

Рентгеновские маяки Вселенной



Астрофизика высоких энергий

М.Н.Павлинский, А.А.Вихлинин, М.Г.Ревнивцев, В.А.Арефьев

Хорошо известно, что атмосфера Земли прозрачна для электромагнитного излучения в радио- и оптическом диапазонах, а для излучения других длин волн — нет; это в принципе и сделало возможной жизнь на Земле. Со времен древних цивилизаций Египта, Греции и Китая и до недавних дней человек изучал звездное небо исключительно глазами, правда, с некоторых пор вооруженными оптическими приборами. С середины XX в. стала бурно развиваться радиоастрономия, а с появлением ракет и спутников начался бум гамма-, рентгеновской, ультрафиолетовой, инфракрасной и микроволновой (охватывающей миллиметровый и субмиллиметровый интервалы длин волн) астрономии.

Сегодня мировое научное сообщество вкладывает гигантские средства во все новые и новые проекты по исследованию Вселенной. Только за последние пять лет на орбиту была выведена целая флотилия крупных астрофизических спутников, таких как «Chandra» (НАСА, 1999) и «ХММ-Newton» (ЕКА, 1999), предназначенные для изучения неба в рентгеновском диапазоне длин волн с беспрецедентными чувствительностью, спектральным и угловым разрешением; обсерватория гамма-лучей «Интеграл» (ЕКА, Роскосмос, 2002); рентгеновская и гамма-миссия для изучения гамма-



Михаил Николаевич Павлинский, доктор физико-математических наук, зам. директора ИКИ РАН по научной работе. Область научных интересов — рентгеновская астрономия, научное космическое приборостроение. Принимал активное участие в проекте «Гранат», сейчас — один из руководителей подготовки новой астрофизической миссии «Спектр—Рентген—Гамма».



Алексей Александрович Вихлинин, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела астрофизики высоких энергий того же института. Лауреат Государственной премии РФ для молодых ученых (2003). Специалист в области наблюдательной космологии.



Михаил Геннадьевич Ревнивцев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же отдела. Научные интересы связаны с исследованием аккреции на релятивистские объекты.



Вадим Александрович Арефьев, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же отдела. Занимается экспериментальным изучением рентгеновских двойных звезд.

© Павлинский М.Н., Вихлинин А.А., Ревнивцев М.Г., Арефьев В.А., 2005

всплесков «Swift» (НАСА, 2004). В этом году к ним присоединился японский спутник «Astro-E2» с зеркальным рентгеновским телескопом, в фокальной плоскости которого установлен первый рентгеновский болометр (он обеспечит рекордное энергетическое разрешение $\Delta E/E \approx 0.001$); в 2007 г. США планируют запустить спутник «Glast» для наблюдений астрофизических объектов в жестких гамма-лучах.

У колыбели энергичных фотонов

Под астрофизикой высоких энергий обычно подразумевают рентгеновскую и гамма-астрономию. Самые различные физические процессы, происходящие в космосе, сопровождаются генерацией большого числа высокоэнергичных фотонов. Рентгеновское и гамма-излучение с энергиями от долей кэВ (1 кэВ соответствует $\lambda \approx 1.2$ нм) до десятков МэВ может генерироваться в ходе процессов трех основных типов — тепловых, т.е. веществом, разогретым до $\sim 10^7$ — 10^{10} К (для сравнения: температура фотосферы самых горячих звезд на несколько порядков ниже), нетепловых (например, при движении релятивистских электронов в сильном магнитном поле возникает синхротронное излучение) и ядерных.

Если генерация рентгеновского и гамма-излучений в двух последних случаях может быть детально изучена на Земле, то разогреть вещество до миллиардов градусов и сохранить его при этой температуре в течение длительного времени в лабораторных условиях невозможно. Только космические объекты — природные лаборатории, в которых реализуются такие экстремальные условия, — позволяют проводить подобные исследования. В порядке увеличения размеров это черные дыры, нейтронные звезды и белые кар-

лики в составе тесных двойных систем в нашей Галактике, активные ядра галактик (сверхмассивные черные дыры) и горячий газ в галактиках и скоплениях галактик.

Интереснейшие объекты — черные дыры и нейтронные звезды. Они образуются в конце длительной эволюции массивных звезд в результате гравитационного коллапса центральной части звезды — взрыва сверхновой. Если масса сколлапсировавшего остатка меньше, чем $\sim 3 M_{\odot}$, то возникает нейтронная звезда — необычайно плотный (с плотностью $\sim 10^{14}$ г/см³, что сравнимо с плотностью в атомных ядрах), компактный (радиусом ~ 10 км) и быстровращающийся объект с сильным магнитным полем, состоящий в основном из нейтронов. Если же эта масса больше, то, как предсказывает общая теория относительности, образуется черная дыра. У черной дыры нет жесткой поверхности, ее размер характеризуется так называемым *гравитационным радиусом* — границей, за которую из внутренней области ничто не может выйти. В пространстве эта внутренняя область ограничена поверхностью, именуемой *горизонтом событий*. Черные дыры и нейтронные звезды часто называют релятивистскими, или компактными, объектами.

Одиночные нейтронные звезды, как правило, являются слабыми источниками электромагнитного излучения, а одиночная черная дыра сама по себе вообще ничего не излучает (небольшое излучение может сопровождать поглощение дырой окружающего газа). Однако если черная дыра или нейтронная звезда имеют возможность притягивать к себе вещество, например, находясь в двойной системе с нормальной звездой, ситуация резко меняется. Уже в первых ракетных экспериментах в 60-е годы было обнаружено рентгеновское излучение ярчайшей нейтронной звезды

в нашей Галактике (Скорпион X-1 — он оказался в 100000 раз ярче, чем Солнце) — компонента двойной системы. За следующие 40 лет было открыто несколько сотен ярких рентгеновских источников, большинство из которых входит в двойные системы.

