

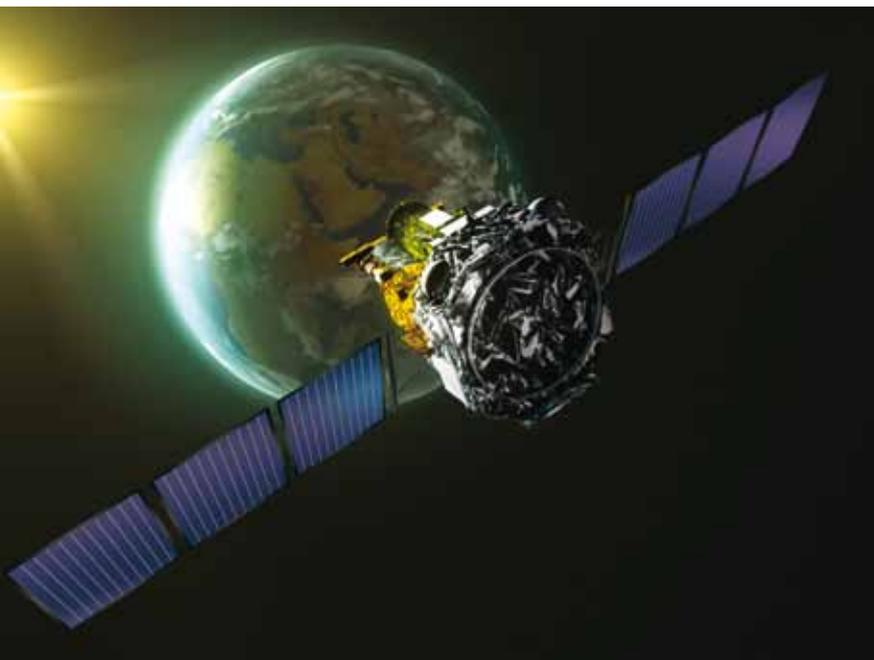
Рентгеновская и гамма-астрономия изучает свойства и поведение вещества в условиях, которые невозможно создать в лабораториях, — при экстремально высоких температурах, под действием сверхсильных гравитационных и магнитных полей. Объектами изучения являются взрывы и остатки сверхновых, релятивистские компактные объекты (нейтронные звезды, черные дыры, белые карлики), аннигиляция антивещества, свечение межзвездной среды из-за ее бомбардировки космическими лучами высоких энергий и т.д. Земная атмосфера является непреодолимым препятствием на пути рентгеновских и гамма фотонов, поэтому все астрофизические исследования в этом диапазоне энергий проводятся с бортов космических обсерваторий. Фотоны жесткого рентгеновского диапазона (>15 кэВ) обладают большой проникающей способностью, что имеет как минусы — такие фотоны трудно фокусировать, так и свои плюсы — астрофизические объекты, скрытые от нас оболочкой пыли и газа или межзвездным веществом в плоскости Галактики, становятся обнаружимыми в жестких рентгеновских лучах.

Создание инструментов, способных работать с фотонами, имеющими энергии от десятков тысяч до миллионов электронвольт, представляет собой очень сложную задачу. Такие фотоны сложно регистрировать и еще сложнее распознать на фоне большого количества событий, возникающих в регистрирующей аппаратуре из-за космических заряженных частиц. Кроме того, улучшение чувствительности инструментов в этом диапазоне энергий неизбежно влечет за собой существенное увеличение площади и массы регистрирующей аппаратуры, что, в свою очередь создает трудности при их запуске в космическое пространство.

В 2012 году исполняется 10 лет с момента вывода на высокоапогейную орбиту Международной Астрофизической Лаборатории Гамма Лучей ИНТЕГРАЛ (INTErnational Gamma Ray Astrophysical Laboratory - INTEGRAL).

Обсерватория является самым передовым инструментом человечества для исследования Вселенной в жестких рентгеновских и гамма лучах. ИНТЕГРАЛ -- совместный проект Европейского (ЕКА) и Российского космических агенств. Участие России в проекте было инициировано Российской академией наук (РАН) и закреплено Соглашением между Росавиакосмосом и ЕКА, введенным в действие распоряжением Правительства РФ. В результате участия Российской Федерации в проекте ИНТЕГРАЛ российские ученые имеют исключительное право на использование 25% наблюдательного времени обсерватории.

Основными приборами обсерватории являются гамма-телескоп IBIS (имеет два слоя детекторов ISGRI и PICSIT) и спектрометр SPI, позволяющие строить изображения рентгеновского неба и проводить спектральный анализ излучения в диапазоне энергий от 15 кэВ до 10 МэВ. В качестве вспомогательных приборов используются рентгеновский телескоп JEM-X и оптический монитор OMC. Общая масса обсерватории составляет около 4 тонн, что фактически является пределом для современной технологии построения изображений и регистрации фотонов жесткого рентгеновского и мягкого гамма диапазонов.



© ESA

Основными преимуществами обсерватории ИНТЕГРАЛ, делающими ее уникальным инструментом для исследования неба в рентгеновских и гамма лучах, являются:

- большое поле зрения приборов при хорошем угловом разрешении и высокой чувствительности, что позволяет проводить обзоры больших участков неба и при этом иметь способность разрешать отдельные источники в таких густонаселенных областях как плоскость Галактики и ее центр;
- широкий энергетический диапазон, простирающийся от энергий 4 кэВ до 10 МэВ. Это позволяет получать информацию как о тепловых, так и о нетепловых процессах, происходящих в релятивистских компактных источниках;
- рекордное энергетическое разрешение приборов на энергиях выше 20 кэВ. Благодаря этому ИНТЕГРАЛ является (и останется на долгие годы) самой лучшей обсерваторией для исследования эмиссионных линий, возникающих в результате распада радиоактивных элементов в нашей и ближайших к нам галактиках.

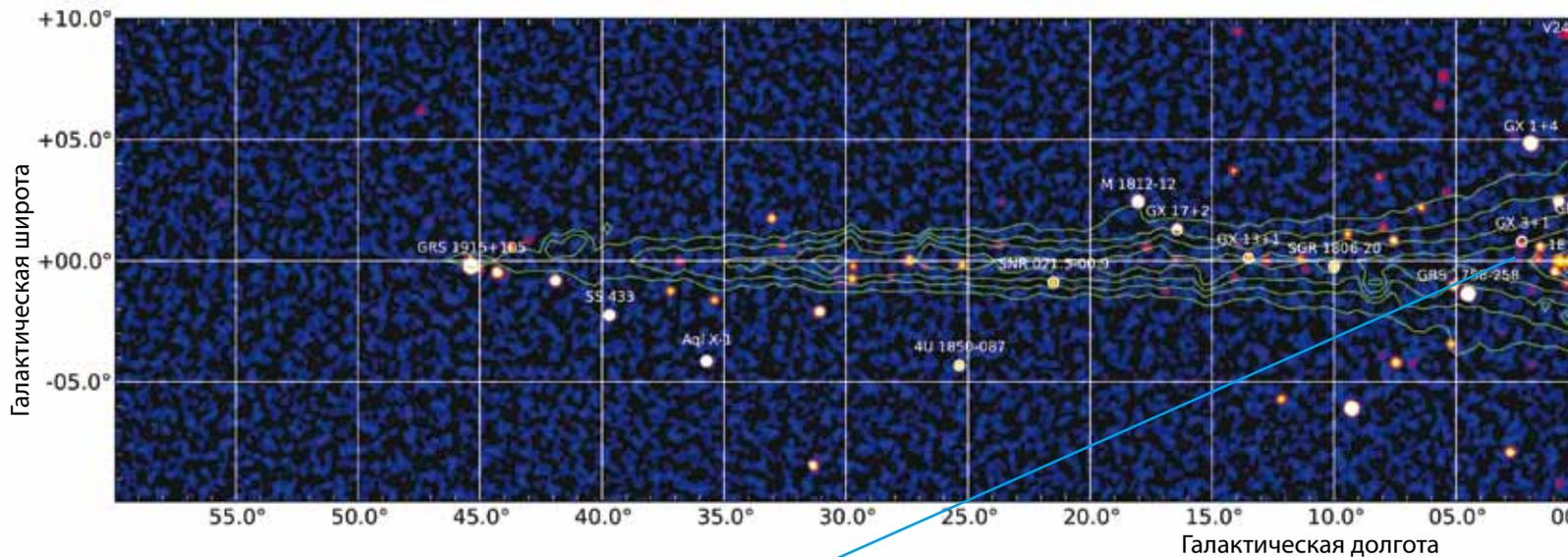
Задача построения изображений по данным, полученным приборами обсерватории ИНТЕГРАЛ, решается с использованием принципа кодирующей апертуры. Над детектором, который регистрирует падающие фотоны, расположена маска, состоящая из набора прозрачных и непрозрачных элементов. В зависимости от положения в поле зрения любой источник создает определенную, уникальную тене-

вую засветку на детекторе. Дальнейший компьютерный анализ информации, полученной регистрирующим прибором, позволяет восстановить исходное изображение неба.

До настоящего времени спутник ИНТЕГРАЛ облетел вокруг Земли 1219 раз. Восемьдесят процентов времени (за исключением короткого периода нахождения в зоне радиационных поясов Земли) посвящено непрерывным наблюдениям разных областей неба, прежде всего нашей Галактики. Все приборы обсерватории работают в штатном режиме. Орбита спутника постепенно эволюционирует. До 2011 года ее перигей постепенно уменьшался от начального значения 9600 км, достигнув 2750 км в октябре 2011 года. Согласно расчетам, к концу 2012 года он поднимется до 4500 км, а к осени 2015 года снова вырастет до 10000 км. Как и ожидалось, временное уменьшение перигея орбиты привело к небольшой деградации эффективности солнечных батарей спутника, однако их характеристик с запасом хватает для успешной работы всей аппаратуры обсерватории. Наряду с изменениями в солнечных батареях происходит и деградация научных приборов обсерватории. Однако, она оказалась незначительной: за десятилетний период работы спектрометр SPI потерял 21% детекторов (4 детектора из 19), детектор IBIS/ISGRI -- 4.4%, детектор IBIS/PICsIT -- 1.3%.

