

3.6.1. ПРОЕКТ ГАММА-400. ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРВИЧНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ 30 ГЭВ – 1 ТЭВ

Научные цели

1 Измерения энергетических спектров диффузного гамма-излучения Галактики и гамма-излучения некоторых астрономических объектов вплоть до энергий 1 ТэВ.

2. Исследование моноэнергетических гамма-линий, образованных при аннигиляции нейтралов, суперсимметричных частиц, которые, как полагают, образуют Темное вещество.

3. Длительные наблюдения (около 5 лет) интенсивных дискретных гамма-источников.

3.6.1.1. Состав гамма-телескопа ГАММА-400

1. Системы первичного отбора гамма-квантов: вето-детектор (АС), свинцовый конвертор (К), сцинтилляторы (СВ и СН) для регистрации продуктов конверсии.

1. Координатная система (КД), определяющая направление заряженных частиц.

1. Система для измерения энергии электронного каскада (семплингвый калориметр СК) (рис. 1).

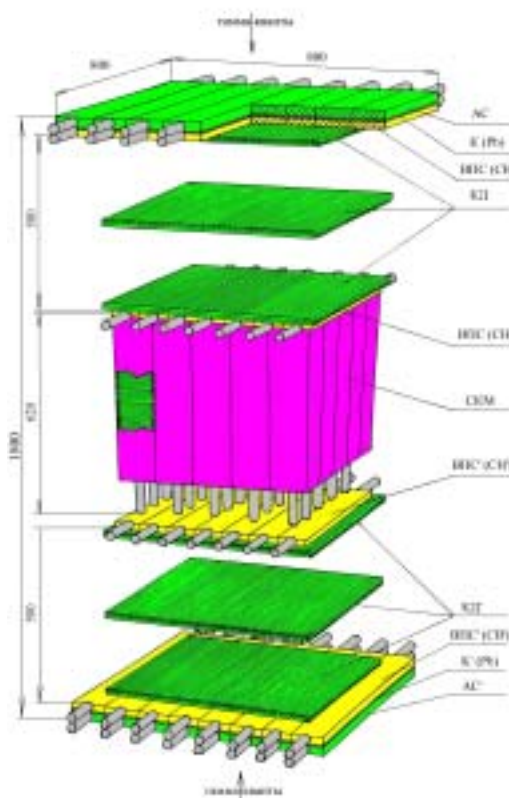


Рис. 1. Гамма-телескоп ГАММА-400

3.6.1.2. Особенности гамма-телескопа ГАММА-400

1. Все используемые детекторы созданы на основе пластических сцинтилляторов. Обеспечивается высокая надежность и низкая стоимость.

2. Имеется специальная система исключения влияния частиц обратного тока, возникших после рассеяния в калориметре и движущихся к вето-детектору. Обеспечивается возможность измерения энергии вплоть до нескольких терраэлектронвольт.

3. Детекторы координатной системы представляют собой узкие полосы, использующие для собирания света спектросмещающее оптическое волокно и низковольтные кремниевые фотоумножители (Si-ФЭУ) в качестве светоприемников. Обеспечивается низкое энергопотребление и стоимость.

4. Используются два комплекта системы отбора гамма-квантов, расположенных над и под калориметром (рис. 2). При этом геометрический фактор удваивается при небольшом увеличении веса телескопа.

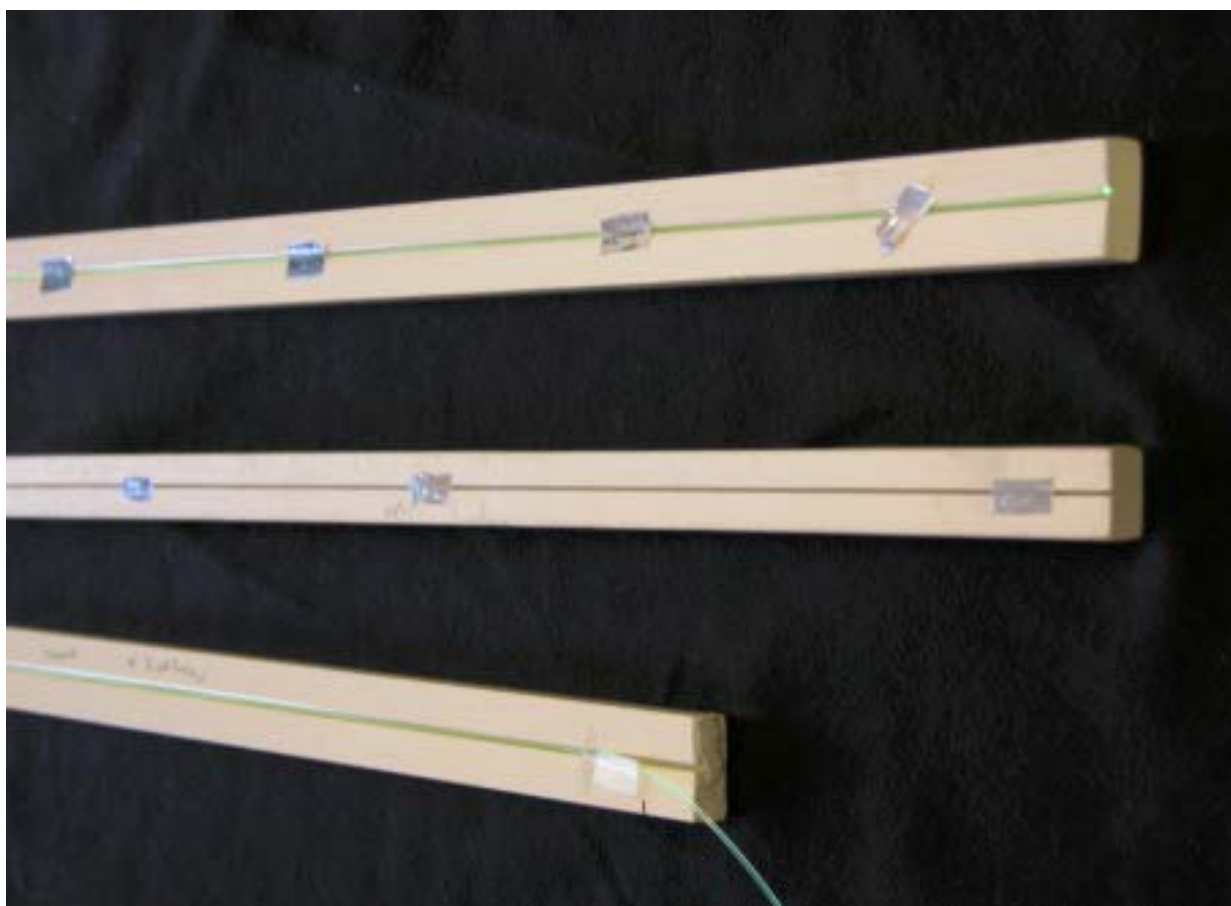


Рис. 2. Фотография сцинтилляционных полос со спектросмещающим волокном

5. Калориметр собирается из 25 отдельных модулей (рис. 3). Каждый модуль семплингового типа состоит из чередующихся слоев свинца (толщина 0,55 мм) и сцинтиллятора (толщина 1,5 мм). Общая толщина калориметра — 18 рад. ед. (200 слоев свинца и сцинтиллятора). Сцинтилляционный свет собирается с помощью 144 спектросмещающих волокон, пронизывающих все сцинтилляционные слои, и направляется на вакуумный ФЭУ (рис. 4, 5).

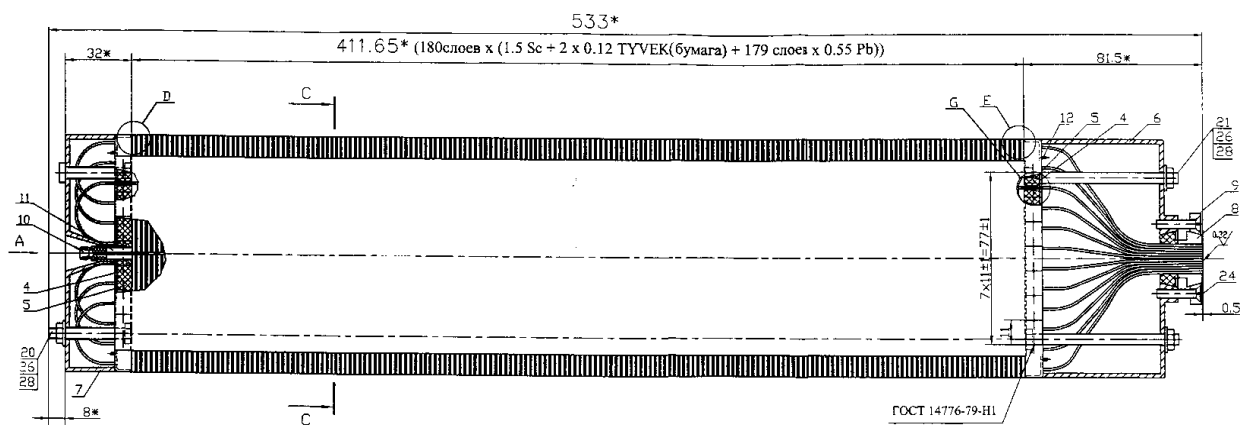


Рис. 3. Схема модуля калориметра

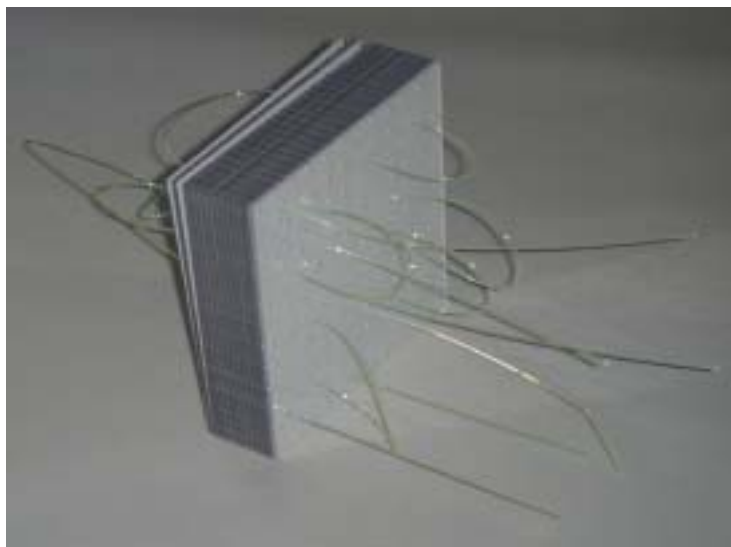


Рис. 4. Элемент калориметра

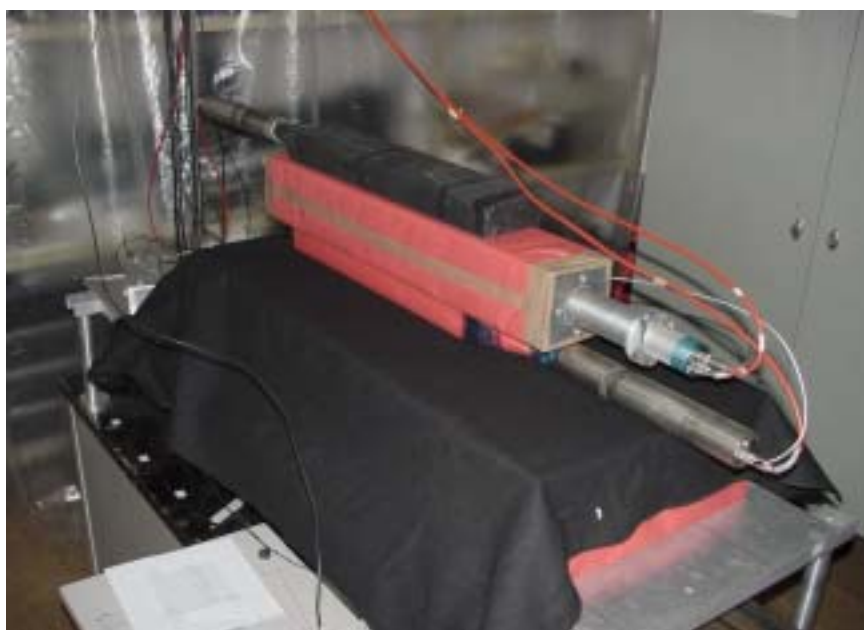


Рис. 5. Измерения характеристик модуля на частицах космических лучей

Характеристики ГАММА-400

Геометрический фактор	1 м ² ср
Эффективность конверсии.....	0,7
Точность измерения направления гамма-квантов ($E_\gamma = 1$ ТэВ).....	1°
Угловое разрешение для точечных источников	0,1°
Энергетическое разрешение ($E_\gamma = 1$ ТэВ).....	1,8 %
Масса.....	800 кг

Характеристики Si-ФЭУ

Напряжение питания	20–50 В
Коэффициент усиления.....	10 ⁶
Временное разрешение	30 пс

3.6.1.3. Современное состояние проекта ГАММА-400

1. Выполнены расчеты характеристик телескопа методом Монте-Карло.
2. Разработаны электронные блок-схемы отдельных детекторных систем телескопа.
3. Исследованы характеристики кремниевых фотоумножителей.
4. Лабораторный макет калориметра собран из 9 модулей и на нем проводятся измерения на частицах космических лучей (рис. 6).
5. Макет координатной системы собран и изготовлен.
6. Начаты консультации со специалистами НПО им. Лавочкина по реализации эксперимента ГАММА-400.