Дело в том, что за исключением аннигиляции вещества и антивещества, наиболее эффективным механизмом выделения энергии служит *аккреция* — падение вещества в сильном гравитационном поле компактного объекта. Когда черная дыра или нейтронная звезда захватывает достаточное количество газа, потерянного обычной звездой-компаньоном, двойная система может стать мощнейшим источником рентгеновского излучения. В тесных двойных системах реализуется специфический режим аккреции — *дисковая аккреция*. Газ, перетекающий с нормальной звезды, имеет большой угловой момент. В результате образуется аккреционный диск, вещество в котором быстро вращается по почти круговым орбитам и медленно дрейфует в сторону компактного объекта. Дрейф сопровождается нагревом вещества, и при приближении к компактному объекту температура газа становится настолько высока, что он начинает излучать в рентгеновском диапазоне. Механизм дисковой аккреции был предложен для объяснения природы рентгеновских источников советскими астрофизиками Н.И.Шакурой и Р.А.Сюняевым в 70-е годы XX в. [1]. Этот механизм действует не только в тесных двойных системах, но и в активных ядрах галактик, где центральная сверхмассивная черная дыра (массой 10^6 — $10^7 M_{\odot}$) поглощает межзвездный газ и даже отдельные звезды.

Наблюдения показали, что иногда черные дыры излучают значительную часть энергии в жестких рентгеновских лучах (энергия фотонов больше 10—100 кэВ). Фотоны с подобной

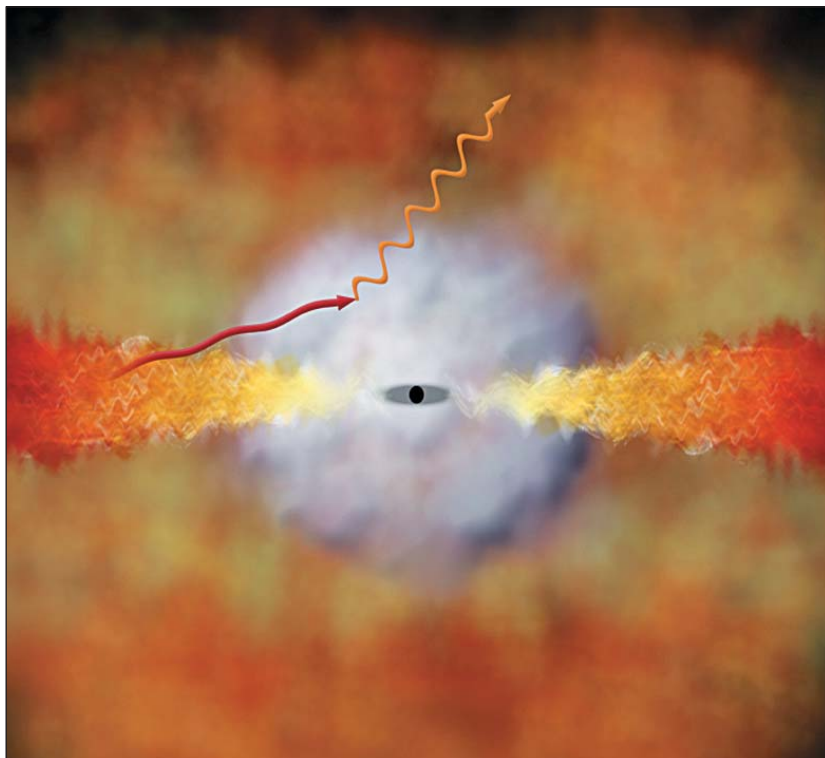


Рис. 1. Схематическое изображение аккреционного потока вокруг черной дыры с малым темпом аккреции вещества. Оптически толстый аккреционный диск подходит к черной дыре справа и слева, но не продолжается до ее горизонта событий (черный кружок в центре), а превращается в оптически тонкую горячую корону (показана серым). Фотон, выходящий из аккреционного диска (изображен красной стрелкой), рассеивается в горячей короне на электронах и приобретает большую энергию.

формой спектра не могут возникнуть в результате самого излучения аккреционного диска. В теоретических работах, выполненных в 80-е годы [2], было показано: вероятнее всего, излучение на больших частотах есть следствие перекачки энергии от высокоэнергичных (горячих) электронов к фотонам (так называемая комптонизация фотонов). В настоящее время наиболее популярна комбинированная двухзонная модель аккреционного потока: аккреционный диск вблизи компактного объекта испаряется, образуя горячую корону, в которой происходит комптонизация рентгеновских фотонов (рис. 1).

Основная доля энергии, выделяющейся при аккреции, должна излучаться вблизи ком-

пактного объекта, причем, как показывают расчеты, преимущественно в рентгеновском диапазоне энергий. Именно поэтому рентгеновское излучение является самым эффективным инструментом для исследований компактных объектов. Форма спектра фотонов весьма чувствительна как к параметрам компактных объектов, так и к параметрам аккреционного диска и области, содержащей высокоэнергичные электроны. Например, если в качестве компактного объекта выступает нейтронная звезда с сильным магнитным полем напряженностью 10^{12} – 10^{14} Гс (для примера, напряженность магнитного поля Солнца не превышает ~ 1 Гс), то рентгеновское излучение будет сильно промодулиро-

вано во времени, и двойная система будет выглядеть как рентгеновский пульсар. Высокая переменность рентгеновского излучения компактных объектов — их отличительная черта. Причем эта переменность проявляется на всех временных масштабах — от микросекунд до десятков лет (времени существования рентгеновской астрономии), а амплитуда изменения интенсивности может достигать шести-семи порядков по величине. Сам характер переменности рентгеновского излучения может быть различным в зависимости от светимости объекта.

На страже переменного блеска

В 90-е годы российские астрофизические обсерватории — рентгеновский модуль «Квант» орбитальной станции «Мир» и астрофизический спутник «Гранат», в создании и эксплуатации которых принимали участие сотрудники ИКИ, — были лидерами отечественной экспериментальной астрофизики. Они позволили не только открыть несколько десятков рентгеновских источников в нашей Галактике, в том числе кандидатов в черные дыры, но и исследовать их спектры в широком — три порядка по энергиям (!) — энергетическом диапазоне.