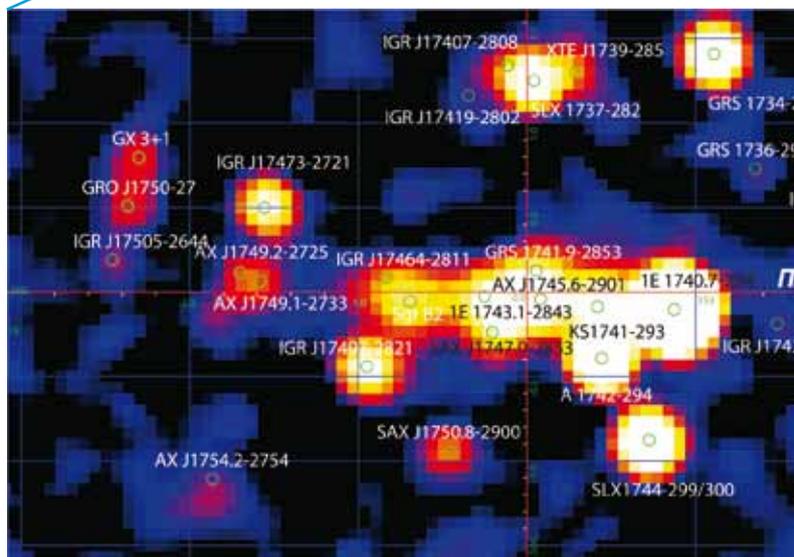
Обсерватория была успешно выведена на высокоапогейную орбиту 17 октября 2002 года в 4 часа 41 минуту по Гринвичу с космодрома Байконур. В качестве средства выведения на орбиту обсерватории ИНТЕГРАЛ была использована российская ракета-носитель ПРОТОН Федерального Государственного Космического Центра имени Хруничева с разгонным блоком ДМ Ракетно-Космической Корпорации "Энергия". Выведение обсерватории на промежуточную высокоэллиптическую орбиту было выполнено с точностями много лучше (более, чем на порядок) гарантированных величин, что позволило значительно сократить расход топлива при формировании окончательной орбиты двигателями космического аппарата и, с учетом оптимизации процедур управления ориентацией аппарата, дало возможность увеличить операционное время жизни обсерватории с 5 лет до 21 года, т.е. запаса топлива на борту спутника должно хватить до 2023 года.



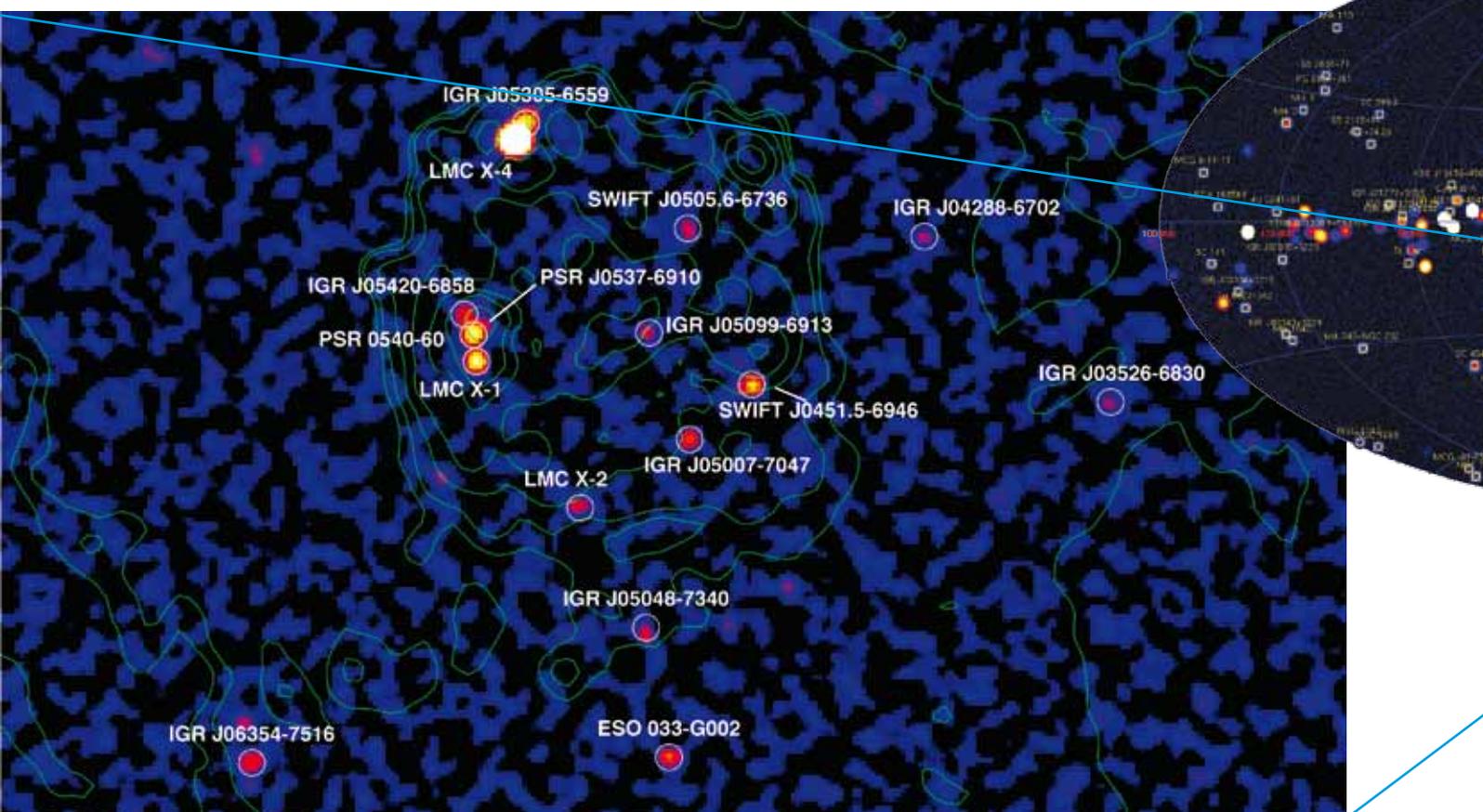


Картографирование неба

Проводимый с 2003 г. обсерваторией ИНТЕГРАЛ обзор всего неба в жестком рентгеновском диапазоне энергий позволил не только открыть несколько сотен новых рентгеновских источников (Ревнивцев и др. 2004а, 2006а, Мольков и др. 2004, Кривонос и др. 2007, 2010, 2012; Берд и др., 2006, 2010), но и впервые провести достаточно полное исследование статистических свойств объектов разных классов: активных ядер галактик (Сазонов и др., 2007, 2008), массивных и маломассивных рентгеновских двойных систем во внутренней области нашей Галактики (Лутовинов и др., 2005а,б; Ревнивцев и др., 2008а,б). Обсерватория ИНТЕГРАЛ провела сверхглубокие наблюдения нескольких областей, практически достигнув пределов возможностей телескопов с кодирующей апертурой. Среди областей с глубоким покрытием - поле в направлении ближайшей к нам галактики Большое Магелланово Облако (Гребенев и др. 2012а, Лутовинов и др. 2012а) и поле в направлении квазара 3С273, богатое внегалактическими объектами.



Центр Галактики



Галактика Большое Магелланово Облако

Российский Центр Научных Данных (РЦНД) обсерватории ИНТЕГРАЛ

Для обсерватории ИНТЕГРАЛ впервые в России был реализован принцип Национальной Обсерватории. Это значит, что любой ученый из любого российского научного института, университета или обсерватории может подать заявку на проведение наблюдения любого объекта и, в случае если заявка будет одобрена Российским и Европейским Комитетами по Распределению Наблюдательного Времени, -- получить данные наблюдений для их последующей обработки и анализа. При этом ученый обладает исключительным правом на проведение таких исследований и публикацию всех полученных научных результатов в течение года с момента поступления данных. По прошествии года данные становятся доступными для всех.

Все научные данные, полученные в рамках российской квоты наблюдательного времени, поступают в международный центр научных данных обсерватории ИНТЕГРАЛ (ISDC, Женева, Швейцария), а затем становятся доступными для российских ученых через Российский Центр Научных Данных (РЦНД) обсерватории ИНТЕГРАЛ, организованный в Институте космических исследований РАН.



Основными задачами РЦНД являются:

- обеспечение российских ученых результатами наземных и полетных калибровок;
- получение, первичная обработка и архивирование данных обсерватории ИНТЕГРАЛ, полученных в рамках российской квоты, а также всех открытых данных проекта;
- оперативное предоставление российским ученым данных наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ и программно-математического обеспечения, необходимого для их обработки;
- проведение необходимой консультационной работы по поддержке российских ученых при обработке и анализе ими научных данных, полученных обсерваторией.

Благодаря финансированию, выделенному Российской академией наук в 2002, 2004, 2010 гг и Российским Фондом Фундаментальных Исследований в 2007 и 2011 гг., а также поддержке со стороны Института космических исследований РАН, предоставившего специальные помещения и высокоскоростные каналы связи, в РЦНД организован архив данных, отвечающий самым современным требованиям. Архивные мощности представлены восемью современными серверами с общим объемом доступного дискового пространства несколько десятков ТБ и терминальным классом, в котором любой российский ученый может приобрести опыт работы с данными обсерватории.

Обзор основных результатов обсерватории за 10 лет

Поскольку все данные обсерватории выкладываются в общий доступ после истечения однолетнего периода исключительного пользования заявителями наблюдений, с ними имеют возможность работать научные коллективы всего мира. Несмотря на связанную с этим высочайшую конкуренцию, российские ученые смогли внести существенный, а в ряде случаев решающий вклад в получение и публикацию результатов обсерватории. С использованием результатов наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ за 10 лет вышло более 2000 публикаций, из них более 700 в реферируемых журналах, из них 130 -- публикации российских ученых. По меньшей мере 88 диссертаций (из них 9 российских) защищены с использованием данных наблюдений обсерватории.

Среди важнейших результатов, полученных обсерваторией ИНТЕГРАЛ за 10 лет, следует отметить:

- карты всего неба с рекордной чувствительностью в области галактической плоскости и выделенных внегалактических полей; анализ полученных карт позволил открыть более трехсот новых жестких рентгеновских источников, что более чем в два раза увеличило число известных объектов на небе;
- обнаружение новых популяций галактических рентгеновских источников;
- высокоточные измерения энергий ядерных линий на энергиях 511 (линия аннигиляции позитронов) и 1809 кэВ (линия распада радиоактивного ^{26}Al) и построение карт интенсивности излучения в этих линиях;
- открытие излучения в линиях 67.9 и 78.4 кэВ, формирующихся в результате распада радиоактивного ^{44}Ti , образовавшегося во время



вспышки ближайшей к нам сверхновой за последние 400 лет — SN1987A;

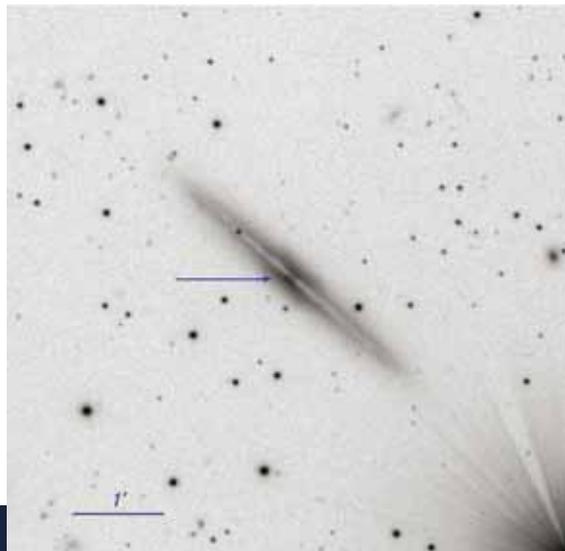
- доказательство активности сверхмассивной черной дыры в ядре нашей Галактики в недавнем прошлом;
- составление представительной выборки активных сверхмассивных черных дыр в ядрах близких галактик, обнаружение неоднородности их распределения по объему в ближней Вселенной;
- высокоточные измерения космического фонового излучения в жестком рентгеновском диапазоне;
- открытие нового класса слабых гамма-всплесков.