**Рис. 6.** Лабораторный макет калориметра

3.6.2. АСТРОФИЗИКА

3.6.2.1. Основные научные результаты. Два года работы обсерватории «ИНТЕГРАЛ»

*Детальные измерения спектра аннигиляции позитронов
в центральной области Галактики обсерваторией «ИНТЕГРАЛ»*

Важнейшим результатом работы обсерватории ИНТЕГРАЛ стало детальное измерение спектра аннигиляции позитронов в центральной области Галактики. Уникальной, по сравнению с другими работающими орбитальными обсерваториями, является способность обсерватории ИНТЕГРАЛ регистрировать ядерные гамма-линии на энергиях от 50 кэВ до 8 МэВ с разрешением в несколько килоэлектронвольт. На рис. 7 показана сглаженная карта излучения нашей Галактики в линии аннигиляции позитронов, полученная в ИКИ РАН. Яркое пятно в центре карты соответствует центральной области Галактики. Детальные измерения показывают, что большая часть излучения сосредоточена в области размером менее 10° вокруг динамического центра Галактики. По полному измеренному потоку излучения было показано, что в этой области каждую секунду аннигилирует около $2 \cdot 10^{43}$ позитронов.

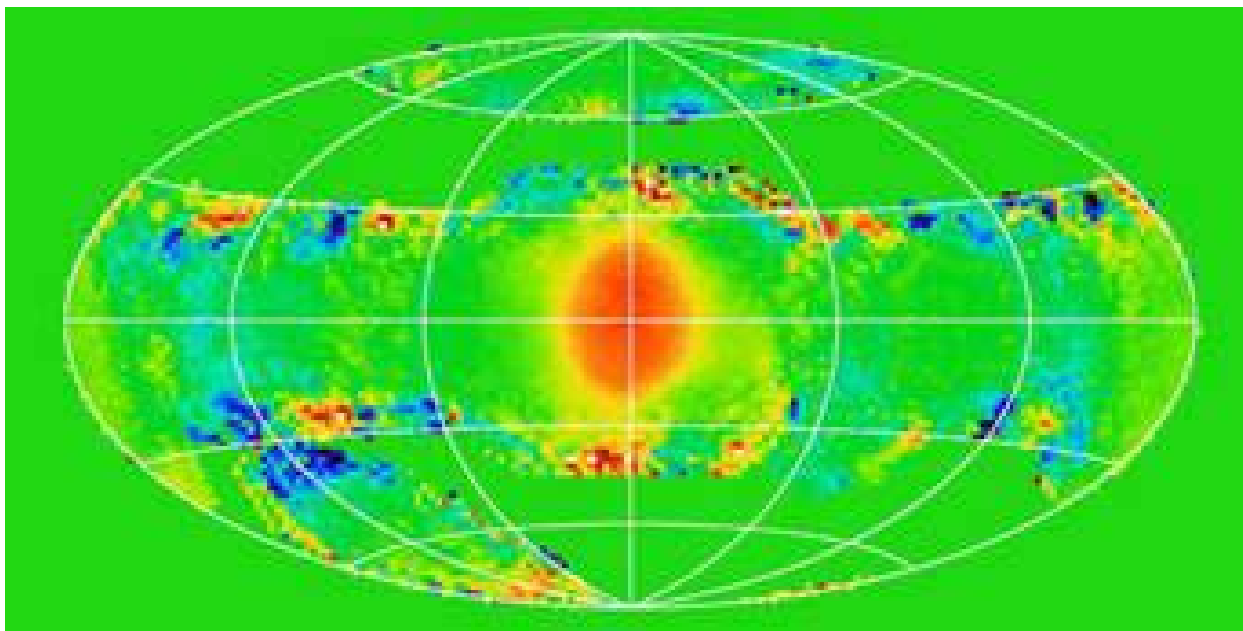


Рис. 7. Сглаженная карта излучения Млечного Пути в линии 511 кэВ по данным обсерватории «ИНТЕГРАЛ». Центральное яркое пятно соответствует области Галактического центра

На рис. 8 представлен спектр аннигиляционного излучения, полученный обсерваторией «ИНТЕГРАЛ», позволяющий получить уникальную информацию о свойствах среды, в которой происходит аннигиляция позитронов.

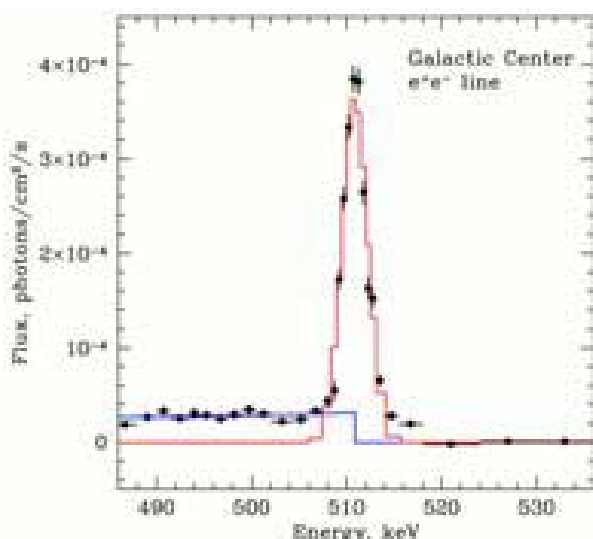


Рис. 8. Спектр аннигиляционного излучения позитронов, измеренный обсерваторией «ИНТЕГРАЛ» из области Галактического центра; красной линией показан профиль линии 511 кэВ, возникающий при двухфотонной аннигиляции; синей линией показан спектр трехфотонного распада позитрония

GRB 031203: гамма-всплеск с необычайно малой энергией

Проанализированы наблюдения в жестких рентгеновских лучах обсерваторией «ИНТЕГРАЛ» гамма-всплеска GRB 031203, второго по близости всплеска с измеренным расстоянием за всю историю наблюдений. Это событие практически не отличается по своим временным и спектральным свойствам от обычных космологических гамма-всплесков. В частности, основная энергия была испущена в виде гамма-фотонов с энергиями выше 200 кэВ. Вместе с тем полная энергия этого всплеска примерно в тысячу раз меньше считавшейся обычной (в предположении изотропного выделения лучистой энергии). Кроме того, GRB 031203 явно нарушает два считавшихся универсальными соотношения между основными энергетическими и временными параметрами гамма-всплесков. Открытие этого всплеска, как и обнаружение другого уникального всплеска GRB 980425, показывает, что во Вселенной существует многочисленная популяция слабых гамма-всплесков, связанных со взрывами сверхновых, а также опровергает представление, что гамма-всплески являются «стандартными свечами».

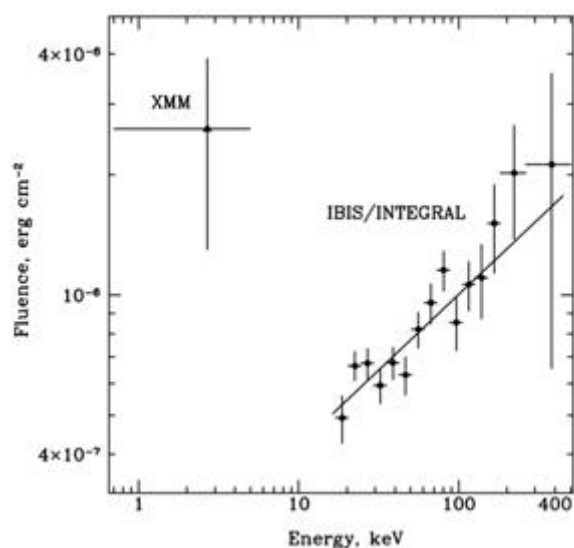


Рис. 9. Энергетический спектр гамма-всплеска GRB 031203 необычайно малой светимости, открытого обсерваторией «ИНТЕГРАЛ»

Кривая подсчетов внегалактических источников в энергетическом диапазоне 20–50 кэВ по данным глубокого обзора поля скопления галактик Волосы Вероники с помощью телескопа IBIS на борту обсерватории «ИНТЕГРАЛ»

Проведена работа по исследованию популяции внегалактических источников в поле скопления галактик Волосы Вероники. С помощью глубокой экспозиции длительностью 500 тыс. с достигнута рекордная чувствительность на энергии больше 20 кэВ — одна тысячная от излучения Крабовидной туманности. Кривая подсчетов внегалактических источников построена до предельного потока 10–11 эрг/с/см², что на порядок лучше предыдущего результата полученного на обсерватории им. Эйнштейна более двадцати лет назад (рис. 10).

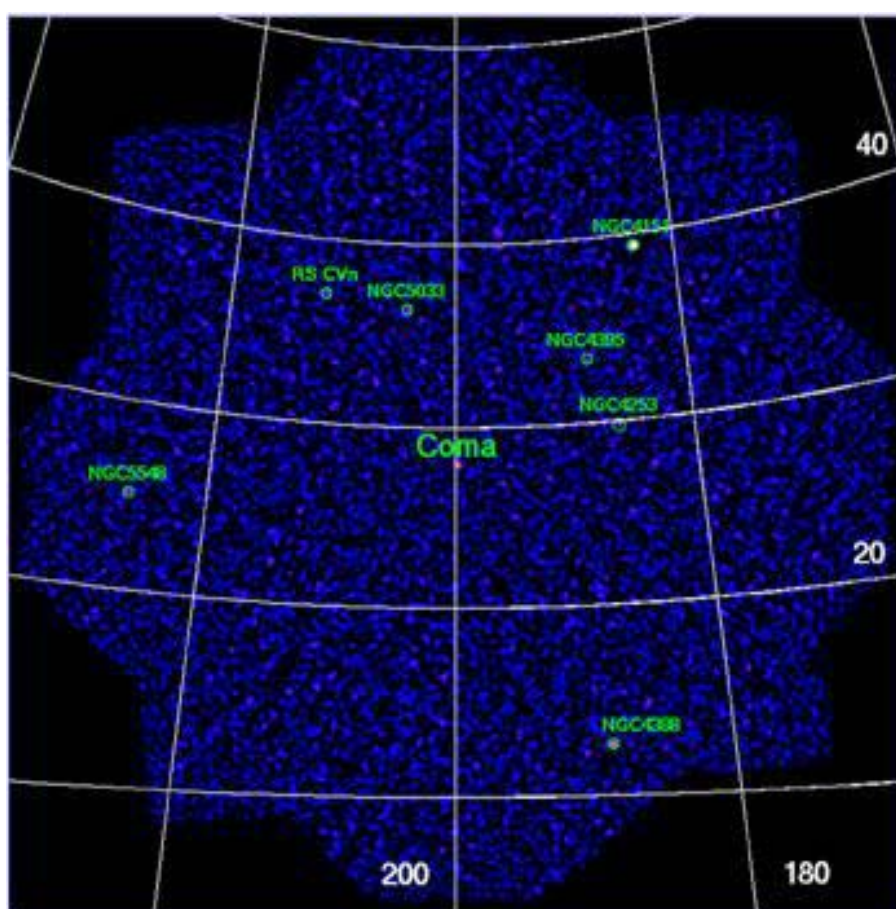


Рис. 10. Рентгеновское изображение области скопления галактик в созвездии Волосы Вероники (Coma cluster) по данным телескопа IBIS спутника «ИНТЕГРАЛ»

Удалось оценить вклад внегалактических источников в излучение рентгеновского фона в полосе энергий 20–50 кэВ. Оказалось, что источники отождествленные с АЯГ излучают не больше 3 % от интенсивности КРФ в этом диапазоне энергий. Красные смещения большинства отождествленных источников имеют малые значения ($z < 0,002$), что говорит о том, что активные ядра галактик на больших z могут излучать значительную долю регистрируемого рентгеновского фона.

Жесткие рентгеновские всплески, зарегистрированные телескопом IBIS обсерватории «ИНТЕГРАЛ» в 2003–2004 гг.

С целью поиска рентгеновских всплесков проведен анализ данных всех наблюдений, выполненных телескопом IBIS орбитальной обсерватории ИНТЕГРАЛ в течение первых полутора лет работы на орбите (с 10 февраля 2003 г. по 2 июля 2004 г.). Во временной записи полной скорости счета детектора IBIS/ISGRI в диапазоне энергий 15–25 кэВ выявлено 1077 всплесков длительностью от ~5 до ~500 с, удовлетворяющих высокому критерию статистической достоверности (за все время наблюдений лишь одно событие могло быть случайным, да и то с вероятностью 20 %). Помимо событий, связанных с космическими гамма-всплесками (зарегистрированными в поле зрения или прошедшими сквозь защиту телескопа), солнечными вспышками и активностью источника повторных мягких гамма-всплесков SGR 1806-20, 105 всплесков удалось локализовать и за одним исключением — отождествить с ранее известными постоянными или транзиентными источниками рентгеновского излучения (96 — с известными рентгеновскими барстерами). В одном случае источником всплеска был новый барстер в состоянии с низким уровнем светимости, получивший название IGRJ17364-2711. Основные параметры локализованных всплесков и результаты их отождествления представлены в каталоге всплесков. Надо отметить, что 61 всплеск был зарегистрирован от одного рентгеновского барстера — GX354-0. Для этого источника исследованы статистические распределения всплесков по их длительности, уровню максимального потока и периоду рекуррентности. Некоторые из всплесков, наблюдавшихся телескопом IBIS/ISGRI, были также зарегистрированы телескопом JEM-X обсерватории «ИНТЕГРАЛ» в стандартном рентгеновском диапазоне 3–20 кэВ.