Регистрация излучения сильно переменных источников, спектры которых простираются на несколько порядков величин по энергиям — от долей кэВ до сотен кэВ — весьма сложная задача. Дело в том, что на такой диапазон энергий приходится несколько способов взаимодействия рентгеновских фотонов с веществом. При малых энергиях преобладает фотоэффект, при энергиях выше нескольких десятков кэВ доминирует комптоновское рассеяние, а при энергии фотона около МэВ начинается образование электрон-позитронных пар. Для регистрации

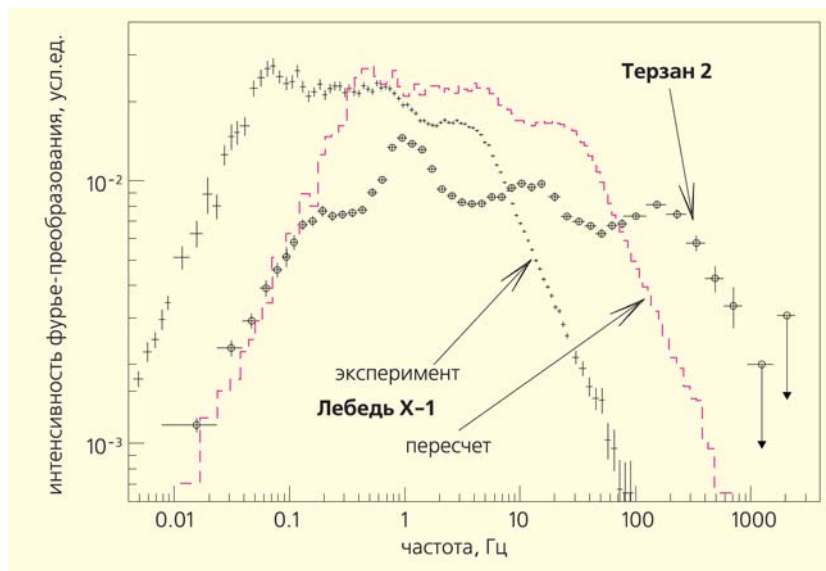


Рис.2. Спектры мощности типичной аккрецирующей черной дыры (Лебедь X-1) и нейтронной звезды (Терзан 2). Кривая для нейтронной звезды спадает при более высоких частотах, даже если учесть разницу в массах компактных объектов (цветная кривая для черной дыры пересчитана с учетом этой разницы) [3]. Это говорит о том, что нейтронная звезда гораздо более переменна на высоких частотах.

спектра рентгеновского источника в широком энергетическом диапазоне требуется работа нескольких различных детекторов одновременно, что далеко не всегда возможно. Рентгеновское излучение не удастся сфокусировать, как это делается в оптике. Только для мягкого рентгеновского диапазона (энергии фотонов меньше ~10 кэВ) можно использовать *телескопы косого падения* — аналог обычных оптических телескопов. В телескопах косого падения рентгеновские кванты отражаются под малым углом в фокус телескопа металлическим (обычно позолоченным) зеркалом, имеющим форму сопряженного парабооида — гипербооида вращения. Это позволяет получить реальное изображение участка неба в рентгеновском диапазоне и наблюдать не только точечные, но и протяженные объекты, например скопления галактик. Наилучшее угловое разрешение достигнуто таким способом у рентгеновского теле-

скопа на спутнике «Chandra» и составляет ~0.5'', что уже сравнимо с разрешением наземных оптических телескопов. Чтобы построить изображение в более жестком диапазоне, применяется *метод кодирующей апертуры*. В этом методе перед детектором помещают экран из прозрачных и непрозрачных для рентгеновского излучения элементов. Непрозрачные элементы отбрасывают тень на детектор, и по положению освещенных и затененных участков детектора можно восстановить положение источника на небе. Метод позволяет реконструировать изображение, даже если в поле зрения телескопа находится несколько точечных источников. Обычно угловое разрешение таких телескопов порядка угловой минуты дуги.

На сегодняшний день одна из наиболее интересных задач — это доказать, что черные дыры действительно существуют. Пока твердо установлены только признаки, по которым можно определить, что компактный

объект в двойной системе НЕ является черной дырой. Если масса компактного объекта меньше 2–3 M_{\odot} , то это нейтронная звезда или белый карлик. Если компактный объект проявляет себя как рентгеновский пульсар либо от него регистрируются непериодические рентгеновские всплески, вызванные термоядерным горением аккрецировавшего вещества, то это нейтронная звезда. Даже если масса компактного объекта заведомо больше максимально возможной массы нейтронной звезды, то и в этом случае нельзя со 100-процентной уверенностью утверждать, что наблюдаемый объект — черная дыра, так как нужно установить наличие горизонта событий в данном объекте. Поэтому, строго говоря, до сих пор обнаружены только *кандидаты в черные дыры*, но не сами черные дыры. Доказать существование черных дыр — значит получить наиболее серьезное подтверждение общей теории относительности. Один из возможных путей решения этой задачи — исследовать переменность рентгеновского излучения на высоких частотах. Оказывается, что, в отличие от нейтронных звезд, кандидаты в черные дыры практически «не шумят» на частотах, превышающих частоту обращения вещества на внутренних орбитах аккреционного диска вокруг черных дыр, т.е. на временных масштабах менее чем ~10 мс [3]. Амплитуда переменности в спектрах мощностей нейтронных звезд (фурье-образы рентгеновской кривой блеска) на частотах выше нескольких сотен герц на порядок выше, чем у канонического кандидата в черные дыры Лебедь X-1 (рис.2). Это объясняется вкладом рентгеновского излучения, генерируемого на поверхности нейтронной звезды. Отсутствие такой компоненты в спектре мощностей черной дыры говорит об отсутствии такой поверхности, а следовательно, служит косвенным подтверждением наличия горизонта событий.

От аннигиляции до гамма-всплесков

Если энергия фотона превышает несколько десятков кэВ, его принято называть гамма-квантом. С 2002 г. сотрудники ИКИ РАН активно участвуют в работе обсерватории гамма-лучей «Интеграл», телескопы которой почти на порядок чувствительнее телескопов обсерватории «Гранат». Как и на «Гранате», в приборах обсерватории «Интеграл» для получения изображений используется метод кодирующей апертуры. Высокое энергетическое разрешение спектрометра SPI обсерватории «Интеграл» позволяет эффективно регистрировать узкие эмиссионные линии на энергиях в сотни и тысячи кэВ. Линии служат уникальным источником информации о ядерных превращениях вещества в Галактике. Ярчайшей гамма-линией оказывается линия на энергии 511 кэВ, которая возникает при аннигиляции электрон-позитронных пар (рис.3).

