

II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Тема ВСЕЛЕННАЯ. Исследования в области астрофизики высоких энергий, теоретической физики и наблюдательной космологии.

Гос. регистрация № 0120.0 602990

Научный руководитель академик Р.А. Сюняев

Аккреция

Рассмотрена аккреция на сверхмассивную черную дыру горячего медленно вращающегося газа. Изучен важный случай, когда на радиусе Бонди r_B скорости турбулентных пульсаций малы по сравнению со скоростью звука c_s . Найдено численное решение задачи аккреции горячего газа с конечным угловым моментом с учетом теплопроводности и потерь энергии двухтемпературной плазмой на тормозное излучение. Исследованы течения вещества вокруг сверхмассивной черной дыры в указанном случае (Иногамов, Сюняев, 2010).

Рассмотрена задача о торможении гиперзвукового потока со скоростью 0.4–0.5 скорости света над подошвой слоя растекания на поверхности нейтронной звезды. Показано, что турбулентное торможение и лестница из взаимодействующих гравитационных волн в стратифицированной квазиэкспоненциальной атмосфере приводят к закручиванию массивной зоны, простирающейся до “океана” из плазмы с вырожденными электронами. Такая картина должна приводить к сильному разогреву глубоких слоев атмосферы и выключению механизма взрывного горения гелия. Очевидно, что в рентгеновских барстерах должен работать более эффективный механизм диссипации сильного азимутального течения в атмосфере. Показано, что гигантская уединенная гравитационная волна в атмосфере способна привести к диссипации энергии и резкому скачкообразному понижению азимутальной скорости в достаточно разреженных слоях атмосферы над зоной ядерных реакций взрывного горения гелия. Поставлен вопрос о возможности существования среди наблюдаемых галактических рентгеновских источников нейтронных звезд с массивными атмосферами, закрученными до высоких скоростей веществом, аккрецирующим из диска (Иногамов, Сюняев, 2010).

1. Иногамов Н. А., Сюняев Р. А., «Сверхмассивная черная дыра в эллиптической галактике: аккреция горячего газа с малым, но конечным угловым моментом », Письма в Астрономический журнал, 36, 883 (2010)
2. Иногамов Н. А., Сюняев Р. А., «Слой растекания при дисковой аккреции на поверхность нейтронной звезды и проблема торможения быстровращающегося вещества», Письма в Астрономический журнал, 36, 896 (2010)

Измерения геометрии аккреционных потоков при помощи аperiodической переменности яркости компактных объектов

Ревнивцев М., Буренин Р., Цыганков С., Чуразов Е.

В ряде работ рассмотрен оригинальный метод определения геометрии аккреционного потока в окрестностях компактных объектов (в частности замагниченных нейтронных звезд и белых карликов). Проведены исследования большого набора систем и показано, что в характеристиках переменности рентгеновского и оптического потоков излучения этих объектов содержится информация о границах аккреционных дисков вокруг них. В случае замагниченных компактных объектов измерения внутреннего края аккреционного диска

позволяют сделать оценки их магнитных полей. В одной из последних работ цикла показана возможность измерения скорости движения вещества в аккреционном потоке вокруг компактного объекта при помощи наблюдений переменности яркости объекта в различных спектральных диапазонах (наблюдения проведены по нашей заявке на обсерватории RXTE и телескопе Redcliff, SAAO). В результате проведенных наблюдений была измерена скорость движения вещества от границы аккреционного диска вокруг замагниченного белого карлика EX Нуа до его поверхности и показано, что полученное значение хорошо согласуется с предсказаниями современных моделей аккреционных дисков. (рис.1, Ревнивцев и др., 2009, 2010а,б).

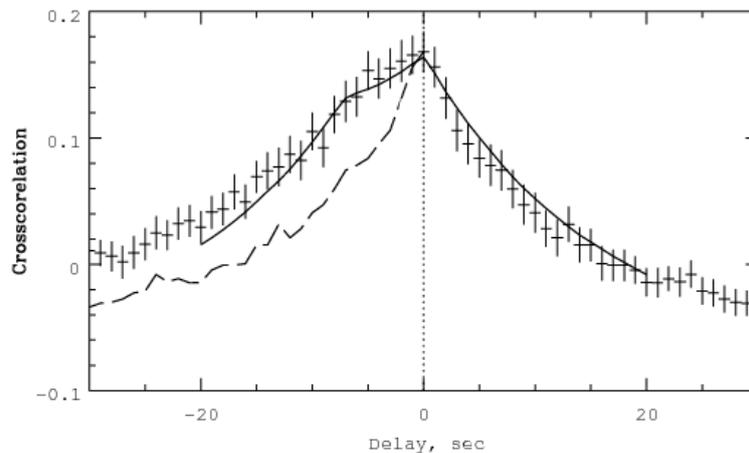


Рис.1. Кросскорреляция кривых блеска источника EX Нуа в оптическом и рентгеновском диапазонах. Пунктирная кривая показывает симметричный вид кросскорреляционной кривой. Асимметричный вид кривой кросскорреляции является результатом того, что в оптическом сигнале (возникающем в аккреционном диске) присутствует компонента, сдвинутая по времени относительно рентгеновского сигнала (возникающего на поверхности белого карлика). Модельная кривая кросскорреляции показана сплошной кривой. Аппроксимация наблюдаемых данных позволяет сделать вывод о том, что вещество аккреционного диска от внутренней границы диска до поверхности белого карлика летит около 7-8 секунд.