Картографирование неба в жестких рентгеновских лучах в области касательной к Галактическому спиральному рукаву в созвездии Стрельца

Работа была выполнена по данным верхнего слоя детектора телескопа IBIS (ISGRI — рабочий энергетический диапазон 18–200 кэВ) обсерватории ИНТЕГРАЛ, полученным во время российских наблюдений этой области Галактики. Общая экспозиция наблюдений составила около одного миллиона секунд. Была достигнута беспрецедентная чувствительность в 1,5 мКраба в данном диапазоне энергий. Было зарегистрировано более трех десятков источников рентгеновского излучения различной природы: кандидаты в черные дыры, пульсары, маломассивные двойные рентгеновские системы. Также в данной работе было сообщено об открытии 5 новых рентгеновских объектов, среди которых оказались и объекты нового типа, открытого также приборами миссии ИНТЕГРАЛ, поглощенных источников — источники с сильным внутренним поглощением, что делает их практически невидимыми на энергиях стандартного рентгеновского диапазона (рис. 11).

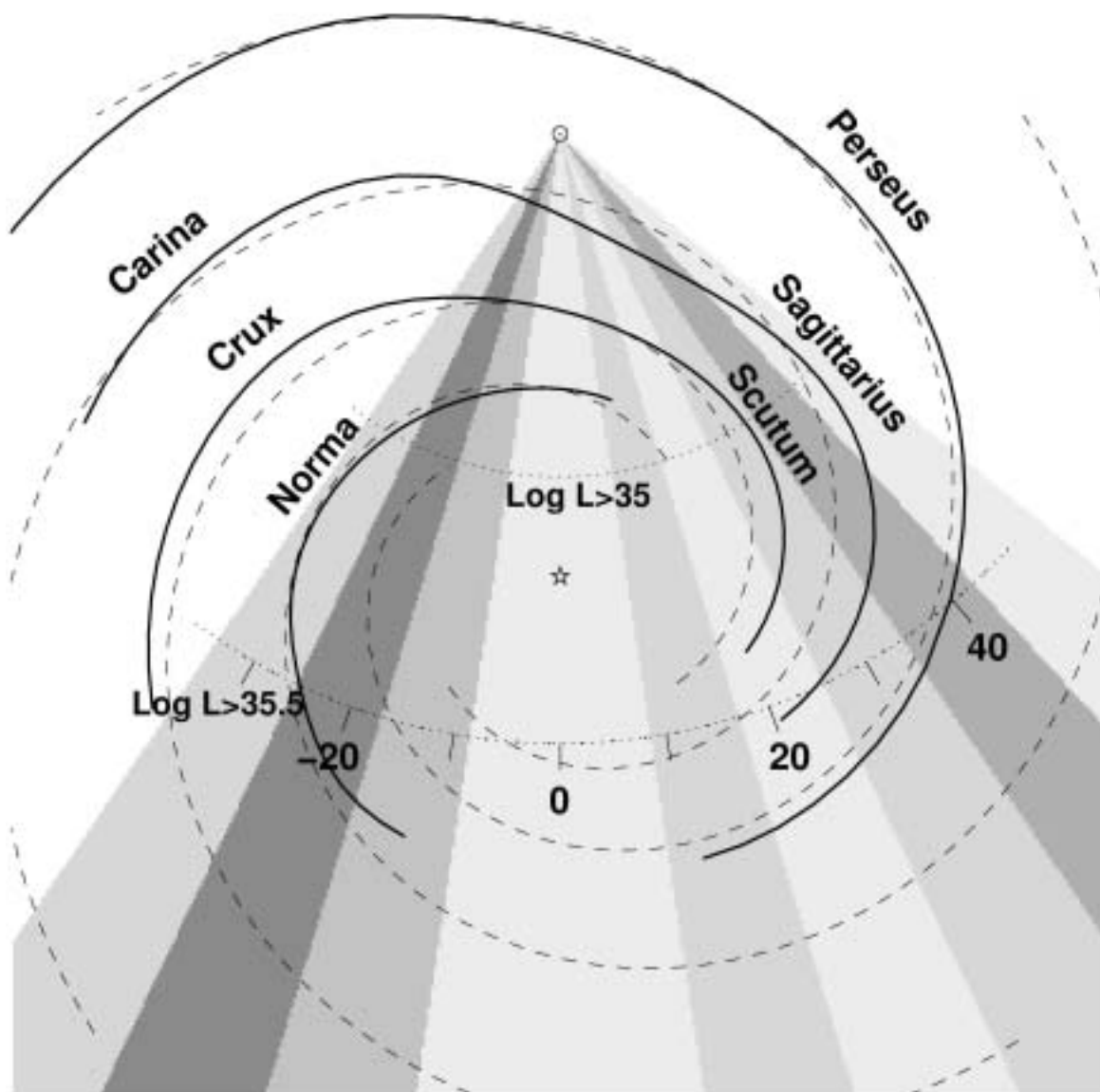


Рис. 11. Карта области Галактики с распределением массивных двойных

*Жесткие спектры рентгеновских пульсаров
по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ*

Исследованы спектры 34 аккрецирующих рентгеновских и одного миллисекундного пульсаров, которые попадали в поле зрения обсерватории ИНТЕГРАЛ за два года (декабрь 2002 г. – январь 2005 г.) работы на орбите и значимо (>8 sigma в диапазоне энергий 18–60 кэВ) регистрировались ее приборами. Среди них пульсаров присутствуют 7 недавно открытых объектов этого класса: 2RXP J130159.6-635806, IGR/AX J16320-4751, IGR J16358-4726, AX J163904-4642, IGR J16465-4507, SAX/IGR J18027-2017, AX J1841.0-0535. Впервые получены спектры аккрецирующих пульсаров A 0114+650, RX J0146.9+6121, AX J1820.5-1434 и AX J1841.0-0535 в жестком рентгеновском диапазоне энергий (> 20 кэВ). Проанализирована эволюция спектральных параметров в зависимости от интенсивности источников, и проведено их сравнение с результатами предыдущих исследований.

*Долговременные наблюдения рентгеновского пульсара LMC X-4
обсерваториями ИНТЕГРАЛ и RXTE*

Представлены результаты анализа наблюдений рентгеновского пульсара LMC X-4 в широком диапазоне энергий, выполненного по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ и монитором всего неба ASM обсерватории RXTE. Показано, что поток излучения, регистрируемый от источника в жестком рентгеновском диапазоне энергий, меняется более чем в 50 раз (от ~ 70 мКраб в высоком состоянии до $\sim 1,3$ мКраб в низком состоянии) на масштабе периода прецессии аккреционного диска, средняя величина которого за период 1996–2004 гг. определена с высокой точностью $P_{prec} = 30,275 \pm 0,004$ дня (рис. 12).

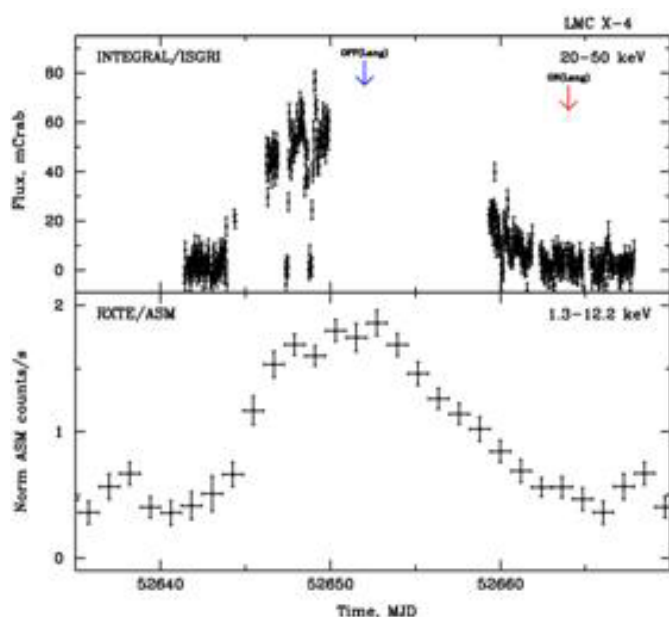


Рис. 12. Результаты наблюдений рентгеновского пульсара LMC X-4 обсерваторией ИНТЕГРАЛ и монитором всего неба ASM обсерватории RXTE

В низком состоянии от источника зарегистрирована вспышка излучения длительностью около 10 часов, во время которой поток от источника увеличился более чем в 4 раза. Форма широкополосного спектра пульсара практически не меняется с изменением его интенсивности; в спектре источника не обнаружено значимых особенностей, связанных с возможной линией резонансного циклотронного поглощения.

*Наблюдения транзистного рентгеновского пульсара KS 1947+300
обсерваториями ИНТЕГРАЛ и RXTE*

Представлены результаты анализа наблюдений рентгеновского пульсара KS 1947+300, выполненного по данным обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE в широком рентгеновском диапазоне энергий 3–100 кэВ. Обнаружена зависимость формы профиля импульса от светимости источника. По изменению темпа ускорения пульсара проведено исследование характеристик пульсара на основании модели замагниченной нейтронной звезды. Получены оценки на величину магнитного поля пульсара и расстояния до двойной системы (рис. 13).

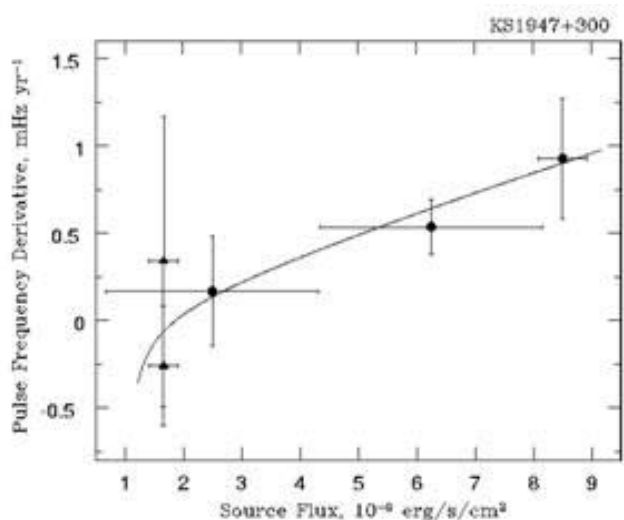


Рис. 13. Зависимость профиля рентгеновского импульса пульсара KS 1947+300 от величины потока

3.6.2.2. Теоретические и экспериментальные исследования в области астрофизики высоких энергий

Популяции рентгеновских двойных в галактиках как новые индикаторы темпа формирования звезд и полной звездной массы

В зависимости от массы оптического компаньона, рентгеновские двойные делятся на два класса: маломассивных и массивных систем. Такие системы эволюционируют на сильно отличающихся временах, в миллионы и миллиарды лет, соответственно. Почти мгновенное излучение массивных рентгеновских двойных делает их хорошим кандидатом на роль индикатора недавно происходившего звездообразования. С другой стороны маломассивные системы не имеют прямой связи с процессами звездообразования, но благодаря большому времени жизни связаны с содержимым родительской галактики. Наблюдения ближайших галактик телескопами Chandra и XMM-Newton дают возможность проверить эту простую картину и откалибровать связь HMXB-SFR и LMXB-M*.

В результате исследований было продемонстрировано, что число и/или суммарная рентгеновская светимость рентгеновских двойных в галактике могут быть использованы как новые независимые индикаторы темпа звездообразования (HMXB) и массы галактики (LMXB). Галактики с активным звездообразованием, наблюдавшиеся Chandra вплоть до смещений $z \sim 1,2$ в области глубокого обзора на северном небе, показали, что калибровка HMXB LX – SFR зависимости, выполненная по близлежащим галактикам сохраняется и на космологических дистанциях.

Распределение светимости маломассивных и массивных рентгеновских двойных в ближайших галактиках может быть описано некоторой «универсальной» функцией светимости, чья форма остается практически неизменной для различных галактик, а нормировка этой функции пропорционально темпу звездообразования для массивных и общей массе галактики для маломассивных рентгеновских двойных. Качественное отличие между функциями светимости маломассивных и массивных

рентгеновских двойных отражает отличие в режимах аккреции, происходящих в этих типах двойных систем.

Наблюдающееся обрезание по высокоэнергетичной части функции рентгеновской светимости примерно на порядок выше для НМХВ, хотя яркие источники со светимостью больше $\log(L_X) > 39$ наблюдаются как в молодых, так и в старых галактиках, по-настоящему сверх яркие рентгеновские источники со светимостью $\log(L_X) > \sim 40-40,5$, связаны с областями активного звездообразования и до сего времени не наблюдались в старом звездном населении или в эллиптических S0 галактиках. Зависимость $L_X - SFR$ в удаленных галактиках в HDF-N показывает, что сверх яркие источники на смещении $z \sim 0,2-1,3$ не были значительно ярче, чем те, что мы наблюдаем в ближайших галактиках.