Позитроны (антиэлектроны) представляют собой наиболее распространенную форму антивещества в Галактике. Целый ряд различных по своей природе процессов в астрофизических объектах может приводить к рождению позитронов. Наиболее важный из них — β -распад, при котором изотопы испускают позитроны. Для астрофизики естественным поставщиком позитронов выступает, например, распад радиоактивного изотопа алюминия Al^{26} со временем жизни около миллиона лет. Этот изотоп образуется как в звездах типа Вольфа—Райе*, так и при взрывах сверхновых; его количество характеризуется современным темп звездообразования в Галактике. Столкновение позитрона с электроном может привести к аннигиляции — исчезнове-

*Звезды типа Вольфа—Райе — горячие звезды очень высокой светимости с яркими и широкими спектральными линиями водорода, гелия, азота, углерода и кислорода.

нию обеих частиц и рождению вместо них двух или трех фотонов. Именно эти фотоны и способны зарегистрировать приборы «Интеграла».

Практически все процессы приводят к образованию «горячих» позитронов, т.е. частиц, кинетическая энергия которых сравнима или превышает их массу покоя. При таких энергиях вероятность процесса (или сечение) аннигиляции весьма мала, и позитроны, как правило, успевают потерять значительную часть своей энергии до того, как произойдет аннигиляция. Время между рождением и аннигиляцией позитрона может составлять миллионы лет, в течение которых позитрон постепенно дрейфует от места своего рождения до места исчезновения. Если вещество на пути позитрона достаточно холодное, то до аннигиляции позитрон захватывает электрон и образует так называемый «позитроний» — своего рода аналог атома водорода, в котором роль положительно заряженной частицы выполняет позитрон. Просуществовав недолгое время, позитроний аннигилирует, испуская жесткие гамма-лучи. По взаимной ориентации спинов частиц различают два типа позитрония — пара- и орто-позитроний. Аннигиляция пара-позитрония порождает два кванта с энергией 511 кэВ, тогда как орто-позитроний аннигилирует с образованием трех фотонов различных энергий, складывающихся для многих событий в непрерывный спектр. Спектрометр SPI способен регистрировать обе эти компоненты (рис.3) и определять соотношение между количеством орто- и пара-позитрония. Измерение параметров линии пара-позитрония позволяет сделать выводы о свойствах среды, в которой происходит аннигиляция.

Если исследование аннигиляции позитронов стало доступно только в последнее десятилетие, то загадка гамма-всплесков волновала исследователей более 40 лет. В середине 60-х го-

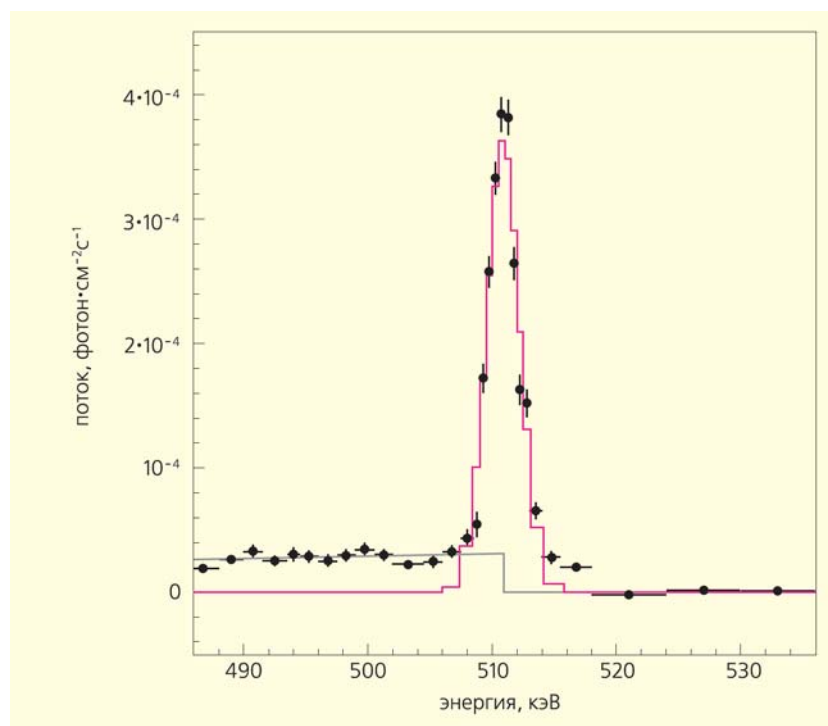


Рис.3. Спектр излучения из области центра Галактики в районе энергии 511 кэВ. Черной кривой показан вклад орто-позитронного континуума, цветной — линия от пара-позитрония [4].

дов американские спутники «Vela», предназначенные для наблюдения за ядерными взрывами на территории СССР, обнаружили яркие и короткие (от долей до десятков и сотен секунд) всплески гамма-излучения. Хотя по своему характеру эти всплески напоминали вспышки в момент ядерных взрывов, приходили они из космического пространства. Сразу же стало понятно, что в источниках гамма-всплесков должны реализовываться самые экстремальные состояния вещества и что они смогут послужить прекрасной лабораторией для исследования вещества в подобных состояниях.

Несмотря на большие усилия, природа космических гамма-всплесков долгое время оставалась неразгаданной. Только в конце 90-х годов было установлено, что источники всплесков расположены на космологических расстояниях, т.е. рассто-

яниях, сравнимых с размером наблюдаемой части Вселенной. Это стало возможно благодаря наблюдениям так называемых послесвечений гамма-всплесков. Оказалось, что после яркой, но короткой вспышки в гамма-диапазоне источник всплеска еще долго (на протяжении дней и более) излучает в других диапазонах спектра электромагнитного излучения — от рентгеновского до радио. В жестком рентгеновском диапазоне подобное послесвечение было впервые обнаружено по данным обсерватории «Гранат».

В настоящее время удается наблюдать послесвечения гамма-всплесков несколько раз в год. Этими наблюдениями заняты многие крупнейшие наземные и орбитальные обсерватории. Было установлено, что по крайней мере часть гамма-всплесков связана со взрывами сверхновых, точнее, с выбросом вещества и энергии вдоль оси

вращения сколлапсировавшего ядра массивной звезды.

В ИКИ наблюдения послесвечений гамма-всплесков проводятся на Российско-Турецком полутораметровом оптическом телескопе РТТ150, введенном в строй в середине 90-х годов при участии сотрудников ИКИ РАН. Он стал первым телескопом среднего класса, который был наведен на оптическое послесвечение всплеска 29 марта 2003 г. — одного из ближайших и ярчайших гамма-всплесков, зарегистрированных в последние несколько лет. В ходе наблюдений была наиболее точно измерена кривая блеска оптического послесвечения (рис.4). Впоследствии на месте источника этого гамма-всплеска была обнаружена сверхновая.