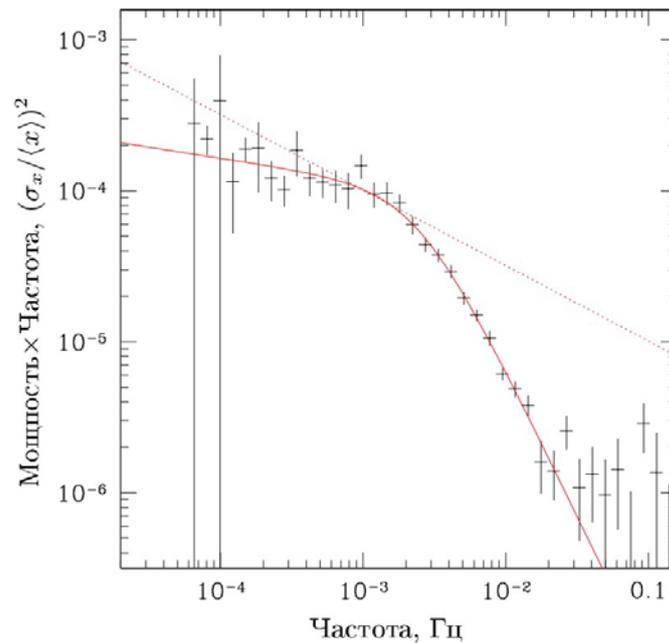


Рис.2. Спектр мощности переменности оптического излучения объекта SS433 вне затмений аккреционного диска.

Проведено подробное исследование переменности оптического потока пекулярного галактического источника SS433 по данным наблюдений Российско-Турецкого 1.5-м телескопа (РТТ-150). Получен спектр мощности переменности его потока с рекордной чувствительностью до частот порядка 0.5 Гц и обнаружен его излом на частоте около 2.4×10^{-3} Гц (рис. 2). Предполагается, что обнаруженный нами излом в спектре мощности вызван сглаживанием переменности оптического потока из-за конечного размера излучающей области. Исходя из измерения частоты слома в спектре мощности, выполнена оценка размера фотосферы аккреционного диска $\sim 2 \times 10^{12}$ см. Показано, что амплитуда переменности объекта SS433 резко уменьшается в течение затмения аккреционного диска, однако, не исчезает полностью. Это говорит о том, что размер источника переменного оптического излучения сравним с размером нормальной звезды, размер которой поэтому составляет также $R_O \sim 2 \times 10^{12}$ см $\sim 30 R_{\square}$. Уменьшение амплитуды переменности потока в течение затмения показывает наличие неперменной составляющей оптического излучения величиной $m_R \sim 13.2$ (Буренин и др., 2010).

1. Revnivitsev M., Churazov E., Postnov K., Tsygankov S., « Quenching of the strong aperiodic accretion disk variability at the magnetospheric boundary», *Astronomy and Astrophysics*, 507, 1211 (2009)
2. Revnivitsev M., Burenin R., Bikmaev I., Kniazev A., Buckley D. A. H., Pretorius M. L., Khamitov I., Ak T., Eker Z., Melnikov S., Crawford S., Pavlinsky M., «Aperiodic optical variability of intermediate polars - cataclysmic variables with truncated accretion disks», *Astronomy and Astrophysics*, 513, A63 (2010a)
3. Revnivitsev M., Potter S., Kniazev A., Burenin R., Buckley D. A. H., Churazov E., «Observational evidence for matter propagation in accretion flows», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press, (2010b)
4. Буренин Р. А., Ревнивцев М. Г., Хамитов И. М., Бикмаев И. Ф., Носов А. С., Палинский М. Н., Сюняев Р. А., «Быстрая переменность оптического излучения двойной системы SS433», *Письма в Астрономический журнал*, в печати (2010)

Рентгеновское излучение Галактики

Обработана совокупность 7-летних наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ аннигиляционного излучения из центральной зоны Галактики (рис. 3). Разработана теоретическая модель аннигиляции позитронов в плазме, остывающей за счет потерь энергии на излучение (Чуразов и др., 2010).

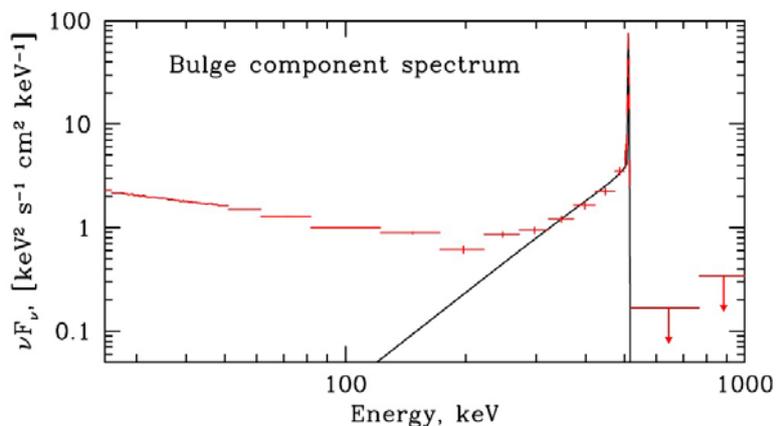


Рис.3. Спектр излучения балджа Галактики в диапазоне 30—1000 кэВ.

Продолжена работа над измерением излучения Галактики в диапазоне энергий 80-200 кэВ при помощи инструмента IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ. В этой области энергий происходит переход от преобладания сложения излучения большого количества слабых источников звездной природы к преобладанию излучения, вызванного взаимодействием космических лучей с веществом межзвездной среды, поэтому важно как можно более правильно учесть вклад источников звездной природы в полный поток излучения. Самую большую сложность в этой работе составляет учет инструментального фона детектора телескопа, амплитуда которого в этом диапазоне энергий значительно превосходит амплитуду сигнала из галактической плоскости. К настоящему времени удалось показать, что в диапазоне энергий 100-200 кэВ действительно присутствует доля потока, не связанная с точечными источниками, видимыми на самых глубоких картах плоскости Галактики, однако точность его определения пока невелика (Кривонос и др., 2010).

С целью уточнения измерений рентгеновских потоков и формы спектров слабых рентгеновских источников в глубоком поле галактического балджа телескопа Чандра, по данным оптических наблюдений, выполненных при помощи Российско-Турецкого 1.5-м телескопа, была уточнена карта межзвездного поглощения в этой области (Карасев и др., 2010).

