очередь - центр Галактики. Такой выбор не случаен: именно здесь наибольшее количество рентгеновских источников. Большое поле зрения и достаточно высокое пространственное разрешение телескопа ТТМ делают наблюдения особенно эффективными. Изучение источников различных типов ведутся одними и теми же приборами на протяжении многих лет, что позволяет одновременно решать задачи самых разных направлений.

В окрестностях центра Галактики также часто



вспыхивают новые источники. Здесь расположены открытые разными космическими обсерваториями объекты: галактический микроквазар GRO Л 655-40, барстер-пульсар GRO J1744-28 и уже упоминавшиеся рентгеновские новые GRS 1716-249, KS 1730-312 и GRS 1739-278. Самым телескопом ТТМ было открыто 11 новых источников.

БАРСТЕРЫ

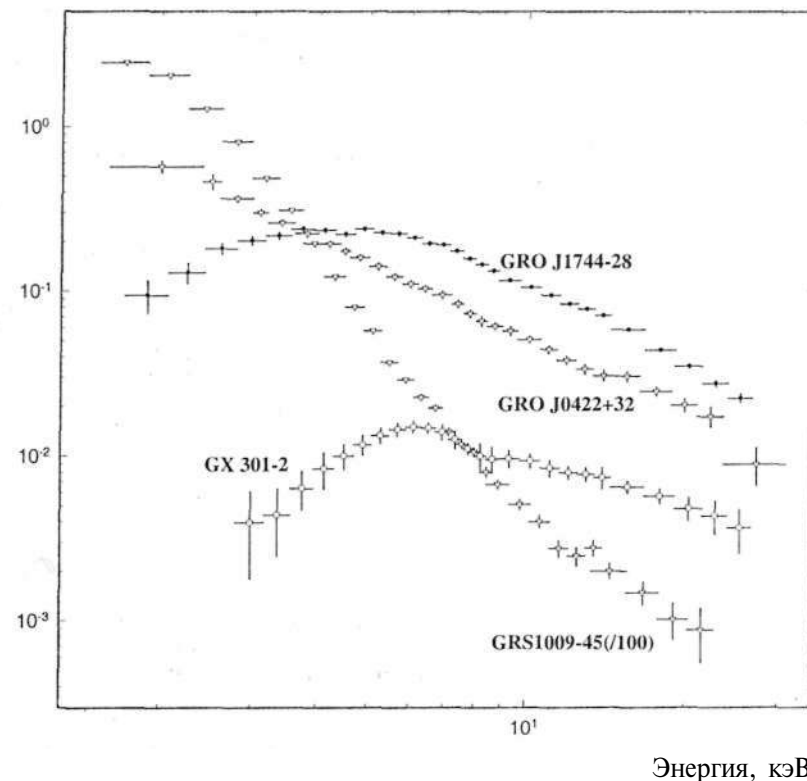
Вблизи центра Галактики в 1990 г. доктора физико-математических наук М. Гильфанов и Е. Чуразов обнаружили барстер KS 1731-260. **Барстеры** - это вспыхивающие рентгеновские источники с пе-

риодом повторения вспышек от нескольких часов до нескольких дней и продолжительностью около 10 с. Интервал между вспышками колеблется от 30 до 50% от среднего значения в стабильном состоянии и меняется в зависимости от общей светимости источника. Как правило, при увеличении средней светимости уменьшается время между вспышками, а при достижении некоторой критической светимости (~10³⁷ эрг/с) они вообще исчезают. Спектр излучения во время вспышки близок к спектру излучения абсолютно черного тела с температурой несколько кэВ. В спокойном состоянии барстеры

Карта рентгеновских источников в районе центра Галактики, наблюдавшихся телескопом ТТМ обсерватории "Рентген" в 1987-1998гг. По осям - галактические координаты. Размеры кружков соответствуют максимальной за время наблюдений яркости источников

представляют собой рентгеновские источники с медленно меняющимся потоком излучения и средней светимостью 10³⁶-10³⁷ эрг/с. Все известные барстеры принадлежат к двойным системам малой массы. Большинство их располагается в пределах 30° воле круг направления на Галактический центр, что свидетельствует о при-

Поток, фот/с/см²/кэВ



Сравнение спектров четырех источников разных типов по данным телескопа ТТМ обсерватории "Рентген": барстера-пульсара GRO J1744-28, рентгеновского пульсара GX301-2, жесткой рентгеновской новой 1992 г. GRO J0422 + 32 и мягкой новой 1993 г. GRS 1009-45. Спектр GRS 1009-45 сдвинут по вертикальной оси для наглядности

надлежности барстеров к **сферической подсистеме Галактики**. По современным представлениям, барстер - двойная система с нейтронной звездой, на ее поверхность выпадает обогащенное гелием вещество звезды-ком-

паньона. В ходе аккреции оно в течение нескольких часов накапливается на поверхности звезды в виде слоя толщиной около 10 м с поверхностной плотностью порядка 10⁹ г/см², разогреваясь за счет аккреции и ядерного

горения водорода. При достижении критической температуры около 3 x 10⁸ К начинает "гореть" гелий. Накопленная масса (около 10²¹ г) сгорает за несколько секунд, что и вызывает кратковременную вспышку в

рентгеновском диапазоне. Между вспышками поток от барстеров относительно постоянен. Подобную же природу (термоядерный взрыв, но не гелия, а водорода) имеют вспышки оптических новых звезд.