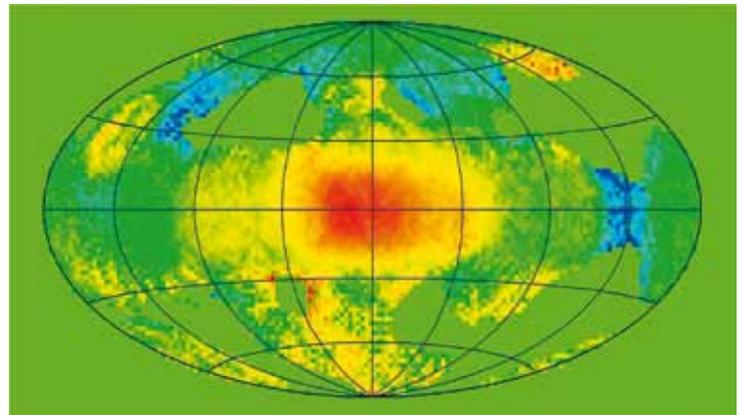
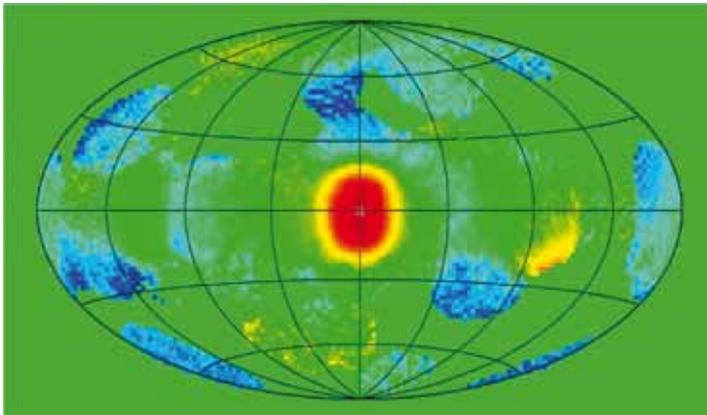
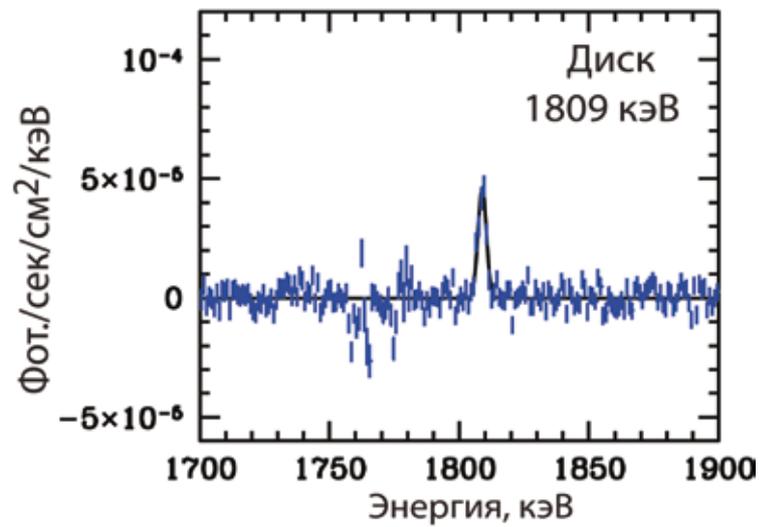
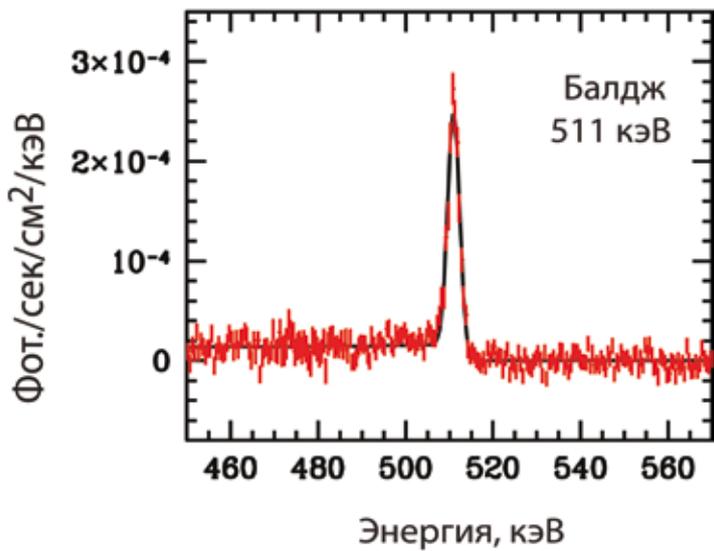
Ниже кратко рассказывается об этих и некоторых других результатах работы обсерватории.

Оптическое отождествление рентгеновских источников

Для определения природы новых источников, открытых обсерваторией ИНТЕГРАЛ, необходимо проводить большое количество наблюдений в других участках электромагнитного спектра - в оптическом, инфракрасном, радио диапазонах. Начиная с 2003 года оптическую поддержку рентгеновским наблюдениям обсерватории ИНТЕГРАЛ оказывает Российско-Турецкий 1,5-метровый телескоп (РТТ-150), наблюдения на котором проводят ученые из Казанского федерального университета и Института космических исследований РАН. К настоящему времени более сорока объектов, открытых обсерваторией ИНТЕГРАЛ на северном небе, отождествлены при помощи наблюдений на РТТ-150 (Бикмаев и др., 2006а,б, 2008, 2009; Буренин и др. 2006, 2008; Лутовинов и др. 2010, 2012б,в).

Большая часть открытых источников являются сверхмассивными черными дырами в центрах галактик, однако также значительную долю объектов составляют аккрецирующие белые карлики (так называемые катаклизмические переменные) в нашей Галактике.





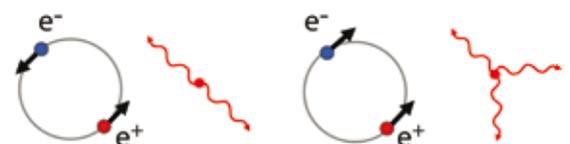
Аннигиляция позитронов в центральной области Галактики

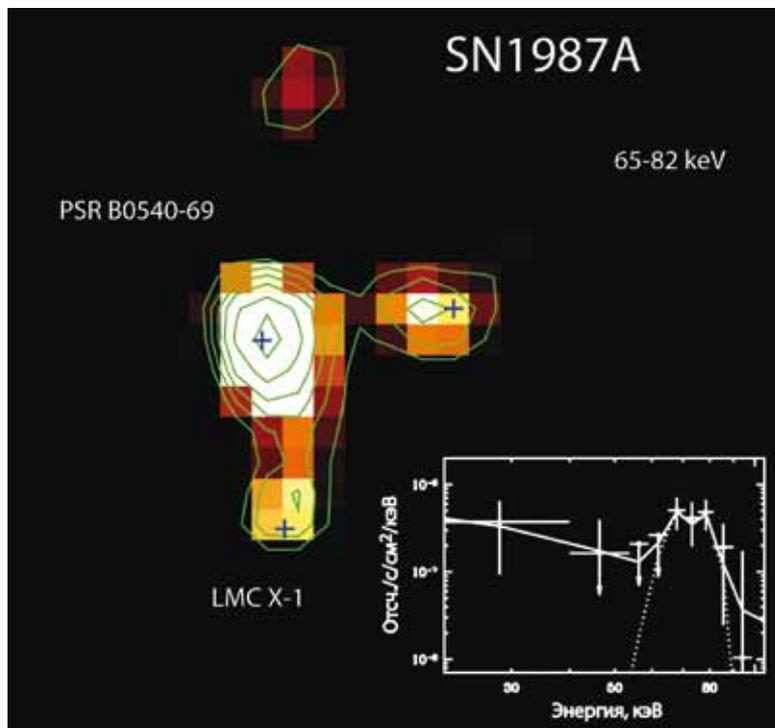
С помощью спектрометра высокого разрешения SPI исследовано гамма-излучение балджа и диска нашей Галактики. В измеренных спектрах четко видны две сильнейшие линии, на энергиях 511 кэВ и 1.8 МэВ, связанные с аннигиляцией электрон-позитронных пар и с распадом радиоактивного изотопа ^{26}Al , синтезируемого массивными звездами (Жан и др. 2003, Чуразов и др. 2005, 2011).

$$\frac{E}{m_e c^2} = 1.00002 \pm 7 \cdot 10^{-5}$$

Пространственные распределения интенсивности излучения этих линий разительно отличаются – линия 1.8 МэВ тяготеет к диску Галактики, где формируются молодые звезды, тогда как интенсивная аннигиляция позитронов происходит в центральной зоне Галактики. По ширине линии 511 кэВ и относительной яркости трех-фотонного

континуума (на энергиях ниже 511 кэВ) показано, что аннигиляция происходит в теплой (~10 тыс. градусов), частично ионизованной межзвездной среде, причем в основном не напрямую, а через образование позитрония – короткоживущей связанной системы из электрона и позитрона. Наиболее вероятным поставщиком позитронов являются термоядерные взрывы сверхновых типа Ia (связанные с маломассивными звездами), синтезирующие радиоактивный изотоп ^{56}Ni , который в процессе распада $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$, производит позитроны. Однако нельзя исключить и более экзотические сценарии рождения позитронов в центральной зоне Галактики.





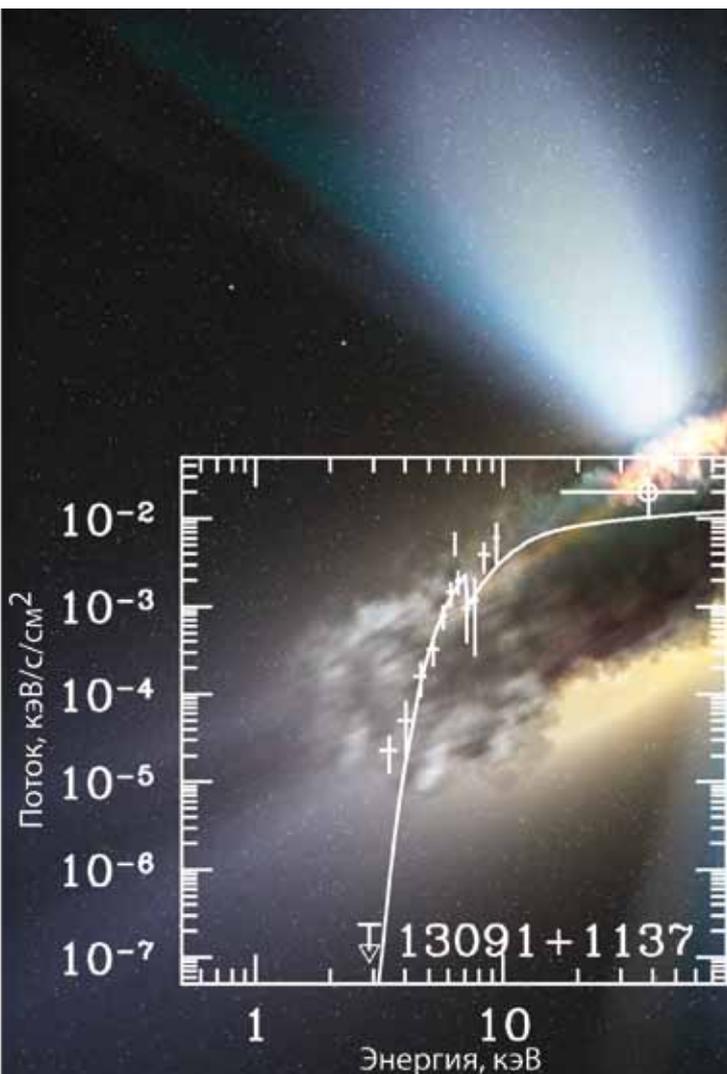
Открытие линий радиоактивного титана в остатке вспышки Сверхновой SN1987A