1. Churazov E., Sazonov S., Tsygankov S., Sunyaev R., Varshalovich D., «Positron annihilation spectrum from the Galactic Centre region observed by SPI/INTEGRAL, revisited: annihilation in a cooling ISM?», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, in press, arXiv:1010.0864 (2010)
2. Krivonos R., Revnivtsev M., Tsygankov S., Churazov E., Sunyaev R., «Broad view on hard X-ray background emission of the Galaxy», Highlights of Astronomy, 15, 810 (2010a)
3. Карасев Д., Ревнивцев М., Лутовинов А., Буренин Р., «Исследование звездного населения и определение межзвездного поглощения по направлению на поле Галактического балджа телескопа Чандра по данным телескопа РТТ-150», Письма в Астрономический журнал, 36, 832 (2010a)

Предшественники сверхновых типа Ia в эллиптических галактиках

Сверхновые типа Ia играют важную роль в современной космологии -- с их помощью было продемонстрировано, что Вселенная расширяется с ускорением и сделан вывод о существовании темной энергии. Однако, их природа до сих пор точно не известна. Почти нет сомнений, что они являются результатом термоядерного взрыва белого карлика (БК), достигшего массы Чандрасекара, но не ясно, как происходит увеличение массы БК. Из двух ныне существующих сценариев наиболее популярным является аккреционный, в котором масса БК растет за счет аккреции вещества звезды - донора в двойной системы. В альтернативном сценарии взрыв происходит в результате слияния двух БК в тесной двойной системе. Показано, что эти два сценария радикально отличаются по уровню электромагнитного излучения, предшествующего сверхновой. В то время как светимость двойных БК до слияния мала, аккрецирующий БК является мощным источником мягкого рентгеновского излучения в течение нескольких млн.лет до взрыва. Используя данные обсерватории Чандра, показано, что рентгеновская светимость 6 близких эллиптических галактик в 30-50 раз меньше, чем следовало бы ожидать, если бы все сверхновые были связаны со взрывами аккрецирующих БК при достижении массы Чандрасекара. Сделан вывод о том, что не более 5% сверхновых в эллиптических галактиках образуются согласно аккреционному сценарию (Гильфанов и Богдан., 2010, Богдан и Гильфанов, 2010а,б,в).

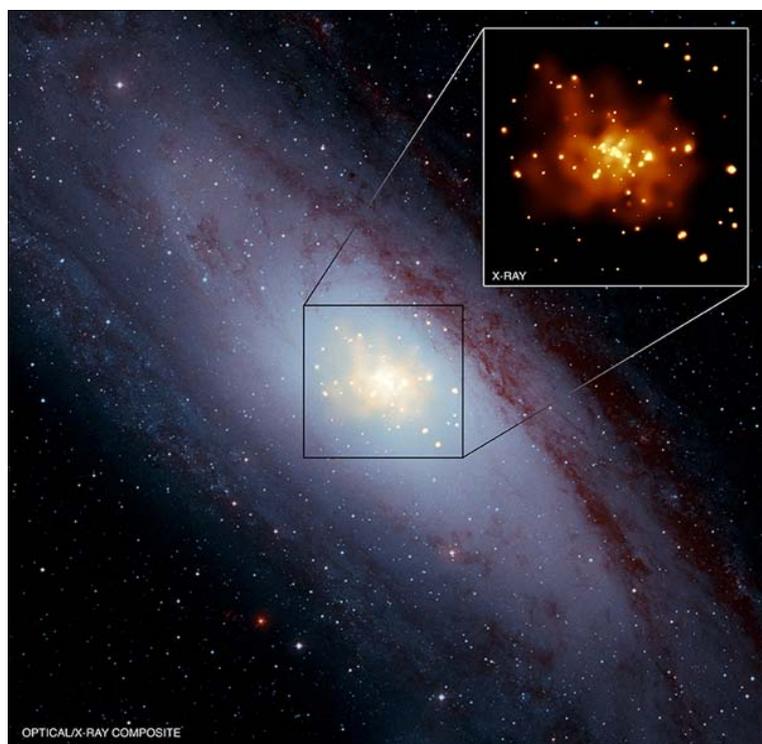


Рис. 4. Изображение галактики Туманность Андромеды, построенное на основе оцифрованных фотографических пластинок Паломарского обзора (синий), изображений в ИК диапазоне, полученных телескопом Спитцер (красный) и рентгеновских изображений телескопа Чандра (желтый). Протяженное рентгеновское излучение является суммой вкладов излучения горячей ионизированной межзвездной среды с температурой несколько миллионов градусов и совокупного излучения слабых компактных источников. Их полная светимость в ~30 раз меньше ожидаемой в случае, если бы все вспышки Сверхновых типа Ia были

связаны со взрывами аккрецирующих белых карликов в двойных системах.

1. Gilfanov M., Bogdán Á., «An upper limit on the contribution of accreting white dwarfs to the type Ia supernova rate», *Nature*, 463, 924 (2010)
2. Bogdán Á., Gilfanov M., «Soft band X/K luminosity ratios for gas-poor early-type galaxies», *Astronomy and Astrophysics*, 512, A16 (2010a)
3. Bogdán Á., Gilfanov M., «Soft band X/K luminosity ratios in late-type galaxies and constraints on the population of supersoft X-ray sources», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press (2010b)
4. Bogdán Á., Gilfanov M., «Unresolved X-ray emission in M31 and constraints on progenitors of classical novae», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 405, 209 (2010b)

Скопления галактик

Исследованы возможности определения характерных амплитуд и направленности движений горячего газа в скоплениях галактик по наблюдениям ярчайших резонансных линий. Движения газа: а) влияют на спектральную форму линий за счет эффекта Допплера и б) влияют на искажения радиальных профилей поверхностной яркости в линии в процессе резонансного рассеяния.

Проведены расчеты радиационного переноса методом Монте Карло в резонансной линии Fe XXV с энергией 6.7 кэВ для скопления A426 в созвездии Персея. Предположения о поле скоростей сделаны на основе анализа движений газа в скоплениях из численных расчетов. В результате: а) показано, что радиальные движения значительно сильнее снижают эффективность рассеяния по сравнению со случаем чисто тангенциальных движений, б) показано, что крупномасштабные движения газа слабо влияют на эффективность рассеяния, в) сделана оценка неопределенности в измерении характеристик движений газа с помощью резонансного рассеяния по существующим и будущим наблюдениям скоплений (Чуразов и др., 2010, Журавлева и др., 2010).