Недавно с американского спутника "RXTE" (Rossi X-Ray Timing Explorer - "Исследователь временного поведения рентгеновского излучения им. Росси") у барстера KS 1731-260 обнаружены периодические пульсации во время прохождения ядерного пламени по поверхности звезды. Пламя "обегают" нейтронную звезду за 8 с. Фронт пламени создает яркую зону на поверхности звезды, и детекторы "RXTE" принимали пульсирующий сигнал переменной амплитуды (частота вращения нейтронной звезды - 524 Гц).

РЕНТГЕНОВСКИЕ ПУЛЬСАРЫ

Интересен и другой класс источников - рентгеновские пульсары - двойные системы, в которые входит обычная звезда и быстровращающаяся нейтронная звезда с сильным магнитным полем. Рентгеновское излучение появляется за счет аккреции в области магнитных полюсов вещества, истекающего с обычной звезды, а наблюдаемые пульсации - следствие быстрого вращения нейтронной звезды. Если ее магнитная ось не совпадает с осью вращения, горячее пятно (магнитный

полюс) периодически скрывается от наблюдателя. Периоды следования импульсов соответствуют периодам вращения нейтронной звезды и лежат в пределах от 2,5 мс (SAX J1808.4-3658) до нескольких сотен секунд (835 с у пульсара 4U 0535+30). Падающее на поверхность вещество передает нейтронной звезде часть своего вращательного момента, из-за чего у каждого пульсара этот период медленно изменяется в зависимости от условий аккреции, а у некоторых пульсаров ускорение вращения чередуется с замедлением.

В декабре 1995 г. вспыхнул уникальный источник GRO J1744-28. Он сочетает свойства транзиента (источник, излучение от которого большую часть времени - десятки лет - не наблюдается), пульсара и барстера. За время наблюдения источника обсерваторией "Рентген" рентгеновский поток от него (2-30 кэВ) упал с 900 МКраб (~15 кэВ/с/см², для диапазона 2-30 кэВ) в первых сеансах (6-7 февраля 1996 г.) до 400 МКраб в последних (конец марта 1996 г. и февраль 1997 г.). Блеск источника имеет два ярко выраженных максимума с интервалом около года. Подобные кривые блеска, характерные для галактических микроквazarов, наблюдались и у двойных систем малой массы с нейтронными звездами, например у 4U 1608-522. Во время коротких вспышек пульсара

(порядка 10 с), поток от источника увеличивается в несколько раз. Пульсар входит в двойную систему малой массы и представляет собой нейтронную звезду в отличие от многих транзиентов - рентгеновских новых, являющихся общепринятыми кандидатами в черные дыры. Форма его спектра характерна для рентгеновских пульсаров. По данным обсерваторий "ASCA" (Япония) и "RXTE", подтвержденным наблюдениями ТТМ и ГЕКСЕ, спектры источника в максимуме и минимуме вспышки отличаются незначительно. Расстояние до источника близко к 8 кпк. Светимость в максимуме блеска - $1,8 \times 10^{40}$ эрг/с, что примерно в 100 раз превышает эддингтоновский предел светимости (максимально возможная светимость стационарной звезды) для звезды массой $1 M_{\odot}$.

Интенсивность стандартного спектра пульсаров резко понижается на энергиях выше 5-30 кэВ. В результате этого излучение выше 80 кэВ обнаруживается лишь у пары наиболее ярких объектов. Так, в конце мая 1994 г. приборы ТТМ и ГЕКСЕ зафиксировали необычайно жесткий спектр излучения рентгеновского пульсара 4U 0115+63 во время вспышки. Недавно открыт пульсар SAX J1808.4-3658 (ХТЕ J1808-369), у которого также наблюдается необычайно жесткий спектр. Механизм его формирования пока не изучен.

В спектре рентгеновского пульсара Геркулес Х-1 хорошо видна **гиролиния** - спектральная линия, связанная с циклотронным излучением или поглощением электронов. По ней можно экспериментально определить магнитное поле нейтронной звезды. Гиролиния с энергией 41 кэВ в спектре Геркулеса Х-1 соответствует напряженности магнитного поля на поверхности 4×10^{12} Гс.