Почти все ранее регистрировавшиеся гамма-всплески, до которых удавалось измерить расстояние, произошли в далеких галактиках (при красных смещениях от 0.3 до 4) и характеризовались огромной энергией, меняющейся в достаточно узком для астрофизики интервале 10^{52} – 10^{54} эрг (в условиях изотропного распространения излучения). Высказывалось предположение, что полное энерговыделение всплеска есть величина универсальная. Однако ряд наблюдений «Интеграла» показывает, что такая простая картина, скорее всего, неверна.

3 декабря 2003 г. в 22 ч 01 мин 28 с Всемирного времени телескоп IBIS обсерватории «Интеграл» зарегистрировал гамма-всплеск GRB031203. Его положение на небе было определено с точностью 2.5', и эти сведения были распространены с помощью Интернета в рекордное время — через 18 с после начала всплеска, т.е. когда сам всплеск еще продолжался. Спустя несколько часов телескопы орбитальной обсерватории «XMM-Newton» засекли на месте GRB031203 затухающий рентгеновский источник, который впоследствии был зарегистрирован также наземными радио-

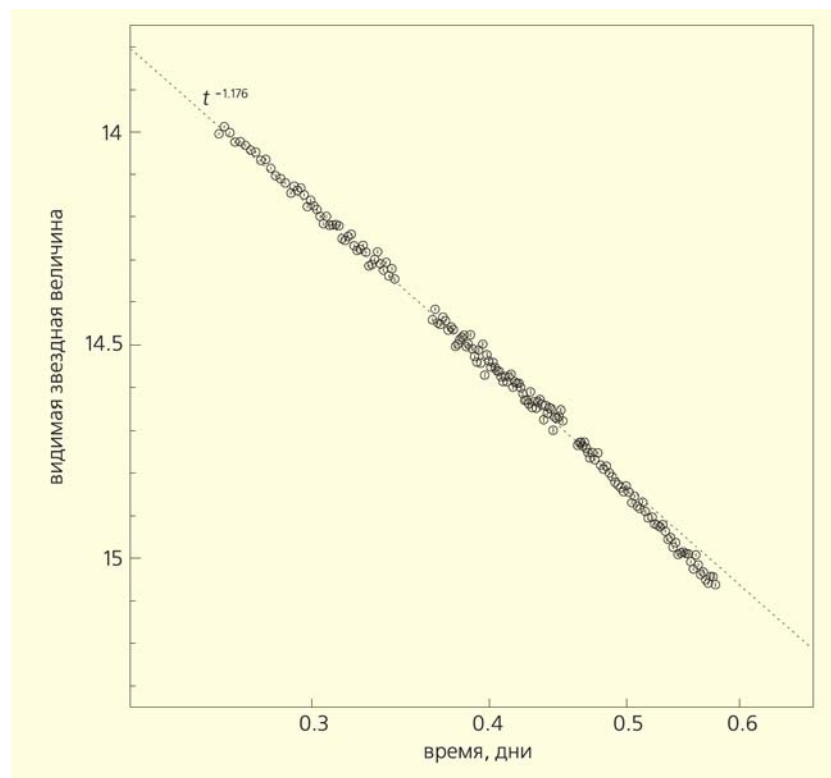


Рис.4. Исключительно яркое оптическое послесвечение гамма-всплеска GRB 030329 в первые несколько часов его затухания [5]. Данные наблюдения на телескопе РТТ150.

и оптическими телескопами. Дальнейшие наблюдения позволили обнаружить галактику с красным смещением 0.1055 (расстояние около 1300 млн световых лет), где произошел гамма-всплеск, а спустя несколько недель — и сверхновую, связанную со всплеском. Анализ данных обсерватории «Интеграл» показал, что временные и спектральные характеристики гамма-всплеска GRB031203 вполне обычны для объектов этого класса; в частности, основная энергия была выделена в виде гамма-фотонов с энергией более 200 кэВ. Однако полная энергия, выделившаяся при этом ($<10^{50}$ эрг в предположении изотропности излучения), оказалась в сотни раз меньше ожидаемой для обычного гамма-всплеска [6]. Данный результат опроверг господствовавшее последние пять лет представление о гамма-всплесках как о «стандартных свечах», имеющих примерно одну и ту же светимость. Теперь есть серьезные основания предполагать, что су-

ществует класс гамма-всплесков в сотни и тысячи раз слабее известных до сих пор. Эта новая популяция может оказаться весьма многочисленной, а не удавалось обнаружить ее до недавнего времени лишь из-за недостаточной чувствительности приборов.

Рентгеновская «археология»

Из-за аккреции окружающего газа и пыли мощнейшее внегалактическое рентгеновское излучение возникает вблизи активных ядер галактик — предположительно сверхмассивных черных дыр в их центрах. Собственно, современная теория не предлагает никаких других кандидатов на роль объектов со столь большой массой. Глубокие обзоры небольших участков неба в стандартном рентгеновском диапазоне (2–10 кэВ), проведенные обсерваториями «Chandra» и «XMM-Newton», зарегистриро-

вали значительное число таких источников в далеких галактиках, а обзор всего неба в мягком рентгеновском диапазоне (<2 кэВ) обсерватории ROSAT подтвердил, что и в близких галактиках наблюдается много сверхмассивных черных дыр. Однако рентгеновское излучение таких низких энергий легко поглощается пылью и газом, который окружает центральные части галактик, поэтому можно было ожидать, что на самом деле доля активных ядер намного выше. Так как в последнее время стало понятно, что наличие и активность сверхмассивных черных дыр в галактиках может оказывать значительное влияние на формирование и эволюцию звездного населения и межзвездного газа галактик, требовалось получить более точные оценки их числа. Был проведен новый обзор всего неба, сделанный на основе наблюдений обсерватории RXTE (рис.5) в более широком диапазоне энергий (3–20 кэВ) [7]. В итоге удалось обнаружить большое количество