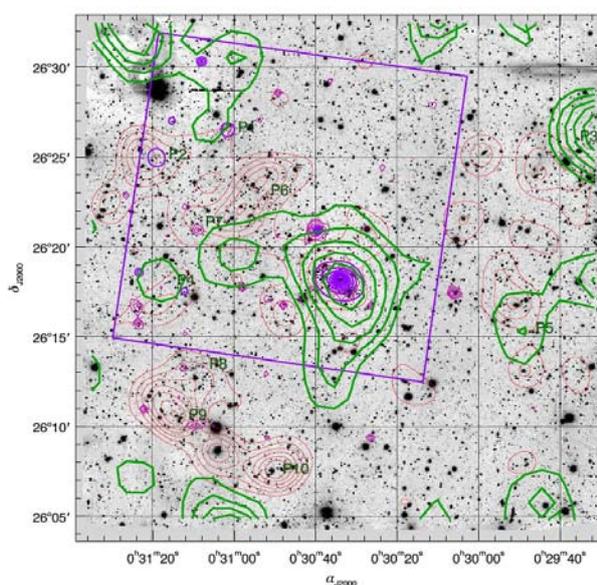
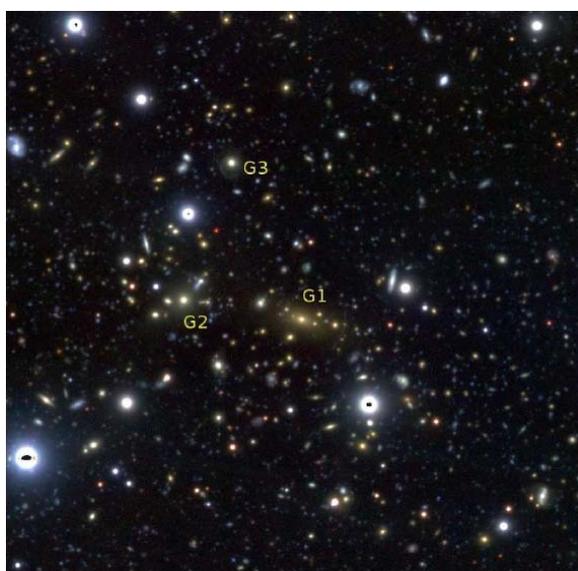


Рис.5. Оптическое изображение скопления 0030+2618 из обзора 400d (слева) и карта сигнала слабого линзирования, полученная по этим данным (справа).

Измерен сигнал слабого линзирования в скоплении 0030+2618 из обзора 400d по данным оптических наблюдений, выполненных при помощи телескопа ММТ (рис. 5). Это дало возможность надежно измерить также полную гравитационную массу скопления (Израэль и др., 2010).

Разработан новый метод измерения масс скоплений галактик по рентгеновским спектрам скоплений, который, по сравнению с другими методами, зависит от наименьшего количества предположений, кроме предположения о сферической симметрии и гидростатического равновесия газа в скоплении (Нульсен, Повелл, Вихлинин, 2010).

Обнаружены семь новых реликтовых систем среди скоплений галактик из обзора 400d. Показано, что, рентгеновские и оптические светимости таких скоплений согласуются с соотношением между этими величинами для полной выборки скоплений (Воеводкин и др., 2010)

Проведено исследование процессов диффузии в скоплениях галактик и их влиянию на распределение тяжелых элементов. Показано, что термодиффузия в скоплениях галактик может успешно противостоять гравитационной силе. Это приводит к тому, что вместо оседания тяжелых элементов к центру скопления под действием силы тяжести, наблюдается гораздо более сложная картина с формированием профиля металличности с рядом пиков и депрессий. В частности, в центральных областях скоплений галактик с холодным ядром происходит отток тяжелых элементов и в профиле металличности формируется депрессия (Штыковский и Гильфанов, 2010).

Выполнен большой объем оптических наблюдений скоплений галактик на телескопах РГТ-150, Датский 1.54-м и БТА с целью увеличения выборки массивных скоплений.

1. Churazov E., Zhuravleva I., Sazonov S., Sunyaev R., «Resonant Scattering of X-ray Emission Lines in the Hot Intergalactic Medium», Space Science Reviews, in press (2010)
2. Журавлева И., Чуразов Е., Сазонов С., Сюняев Р., Долаг К., «Резонансное рассеяние в скоплениях галактик при анизотропном движениях на разных пространственных масштабах», Письма в Астрономический журнал, в печати (2010)
3. Israel H., Erben T., Reiprich T. H., Vikhlinin A., et al. «The 400d Galaxy Cluster Survey weak lensing programme. I. MMT/Megacam analysis of CL0030+2618 at $z = 0.50$ », Astronomy and Astrophysics, 520, A58 (2010)
4. Nulsen P. E. J., Powell S. L., Vikhlinin A., «Model-independent X-ray Mass Determinations», The Astrophysical Journal, 722, 55 (2010)
5. Voevodkin A., Borozdin K., Heitmann K., Habib S., Vikhlinin A., Mescheryakov A., Hornstrup A., Burenin R., «Fossil Systems in the 400d Cluster Catalog», The Astrophysical Journal, 708, 1376 (2010)
6. Shtykovskiy P., Gilfanov M., «Thermal diffusion in the intergalactic medium of clusters of galaxies», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 401, 1360 (2010)

Космологическая рекомбинация

Рассмотрена переработка атомами водорода и гелия высокоэнергичных фотонов, излучаемых HeII и HeI во время эпохи рекомбинации. Показано, что по сравнению со случаем, когда

пренебрегают всеми процессами обратной связи, количество фотонов, рожденных во время рекомбинации, которые относятся к присутствию гелия в ранней Вселенной, может быть увеличено на 40-70%. Наблюдения этих фотонов могут быть использованы для проверки нашего понимания физики рекомбинации (Хлуба, Сюняев, 2010а).

Получено уравнение переноса фотонов в линии Лайман-альфа с учетом поправок двухфотонных поправок в течение космологической рекомбинации. Это уравнение использовано для расчета поправок к соболевской вероятности выхода фотонов линии Лайман-альфа, что позволило рассчитать изменения доли свободных электронов, температуры микроволнового фона и спектра мощности его поляризации (Хлуба, Сюняев, 2010б).