Динамическое формирование рентгеновских двойных в балджах спиральных галактик может быть важным каналом генерации рентгеновских двойных

Рентгеновские двойные могут формироваться динамическим образом, если они находятся в области с высокой плотностью звезд. Это может происходить через приливной захват, столкновения нейтронных звезд с красным гигантом, и через различные взаимодействия двойных звезд с компактным объектом. Эти процессы могут играть преобладающую роль в центральных частях галактик. В частности они объясняют природу избытка рентгеновских двойных, во внутреннем балдже туманности Андромеды. В целом более половины рентгеновских двойных систем, во внутренней области туманности Андромеды, размером ~ 3 кпк сформированы динамическим образом, либо в центре, либо в шаровых скоплениях, а не в результате естественной звездной эволюции. Эффективность динамического канала образования рентгеновских двойных существенно зависит от скорости относительного движения звезд. Так как этот же механизм действует и в шаровых скоплениях, имеющих относительную дисперсию скоростей на ~ 100 ниже, то это открывает возможность исследовать в деталях процессы взаимодействия звезд и достоверность моделей синтеза звезд в целом.

Излучение пограничного слоя в системах с аккрецирующими нейтронными звездами

Современная картина аккреции на нейтронную звезду в маломассивных двойных системах включает два ключевых ингредиента: аккреционный диск и пограничный слой. Тогда как вещество диска вращается с почти Кеплеровской скоростью, в граничном слое оно тормозится до скорости вращения нейтронной звезды, и затем растекается по поверхности. Для типичных скоростей вращения нейтронной звезды это приводит к примерно равному энерговыделению в диске и в граничном слое.

Основываясь на методе фурье-разрешающей спектроскопии, было показано, что аperiodическая и квазипериодическая переменность ярких

рентгеновских маломассивных двойных — атолл и Z-источников, в диапазоне времен секунда — миллисекунда, вызвана в основном переменностью излучения в граничном слое. Излучение аккреционного диска менее переменно на этом временном масштабе и его спектр мощности следует соотношению $P_{disk}(f) \sim 1/f$, внося вклад в переменность только на низких частотах и при низких энергиях. Килогерцовые КПО имеют ту же самую причину, что и переменность излучения на более низких частотах, а именно вне зависимости от природы самого механизма переменности, модуляции происходят на поверхности нейтронной звезды. Спектр граничного слоя остается практически постоянным при изменениях светимости и с определенной точностью может быть найден в Фурье-разрешаемых спектрах. Следовательно, его можно непосредственно измерить в наблюдениях.

В исследованном диапазоне $\dot{M} \sim 0,1 - 1\dot{M}_{\text{Edd}}$ оно слабо зависит от полного темпа аккреции и в пределе $\dot{M} \sim \dot{M}_{\text{Edd}}$ выходящее излучение близко к Виновскому спектру с температурой $kT \sim 2,4$ кэВ. Эта независимость от глобального значения \dot{M} поддерживает теоретические оценки, что граничный слой поддерживается радиационным давлением. С учетом этого предположения мы получаем ограничения на массу и радиус нейтронных звезд.

Свойства аккреционного диска и граничного слоя/слоя растекания в аккрецирующих двойных системах

Проанализировав все доступные данные рентгеновской обсерватории RXTE, для ярких рентгеновских систем с нейтронной звездой, сделанное с высоким энергетическим и спектральным разрешением, было показано, что независимо от темпа аккреции в двойной системе, излучение граничного слоя может быть описано моделью «размытого» черного тела. И параметры данного излучения определяются только гравитацией нейтронной звезды. Измеренные спектральные параметры граничного слоя нейтронной звезды позволяют получить ограничения на отношение массы и радиуса нейтронных звезд. Предполагая массу нейтронной звезды приблизительно 1,4 масс Солнца, радиус нейтронной звезды оказывается равен $\sim 9-14$ км. Анализ большого числа наблюдений различных систем для различных темпов аккреции позволил проследить поведение аккреционного диска в двойной системе. Было показано, что приблизительно при Эддингтоновском темпе аккреции структура аккреционного диска сильно изменяется. Вероятно, что аккреционный поток вблизи нейтронной звезды при таком темпе аккреции «вздувается». Предложена модель поведения целого аккреционного потока в системах с хорошо определенными Z-треками, которые наблюдаются у ярких нейтронных звезд.

Открытие природы рентгеновского излучения Галактического риджа

Использование данных наблюдений, произведенных обсерваторией RXTE в сканирующем режиме и в режиме перенаведений позволили

разрешить проблему рентгеновского излучения Галактического риджа. Эта проблема более тридцати лет, с середины семидесятых, не была решена и теперь показано, что рентгеновское излучение Галактического риджа формируется вкладом большого числа слабых галактических рентгеновских источников. Первым делом, было показано, что распределение интенсивности рентгеновского излучения Галактического риджа очень точно следует распределению интенсивности инфракрасного излучения Галактики, которое, в свою очередь, следует за распределением массы в Галактике. Затем, анализируя обзоры всего неба совершенные RXTE и ROSAT, была построена функция рентгеновских светимостей слабых источников в беспрецедентно-широком энергетическом диапазоне 1027–1034 эрг/с. Сравнение эмиссивной способности в рентгеновском диапазоне на единицу звездной массы найденной из полученной функции светимости и рентгеновского излучения Галактического риджа показало, что они дают сопоставимые значения. Это подтверждает, что значительную часть излучения Галактического риджа генерируют известные типы слабых точечных источников. Сравнение спектров также подтверждает данное заключение (рис. 14).

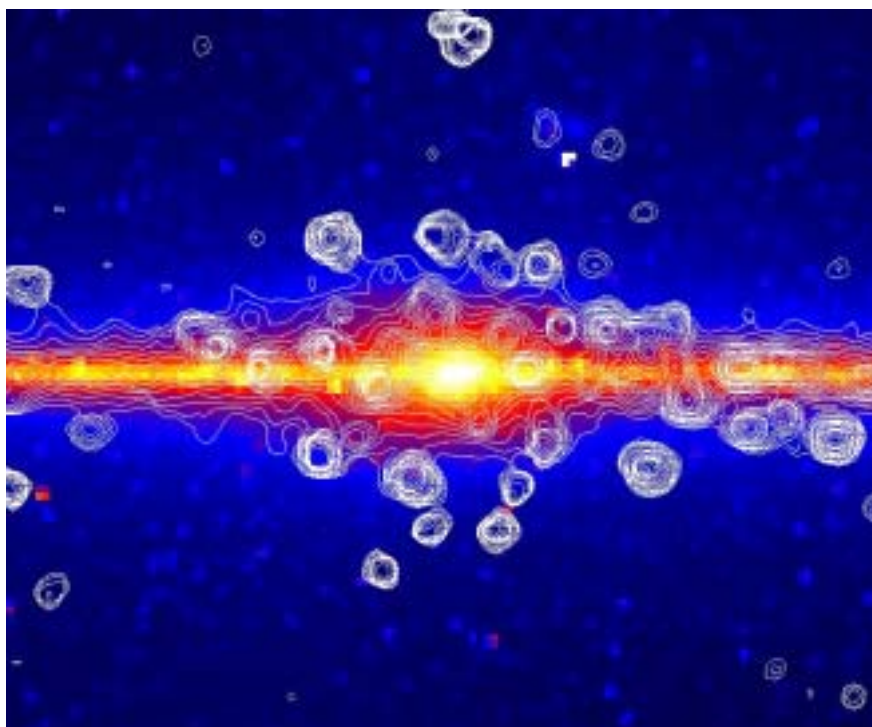


Рис. 14. Показано, что распределение интенсивности излучения Галактического риджа (линии) тесно следует распределению интенсивности близкого инфракрасного излучения (цветное изображение данных COBE), которое в свою очередь, следует распределению галактической массы

Определение космологических параметров по скоплениям галактик

Обзор ROSAT, площадью 400 град² который был выполнен в предыдущие годы, послужил основой для дальнейших исследований. Рентгеновские источники, найденные в этом обзоре прошли оптическую

идентификацию и было подтверждено, что 95 % из предварительно определенных в рентгеновском диапазоне как скопления, действительно являются скоплениями галактик. Это самый крупный на сегодняшний день набор скоплений. Он содержит 43 скопления при $z > 0,35$ и исследованный объем в 3 раза больше объема локальной Вселенной (т. е. при $z < 0,1$). Все удаленные скопления из обзора 400 град² в дальнейшем наблюдались с помощью спутника Chandra.

Измерения функций масс при $z = 0,05$ (локальный набор) и при $z = 0,5$ (набор 160 град) показывает, что изменение примерно в 10 раз плотности скоплений, для данного порога масс скоплений, отражает рост плотности возмущений вещества с момента $z = 0,5$. Этот рост является непосредственно наблюдаемым космологическим эффектом. Наблюдающиеся изменения в плотности скоплений предсказываются теорией только при вполне определенных значениях космологических параметров Ω_M и Ω_Λ . Модель с $\Omega_M = 0,27$ и $\Omega_\Lambda = 0,73$ описывает как локальные, так и удаленные данные наблюдений. Для значения $\Omega_M = 1$ теория предсказывает иной наклон локальной функции масс, который не согласуется с данными.

Область ошибок, полученная из анализа функции максимального правдоподобия для скоплений разрешает только определенную комбинацию параметров Ω_M и Ω_Λ — только те, которые согласуются как с формой локальной функции масс, так и изменением плотности скоплений со временем. Эти результаты оказываются в хорошем согласии с результатами по SN Ia и данным эксперимента WMAP. Используя полный обзор 400 град. Можно будет ограничить параметр w уравнения состояния Темной Энергии с точностью примерно ± 0.15 по данным единственного эксперимента.

Нагрев газа излучением квазаров

Используя информацию о космическом рентгеновском фоне, суммарном излучении активных ядер галактик (АЯГ) в инфракрасном диапазоне, оценку массовой плотности сверхмассивных черных дыр в локальной Вселенной, а также спектры отдельных АЯГ, получен усредненный по всем направлениям широкополосный спектр излучения среднего квазара. Показано, что излучение таких источников способно фотоионизировать и нагревать окружающий газ до температуры 2×10^7 К. Это значение превышает вириальные температуры гигантских эллиптических галактик. Результаты этой работы будут использованы для расчетов обратного воздействия излучения, выделяющегося при аккреции на сверхмассивные черные дыры, на межзвездную среду.

Эволюция сверхмассивных черных дыр в эллиптических галактиках: от очень ярких до очень слабых

Выбросы релятивистской плазмы (наблюдающиеся в радио диапазоне длин волн) являются характерной особенностью аккрецирующих черных дыр

в двойных системах и сверхмассивных черных дыр. Наблюдения показывают, что для черных дыр звездных масс наблюдается четкая корреляция рентгеновского и радио потоков при малых темпах аккреции, а при высоких темпах аккреции радио поток значительно ослабевает. Для сверхмассивных черных дыр в скоплениях и эллиптических галактиках потоки релятивистской плазмы играют важную роль в нагреве окружающего газа. Предполагая, что и в сверхмассивных черных дырах энергетика выбросов релятивистской плазмы значительно уменьшается при высоких темпах аккреции, была построена простая модель эволюции сверхмассивных черных дыр в эллиптических галактиках. На первом этапе формирующаяся галактика содержит большое количество газа, который обеспечивает высокий темп аккреции на черную дыру. При этом выбросы релятивистской плазмы практически не влияют на состояние газа. На втором этапе темп аккреции падает, а мощность выбросов плазмы растет и не позволяет окружающему газу охлаждаться. Эта простая модель способна объяснить основные этапы эволюции сверхмассивных черных дыр и наблюдающуюся связь между массами черных дыр и свойствами родительских галактик.

Простая модель эволюции системы из эллиптической галактики и сверхмассивной черной дыры (зеленая линия) (рис. 15). На ранних этапах (вертикальный участок линии) темп аккреции на черную дыру близок к Эддингтоновскому уровню. При этом не происходит мощных выбросов релятивистской плазмы и газ в галактике остывает и преобразуется в звезды. По мере уменьшения количества газа и роста массы черной дыры темп аккреции падает и черная дыра превращается в мощный источник выбросов релятивистской плазмы (горизонтальный участок линии), нагревающих газ и предотвращающих дальнейшее остывание газа.

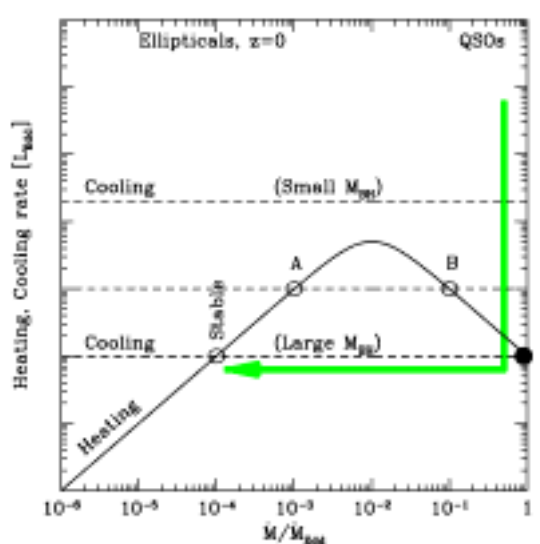


Рис. 15. Простая модель эволюции системы из эллиптической галактики

Магниторотационные сверхновые.

Формирование направленных струйных выбросов (джетов)

Получены новые результаты моделирования магниторотационного механизма взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром.