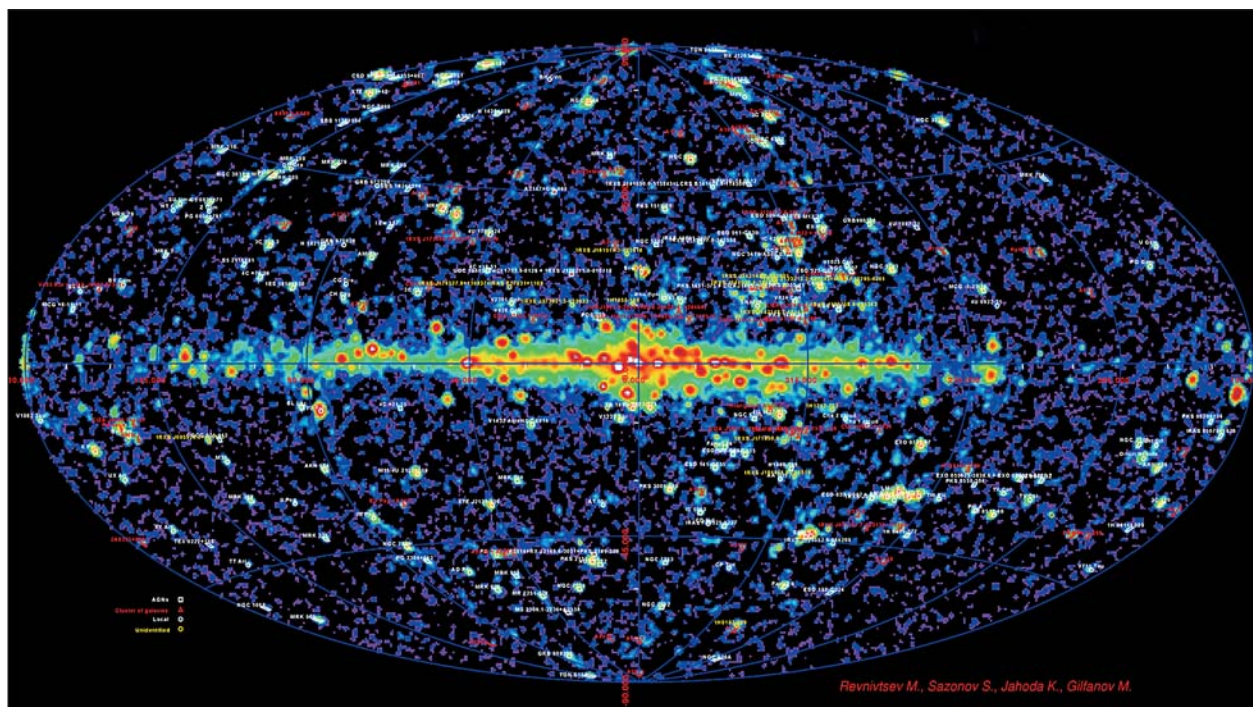


Рис.5. Обзор всего неба в диапазоне 3–20 кэВ обсерватории RXTE в 1996–1999 гг. Отмечен ряд известных источников [7].

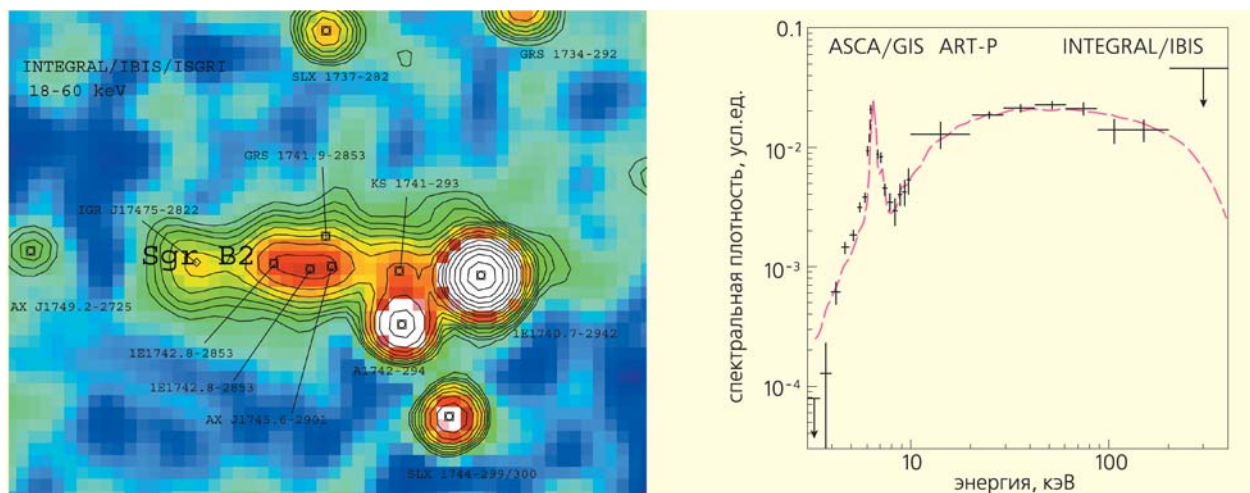


Рис.6. Изображение области Центра Галактики (слева). Показаны ярчайшие нейтронные звезды, черные дыры и положение молекулярного облака Sgr B2. Спектр излучения молекулярного облака Sgr B2 (справа). Крестики — экспериментальные данные, цветной штриховой кривой показаны результаты расчета для модели излучения молекулярного облака, облученного сверхмассивной черной дырой Sgr A* в центре нашей Галактики примерно 300 лет назад [9].

во активных ядер сейфертовских галактик второго типа* — с сильным внутренним поглощением, вызванным, вероятно, большим количеством пыли в галактике по ходу луча зрения, а также показать, что в слабых ядрах поглощение в среднем сильнее (больше пыли?), чем в ярких. Полученный результат позволяет точнее оценить энерговыделение в районах сверхмассивных черных дыр в локальной Вселенной.

А что же происходит с ядром нашей Галактики? Хотя из-за скопления газа и пыли центральная часть нашей Галактики недоступна наблюдениям оптических телескопов, исследования в инфракрасном диапазоне подтвердили, что в Центре нашей Галактики (Sgr A*) находится сверхмассивная черная дыра с массой более $10^6 M_{\odot}$. По аналогии с другими галактиками на этом месте можно было ожидать наличия сильного рентгеновского источника — активного ядра. Однако наблюдения, выполнен-

ные в 90-е годы обсерваторией «Гранат», показали, что на месте Sgr A* такого источника нет. Даже обычные рентгеновские двойные, в большом количестве расположенные вблизи Центра Галактики, оказались на три-четыре порядка более яркими, чем сверхмассивная черная дыра!