Исследовано размывание неоднородностей микроволнового фона, вызванное добавлением излучения, рассеянного с других направлений горячи газом скоплений галактик (Хернандес-Монтеагудо, Сюняев, 2010).

1. Chluba J., Sunyaev R. A., «Cosmological recombination: feedback of helium photons and its effect on the recombination spectrum», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, 1221 (2010a)
2. Chluba J., Sunyaev R. A., «Ly α escape during cosmological hydrogen recombination: the 3d-1s and 3s-1s two-photon processes», *Astronomy and Astrophysics*, 512, A53 (2010)
3. Hernández-Monteagudo C., Sunyaev R. A., «Galaxy clusters as mirrors of the distant Universe. Implications of the blurring term for the kSZ and ISW effects», *Astronomy and Astrophysics*, 509, A82 (2010)

Активные ядра галактик

Каталог активных ядер галактик (АЯГ), зарегистрированных в ходе жесткого рентгеновского обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ, является уникальной репрезентативной выборкой близких сейфертовских галактик, которая позволяет изучать статистические свойства сейфертовских галактик и развивать унифицированную модель АЯГ.

Для 68-ми АЯГ из этого каталога, расположенных вне плоскости Галактики ($|b| > 5$ град) были выполнены инфракрасные наблюдения и обработаны данные архивных наблюдений космического телескопа Спитцер. По этим данным для всех объектов построены изображения и спектры в инфракрасном диапазоне длин волн. Выявлена корреляция между светимостями АЯГ в инфракрасном и жестком рентгеновском диапазонах энергий. При этом жесткое рентгеновское излучение рождается в горячей короне аккреционного диска около сверхмассивной черной дыры, а инфракрасное излучение возникает в результате переработки ультрафиолетового излучения аккреционного диска в торе из молекулярного газа и пыли ключевом элементе унифицированной модели АЯГ. На основе статистики сейфертовских галактик первого и второго типа в каталоге ИНТЕГРАЛ сделан вывод о том, что характерный угол раскрытия газопылевого тора в среднем увеличивается с увеличением светимости АЯГ. С учетом этого факта оказалось, что как у сейфертовских галактик различной светимости, так и у квазаров в горячей короне рождается примерной постоянной долей полной светимости АЯГ.

Для подвыборки АЯГ, расположенных в северной части неба (40 объектов), были сняты оптические спектры с помощью российско-турецкого 1.5-метрового телескопа (РТТ-150). По этим данным для всех объектов были измерены потоки в узких запрещенных линиях кислорода, а в сейфертовских галактиках первого типа также параметры (ширина и поток) широких бальмеровских линий. Была проверена гипотеза о скоррелированности потоков в узких линиях и жестком рентгеновском диапазоне. Оказалось, что данная корреляция характеризуется большим разбросом значений около среднего тренда. Большой разброс

характеризует также и корреляцию между потоками в узких инфракрасных линиях тонкой структуры (по данным Спитцер) и жестком рентгеновском диапазоне. Таким образом можно говорить о том, что светимость излучения в узких линиях может служить лишь достаточно грубым индикатором болометрической светимости АЯГ.

По измеренным параметрам широких линий была выполнена оценка масс сверхмассивных черных дыр в ядрах сейфертовских галактик первого типа. Выполнено сравнение этих значений с оценками, полученными альтернативными методами.

По результатам семилетнего обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ составлен обновленный каталог источников. Данный каталог в частности включает около 200 АЯГ, несколько десятков из которых были открыты обсерваторией ИНТЕГРАЛ. На основе увеличенной (примерно вдвое) выборки АЯГ уточнены параметры функции светимости близких АЯГ, а также зависимости соотношения объектов первого и второго типа от светимости. Эти результаты превосходят по точности все имеющиеся до сих пор (Кривонос и др., 2010б,в).

1. Krivonos R., Revniltsev M., Tsygankov S., Sazonov S., Vikhlinin A., Pavlinsky M., Churazov E., Sunyaev R., «INTEGRAL/IBIS 7-year All-Sky Hard X-ray Survey. I. Image reconstruction», *Astronomy and Astrophysics*, 519, 107 (2010б)
2. Krivonos R., Tsygankov S., Revniltsev M., Grebenev S., Churazov E., Sunyaev R., «INTEGRAL/IBIS 7-year All-Sky Hard X-Ray Survey. II. Catalog of sources», *Astronomy and Astrophysics*, 523, 61 (2010в)

Определение физических механизмов, влияющих на статистические свойства двойных систем с нейтронными звездами в Галактиках.

Основная идея исследования заключается в следующем. Соотношение количества объектов, имеющих разные светимости, является результатом совместного влияния начальных распределений двойных систем по их размерам/орбитальным периодам, зависимости темпа истечения вещества с обычной звезды-компаньона, и временной эволюции периода двойной системы в результате отвода углового момента. Наблюдаемое распределение релятивистских объектов в двойной системе по их светимости имеет явную особенность - в области светимостей выше $5 \cdot 10^{37}$ эрг/сек наклон функции распределения источников по светимости значительно отличается от такового на светимостях ниже $5 \cdot 10^{37}$ эрг/сек. Ранее в литературе (Постнов, Куранов 2005) было высказано предположение, что этот слом есть результат того, что на более высоких светимостях в отводе углового момента преобладает магнитный звездный ветер, а на более низких светимостях - гравитационное излучение. Изучение набора двойных систем в нашей Галактике, у которых мы можем знать орбитальные периоды, типы звезд-компаньонов и т.д. даст понимание того, чем отличаются источники, имеющие систематически малые и систематически большие светимости. Нами была проделана такая работа, основываясь на каталогах галактических обзоров обсерваторий УХУРУ (мягких рентгеновских диапазон) и ИНТЕГРАЛ (жесткий рентгеновских диапазон). Для всех источников с рентгеновским потоком выше $1.4 \cdot 10^{-10}$ эрг/сек/см² были собраны расстояния, орбитальные периоды и типы звезд компаньонов. Оказалось, что можно сделать статистически достоверное заключение, что двойные системы, имеющие светимости выше некоего порогового значения около $5 \cdot 10^{37}$ эрг/сек имеют в качестве компаньонов звезды-гиганты, во время компаньоны источников с более низкой светимостью - звезды главной последовательности.