Магниторотационный механизм был предложен Г.С. Бисноватым-Коганом в 1970 г. Идея магниторотационного механизма состоит в передаче энергии вращения звезды в энергию взрыва при помощи магнитного поля. Магнитное поле встроено в вещество звезды, при коллапсе возникает дифференциальное вращение, которое приводит к усилению магнитного поля и, следовательно, росту магнитного давления. Возросшее магнитное давление приводит к возникновению волны уплотнения, движущейся от центра звезды. Эта волна, двигаясь по быстро спадающему фону плотности, вскоре превращается в быструю МГД ударную волну, которая и приводит к взрыву сверхновой. Данный механизм в настоящее время является практически единственным механизмом, позволяющим получить в численных расчетах взрыв коллапсирующей сверхновой. Для двумерных нестационарных расчетов был использован неявный лагранжев метод на динамически адаптируемой треугольной сетке. Данная методика была специально разработана для моделирования астрофизических МГД течений, в которых присутствуют большие перепады параметров (до 10 порядков), а также имеются существенно различные характерные временные масштабы. Расчеты показывают, что при различных начальных конфигурациях магнитного поля возникает взрыв сверхновой, энергия взрыва составляет $0,5-0,6 \cdot 10^{51}$ эрг. Форма взрыва сверхновой существенно зависит от конфигурации (типа симметрии начального магнитного поля). Начальное магнитное поле квадрупольного типа симметрии приводит к взрыву сверхновой, распространяющемуся преимущественно вблизи экваториальной плоскости. Использование в качестве начального, магнитного поля дипольного типа симметрии, позволяет, в результате взрыва, получить слабоколлимированный направленный струйный выброс (джет). Расчеты были проведены для широкого диапазона начальных энергий магнитного поля.

Показано, также, что при эволюции магнитного поля возникает магниторотационная неустойчивость, которая существенно уменьшает время эволюции магнитного поля. Двумерные расчеты показали, что благодаря возникновению магниторотационной неустойчивости, время возникновения магниторотационного взрыва сверхновой слабо зависит от отношения начальной энергии магнитного поля звезды к ее гравитационной энергии и может быть приближенно описано следующей формулой $t \sim -\log(E_{\text{mag}}/E_{\text{grav}})$. Как показали расчеты, время возникновения магниторотационного взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром не превышает 1 с для реалистичных значений начального магнитного поля.

Проведены оценки для характерного времени пересоединения магнитного поля. Показано, что магнитное пересоединение может возникнуть существенно после формирования ударной волны, приводящей к взрыву сверхновой.

Был также предложен механизм нарушения зеркальной симметрии магнитного поля при магниторотационном взрыве сверхновой. Это позволяет

объяснить возникновение асимметричных выбросов при взрывах сверхновых и возникновение быстролетающих радиопульсаров.

На рис. 16 представлено поле скоростей на развитой стадии магниторотационного взрыва сверхновой для начального дипольного (слева) и квадрупольного (справа) магнитных полей. Цветом показано распределение удельного углового момента.

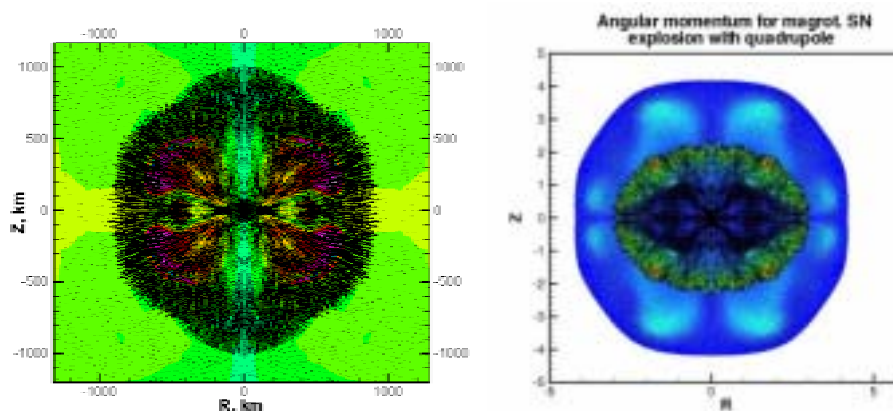


Рис. 16

3.6.3. ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГАММА-ВСПЛЕСКОВ И ТРАНЗИЕНТНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ «КОНУС» И «ГЕЛИКОН»

Природа космических гамма-всплесков и механизм генерации гигантских потоков электромагнитного излучения в их источниках являются одними из самых актуальных задач фундаментальных космических исследований. В российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД, который успешно проводится на американском космическом аппарате «Винд» с помощью российской научной аппаратуры КОНУС с ноября 1994 г., получен целый ряд новых данных о природе этого астрофизического явления. На большом статистическом материале детально изучено разнообразие временных структур всплесков, включая начальные фазы событий и тонкую временную структуру резких интенсивных пиков во временных профилях всплесков. Получены новые данные о быстрой спектральной переменности излучения всплесков на временных масштабах до 2 мс. Создан первый каталог коротких гамма-всплесков с жесткими энергетическими спектрами, необычные свойства которых вызывают значительный интерес и широко обсуждаются.

Регистрация аппаратурой ГЕЛИКОН на солнечной астрофизической обсерватории «Коронас-Ф» обратного комптоновского рассеяния начального импульса гигантского всплеска SGR1806-20 от Луны впервые позволила с высокой достоверностью восстановить интенсивность, временную историю и энергетику гигантского всплеска. По данным эксперимента «КОНУС-ВИНД» показано, что мягкие спектры пульсирующего хвоста гигантской вспышки этого источника содержат жесткую компоненту, простирающуюся до 10 МэВ. В диапазоне энергий до 1 МэВ прослеживается слабое

послесвечение SGR1806-20, спадающее на протяжении нескольких часов. Получена общая картина активности SGR1806-20 в испускании повторных всплесков до и после гигантской вспышки.

Эксперимент «КОНУС-ВИНД» является уникальным источником информации о временных и спектральных характеристиках гамма-всплесков в интервале энергий от 20 кэВ до 10 МэВ. Эти данные составляют неотъемлемую часть современных всеволновых исследований источников гамма-всплесков на космических аппаратах и сети наземных оптических и радиотелескопов и широко востребованы. Такие исследования значительно расширились благодаря новой миссии НАСА СВИФТ и эксперимент КОНУС-ВИНД их эффективно дополняет в широкой области энергий рентгеновского и гамма-излучения

3.6.3.1. Методика исследований

Российско-американский эксперимент по исследованию космических гамма-всплесков проводится на американском космическом аппарате «Винд» с ноября 1994 г. с помощью научной аппаратуры КОНУС Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН. Орбита и условия наблюдения гамма-всплесков в эксперименте исключительно благоприятны.

Аппаратура КОНУС-ВИНД представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр, состоящий из двух идентичных детекторов гамма-квантов и электронного блока для регистрации и предварительной обработки сигналов детекторов. Каждый детектор содержит кристалл NaI(Tl) диаметром 130 мм и высотой 75 мм, помещенный в тонкостенный алюминиевый контейнер с бериллиевым входным окном и свинцовым стеклом высокой прозрачности для защиты от фона космического аппарата в мягкой области спектра. Такой детектор обеспечивает низкий энергетический порог регистрации излучения 10–12 кэВ, диапазон регистрации гамма-квантов до 10 МэВ с энергетическим разрешением 8,5–9,0 % на линии Cs137 и чувствительность обнаружения всплесков на уровне $\sim 10^{-7}$ эрг·см⁻². Детекторы размещены на стабилизированном вращении космическом аппарате таким образом, что они непрерывно осматривают, соответственно, северную и южную небесные полусферы.

Аппаратура постоянно находится в режиме ожидания всплеска, начиная регистрировать с высоким временным разрешением информацию о гамма-всплеске, как только статистически значимое увеличение скорости счета гамма-квантов будет зафиксировано ячейкой выделения всплеска. Запись временных профилей всплесков в настоящее время осуществляется в следующих энергетических интервалах: 20–70, 70–300 и 300–1100 кэВ с временным разрешением от 2 мс до 0,25 с и общей длительностью записи 230 с. Стандартная программа регистрации профилей событий обеспечивает временное разрешение 2 мс на протяжении первых 0,5 с длительности всплеска и в течение 0,5 с «предыстории». В аппаратуре имеется также

2 специальных временных анализатора, так называемые «временные нониусы», которые позволяют регистрировать с высоким временным разрешением, равным 2 мс, любую часть профиля события, содержащую резко выраженные увеличения скорости счета гамма-квантов.

Энергетические спектры событий измеряются с помощью двух многоканальных амплитудных анализаторов с квазилогарифмической шкалой в двух интервалах энергии 20–1100 кэВ и 770 кэВ – 10 МэВ. Специальная адаптивная система автоматически регулирует время набора спектра в зависимости от интенсивности всплеска. Это позволяет получать данные о быстрой спектральной переменности даже для слабых событий в условиях ограниченной статистики.

Аппаратура функционирует в двух основных режимах: режиме регистрации всплеска и в режиме ожидания всплеска, в котором измеряется фоновое рентгеновское и гамма-излучение также в трех энергетических интервалах: 20–70, 70–300, 300–1100 кэВ, а также регистрируется скорость счета заряженных частиц с энергосвободением в детекторах более 10 МэВ. Номинальное значение нижних энергетических порогов детекторов в начале эксперимента составляло 12 кэВ. При многолетней непрерывной работе коэффициенты усиления детекторов медленно уменьшались. Возможности их коррекции по командам с Земли были исчерпаны в 1997 г. По состоянию на конец 2005 г. нижний порог детектора, осматривающего южную небесную полусферу, составляет 21,5 кэВ, северную — 18,5 кэВ. Для удобства сравнения при обработке данные приводятся к порогу 20 кэВ.

Эксперимент «КОНУС-ВИНД» имеет следующие преимущества по сравнению с другими приборами, осуществляющими в настоящее время наблюдения космических гамма-всплесков:

1. Аппаратура имеет исключительно благоприятные условия наблюдения гамма-всплесков. Космический аппарат почти все время находится вне магнитосферы Земли, обеспечивая тем самым стабильный радиационный фон, отсутствие помех от радиационных поясов и затенения Землей и возможность непрерывных наблюдений.

2. Два детектора аппаратуры постоянно осматривают всю небесную сферу обеспечивая возможность с одинаковой чувствительностью регистрировать гамма-всплески, приходящие с любых направлений.

Еще одним важным преимуществом аппаратуры КОНУС-ВИНД, которое стало особенно актуальным после начала наблюдений гамма-всплесков миссией СВИФТ в конце 2004 г., является ее способность исследовать временные и спектральные характеристики излучения всплесков в широкой области энергий от 20 кэВ до 10 МэВ.

Гамма-спектрометр ГЕЛИКОН является одним из приборов солнечной космической обсерватории «Коронас-Ф», которая функционировала на околоземной приполярной орбите высотой 500 км с июля 2001 г. по декабрь 2005 г. Космический аппарат был стабилизирован вращением относительно оси, направленной на Солнце с точностью 10'. Один из детекторов аппаратуры ГЕЛИКОН ориентирован на Солнце, второй просматривает

антисолнечную сферу. По характеристикам своих двух детекторов и структуре представления информации гамма-спектрометр ГЕЛИКОН практически аналогичен спектрометру КОНУС.

Все перечисленные факторы в сочетании с высокой чувствительностью и информативностью аппаратуры КОНУС-ВИНД и ГЕЛИКОН позволили в 2002–2005 гг. получить ряд приоритетных фундаментальных результатов в исследованиях космических гамма-всплесков, гамма-репитеров и необычных транзиентных явлений в космическом рентгеновском и гамма-излучении.

3.6.3.2. Исследования временных профилей, энергетических спектров и спектральной переменности космических гамма-всплесков

За 11 лет наблюдений в эксперименте «КОНУС-ВИНД» зарегистрировано и изучено более 2500 гамма-всплесков. На большом статистическом материале проведено детальное изучение разнообразия временных структур всплесков, включая начальные фазы событий и тонкую временную структуру резких интенсивных пиков во временных профилях всплесков. Многоканальные измерения энергетических спектров охватывают широкий интервал энергий от 20 кэВ до 10 МэВ. Для исследования быстрой спектральной переменности всплесков на временных масштабах до 2 мс разработана специальная методика, позволяющая использовать для этих целей данные временных анализаторов в трех энергетических окнах. Это позволяет получать для гамма-всплесков зависимость мгновенного потока излучения всплеска от его пиковой энергии, которая является мерой жесткости излучения всплеска. С помощью разработанной методики была проанализирована спектральная переменность 30 гамма-всплесков, зарегистрированных в эксперименте «КОНУС-ВИНД», для которых известны величины космологических красных смещений. Преимуществом такого подхода является то, что все измерения спектральных параметров выполнены одной и той же аппаратурой. Результаты анализа представлены на рис. 17 в виде зависимости максимальной изотропной светимости источника всплеска от максимальной пиковой энергии в системе покоя источника.