Чтобы разобраться с этим парадоксом, обсерватория «Интеграл» провела длительную серию наблюдений района Центра Галактики. Благодаря высокой чувствительности и хорошему угловому разрешению телескопа IBIS удалось зарегистрировать жесткое рентгеновское излучение от молекулярного облака Sgr B2 в области галактического центра. Природа этого рентгеновского излучения, также открытого более 10 лет назад «Гранатом» [8], стала предметом жарких дискуссий. Было показано, что наблюдаемое рентгеновское излучение могло быть испущено в прошлом сверхмассивной черной дырой Sgr A* и отражено молекулярным газом массивного облака, находящегося на расстоянии всего 350 световых лет от Sgr A*. Сейчас светимость Sgr A* не превышает 10^{33-34} эрг/с, в то вре-

мя как 350 лет назад (для наблюдателя на Земле) она должна была быть в миллионы раз больше — на уровне $\sim 10^{39}$ эрг/с. Такое отражение добавило бы в излучение молекулярного облака флуоресцентную линию железа (6.4 кэВ) и жесткий рентгеновский континуум. Однако это было не единственное возможное объяснение. Только измерения в жестком рентгеновском диапазоне, проведенные обсерваторией «Интеграл», позволили подтвердить, что модель с рентгеновским эхом прошлой активности Sgr A* наилучшим образом согласуется с наблюдениями (рис.6). В результате модельных расчетов оказалось возможным определить исходный спектр излучения Sgr A* со светимостью $\sim 10^{39}$ эрг/с [9]. Но даже такая светимость очень мала по сравнению со светимостью активных ядер галактик.

Измеряем Вселенную

Исследования, нацеленные на определение значений основных космологических параметров, которые описывают состояние и эволюцию Вселен-

* Сейфертовские галактики второго типа — класс галактик с яркими звездобразными ядрами и сильными запрещенными и разрешенными спектральными линиями водорода сравнимой ширины.

ной, в последние несколько лет достигли качественно нового уровня точности. Вместо оценок по порядку величины становятся возможными измерения постоянной Хаббла H_0 , параметра плотности вещества во Вселенной Ω , космологической постоянной Λ и т.д. с относительной погрешностью около 10%. Многие исследователи характеризуют такое положение дел как эру прецизионных измерений, когда на первый план выходят не статистические, а систематические погрешности, присущие тем или иным методам измерений. По этой причине для надежного определения значений космологических параметров требуется согласие многих независимых методов. Скопления галактик, самые массивные гравитационно связанные объекты во Вселенной, играют особую роль в решении подобных классических задач космологии, так как темп эволюции скоплений на больших красных смещениях чувствителен к значению основных космологических параметров.

Надежнее всего массивное скопление галактик можно распознать по протяженному рентгеновскому излучению горячей межгалактической плазмы. Это вызвано тем, что масса горячей газа с температурой $\sim 10^7$ К, наблюдаемого в рентгеновском диапазоне, в ~ 10 раз больше, чем масса всех звезд в галактиках, входящих в скопление. Рентгеновские телескопы позволяют довольно легко детектировать скопления в диапазоне красных смещений $0.5-1$, где эволюционные эффекты уже достаточно выражены, но все еще возможны довольно детальные исследования каждого объекта. Наблюдения, выполненные спутником «ROSAT» в течение восьми лет его работы, дают достаточный наблюдательный материал для составления обширного каталога далеких скоплений.

Начиная с 1996 г. в ИКИ ведется систематическая работа по анализу архивных наблюде-

ний спутника «ROSAT» и последующих оптических наблюдений найденных далеких скоплений галактик. Для поиска протяженных объектов разработаны специальные алгоритмы анализа рентгеновских изображений, позволяющие обнаруживать источники очень малой интенсивности, правильно их классифицировать и измерять основные параметры. По результатам поиска подобных объектов был составлен самый большой опубликованный каталог далеких скоплений, содержащий 203 объекта и покрывающий в сумме телесный угол 160 квадратных градусов (каталог 160d). В 2003—2004 гг. была закончена работа по расширению обзора до 400 квадратных градусов. Для проведения оптических идентификаций скоплений из обзора 400d использовался Российско-Турецкий телескоп РТТ150.

Последующие исследования данных скоплений позволили определить темп их эволюции при $z \approx 0.5$ (т.е. на момент времени примерно 5 млрд. лет назад), которая проявляется в изменении соотношений между основными параметрами (масса, температура и светимость),

и, что наиболее интересно для космологических измерений, в их пространственной плотности. На рис.7 показана функция распределения масс скоплений, измеренных при $z = 0.4-0.8$. Видно, что пространственная плотность скоплений данной массы падает примерно в 10 раз по сравнению с количеством таких же скоплений на низких красных смещениях [10]. Данный темп эволюции позволяет ограничить комбинацию значений параметра плотности Вселенной и космологической постоянной (рис.8).

В настоящее время спутник «Chandra» следит за далекими объектами из обзора 400d (всего около 40 скоплений на $z > 0.35$). Ожидаемая точность определения эволюции распределения скоплений по массам в результате этих наблюдений должна быть достаточной, чтобы найти диапазон возможных параметров темной энергии.

Рентгеновские наблюдения близких скоплений, выполненные орбитальными обсерваториями «Chandra» и «XMM-Newton», позволили также детально исследовать многие процессы, возникающие при слия-

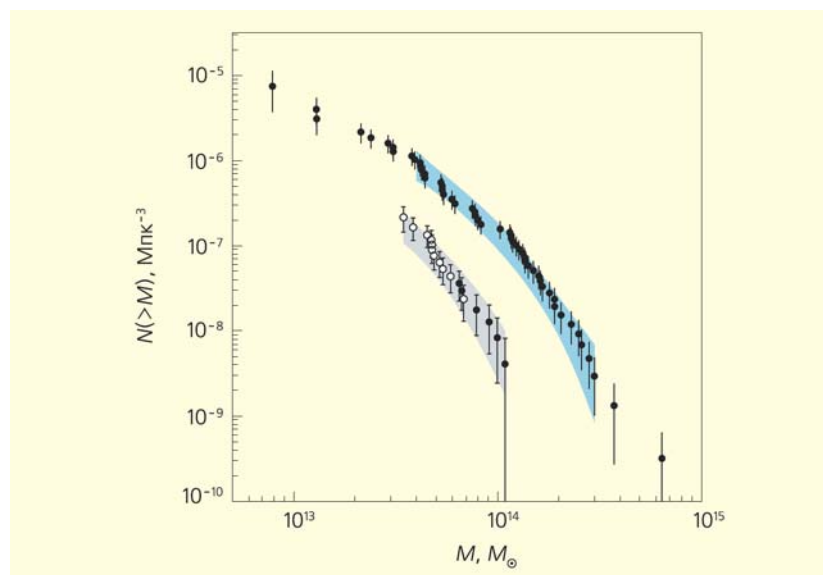


Рис.7. Интегральные распределения по массе барийной составляющей: скоплений при $0.4 \leq z \leq 0.8$, данные каталога 160d (выделено серым); близких скоплений для $0.01 \leq z \leq 0.2$, из работы [10] (голубым).