Нами была предложена простейшая модель формирования функции светимости (функции зависимости числа систем от их светимости) маломассивных двойных систем. Показано, что

в рамках простейших предположений мы можем воспроизвести вид функции светимости маломассивных двойных систем, наблюдаемый как в нашей Галактике, так и в других близких галактиках. Основным эффектом, приводящим к тому, что на больших светимостях падение числа объектов с их светимостью становится более быстрым, является эффект быстрого перетекания значительной доли вещества звезды компаньона за время жизни двойной системы. Т.о. наблюдаемый в области светимостей $5 \cdot 10^{37}$ эрг/сек слом не является результатом влияния собственно гравитационного излучения на эволюцию двойных систем, а связан с тем, что эволюция двойных систем с большими светимостями начинает определяться эволюцией самой звезды (звезды-гиганты).

Интересным результатом, полученным параллельно в нашей работе было то, что наблюдаемая зависимость светимости источников от значения их орбитальных периодов в области, где компаньонами являются звезды главной последовательности, хорошо согласуется с простейшими моделями перетекания вещества со звезд-компаньонов в рамках модели уноса углового момента магнитным звездным ветром.

1. M. Revnivtsev, K. Postnov, A. Kuranov, H. Ritter «On the nature of the break in the X-ray luminosity function of low-mass X-ray binaries», *Astronomy and Astrophysics*, accepted, 2010 (arXiv: 1011.5024).

Измерение орбитального периода рентгеновского барстера GS 1826-238 по наблюдениям вариаций его оптического блеска.

В работе исследуется переменность потока излучения двойной системы GS 1826-238 в оптическом и рентгеновском диапазонах. Анализ оптических данных, полученных на телескопе РТТ150 в период 2003- 2004 гг. методом наложения эпох позволил нам обнаружить периодические вариации яркости источника с периодом $P_{orb} = 2.24940 \pm 0.00015$ часа с большой статистической значимостью. При оценке значимости детектирования периодического сигнала мы специально учитывали наличие мощной аperiodической составляющей ("красного шума") в переменности яркости источника. Получены спектры мощности переменности источника в диапазоне частот $\sim 10^{-5}$ -0.01 Гц. Как в оптическом, так и в рентгеновском диапазоне энергий обнаружен статистически значимый излом в спектре мощности переменности потока GS 1826-238 на частоте $\nu_{br} \sim (8.48 \pm 0.14) \cdot 10^{-5}$ Гц. Мы провели оценку орбитального периода системы GS 1826-238, используя корреляцию частоты излома в спектре мощности и орбитального периода двойных $P_{orb} \sim 1/\nu_{br}$, найденную в работе Гильфанова и Арефьева, 2005: $P_{orb} = (3.7 \pm 0.8)$ часов и $P_{orb} = (11.3 \pm 5.9)$ часов, при использовании в качестве реперных источников Sco X-1 и 1H 16267-273, соответственно. Нам представляется, что метод оценки орбитальных периодов маломассивных рентгеновских двойных систем с использованием корреляции $P_{orb} \sim 1/\nu_{br}$, может оказаться весьма многообещающим, особенно для постоянных рентгеновских систем малой светимости.

1. Мещеряков А.В., Ревнивцев М.Г., Павлинский М.Н., Хамитов И., Бикмаев И.Ф., «Измерение орбитального периода рентгеновского барстера GS 1826-238 по наблюдениям вариаций его оптического блеска», *Письма в АЖ*, т.36, №10, с.777 (2010)

Исследование свойств источника в Крабовидной туманности

В 2010 году мы продолжили изучение свойств излучения Крабовидной туманности по данным телескопа SPI обсерватории INTEGRAL и детекторов PCA/RXTE. Мы сконцентрировали работу на исследовании когерентного временного сигнала от изолированно пульсара системы. В частности, используя радио-эфемериды, мы свернули кривые блеска, восстановленные в различных энергетических диапазонах и

проанализировали изменение как формы сигнала так и фазовые задержки в зависимости от энергии. В первом приближении мы нашли, что сигнал в жестком рентгене (20-100 кэВ) и в стандартном рентгене (3-20 кэВ) приходит раньше чем в радио. В первом случае мы измерили опережение в 275 ± 15 микросекунд, во втором - 310 ± 6 микросекунд. Дальнейшие исследования показали, что величина задержки прихода радио сигнала относительно сигнала на энергиях в полосе 2-300 кэВ изменяется с энергией (задержка уменьшается с возрастанием энергии). Данный результат является абсолютно новым. В то же время, расстояние между основным и вторым пиками на фазовой плоскости не зависит от энергии. В качестве объяснения наблюдаемых явлений, мы предложили двухкомпонентную модель формирования пульсирующего излучения, причем, компоненты независимые друг от друга.

1. Molkov, S.; Jourdain, E.; Roques, J. P. "Absolute Timing of the Crab Pulsar with the INTEGRAL/SPI Telescope", *The Astrophysical Journal*, Volume 708, Issue 1, pp. 403-410 (2010)

Аккрецирующие черные дыры и нейтронные звезды в рентгеновских двойных в нашей и других галактиках

(научный руководитель д.ф.-м.н. С.А.Гребенев, отв. исп. к.ф.-м.н. А.А.Лутовинов; тел. 333-22-22, e-mail: sergei@hea.iki.rssi.ru)

Выполнено детальное исследование открытых обсерваторией ИНТЕГРАЛ «быстрых рентгеновских транзиентов» - массивных рентгеновских двойных, содержащих сверхгигант раннего спектрального класса в качестве оптического компаньона, изредка вспыхивающих в рентгеновских лучах на короткое (менее одного дня) время. Рассмотрены механизмы, ответственные за такие короткие и мощные вспышки, отмечено, что ключевую роль должен играть эффект «пропеллера», останавливающий и отбрасывающий аккрецирующее вещество на границе магнитосферы компактного объекта (нейтронной звезды). Вспышка наступает, когда эффект перестает работать из-за повышения плотности аккрецирующего вещества.