По данным эксперимента «КОНУС-ВИНД» создан доступный через Интернет первый каталог коротких гамма-всплесков. Существование отдельного класса коротких гамма-всплесков длительностью менее 2 с было впервые показано в экспериментах «КОНУС» на станциях «Венера» и позднее подтверждено в американском эксперименте «БАТСЕ». Каталог содержит временные истории, энергетические спектры, спектральные параметры и ряд других характеристик излучения 130 коротких всплесков. Для ряда событий, включенных в каталог, показано существование статистически значимого потока раннего послесвечения источников коротких всплесков в области жесткого рентгеновского и гамма-излучения. При наблюдениях этого послесвечения важным преимуществом

эксперимента «КОНУС-ВИНД» является стабильный радиационный фон. Эффект раннего послесвечения коротких всплесков важен для понимания природы всплесков и продолжает активно обсуждаться. Данные, содержащиеся в каталоге, используются для анализа этого класса событий, в том числе для сравнения характеристик коротких всплесков, зарегистрированных в разных экспериментах.

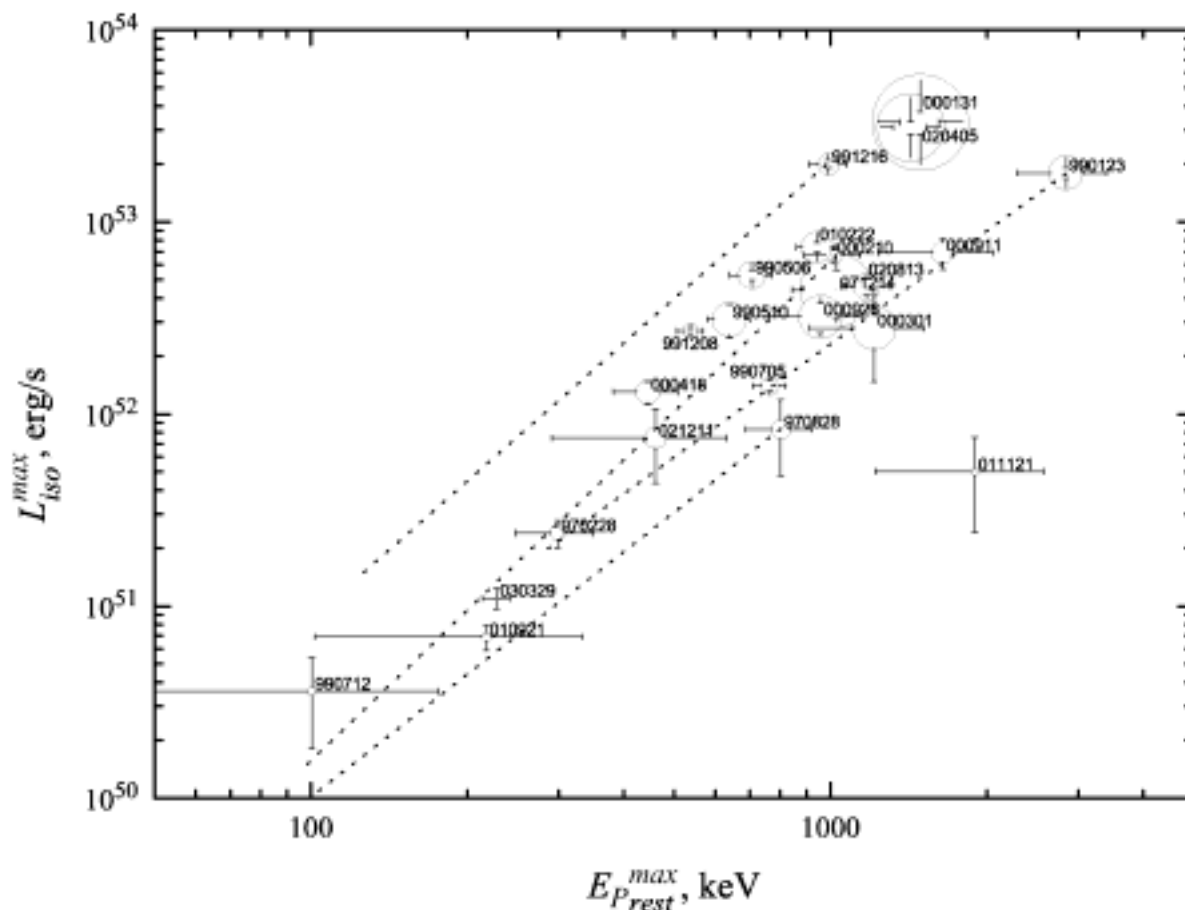


Рис. 17. Зависимость максимальной изотропной светимости от максимальной пиковой энергии в системе покоя, связанной с источником всплеска, для гамма-всплесков с известным космологическим красным смещением. Радиусы окружностей пропорциональны величинам красных смещений. Пунктирными линиями показаны несколько корреляционных треков для отдельных всплесков

3.6.3.3. Роль эксперимента «КОНУС-ВИНД» во всеволновых исследованиях космических гамма-всплесков

Исследования источников космических гамма-всплесков с помощью наземных и космических телескопов с целью идентификации их с известными астрофизическими объектами и детального изучения их характеристик в широком интервале длин играют ключевую роль в понимании природы явления. Первый успех в этих исследованиях был достигнут в 1997 г. с помощью европейского спутника Беппо-САКС,

благодаря которому было открыто послесвечение источников всплесков в оптическом и рентгеновском диапазонах длин волн и установлено космологическое происхождение, по крайней мере, части гамма-всплесков. Для этих исследований также широко использовались данные триангуляционных измерений координат источников гамма-всплесков по данным межпланетной сети космических аппаратов с детекторами всплесков IPN (Interplanetary Network). Одним из базовых узлов этой сети являлся эксперимент «КОНУС-ВИНД» благодаря его высокой чувствительности и оптимальному месту наблюдений. В период 2002–2004 гг. сетью IPN было оперативно локализовано с высокой точностью несколько десятков источников всплесков. По этим данным удалось обнаружить и подробно исследовать оптическое и рентгеновское послесвечение ряда источников, определить для них величину красного смещения и получить важные для физики гамма-всплесков результаты, подтверждающие космологическую природу явления. Для всеволновых исследований всплесков эксперимент КОНУС-ВИНД в настоящее время являлся единственным источником временных и спектральных характеристик гамма-излучения в широком интервале энергий от 20 кэВ до 10 МэВ. Наиболее важные результаты были получены для следующих событий:

GRB020410. Один из рекордных по длительности гамма-всплесков (длительность более 1500 с) с рентгеновским и оптическим послесвечением. Сопоставление данных рентгеновской камеры спутника Беппо-САКС и аппаратуры КОНУС-ВИНД позволило построить спектр рентгеновского и гамма-излучения всплеска в диапазоне энергий от 2 кэВ до 1270 кэВ.

GRB001025A. Это гамма-всплеск с ярким рентгеновским послесвечением, но без оптического послесвечения, так называемый «темный» всплеск. Наблюдения за его источником продолжались 2,5 года. По данным эксперимента «КОНУС-ВИНД» получены детальные временные профили и энергетические спектры в диапазоне энергий 18–1150 кэВ со свидетельствами сильной спектральной эволюции.

GRB000911. Один из наиболее точно локализованных сетью IPN всплесков, для которого были найдено послесвечение в оптическом и радио – диапазонах длин волн. В эксперименте КОНУС-ВИНД получены временные профили и энергетические спектры всплеска для энергий 15 кэВ – 8 МэВ.

С началом работы миссии НАСА СВИФТ всеволновые исследования источников космических гамма-всплесков вступили в качественно новую фазу. Телескоп БАТ-СВИФТ определяет координаты источников гамма-всплесков с точностью несколько угловых минут и в режиме реального времени передает их на Землю. По сети Интернет эта информация попадает на наземные оптические и радиотелескопы. Всеволновые исследования источников всплесков стали начинаться буквально спустя единицы и десятки секунд после обнаружения события. Одновременно ось аппарата СВИФТ ориентируется на источник всплеска и через несколько десятков секунд рентгеновский и оптический телескопы миссии также подключаются к исследованию источника всплеска. Телескоп БАТ-СВИФТ может выполнять

спектральный анализ гамма-излучения в ограниченном диапазоне энергий 15–150 кэВ, что не позволяет определять такие важнейшие характеристики гамма-всплесков как полный интегральный поток и энергию максимума энерговыведения E_{peak} для большинства гамма-всплесков, так как основная область энерговыведения лежит выше 150 кэВ. Поэтому данные эксперимента «КОНУС-ВИНД» стали неотъемлемой частью этих исследований как уникальный источник информации о временных, спектральных и энергетических характеристиках излучения в широком интервале энергий от 20 кэВ до 10 МэВ. Ниже рассматривается использование этих данных при анализе ряда гамма-всплесков в 2005–2006 гг.

GRB 060124. Телескоп БАТ-СВИФТ локализовал этот всплеск по слабому предшественнику и благодаря этому до начала главной фазы события рентгеновский и оптический телескопы миссии СВИФТ уже были направлены на источник излучения. Аппаратура КОНУС-ВИНД детально зарегистрировала этот всплеск, основная фаза которого представлена тремя резкими пиками (рис. 18). Событие наблюдалось на целом ряде наземных оптических телескопов, что позволило определить величину красного смещения $Z = 2,297$ и проследить за поведением послесвечения в течение длительного времени. Был выполнен всесторонний анализ спектральных характеристик всплеска в широкой области энергий от 0,5 до 2000 кэВ по данным рентгеновского телескопа ХРТ и телескопа БАТ миссии СВИФТ и гамма-спектрометра «КОНУС-ВИНД», который позволил подробно исследовать сильную спектральную эволюцию в основной фазе всплеска и оценить выход энергии при изотропном излучении в источнике всплеска величиной $4,2 \cdot 10^{53}$ эрг.

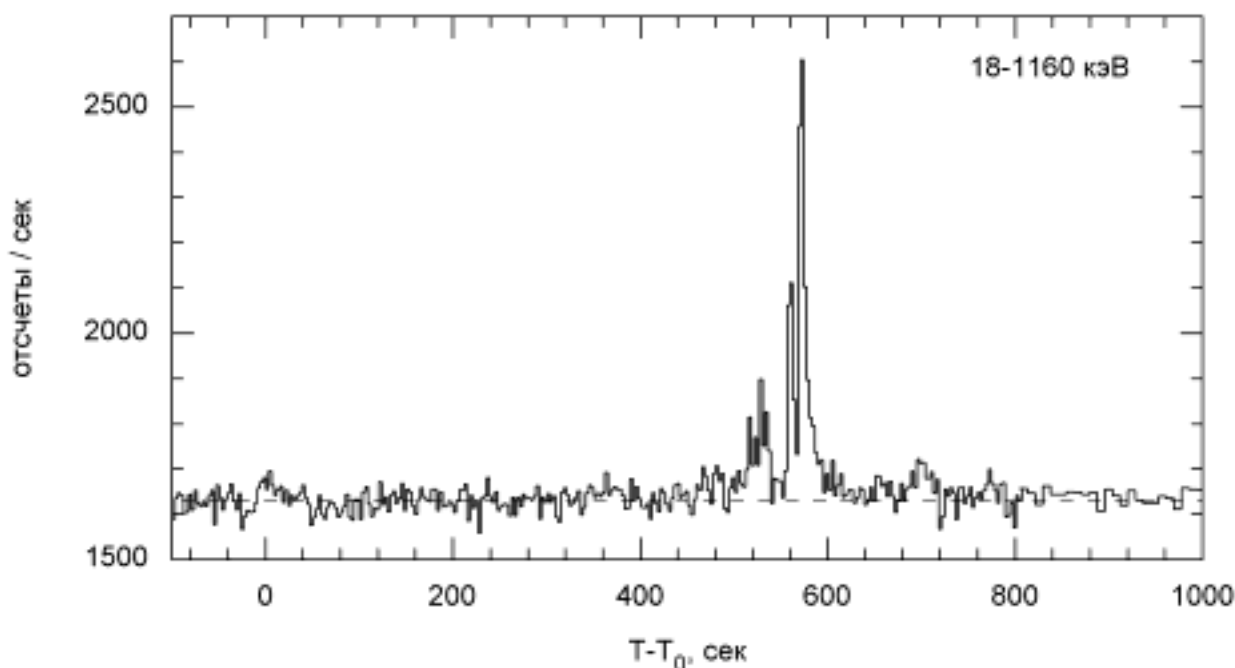


Рис. 18. Временной профиль GRB060124 по данным эксперимента «КОНУС-ВИНД»

GRB 050713A. Этот один из редких всплесков, которые наблюдались одновременно в области мягкого рентгеновского излучения (телескоп ХРТ СВИФТ), жесткого рентгеновского излучения (телескоп БАТ СВИФТ) и гамма-излучения (аппаратура КОНУС-ВИНД). Результаты совместного спектрального анализа излучения основной фазы всплеска по данным БАТ-СВИФТ и КОНУС-ВИНД показаны на рис. 19.