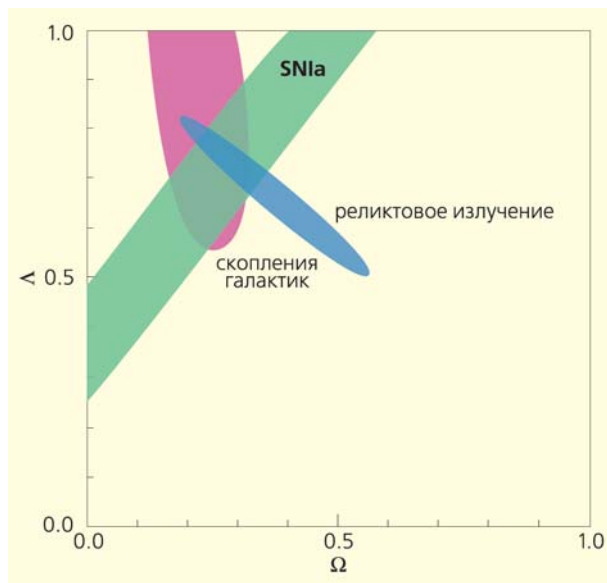


Рис.8. Ограничения на значения параметра плотности и космологической постоянной, получаемые с помощью различных методов: по наблюдениям сверхновых I типа SNIa; по регистрации микроволнового реликтового фона; по изучению эволюции скоплений галактик.

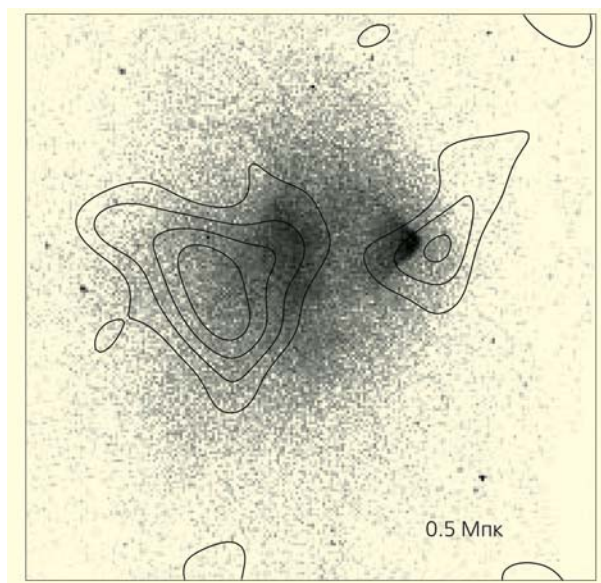


Рис.9. Ударная волна (черный треугольник справа) в скоплении галактик 1E0657 по данным обсерватории «Chandra». Контуры соответствуют распределению плотности материи, измеренному методом слабого линзирования [11].

нии массивных скоплениях галактик.

Изображение скопления 1E0657, полученное спутником «Chandra» (рис.9), ясно указывает на существование мощной ударной волны, которую вызывает движение плотного остатка влетающего менее массивного скопления галактик. Анализ профиля ударной волны позволяет установить скорость влета, оценить энергию, переданную от протонов к электронам в бесстолкновительной ударной волне, изучить вероятные механиз-

мы ускорения релятивистских частиц, ответственных за протяженное радиоизлучение скоплений. В данном объекте удалось точно измерить пространственной распределение гравитирующей материи методом слабого линзирования [11]. Оказалось, что центр масс влетающего скопления смещен относительно центра масс его барионной компоненты, масса которой определяется наблюдаемым в рентгеновском диапазоне газом. Этот сдвиг — вероятно, единственное на сегодняшний

день прямое указание на существование темной материи.

* * *

В рамках небольшой статьи нельзя охватить многообразие научных задач и физических процессов, которые относятся к астрофизике высоких энергий — можно ограничиться лишь несколькими примерами. Загадок пока очень много, но стремительное развитие этого направления исследований все-таки дает надежду, что их удастся разгадать. ■

Литература

1. *Shakura N., Sunyaev R.* // *Astron. and Astrophys.* 1973. V.24. P.337—355.
2. *Sunyaev R., Titarchuk L.* // *Astron. and Astrophys.* 1980. V.86. P.121—138.
3. *Sunyaev R., Revnitsev M.* // *Astron. and Astrophys.* 2000. V.358. P.617—623.
4. *Churazov E., Sunyaev R., Sazonov S. et al.* // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2005. V.357. №4. P.1377—1386.
5. *Буренин П.А., Сюняев П.А., Павлинский М.Н. и др.* // *Письма в Астрон. журн.* 2003. Т.29. №9. С.649—654.
6. *Sazonov S., Lutovinov A., Sunyaev R.* // *Nature.* 2004. V.430. №7000. P.646—648.
7. *Revnitsev M., Sazonov S., Jaboda K., Gilfanov M.* // *Astron. and Astrophys.* 2004. V.418. P.927—936.
8. *Markevitch M., Sunyaev R., Pavlinsky M.* // *Nature.* 1993. V.364. №6432. P.40—42.
9. *Revnitsev M., Churazov E., Sazonov S. et al.* // *Astron. and Astrophys.* 2004. V.425. P.L49—L52.
10. *Voevodkin A., Vikhlinin A.* // *Astrophys. J.* 2004. V.601. P.610—620.
11. *Markevitch M., Gonzalez A., Clowe D. et al.* // *Astrophys. J.* 2004. V.606. P.819—824.