Пульсар в Крабовидной туманности - остаток вспышки Сверхновой 1054 - нейтронная звезда с сильным магнитным полем и периодом вращения 33 мс. В отличие от обычных рентгеновских пульсаров мы видим этот источник благодаря синхротронному излучению - свечению разгоняемых нейтронной звездой релятивистских электронов в магнитном поле. Данный пульсар не входит в двойную систему. Эффекты, связанные с орбитальным движением, отсутствуют, поэтому форма его спектра и поток от него практически неизменны, в то время как характерной чертой подавляющего большинства остальных рентгеновских источников является их переменность. Пульсар в Крабовидной туманности служит естественным калибровочным источником для астрофизических приборов, работающих в космосе.

ГАЛАКТИЧЕСКИЕ МИКРОКВАЗАРЫ

В 1992 г. "Гранат" открыл GRS 1915+105 -

первый в Галактике источник со **"сверхсветовым" разлетом радиокомпонент**. В сентябре 1994 г. начались исследования приборами модуля "Квант" двух самых ярких галактических источников со "сверхсветовым" разлетом рентгеновских струй: GRS 1915+105 и GRO J1655-40. Оба зарегистрированы как **рентгеновские новые**.

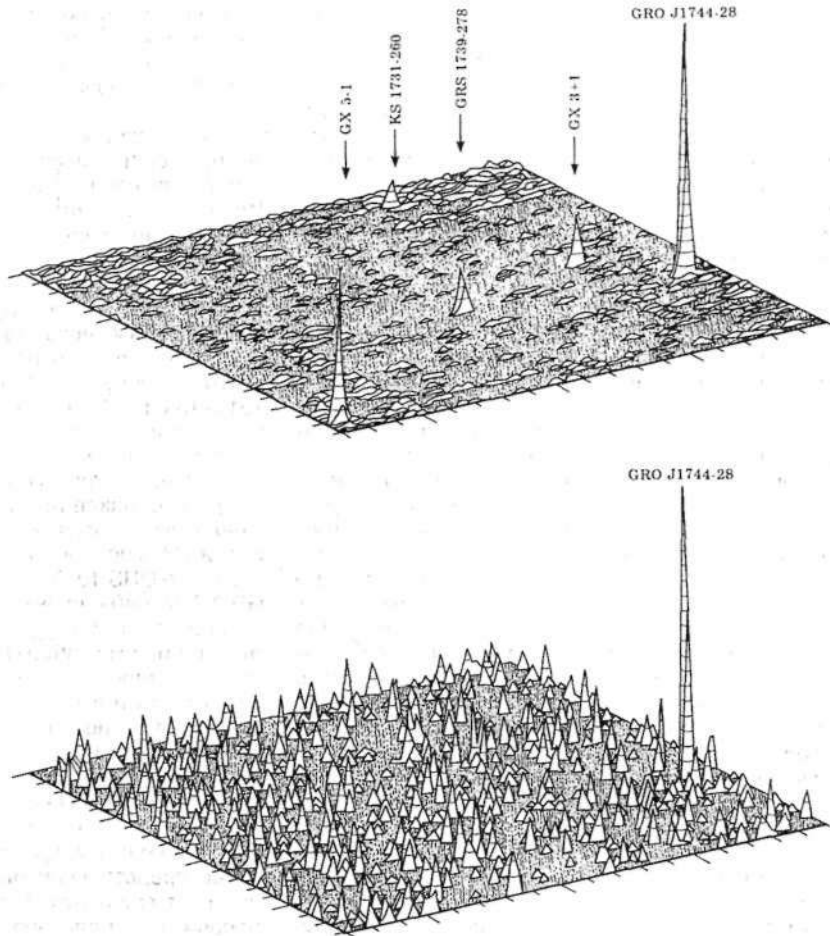
В жестком рентгеновском диапазоне зафиксировано несколько вспышек от них, во время которых эти источники становились ярчайшими на всем небе. Характерная продолжительность вспышки - недели, интервал между вспышками - месяцы. Периоды переходов между "высоким" и "низким" состоянием рентгеновского излучения совпадают с образованием двухкомпонентных радиоисточников. Видимая скорость их движения, перпендикулярная лучу зрения, превышает даже скорость света. Специальная теория относительно объясняет такой эффект для объектов, имеющих скорости немного меньше световой и направленные под малыми углами к лучу зрения (Земля и Вселенная, 1994, №6).