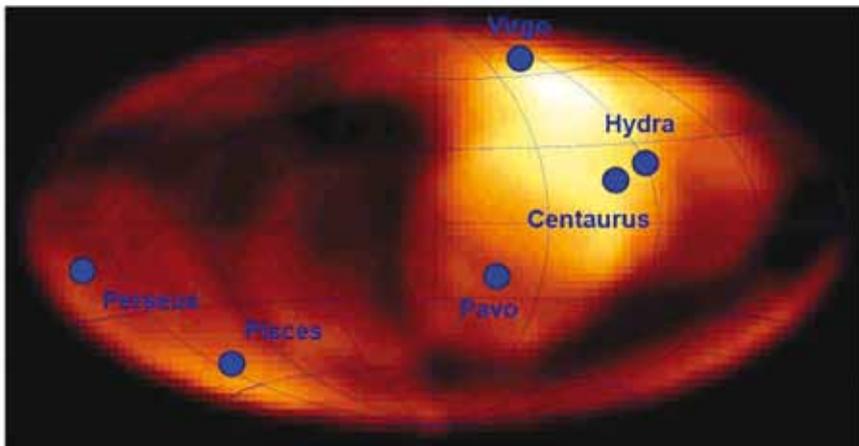
Считается, что распад радиоактивного ^{44}Ti дает энергию для инфракрасного, оптического и ультрафиолетового излучения остатка сверхновой после полного распада радиоактивных ^{56}Co и ^{57}Co (изотопов, обеспечивающих энергетику

остатка в первые 3-4 года после взрыва) и до начала активного взаимодействия разлетающейся оболочки с окружающей средой. Однако, до последнего времени жесткое и гамма-излучение от этого распада было надежно зарегистрировано лишь от остатка Кассиопея А, подводя нас к выводу, что заметный выход ^{44}Ti при взрывном нуклеосинтезе имеет место лишь в исключительных случаях. В результате проведенных обсерваторией ИНТЕГРАЛ глубоких (с экспозицией более 6 млн. сек) наблюдений Большого Магелланова Облака от остатка Сверхновой SN1987A было зарегистрировано жесткое рентгеновское излучение в линиях на энергиях 67.9 и 78.4 кэВ, связанное с распадом радиоактивного ^{44}Ti . Это первое прямое доказательство образования титана в момент взрыва этой уникальной сверхновой, ближайшей к нам за последние 400 лет. Измеренные потоки излучения позволили оценить количество ^{44}Ti , синтезированного при взрыве Сверхновой $(3.1 \pm 0.8) \times 10^{-4}$ от массы Солнца, и объяснить наблюдающееся поведение яркости сверхновой в последние 20 лет (Гребенев и др. 20126).

Аккреция вещества на сверхмассивные черные дыры в активных ядрах галактик

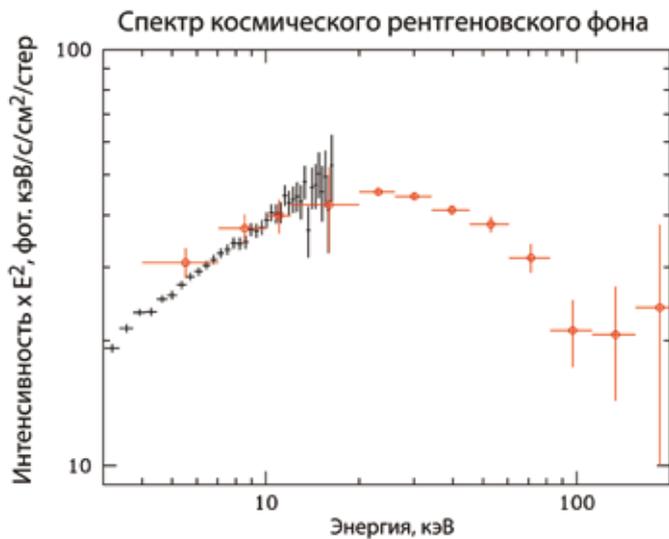
В ядрах галактик находятся черные дыры с массой от миллионов до миллиардов масс Солнца, так называемые сверхмассивные черные дыры. Эти компактные объекты образовались в раннюю эпоху формирования галактик, но многие из них продолжают расти в настоящее время за счет аккреции межзвездного газа. До недавнего времени поиски таких "активных ядер галактик" (АЯГ) велись главным образом в видимом и мягком рентгеновском диапазонах энергий, поэтому в основном обнаруживались АЯГ так называемого первого типа. Жесткий рентгеновский обзор неба, составленный по данным наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ, позволил впервые провести систематический поиск АЯГ второго типа, в которых сверхмассивная черная дыра скрывается от наблюдателя за толстым слоем пыли и холодного газа (Сазонов и др. 2007, 2012). Всего ИНТЕГРАЛ обнаружил более 200 АЯГ, в основном расположенных в близкой Вселенной, из которых примерно половину составляют АЯГ второго типа. Для детального исследования этих объектов проводится обширная программа наблюдений на рентгеновских, оптических и инфракрасных телескопах. Среди наиболее интересных полученных результатов - обнаружение "скрытых" АЯГ и доказательство того, что доля АЯГ второго типа падает с увеличением светимости.





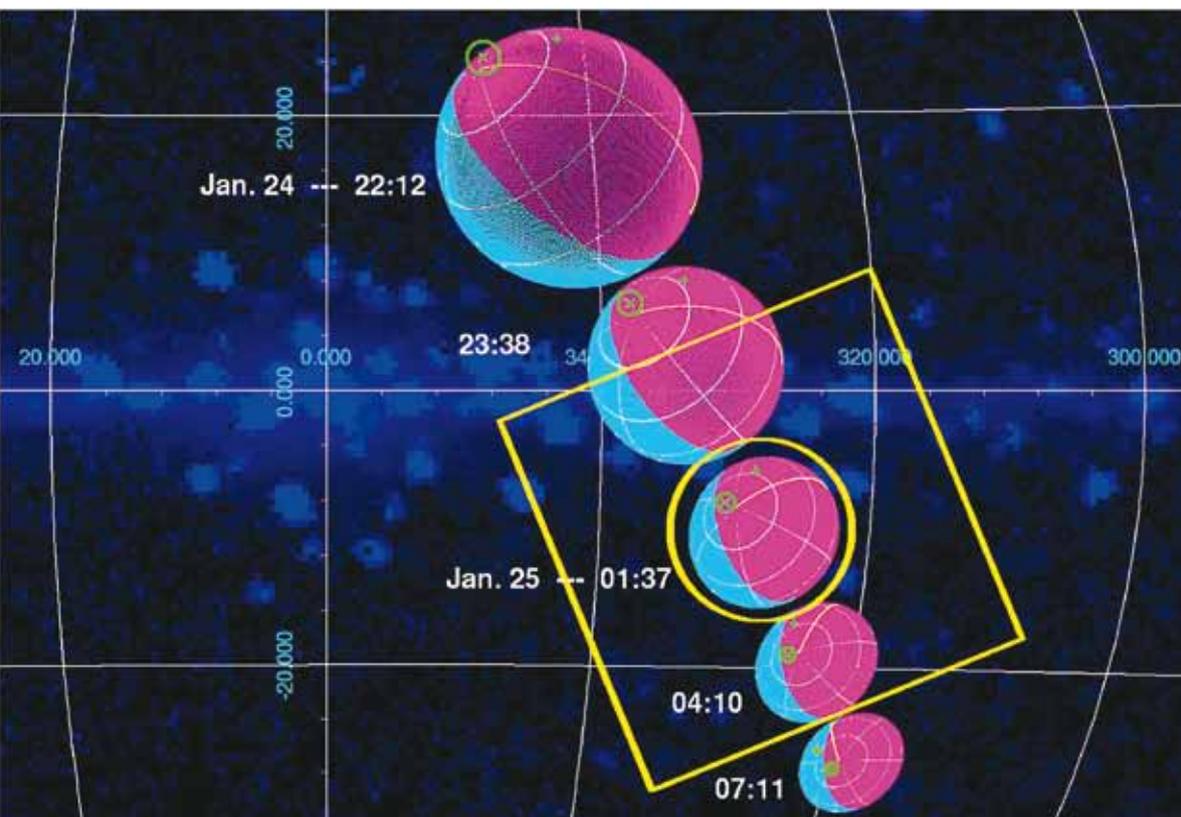
На карте распределения АЯГ, зарегистрированных ИНТЕГРАЛОм, четко прослеживаются крупные структуры в близкой Вселенной: сверхскопления галактик (в созвездиях Дева, Гидра, Павлин, Персей, Рыба и Центавр) и пустоты с характерными размерами в десятки миллионов световых лет. Это доказывает то, что обзоры АЯГ, в том числе далеких квазаров, могут быть эффективным инструментом исследования крупномасштабной структуры Вселенной.

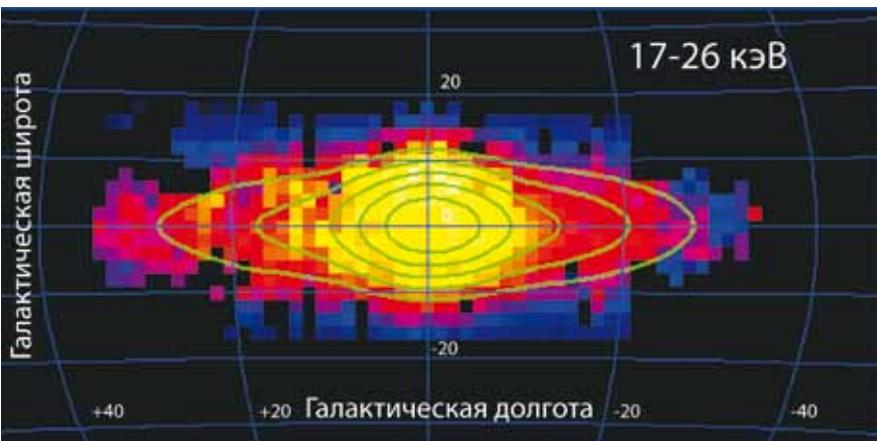
Высокоточные измерения космического фонового излучения в жестком рентгеновском диапазоне



Активные ядра галактик вносят основной вклад в космический рентгеновский фон -- излучение, пронизывающее космическое пространство вокруг нас. Проведенные в стандартном рентгеновском диапазоне (на энергиях ниже 10 кэВ) с помощью обсерваторий XMM-Newton и Chandra глубокие обзоры позволили разрешить около 80% фона на отдельные АЯГ. К сожалению, чувствительность современных жестких рентгеновских детекторов, включая приборы обсерватории ИНТЕГРАЛ, недостаточна для того, чтобы разрешать рентгеновский фон на отдельные источники в более жестком рентгеновском диапазоне, на который приходится максимум его интенсивности. Однако важную недостающую информацию об истории роста сверхмассивных черных дыр во Вселенной можно получить и другим способом -- измеряя с хорошей точностью спектр жесткого рентгеновского фона.