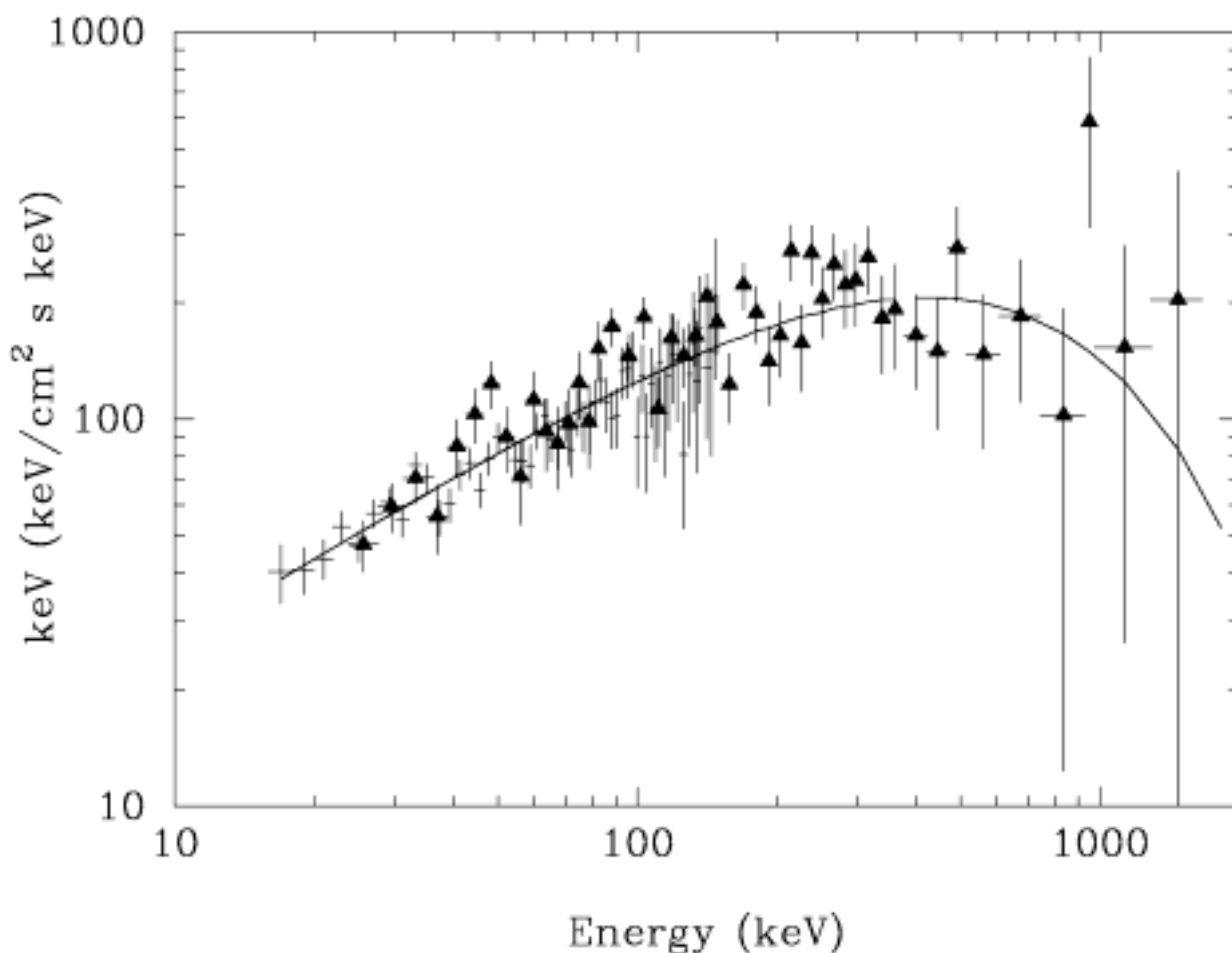


Рис. 19. Энергетический спектр гамма-излучения GRB050713A по данным КОНУС-ВИНД и БАТ-СВИФТ: крестиками обозначены измерения БАТ, треугольниками — измерения КОНУС

GRB 050820A. Наблюдения этого всплеска наземным оптическим телескопом РАПТОР начались спустя 5,5 с после поступления информации миссии СВИФТ. Но затем СВИФТ вошел в зону Южно-атлантической аномалии и данные о временном профиле события в гамма-лучах имеются только на основании наблюдений в эксперименте «КОНУС-ВИНД». Это третий случай за всю историю наблюдений, когда оптическое излучение наблюдалось одновременно с гамма-излучением всплеска. Благодаря необычайной длительности гамма-всплеска (~800 с) и яркости оптического источника были получены уникальные данные о различных компонентах оптического излучения и их соотношении с гамма-излучением.

3.6.3.4. Исследования мягких гамма-репитеров. Гигантский всплеск репитера SGR1806-20 и его комптоновское отражение от Луны

Исследования мягких гамма-репитеров являются одной из важных задач в программе наблюдений экспериментов «КОНУС» и «ГЕЛИКОН». Само явление рекуррентности источников мягких повторных всплесков и два первых гамма-репитера были открыты в экспериментах «КОНУС» на межпланетных станциях «Веренра». Результаты длительных наблюдений гамма-репитеров сведены в первый каталог источников мягких повторных гамма-всплесков, доступный через сеть Интернет.

В течение 2002–2005 гг. в экспериментах «КОНУС-ВИНД» и «ГЕЛИКОН» неоднократно наблюдались новые проявления активности двух гамма-репитеров SGR1900+14 и SGR1806-20 как в виде одиночных повторных всплесков, так и интенсивных серий таких событий. Результаты этих наблюдений регулярно публиковались в виде циркуляров GCN (Gamma-Ray Burst Coordinate Network). Один из таких циркуляров фактически является кратким электронным каталогом активности SGR1806-20 в середине 2004г. На рис. 20 приведена серия повторных всплесков от SGR1806-20, наблюдавшаяся в 2004 г.

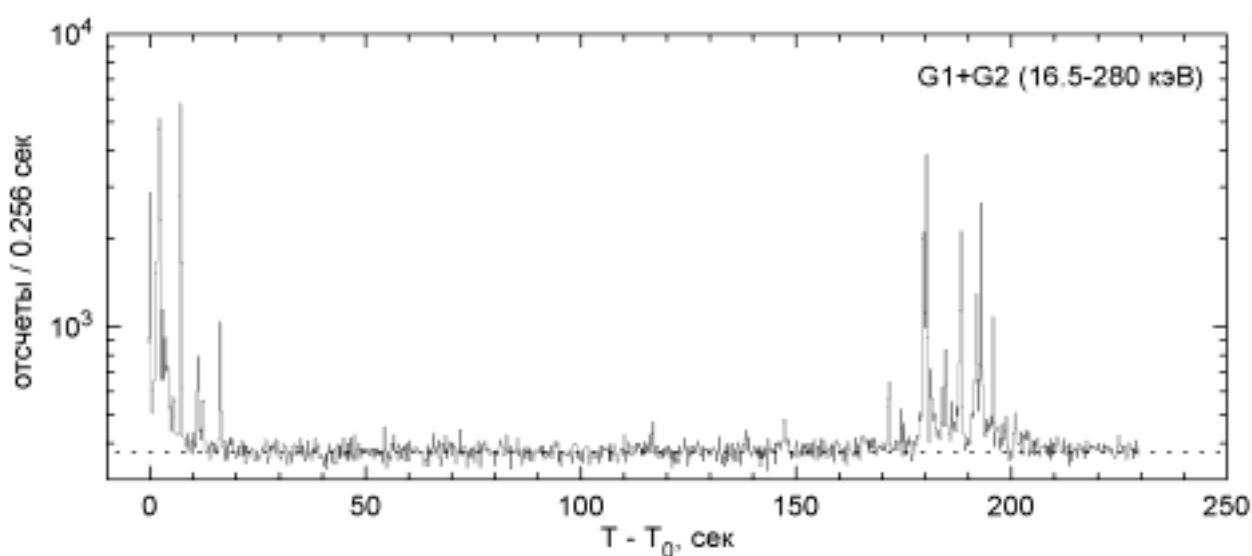


Рис. 20. Серия повторных всплесков от гамма-репитера SGR1806-20, зарегистрированная 5 октября 2004 г. экспериментом «КОНУС-ВИНД»

27 декабря 2004 г. аппаратурой КОНУС-ВИНД синхронно с прибором ГЕЛИКОН выполнены уникальные наблюдения гигантского всплеска от гамма-репитера SGR1806-20 (рис. 21). Гигантский всплеск от гамма-репитера представляет собой короткий, исключительный по интенсивности, начальный импульс гамма-излучения, сменяющийся более слабым, затухающим за ~500 с хвостом, пульсирующим с периодом вращения нейтронной звезды. Детекторы аппаратуры полностью перегружаются начальным импульсом, «зашкаливают». Точное измерение энергетике начального импульса становится, практически,

неразрешимой задачей, так как возможны только грубые оценки. Уникальность наблюдений события 27 декабря 2004 г. состоит в том, что космический аппарат «КОРОНАС-Ф» был экранирован от источника излучения Землей, но его приборы освещались полной Луной (рис. 22). Детектор аппаратуры ГЕЛИКОН, идентичный по характеристикам детекторам на «Винде», четко зафиксировал обратное комптоновское отражение гигантского импульса от Луны, измерил временной профиль сигнала и его энергетический спектр. Это дало возможность впервые надежно определить временной профиль начального импульса (рис. 23) и энергетику гигантского всплеска в мягком гамма-репитере. Эти данные являются первым наблюдением отражения гамма-всплеска от небесного тела, или, другими словами, первым примером природной импульсной локации небесного тела посредством гамма-лучей. По данным эксперимента «КОНУС-ВИНД» определены временные и спектральные характеристики пульсирующего хвоста гигантского всплеска. Обнаружено, что его мягкие спектры содержат также жесткую степенную компоненту, простирающуюся до 10 МэВ. В диапазоне до 1 МэВ прослеживается слабое послесвечение источника, спадающее на протяжении нескольких часов. Выполнен также детальный анализ общей картины активности SGR1806-20 в испускании повторных всплесков до и после гигантского всплеска.

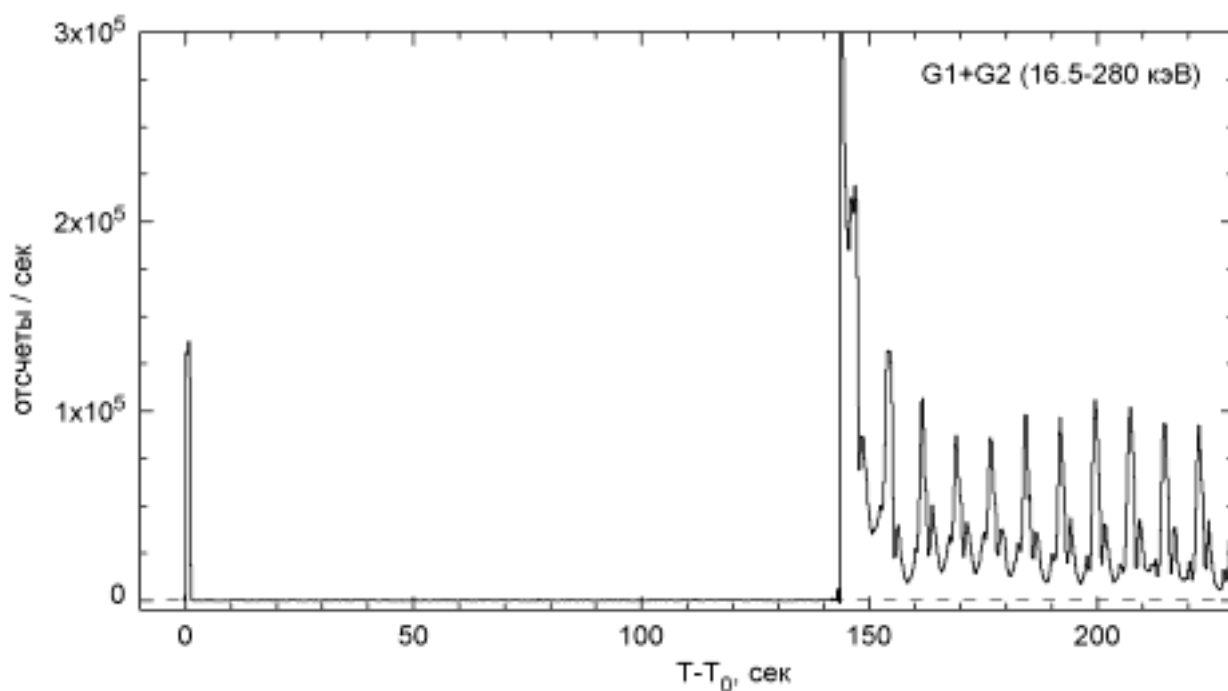


Рис. 21. Общий вид временного профиля события 27 декабря 2004 г. по данным эксперимента «КОНУС-ВИНД». Триггерная запись была инициирована приходом короткого мягкого всплеска («предшественника»). Через 143 с последовал гигантский импульс излучения, который привел к полному насыщению детектора. После окончания начального импульса интенсивность излучения быстро спадает и переходит в медленно затухающий пульсирующий «хвост»