Разработан и применен к анализу данных семи лет наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ новый метод построения изображений неба ее телескопами (с кодированной апертурой). Обсерватория провела первый полный и самый глубокий обзор неба и нашей Галактики в жестком рентгеновском диапазоне. Чувствительность обзора ограничивалась лишь систематическими ошибками восстановления изображений. Использование нового метода позволило заметно уменьшить систематические неопределенности, доведя чувствительность обзора до предельных теоретических значений (обусловленных лишь статистикой зарегистрированных фотонов), и открыть много новых источников (рис. 2.1). Согласно опубликованному каталогу, обсерваторией зарегистрирован 521 источник, из которых 262 находятся в нашей Галактике или в галактиках Местной группы (в основном это - черные дыры, нейтронные звезды и белые карлики в двойных звездных системах), 219 - внегалактические (сверхмассивные черные дыры в активных ядрах галактик), 40 источников все еще не идентифицированы. В целом, в результате наблюдений обсерватории число известных на небе жестких рентгеновских источников увеличено в 2-2.5 раза - результат, который можно сравнить лишь с успехом первой рентгеновской обсерватории УХУРУ, работавшей на орбите 40 лет назад.

С помощью обсерватории ИНТЕГРАЛ открыт новый транзиентный рентгеновский источник IGR J05414-6858 в Большом Магеллановом Облаке — Ве-система. Проведены всесторонние исследования открытых нами ранее источников IGR J18462-0223 («быстрого транзиента») и IGR J17380-3749 (транзиентного барстера). Еще один источник IGR J16547-1916 в результате наблюдений на Российско-турецком телескопе РТТ-150 идентифицирован

как катаклизмическая переменная, обнаружены пульсации его оптического излучения с периодом 549 ± 15 с. Если период связан с вращением белого карлика вокруг своей оси, источник является промежуточным поляраром. Выполнены оптические отождествления рентгеновских пульсаров AX J1749.2-2725 и AX J1749.1-2733, получены оценки расстояний до этих объектов.

Исследовано влияние рентгеновского облучения на вертикальную структуру внешних частей аккреционного диска в маломассивных рентгеновских двойных. Показано, что на радиусах $R > 10^{11}$ см, где полная поверхностная плотность диска достигает значений ~ 20 см²/г, прогрев рентгеновскими фотонами затрагивает все слои диска. Эффект прогрева заметно усиливается при учете рассеяния рентгеновского излучения в горячем протяженном слое (короне) над диском.

Проведен анализ большой выборки маломассивных рентгеновских двойных систем с целью исследования их функции светимости. Отмечено, что рентгеновская светимость таких систем сильно коррелирует с типом их оптического спутника. Звезды разного типа имеют разное время жизни. По-видимому, этот факт позволяет объяснить те особенности функции светимости, которые были недавно выявлены в нашей (по наблюдениям маломассивных систем обсерваторией ИНТЕГРАЛ) и других галактиках.

На основе данных спектрометра SPI обсерватории ИНТЕГРАЛ проведен систематический поиск вспышек излучения в узкой линии аннигиляции позитронов на разных масштабах времен (50 ксек – 1 Мсек), в том числе от рентгеновских двойных. За все время не было обнаружено вспышек, превышающих уровень 6σ . Такие выбросы с учетом большого числа независимых испытаний могут быть отнесены к статистическим флуктуациям потока излучения.

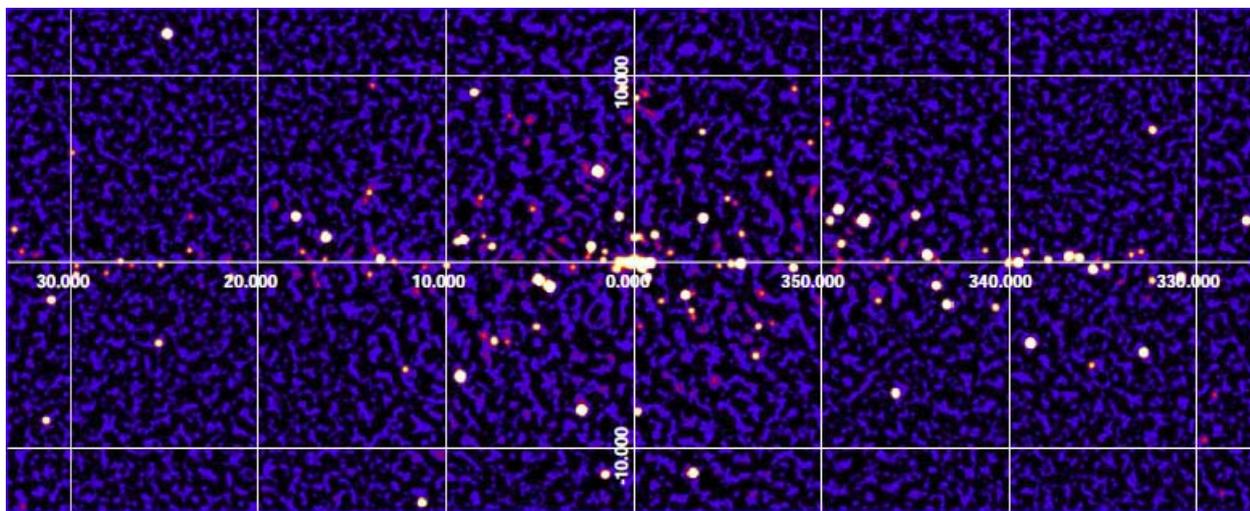


Рисунок 6. Карта центральной части Галактики, полученная телескопом IBIS обсерватории ИНТЕГРАЛ в диапазоне 17-60 кэВ. Систематический шум подавлен. Число источников в поле зрения телескопа равно 80, что находится на пределе возможностей телескопа с кодированной апертурой. Самые слабые источники имеют поток 0.26 мКраб, сильные - более чем в 3000 раз больший.