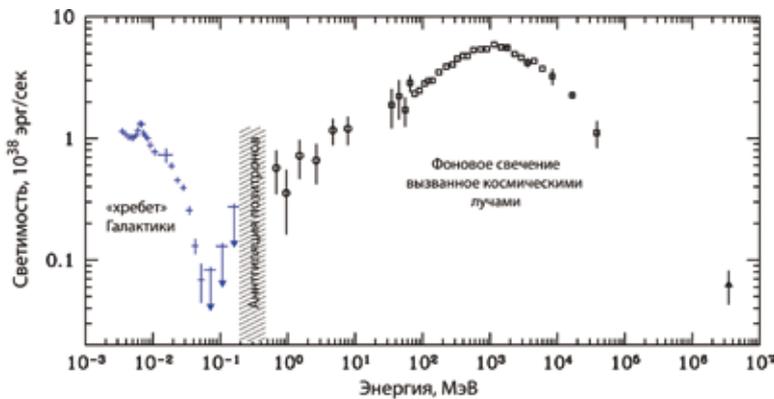
Специально для решения этой задачи в 2006 г. российскими учеными была предложена и выполнена уникальная программа наблюдений диска Земли обсерваторией ИНТЕГРАЛ. При этом Земля использовалась как экран, закрывающий от нас излучение далеких источников, находящихся в поле зрения приборов обсерватории (на рисунке показаны квадратом и кружком) и составляющих фон. В результате впервые удалось построить спектр фона в широком диапазоне энергий от 3 до 150 кэВ с точностью около 10 процентов.





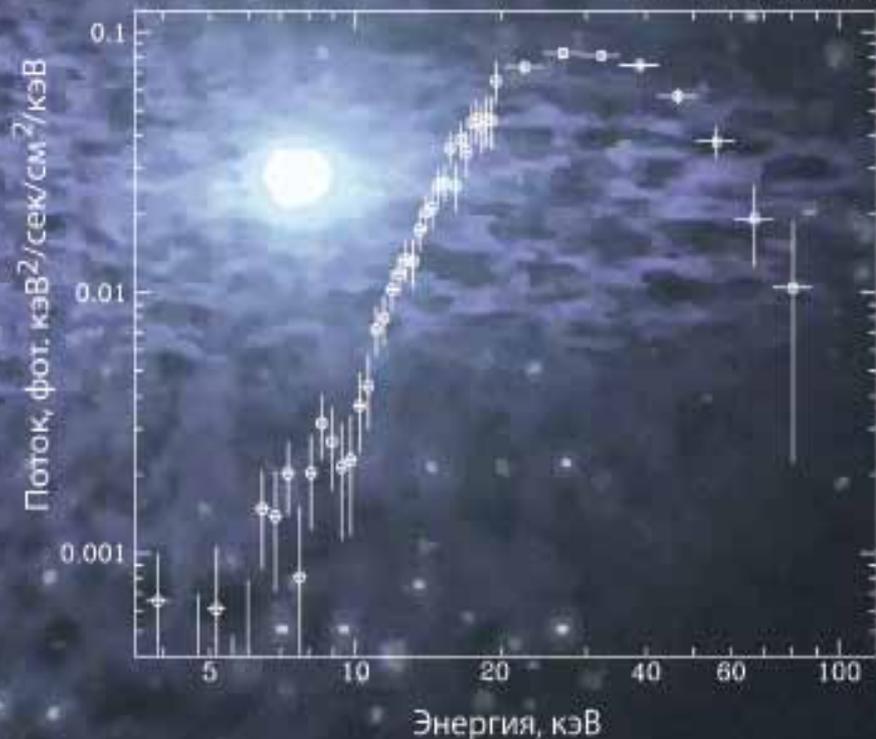
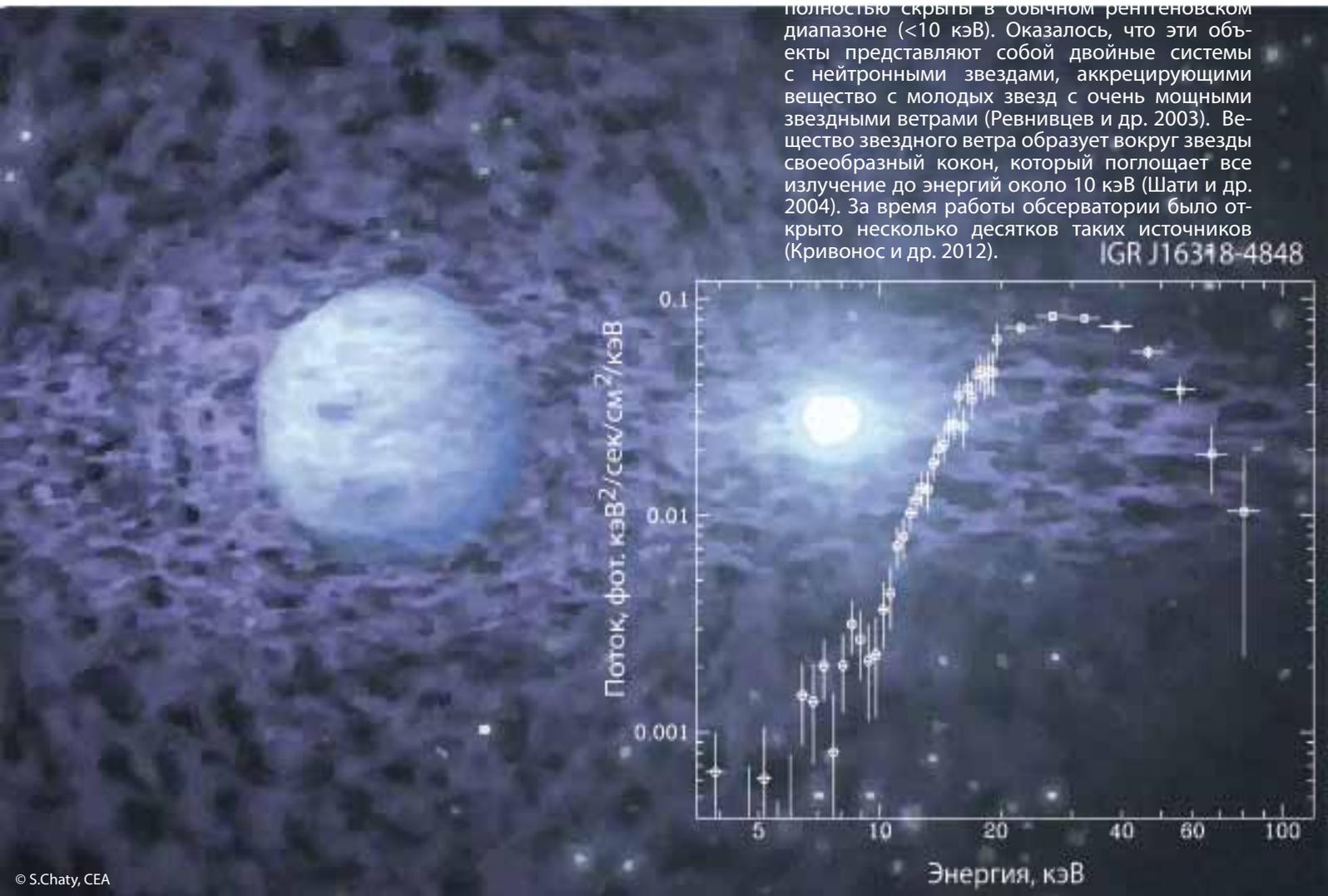
Рентгеновский "хребет" Галактики

Сочетание большого поля зрения и хорошего углового разрешения телескопов обсерватории ИНТЕГРАЛ впервые позволили получить карты и спектры так называемого "хребта Галактики" - слабого протяженного рентгеновского излучения вдоль галактической плоскости, представлявшего собой загадку в течении более 25 лет. Благодаря наблюдениям обсерватории ИНТЕГРАЛ удалось показать, что излучение «хребта Галактики» в жестком рентгеновском диапазоне 10-60 кэВ представляет собой суммарное излучение миллионов аккрецирующих белых карликов (Ревнивцев и др. 2006б, Кривонос и др. 2007). На энергиях выше 100 кэВ вклад этих источников становится малым и в протяженном излучении Галактики начинает преобладать излучение межзвездной среды (Буше и др. 2008, 2011).



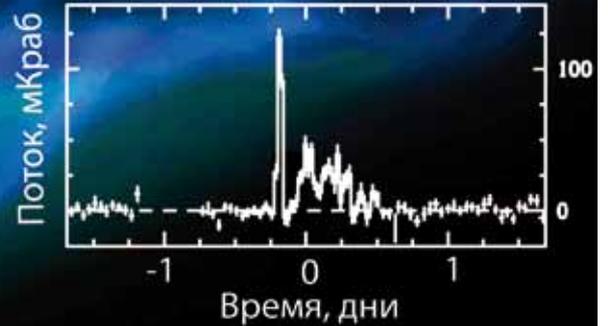
Нейтронные звезды в коконах пыли и газа

Уже первые наблюдения нашей Галактики обсерваторией ИНТЕГРАЛ принесли открытие целого семейства таких систем (Курвуазье и др. 2003). Являясь яркими объектами жесткого рентгеновского неба, они были практически полностью скрыты в обычном рентгеновском диапазоне (<10 кэВ). Оказалось, что эти объекты представляют собой двойные системы с нейтронными звездами, аккрецирующими вещество с молодых звезд с очень мощными звездными ветрами (Ревнивцев и др. 2003). Вещество звездного ветра образует вокруг звезды своеобразный кокон, который поглощает все излучение до энергий около 10 кэВ (Шати и др. 2004). За время работы обсерватории было открыто несколько десятков таких источников (Кривонос и др. 2012).



Вспыхивающие нейтронные звезды в двойных системах со сверхгигантами

Долгое время работы обсерватории ИНТЕГРАЛ и большое поле зрения ее основных инструментов позволили открыть новый тип поведения нейтронных звезд, аккрецирующих вещество с массивных звезд. Было обнаружено, что время от времени такие объекты вспыхивают на короткий период времени, повышая свою яркость иногда в сотни и тысячи раз (Гребенев и др. 2003, Смит и др. 2006, Негуерела и др. 2006, Сгера и др. 2006). Наиболее многообещающей моделью, объясняющей такое поведение, является предположение, что короткие и яркие вспышки в этих системах являются результатом эпизодического преодоления веществом звездного ветра центробежного барьера на границе магнитосферы нейтронной звезды. В обычном (выключенном) состоянии системы вещество звездного ветра не попадает на поверхность вращающейся нейтронной звезды - его останавливает ее магнитное поле, которое фактически отбрасывает падающее вещество наподобие пропеллера (Гребенев, Сюняев 2007).