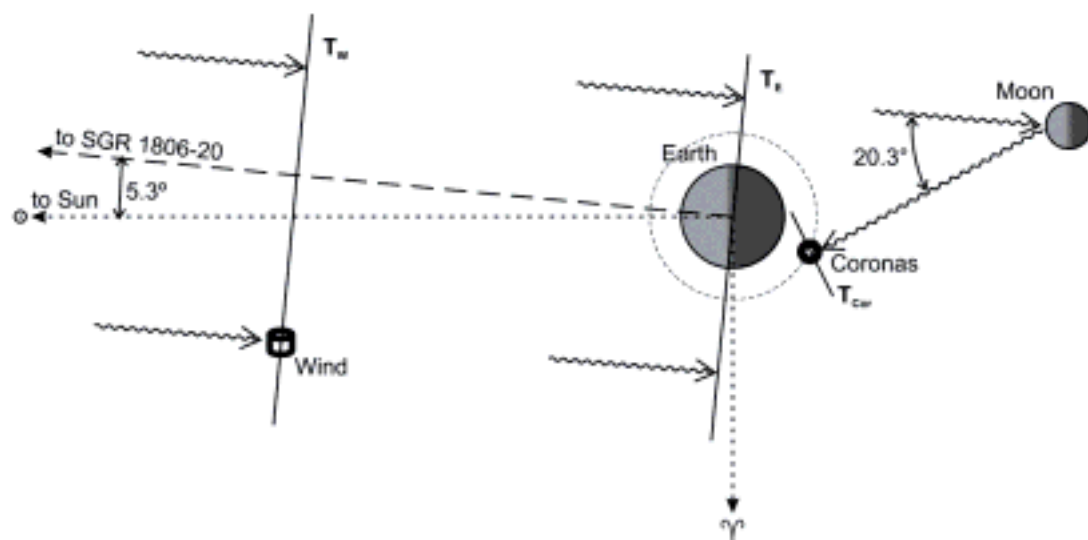


Рис. 22. Схема наблюдений гигантского всплеска от SGR1806-20 27 декабря 2004 г. аппаратурой КОНУС-ВИНД и ГЕЛИКОН. Фронт вспышки приходит на космический аппарат «Винд» в момент T_w , проходит Землю в момент $T_e = T_w + 5,086$ с, достигает Луны и отражается от нее, и, наконец, отраженное излучение достигает детектора ГЕЛИКОН на космическом аппарате «КОРОНАС-Ф» в момент $T_{cor} = T_w + 7,69$ с

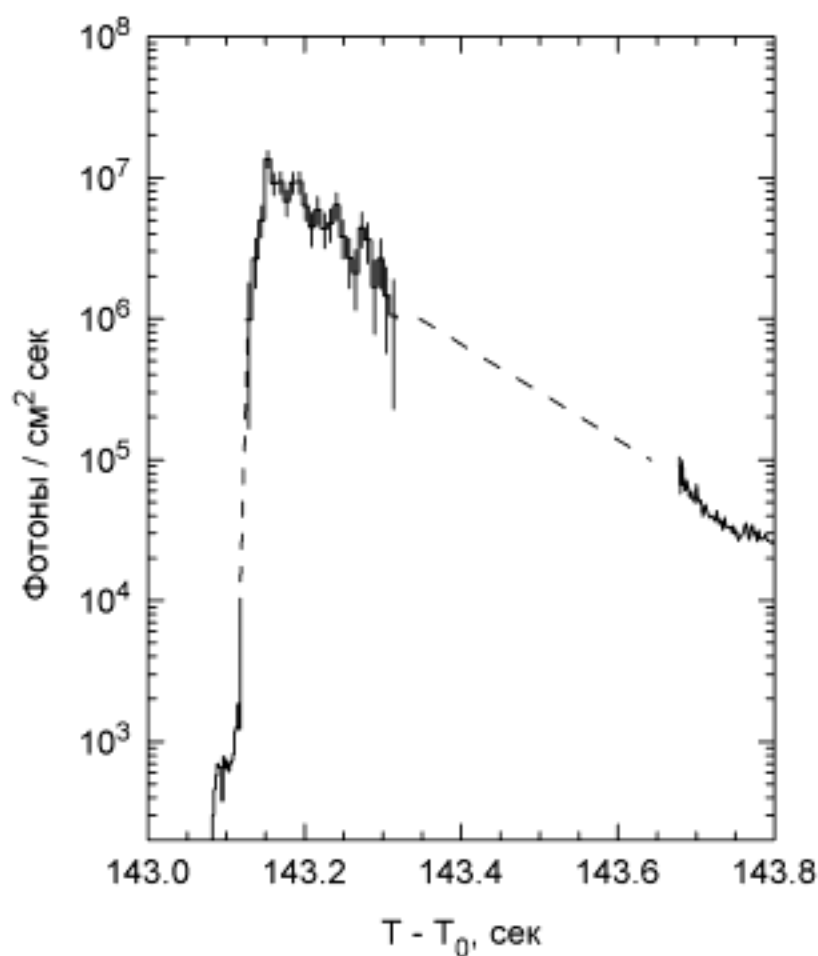


Рис. 23. Восстановленная временная история начального импульса гигантского всплеска 27 декабря 2004 г. Верхняя часть кривой восстановлена по данным ГЕЛИКОН, нижняя — по данным КОНУС-ВИНД

Еще один важный результат также связан с проблемой происхождения гамма-репитеров. Экспериментом «КОНУС-ВИНД» 3 ноября 2005 г. был зарегистрирован и детально исследован исключительно интенсивный короткий всплеск. Он обладал весьма жестким спектром с пиковой энергией около 2 МэВ, резким фронтом ~ 2 мс и пологим спадом при общей длительности менее 200 мс (рис. 24). Всплеск был зарегистрирован на нескольких аппаратах сети IPN и локализован триангуляционным методом. Его координаты совпадают с близкой галактикой M81, находящейся на расстоянии 3,6 Мпк (рис. 25). При предположении, что источник всплеска связан с галактикой M81, оценки выделенной энергии для изотропной модели составят $\sim 4,5 \cdot 10^{45}$ эрг, что согласуется с энергией, выделившейся 27 декабря 2005 г. в источнике SGR1806-20. Полученные данные свидетельствуют в пользу гипотезы о том, что часть коротких всплесков с жестким спектром представляют собой начальные импульсы от гигантских всплесков в источниках, находящихся на значительно больших расстояниях в соседних галактиках. Эта гипотеза впервые была выдвинута авторами эксперимента КОНУС в 1982 г. и стала широко обсуждаться после регистрации гигантского всплеска от гамма-репитера SGR1806-20.

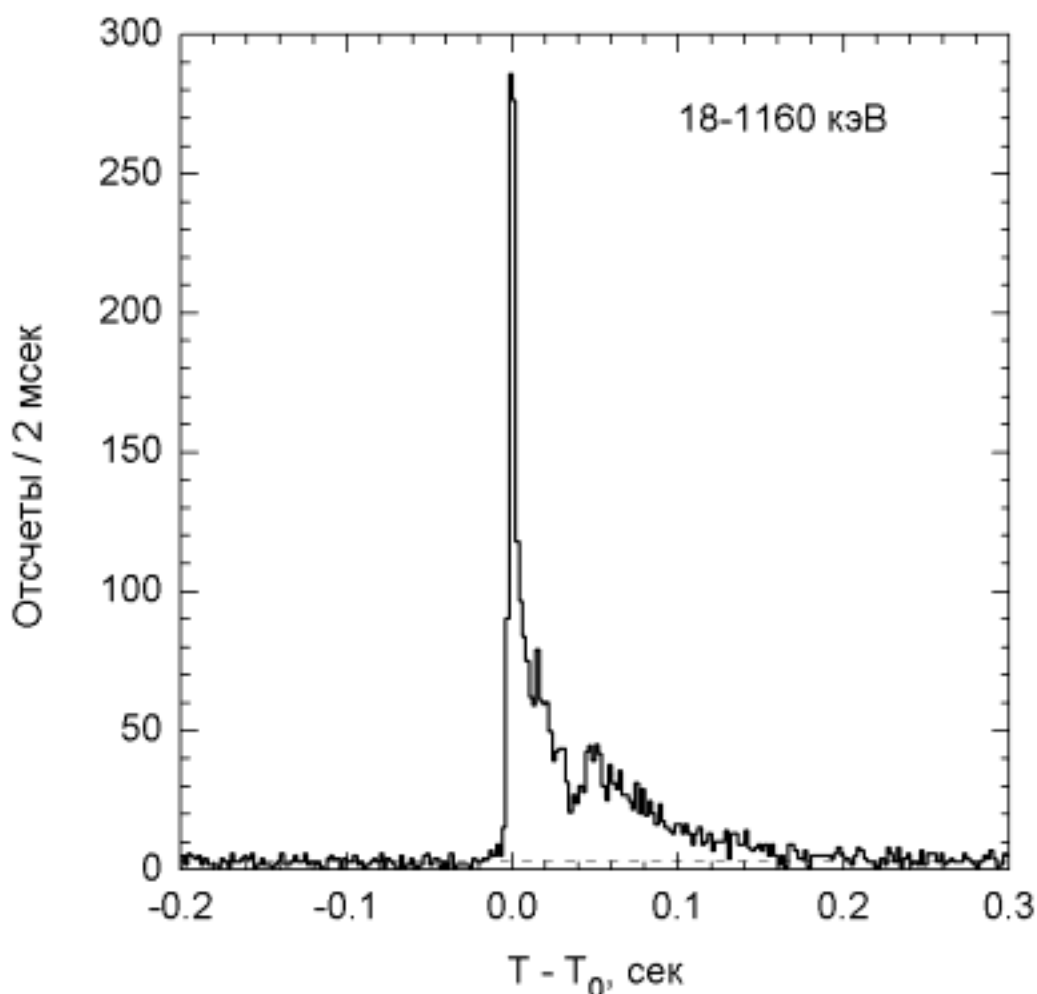


Рис. 24. Временной профиль интенсивного короткого жесткого всплеска 3 ноября 2005 г.: вероятная гигантская вспышка мягкого гамма-репитера в близкой галактике

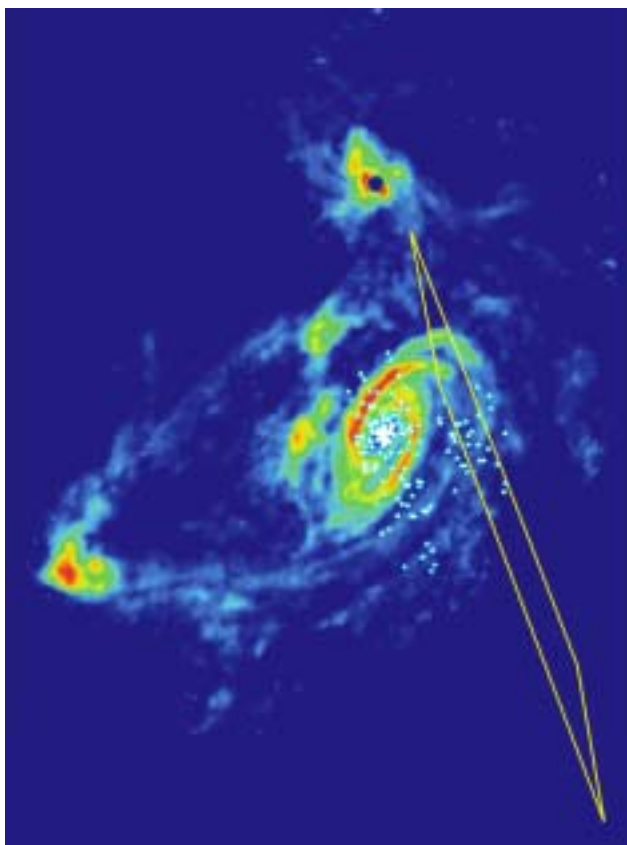


Рис. 25. Локализация сетью IPN события 3 ноября 2005 г. на карте группы галактик M81 в линии H I 21 см. Звездочками показаны рентгеновские источники, относящиеся к галактике M81 (в центре), по данным обсерватории «Чандра»

3.6.3.5. Новый вид активности источника Лебедь X-1

В эксперименте «КОНУС-ВИНД» совместно с всплесковым экспериментом на зонде «Улиссис» обнаружено необычное проявление активности источника Лебедь X-1. Кандидат в черные дыры номер один, Лебедь X-1 принадлежит к числу самых ярких галактических рентгеновских источников. Он наблюдается в двух состояниях активности: иногда в «мягком» с преобладающим излучением с энергией 2–10 кэВ и, чаще, в жестком с энергией излучения в области 10–200 кэВ. В период 1995–2002 гг. в этом источнике были зарегистрированы интенсивные всплески гамма-излучения длительностью от 10 000 до 20 000 в области энергий от 15 кэВ до 1 МэВ. Максимальные значения потоков на порядок превышали потоки, наблюдавшиеся ранее. Интегральные потоки для этих всплесков достигали величин $\sim 8 \cdot 10^{-4}$ эрг/см², что соответствует энерговыделению в источнике $5 \cdot 10^{41}$ эрг. Всего было зафиксировано 6 таких событий. Для них в эксперименте «КОНУС-ВИНД» получены детальные временные и спектральные характеристики. Жесткие энергетические спектры этих всплесков позволяют предполагать, что наблюдаемые события представляют собой новый тип активности источника Лебедь X-1 со спектром близким к спектру для «жесткого» состояния.

3.6.3.6. Заключение

В эксперименте КОНУС-ВИНД и синхронном с ним эксперименте ГЕЛИКОН получены новые приоритетных данные о природе космических гамма-всплесков и особого редкого класса повторяющихся мягких по спектру всплесков от гамма-репитеров. Регистрация детектором аппаратуры ГЕЛИКОН обратного комптоновского рассеяния от поверхности Луны гигантского всплеска репитера SGR1806-20 позволила впервые надежно определить временной профиль начального импульса и его энергетику. Благодаря высокой чувствительности детекторов аппаратуры КОНУС-ВИНД в широкой области энергии гамма-квантов и оптимальным возможностям наблюдений в межпланетном пространстве данные эксперимента широко востребованы в современных всеволновых исследованиях источников космических гамма-всплесков.