Подобное явление обнаружено при наблюдении **квazarов и активных ядер галактик**. GRS 1915+105 и GRO J1655-40 оказались первыми источниками со "сверхсветовым" разлетом радиокомпонент в Галактике. Источник энергии для таких объектов - аккреция, связанная с перетекани-

ем вещества с нормальной звезды на релятивистскую в тесной двойной системе. В квазарах и радиогалактиках ответственной за излучение является сверхмассивная черная дыра с массой $10^7-10^8 M_{\odot}$. Напомним, что черные дыры сами почти не излучают, но своим мощным гравитационным полем провоцируют излучение вещества, находящегося в окрестностях. Сходство GRS 1915+105 и GRO J1655-40 с квазарами определяется тем, что в обоих классах объектов происходят выбросы облаков плазмы с релятивистскими скоростями. Можно предположить, что GRS 1915+105 и GRO J1655-40 - промежуточное звено между релятивистскими объектами звездной массы и сверхмассивными черными дырами, поэтому их иногда называют **микроквazарами**. Эти объекты предоставляют уникальную возможность лучше понять процессы, идущие в непосредственной близости от сверхмассивных черных дыр в квазарах и ядрах активных радиогалактик. В октябре 1995 г. прибор ТТМ впервые зарегистрировал источник GRS 1915+105 в низком жестком спектральном состоянии, что подтверждает интерпретацию этого объекта как галактического кандидата в черные дыры.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К числу наиболее значимых результатов рабо-



Изображение области центра Галактики (9 x 6'), полученное телескопом ТТМ 28 февраля - 5 марта 1996 г. Высота пиков рентгеновских источников пропорциональна интенсивности излучения. На верхнем рисунке - сумма 8 сеансов измерений. На нижнем - изображения той же самой области во время вспышек (сумма по четырем восьмисекундным интервалам), вырезанные из разных сеансов 1996 г. Несмотря на малое время наблюдения, барстер-пульсар GRO J1744-28 выделяется отчетливо, в отличие от остальных источников этой области на верхнем рисунке

ральные и временные исследования нескольких источников этого класса, недоступные для приборов с более коротким сроком жизни;

- построение **широкополосных спектров** различных типов рентгеновских источников в диапазоне энергий 2-500 кэВ; регистрация двух основных типов спектров от галактических кандидатов в черные дыры, среди них: Суд X-1, GRO J1654-40, GRS 1009-45, GX 339-4, KS 1730-312;

- обнаружение яркой мягкой компоненты и спектроскопия в стандартном рентгеновском диапазоне галактических источников со "сверхсветовым" разлетом радиокомпонент;

- получение рентгеновских изображений, картографирование и всестороннее исследование области центра Галактики;

- изменение периодов вращения 9 рентгеновских пульсаров;

- открытие **11 рентгеновских источников** в Галактике, определены их координаты. В числе новых источников: барстер KS 1731-260, рентгеновская новая KS 1730-312, транзиенты KS J1748-248 и KS J1716-389 (1995 г.).

В течение 13 лет обсерватория "Рентген" провела более 3000 сеансов наблюдений, получив научные результаты мирового уровня. Данные модуля "Квант" использованы в сотнях статей в российских и иностранных астрофизических журналах, в циркулярах Международного Астрономического Союза, кандидатских и докторских диссертациях. Это, несомненно, подтверждает их актуальность и высокую надежность. В настоящее время приборы модуля работоспособны, а сам он стал мировым рекордсменом по продолжительности активной работы на орбите.

В ноябре 1998 г. закончил функционировать в космосе самый долгоживущий зарубежный проект - рентгеновский спутник "ROSAT" (ФРГ). Он запущен 1 июня 1990 г., причем последние 4 года в работоспособном состоянии оставался только один детектор. Летом 1999 г. прекратила существование российская обсерватория "Гранат". "Рентген" продолжает работать и после запуска в 1999 г. астрофизических обсерваторий нового поколения - "Chandra" (AXAF) и "XMM-Newton"

(Земля и Вселенная 2000, № 4). Среди программ в области астрофизики высоких энергий, готовящихся к реализации в ближайшем будущем, прежде всего необходимо отметить наш проект **"Спектр-Рентген-Гамма"** (Земля и Вселенная 1997, № 2). Новые миссии значительно превосходят комплекс приборов модуля "Квант" по чувствительности, угловому и спектральному разрешению, но значительно уступают по величине поля зрения и ширине рабочего энергетического диапазона при общем акценте на мягкую рентгеновскую область спектра. Предыдущее поколение специализированных обсерваторий (в том числе "Рентген" и "Гранат") позволило накопить много данных обо всех основных типах рентгеновских источников. Благодаря этому сейчас наступило время специализированных спутников, создаваемых для решения более узких задач, в частности - **спектроскопии с высоким разрешением** и построения качественных изображений слабых источников в мягком рентгеновском диапазоне.

ты обсерватории "Рентген" можно отнести:
- детальное и длительное изучение

SN1987A в широком спектральном диапазоне;
- открытие **жесткой компоненты** в спектрах

рентгеновских новых - общепризнанных ныне кандидатов в черные дыры; уникальные спект-