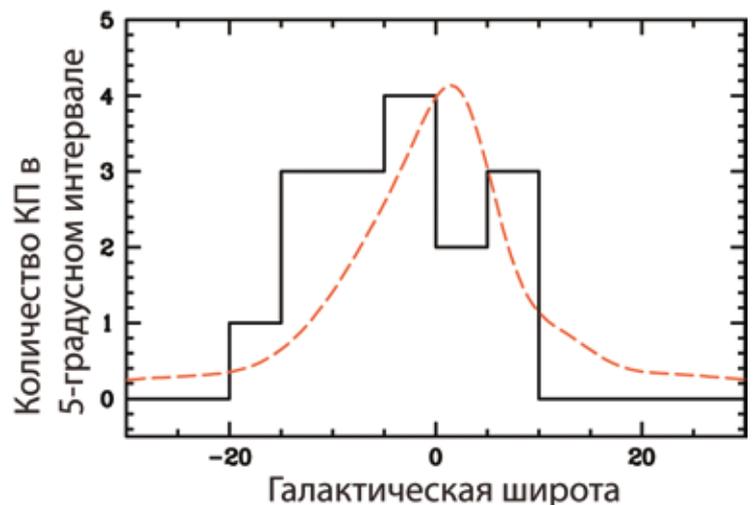
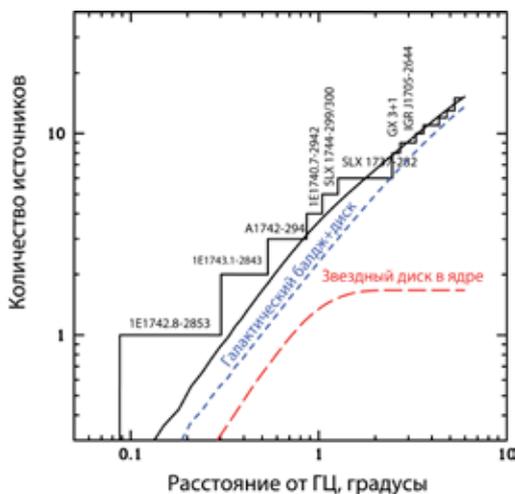


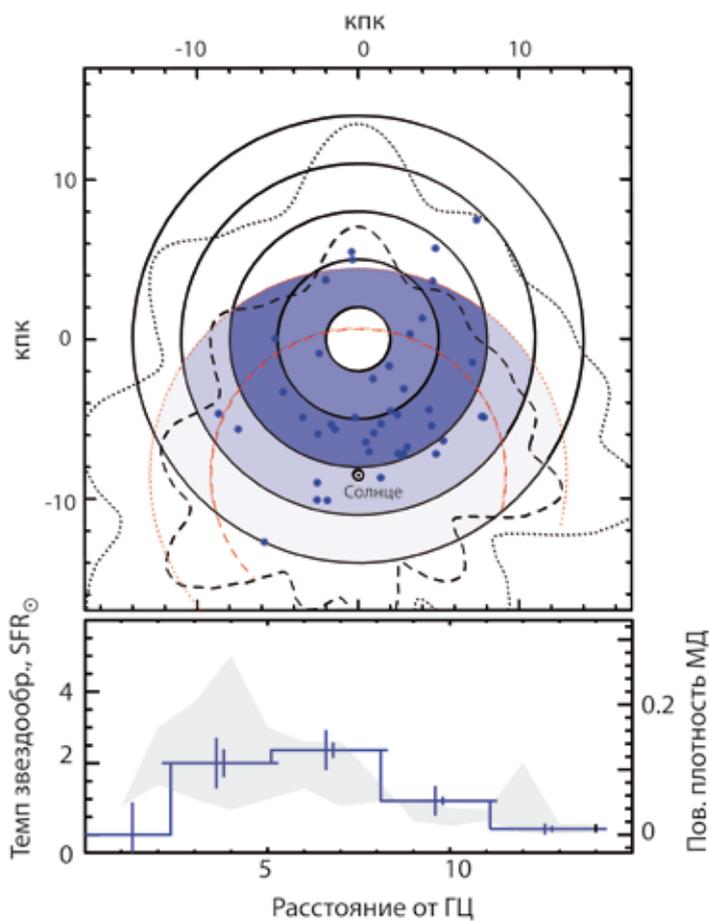
© C. Carreau, ESA

Статистика релятивистских объектов в Галактике

Обзор неба обсерватории ИНТЕГРАЛ позволил измерить свойства популяций релятивистских компактных объектов в двойных системах. Было обнаружено большое количество нейтронных звезд в двойных системах с маломассивными звездами, а также большое количество аккре-

цирующих белых карликов и измерены пространственные характеристики этих популяций (Ревнивцев и др. 2008а,б). На рисунке показаны измеренные распределения маломассивных рентгеновских двойных систем (слева) и аккрецирующих белых карликов/катаклизмических переменных (справа) с кривыми, показывающими их распределения в рамках принятой модели.



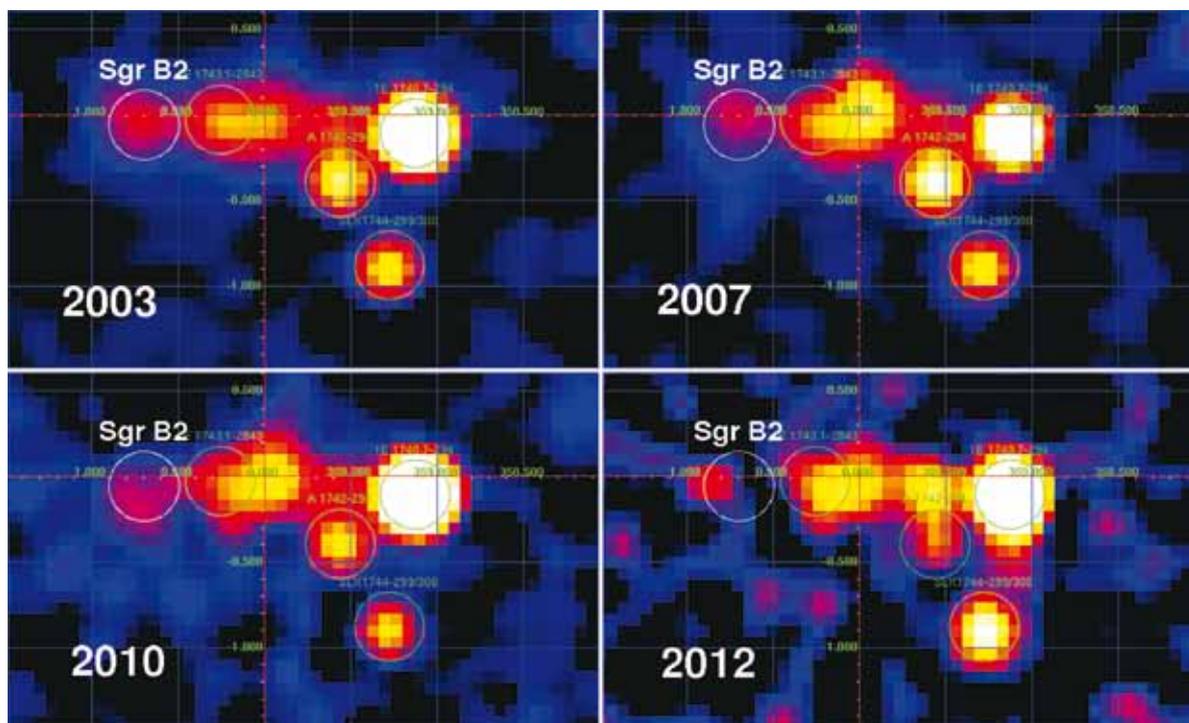


Двойные системы, в которых компактные объекты аккрецируют вещество с массивных звезд, располагаются близко к плоскости Галактики, поэтому их излучение сильно поглощается в межзвездной среде. Кроме того, такие двойные системы часто находятся в поглощающем "коконе", образованном из звездного ветра массивной звезды (см. выше). Таким образом, для изучения популяции массивных двойных систем жесткий рентгеновский диапазон инструментов обсерватории ИНТЕГРАЛ подходит наилучшим образом. В результате проведенного обзора Галактики, на который было потрачено более 130 миллионов секунд (~4 года), обсерватория открыла в 3 раза больше массивных двойных систем, чем было известно до ее запуска. Анализ популяции массивных двойных систем впервые позволил измерить распре-

деление их поверхностной плотности в Галактике, показать, что оно коррелирует с локальным темпом звездообразования (Лутовинов и др. 2005б, 2012г), а также сравнить расположение массивных рентгеновских двойных систем относительно областей их предполагаемого образования (Бодагхи и др. 2012). На рисунке вверху показан вид сверху нашей Галактики и положение известных массивных двойных систем; внизу — поверхностная плотность этих объектов как функция галактоцентрического расстояния.

Активность сверхмассивной черной дыры в нашей Галактике

Телескопы обсерватории ИНТЕГРАЛ впервые зарегистрировали жесткое рентгеновское излучение от гигантского молекулярного облака Sgr B2, находящегося в 10 парсеках от сверхмассивной черной дыры в центре нашей Галактики Sgr A* (Ревнивцев и др. 2004б). По всей видимости, оно формируется в результате комптоновского отражения излучения сверхмассивной черной дыры, бывшей около 300 лет назад в миллион раз ярче, чем сейчас. Высокоточные измерения рентгеновской яркости молекулярного облака за десятилетний период наблюдений позволили обнаружить затухание этого излучения (Терье и др. 2010). Результаты этих исследований говорят о том, что "наша" сверхмассивная черная дыра не всегда была такой тусклой как сейчас. В последние годы интерес к мониторингованию излучения Sgr A* возрос многократно из-за обнаружения небольшого газового облака G2, летящего практически прямо в черную дыру. Согласно последним измерениям это газовое облако подойдет к черной дыре Sgr A* на расстоянии около 270 астрономических единиц в 2013 году и начнет разрушаться под действием приливных сил, что может привести к новому всплеску ее активности.