ПУБЛИКАЦИИ

1. С.С. Цыганков, Е.М. Чуразов «Поиск вспышек излучения в узкой линии 511 кэВ от компактных источников по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ», Письма в Астрономический журнал, т. 36, с. 249, 2010.
2. S.A. Grebenev «Supergiant Fast X-ray Transients observed by INTEGRAL», in Proc. of the Workshop to celebrate 7th Years of INTEGRAL ``The Extreme sky: Sampling the Universe

- above 10 keV" (Otranto/Lecce, Italy, October 13-17, 2009), Proceedings of Science, 96, 60, 2010.
3. С.А. Гребенев, Р.А. Сюняев «Новый быстрый рентгеновский транзиент IGR J18462-0223, открытый обсерваторией ИНТЕГРАЛ», Письма в Астрономический журнал, т. 36, с. 563, 2010.
 4. D.I. Karasev, A.A. Lutovinov, R.A. Burenin «AX J1749.1-2733 and AX J1749.2-2725 - the close pair of X-ray pulsars behind the Galactic Center: an optical identification», Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v. 409, p. 69, 2010.
 5. D.I. Karasev, A.A. Lutovinov, S.S. Tsygankov, R.A. Burenin «The study of the nature of sources AX J1749.1-2733 and AX J1749.2-2725», in Proc. of the Workshop to celebrate 7th Years of INTEGRAL ``The Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV" (Otranto/Lecce, Italy, October 13-17, 2009), Proceedings of Science, 96, 103, 2010.
 6. R. Krivonos, M. Revnivtsev, S. Tsygankov, S. Sazonov, A. Vikhlinin, M. Pavlinsky, E. Churazov, R. Sunyaev «INTEGRAL/IBIS 7-year All-Sky Hard X-Ray Survey. Part I: Image Reconstruction», Astronomy and Astrophysics, v. 519, p. A107, 2010.
 7. R. Krivonos, S. Tsygankov, M. Revnivtsev, S. Grebenev, E. Churazov, R. Sunyaev «INTEGRAL/IBIS 7-year All-Sky Hard X-Ray Survey. Part II: Catalog of Sources», Astronomy and Astrophysics, v. 523, p. A61, 2010.
 8. R. Krivonos, M. Revnivtsev, S. Tsygankov, S. Sazonov, A. Vikhlinin, M. Pavlinsky, E. Churazov, R. Sunyaev «INTEGRAL All-Sky Survey: Deep inside Galaxy and beyond», in Proc. of the Workshop to celebrate 7th Years of INTEGRAL ``The Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV" (Otranto/Lecce, Italy, October 13-17, 2009), Proceedings of Science, 96, 4, 2010.
 9. А.А. Лутовинов, Р.А. Буренин, М.Г. Ревнивцев, В.Ф. Сулейманов, А.Ю. Ткаченко «IGR J16547-1916/1RXS J165443.5-191620 – новый промежуточный поляр из галактического обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ», Письма в Астрономический журнал, т. 36, с. 955, 2010.
 10. А. Лутовинов, S. Tsygankov «Survey of X-ray pulsars in hard X-rays», in Proc. of the Workshop to celebrate 7th Years of INTEGRAL ``The Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV" (Otranto/Lecce, Italy, October 13-17, 2009), Proceedings of Science, 96, 10, 2010.
 11. А.В. Мещеряков, Н.И. Шакура, В.Ф. Сулейманов «Вертикальная структура внешних частей аккреционного диска в стационарных маломассивных рентгеновских двойных системах», Письма в Астрономический журнал, т. 37, №4, в печати, 2010.
 12. S. Tsygankov, А. Лутовинов «Iron line emission from X-ray pulsars: physical conditions and geometry of the system», in Proc. of the Workshop to celebrate 7th Years of INTEGRAL ``The Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV" (Otranto/Lecce, Italy, October 13-17, 2009), Proceedings of Science, 96, 70, 2010.
 13. И.В. Человеков, С.А. Гребенев «Исследование транзиентного рентгеновского барстера IGR J17380-3749, открытого обсерваторией ИНТЕГРАЛ», Письма в Астрономический журнал, т. 36, с. 946, 2010.
 14. I.V. Chelovekov, S.A. Grebenev «Bursts detected in hard X-rays by the IBIS telescope on board the INTEGRAL observatory in 2003-2009», in Proc. of ``Physics of Neutron Stars - 2010" (Cesme/Izmir, Turkey, August 1-7, 2010), 2010.
 15. I.V. Chelovekov, S.A. Grebenev, S.V. Molkov «First X-ray outburst of XTE J1810-189 according to INTEGRAL», in Proc. of ``Physics of Neutron Stars - 2010" (Cesme/Izmir, Turkey, August 1-7, 2010), 2010.
 16. S.A. Grebenev, A.A. Lutovinov «New X-ray source IGR J05414-6858 discovered with INTEGRAL», Astronomer's Telegram, 2695, 2010.

17. A.A. Lutovinov, S.A. Grebenev «Swift follow-up observations of a new transient source IGRJ05414-6858», *Astronomer's Telegram*, 2696, 2010.

Космические гамма-всплески

На телескопе РТТ-150 проведены наблюдения оптических послесвечений четырех космических гамма-всплесков. По результатам этих наблюдений опубликовано 6 циркуляров GCN. Данные, полученные нами ранее, были использованы в работах по подробному исследованию гамма-всплеска 060526 (Тон и др., 2010), а также для работы по исследованию большой выборки гамма-всплесков (Канн и др., 2010).

1. Kann D. A., Klose S., Zhang B., ..., Pozanenko A., ..., Bikmaev I. F., ..., Burenin R. A., ..., Mescheryakov A., et al., «The Afterglows of Swift-era Gamma-ray Bursts. I. Comparing pre-Swift and Swift-era Long/Soft (Type II) GRB Optical Afterglows», *The Astrophysical Journal*, 720, 1513 (2010)
2. Thöne C. C., Kann D. A., Jóhannesson G., ..., Bikmaev I. F., ..., Burenin R. A., ..., Pavlinsky M. N., ..., Pozanenko A., et al., «Photometry and spectroscopy of GRB 060526: a detailed study of the afterglow and host galaxy of a $z = 3.2$ gamma-ray burst», *Astronomy and Astrophysics*, 523, A70 (2010)