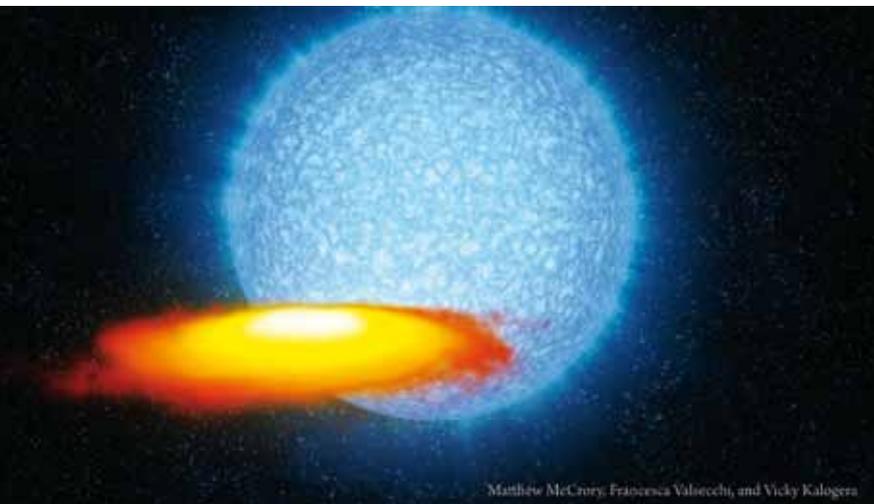


Широкополосные спектры излучения компактных объектов

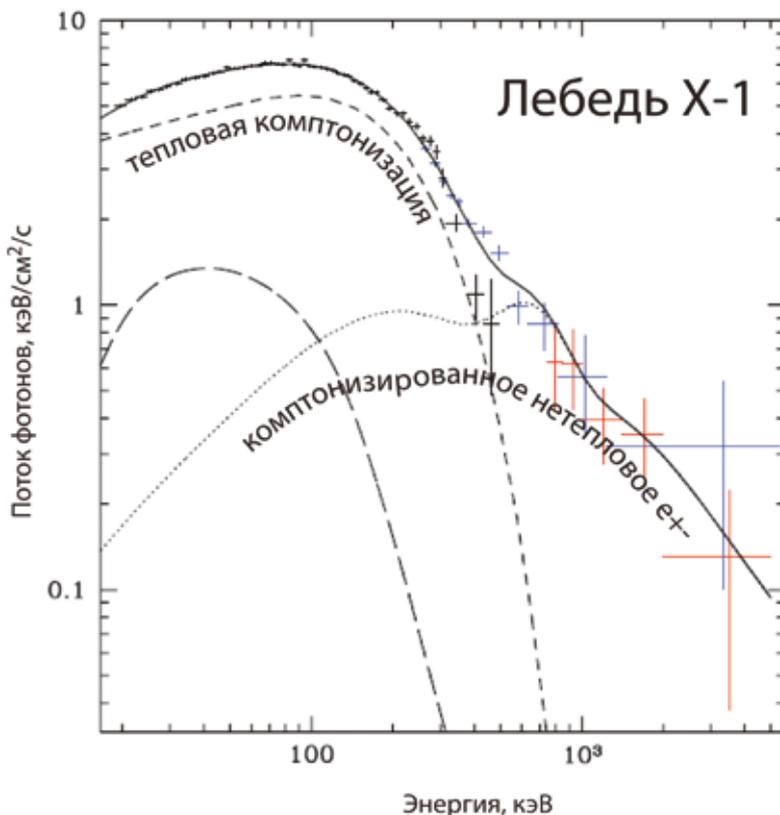
Известно, что большая часть излучения аккрецирующих компактных источников возникает в результате теплового излучения вещества, разогретого до температур в десятки миллионов градусов, т.е. в несколько кэВ; при этом излучение может возникать как в оптически толстом, так и в оптически тонком режимах. Использование новых высокочувствительных инструментов, в частности телескопов обсерватории ИНТЕГРАЛ, впервые показало, что значительная часть аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр излучает и на энергиях 100-200

кэВ и выше. В частности, впервые удалось получить свидетельства в пользу горячей короны вокруг аккреционного диска в системе SS433 — единственной известной в нашей Галактике рентгеновской двойной системы, находящейся в сверхкритическом режиме аккреции (Черепашук и др. 2003, 2005, 2007, 2009).

Важно отметить, что возможности обсерватории ИНТЕГРАЛ в этом диапазоне энергий превышают возможности всех когда-либо работавших обсерваторий и не будут превзойдены в течение еще долгого времени. Высокоточные измерения спектра излучения хорошо известной черной дыры Лебедь X-1 показывают, что в формировании излучения черной дыры на энергиях выше 100-200 кэВ важную роль играет ряд нетепловых процессов (Здзиарски и др. 2012).



Matthew McCrory, Francesca Valocchi, and Vicky Kalogera

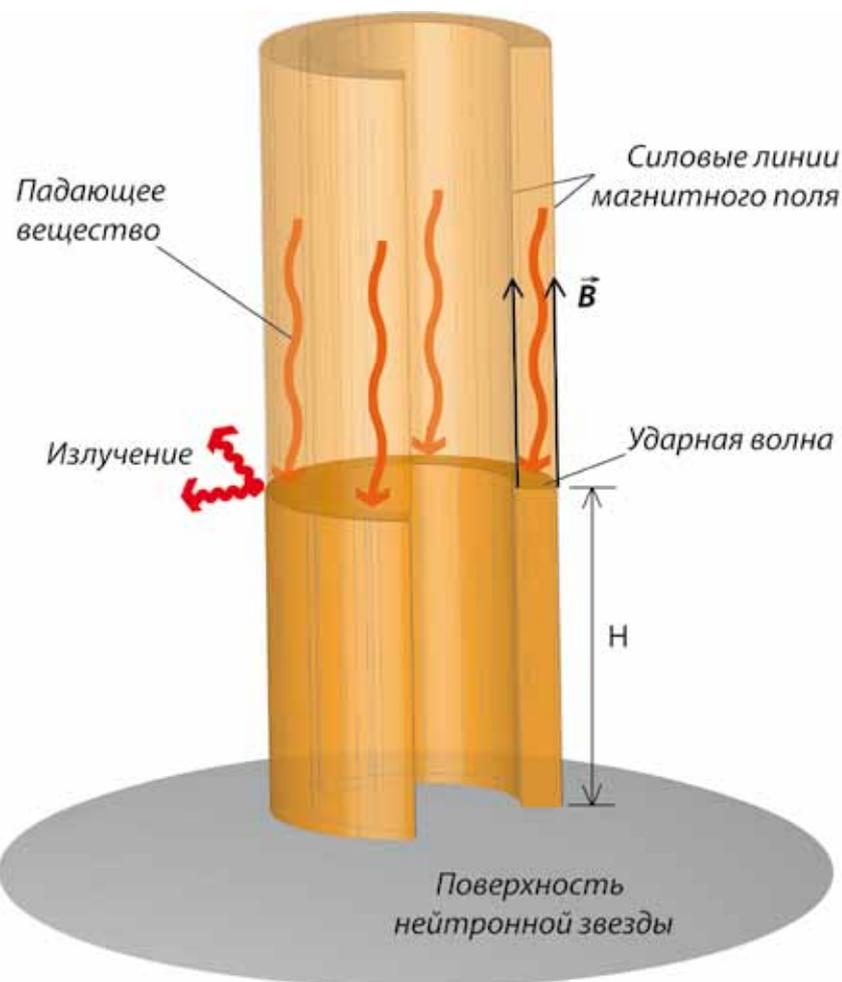


Рентгеновские пульсары

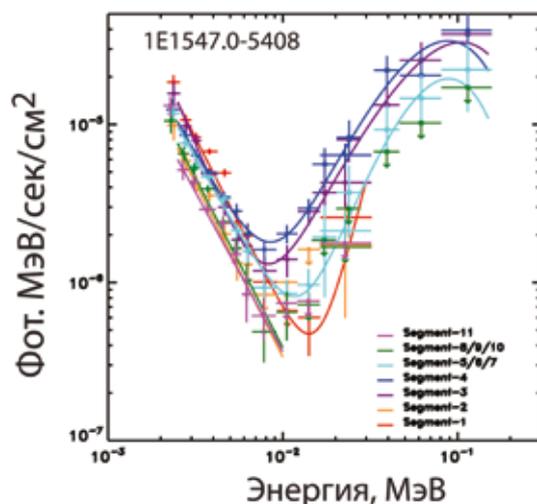
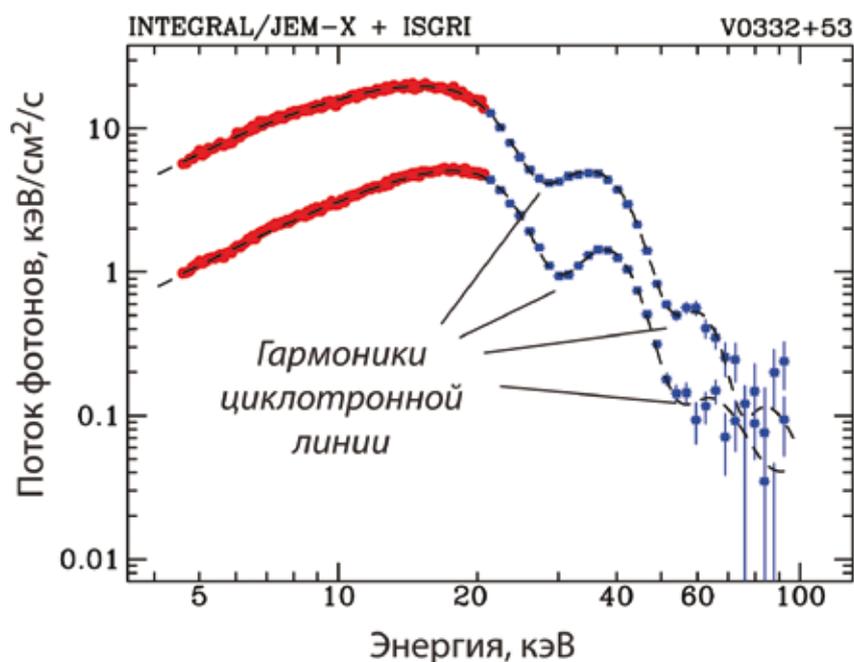
Рентгеновские пульсары являются уникальными лабораториями для исследования взаимодействия излучения с веществом в сверхсильных магнитных полях. Колоссальная напряженность магнитного поля нейтронных звезд (10^{12} Гс) приводит к образованию линий поглощения (так называемых циклотронных линий) в их энергетических спектрах, что связано с резонансным рассеянием фотонов электронами в магнитном поле. Измерение положения этой спектральной особенности является единственным прямым способом определения напряженности магнитного поля у поверхности нейтронных звезд.

Благодаря широкому интервалу энергий приборов обсерватории ИНТЕГРАЛ, а также длительным наблюдениям и высокой чувствительности, в спектрах целого ряда рентгеновских пульсаров удалось обнаружить и измерить положение не только фундаментальной, но и более высоких гармоник (Кретчмар и др. 2004, Крейкенбом и др. 2005). Более того, было обнаружено и впервые детально исследовано изменение энергии циклотронных линий в зависимости от темпа аккреции на нейтронную звезду (Цыганков и др., 2006, 2007, 2010). Проведенные измерения и последующий анализ позволили сделать выводы о строении и изменении геометрии аккреционных шапок (колонок) нейтронных звезд с точностью до сотен метров (Цыганков и др. 2010, Бекер и др. 2012).

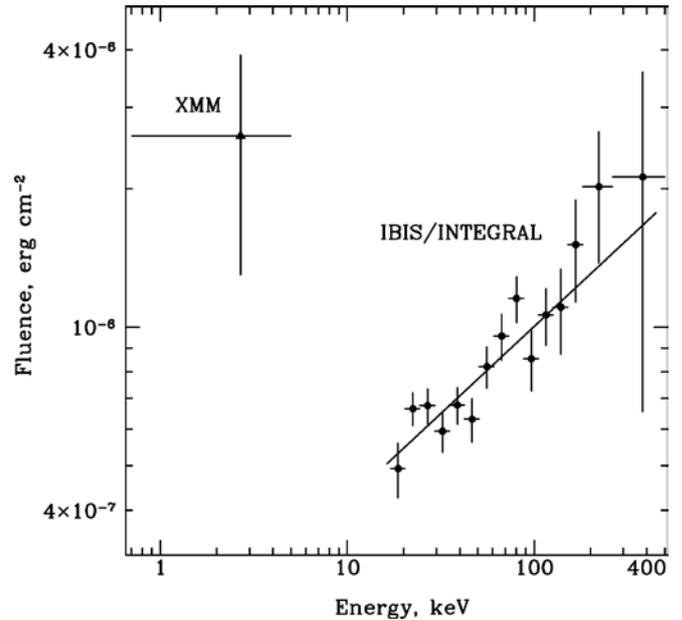
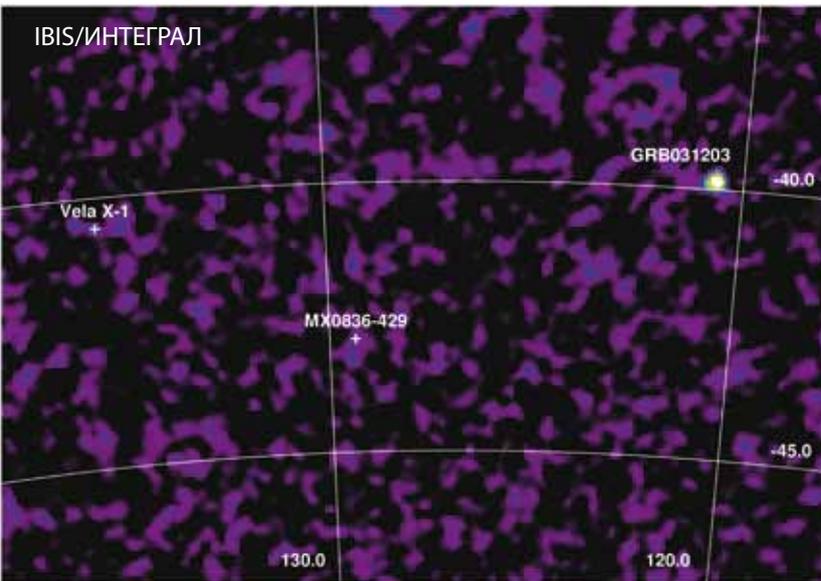
Магнетары



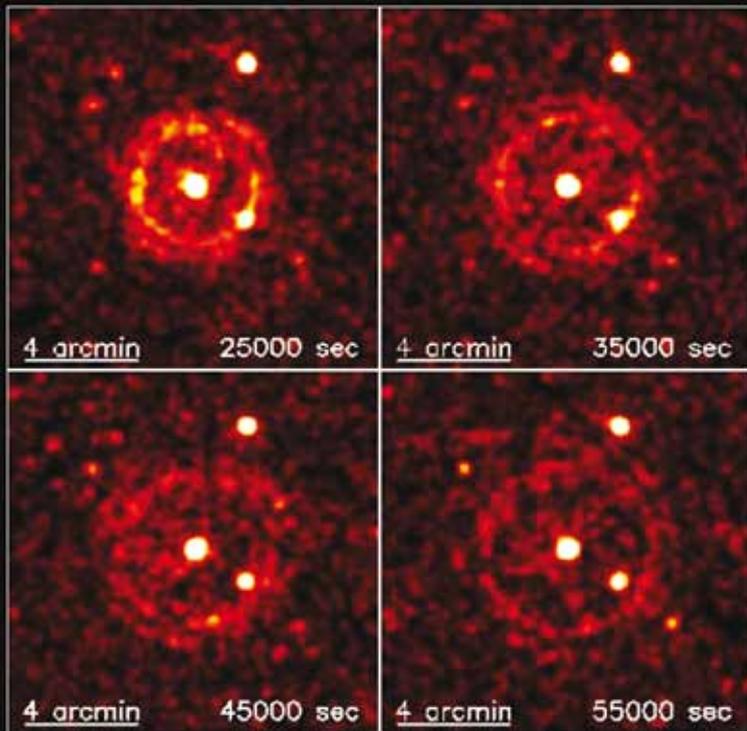
Одним из наиболее неожиданных открытий обсерватории ИНТЕГРАЛ стало обнаружение мощного жесткого рентгеновского излучения от одиночных нейтронных звезд со сверхсильными магнитными полями (10^{14-15} Гс) — магнетаров (Куипер и др. 2004, 2012). Излучение остывающей поверхности этих нейтронных звезд было известно достаточно давно, однако благодаря высокочувствительным измерениям обсерватории ИНТЕГРАЛ оказалось, что кроме этого излучения большую роль играет образование электрон-позитронных пар в процессе перестройки сверхсильных магнитных полей магнетара. Было обнаружено, что помимо гигантских всплесков (впервые обнаруженных на советских аппаратах Венера-11,12 в 1979 году, Мазец и др. 1979) магнетары генерируют большое количество коротких всплесков разной амплитуды (Готз и др. 2006), а также постоянный поток (Мольков и др. 2005). Данные обсерватории ИНТЕГРАЛ показали, что излучение магнетаров достигает энергий как минимум 300-400 кэВ. Механизм формирования жесткого рентгеновского и гамма излучения магнетаров до сих пор не до конца ясен, хотя было предложено несколько моделей, качественно объясняющих их излучение (Дункан и Томсон 1992, Белобородов 2009, 2010).



Гамма-всплески



GRB 031203 XMM—Newton observation



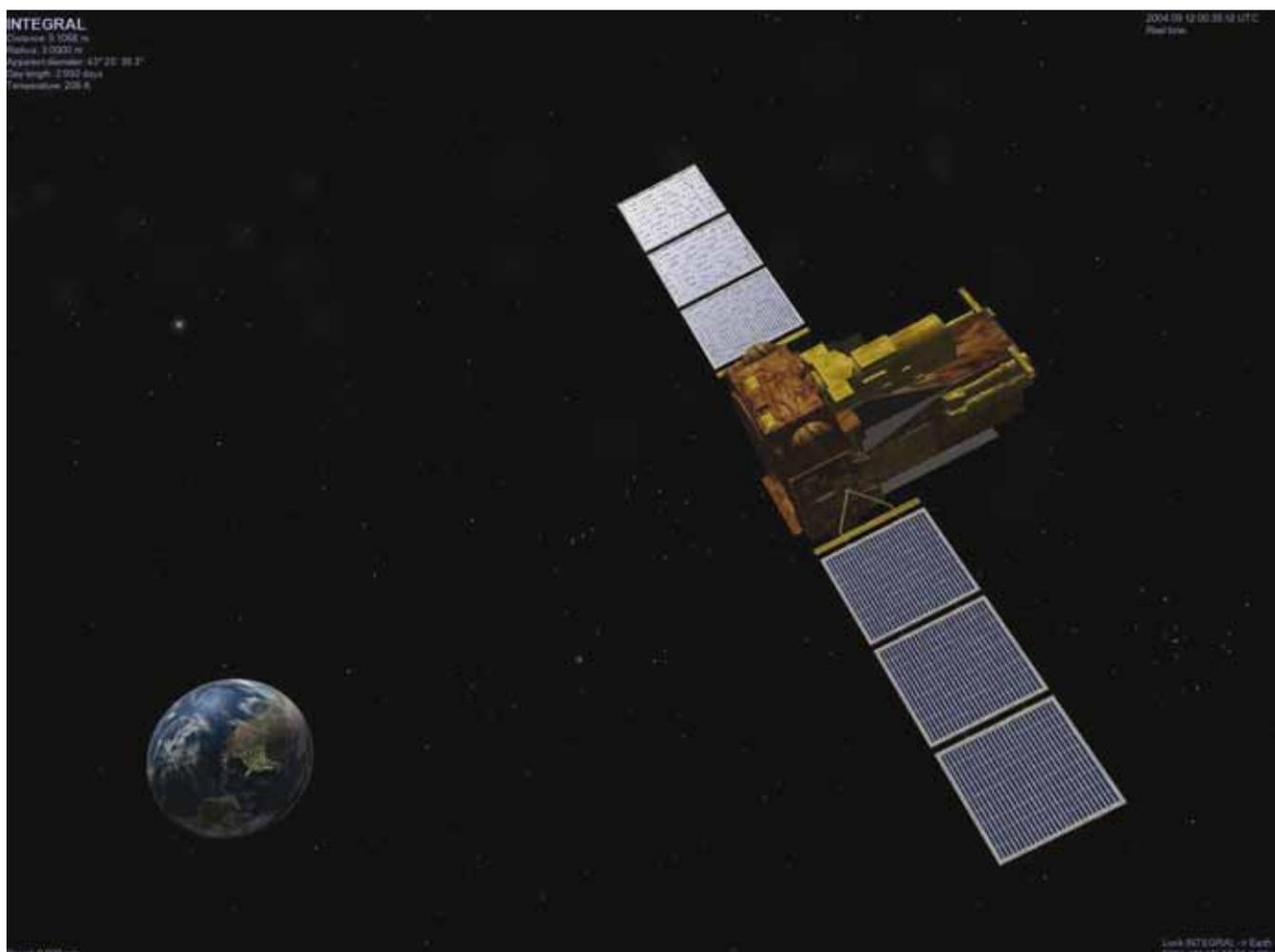
ESA, S. Vaughan (University of Leicester)

Гамма-всплески до недавнего времени были одной из наиболее интересных загадок астрофизики высоких энергий. Сейчас мы знаем, что по крайней мере часть из них связана с определенными типами взрывов сверхновых. Благодаря большому полю зрения основных инструментов, обсерватория ИНТЕГРАЛ регистрирует и получает высококачественные данные с приблизительно десяти гамма-всплесков в год. Некоторые из этих гамма-всплесков дали существенно новую информацию. Например, всплеск GRB 031203 оказался одним из самых близких. Этот всплеск является, по-видимому, представителем большой популяции гамма-всплесков с малой светимостью, которая до сих пор практически не наблюдалась (Сазонов и др., 2003). Интересно также отметить, что от этого события был обнаружен эффект рентгеновского эха, связанный с рассеянием рентгеновского излучения всплеска на пыли в нашей Галактике. Это означает, что примерно одновременно с жестким рентгеновским излучением, обнаруженным обсерваторией ИНТЕГРАЛ, гамма-всплеск сопровождался мощной рентгеновской вспышкой.

Заключение

В 2010 году специальная комиссия ЕКА, рассмотрев полученные результаты и возможные перспективы, признала работу обсерватории ИНТЕГРАЛ успешной и требующей дальнейшего продолжения. Решением ЕКА финансирование обсерватории (наземная поддержка, прием и передача данных) гарантировано до конца 2014 г., с возможностью его продления до конца 2016 г.

Принимая во внимание оставшиеся запасы топлива на борту и хорошее состояние телескопов, есть все основания полагать, что обсерватория ИНТЕГРАЛ будет работать на орбите еще несколько лет, а значит ученых ждут новые неожиданные открытия и результаты.



В подготовке материалов участвовали:

Лутовинов А.А.
Ревнивцев М.Г.
Сазонов С.Ю.
Гребенев С.А.
Чуразов Е.М.
Цыганков С.С.
Мольков С.В.
Кривонос Р. А.
Павлинский М.Н.

Макет:

Захаров А.Н.

Верстка:

Кораблева Е.О.