

Фундаментальные и прикладные научные исследования в области астрофизики и радиоинтерферометрии

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

Гос. регистрация № 0120.0 602990

Научный руководитель академик Р.А. Сюняев

### **Соотношение рентгеновской и оптической светимостей в двойных системах с аккрецирующими немагнитными белыми карликами**

В работе исследована связь оптической (фильтр  $g$ ) и рентгеновской (0.5-10 кэВ) светимостей аккрецирующих немагнитных белых карликов. Показано, что зависимость оптической светимости аккрецирующих белых карликов от их рентгеновской светимости формирует достаточно узкую однопараметрическую кривую. Типичная полуширина этой кривой не превышает 0.2-0.3 dex по светимостям в оптическом и рентгеновском диапазонах, что практически согласуется с амплитудой аperiodической переменности яркости этих объектов. На низких рентгеновских светимостях ( $L_x < 1e30$  эрг/сек) в оптическом спектре двойной системы начинает преобладать вклад фотосферы белого карлика и ее оптическая яркость не опускается ниже  $M_g \sim 13-14$ . Используя этот факт мы показываем, что в текущих и планируемых в будущем обзорах неба в рентгеновском диапазоне энергий возможно полное отождествление семейства аккрецирующих немагнитных белых карликов до расстояний, определяемых чувствительностью оптического обзора неба в этой области. Для обзора неба SDSS с предельной чувствительностью  $m_g \sim 22.5$  это расстояние соответствует  $\sim 400-600$  пк.

### **Жесткое рентгеновское излучение Скорпион X-1**

Приведены результаты анализа всего массива (2003-2013) наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ ярчайшей аккрецирующей нейтронной звезды Скорпион X-1. Показано, что спектр Скорпион X-1 в жестком рентгеновском диапазоне имеет вид степенного закона без признаков завала до энергий 200-300 кэВ. Такая форма спектра не согласуется с предсказаниями моделей, в которых жесткое рентгеновское излучение двойной системы возникает в результате Комptonизации затравочных фотонов на направленном движении электронов вблизи нейтронной звезды. Амплитуда степенного хвоста зависит от формы спектра излучения Скорпион X-1 в стандартном рентгеновском диапазоне (1-20 кэВ), в котором излучают оптически толстые аккреционный диск и пограничный слой/слой растекания на поверхности нейтронной звезды. Мы показываем, что минимальная амплитуда степенного хвоста наблюдается тогда, когда так же минимален вклад внутренней части оптически толстого аккреционного диска. Приведенные оценки дают основания предположить, что, скорее всего, степенной хвост в спектре излучения Скорпион X-1 формируется в результате Комптоновского рассеяния на нетепловых электронах. Источником таких электронов может быть корона над внутренней частью аккреционного диска, в которой могут происходить процессы пересоединения сгенерированных в диске магнитных полей.

### **Широкополосный спектр полного рентгеновского излучения галактики M31**

Измерен спектр полного потока рентгеновского излучения галактики Туманность Андромеды (M31) в диапазоне 3– 100 кэВ по данным космических экспериментов RXTE/PCA, ИНТЕГРАЛ/ISGRI и SWIFT/BAT. Показано, что суммарное излучение

галактики имеет многокомпонентный спектр, основные характеристики которого задаются двойными системами, излучающими в оптически толстом и оптически тонком режимах. Светимость галактики на энергиях 20– 100 кэВ дает около 6% полной светимости галактики в диапазоне 3– 100 кэВ. Излучательная способность звездного населения галактики M31 в диапазоне 2–20 кэВ  $L_{2-20 \text{ кэВ}} \sim 1.1e29 \text{ эрг/с/Msun}$ , в диапазоне 20– 100 кэВ  $L_{20-100 \text{ кэВ}} \sim 8e27 \text{ эрг/с/Msun}$ . Учет вклада жесткой компоненты спектра галактики изменяет эффективную комптоновскую температуру излучения галактики приблизительно в 2 раза, от  $\sim 1.1 \text{ кэВ}$  до  $\sim 2.1 \text{ кэВ}$

### **Определение площади аккреционных колонок в промежуточном поясе EX Нуа по аперриодической переменности его яркости**

В работах этого направления определения площади аккреционной колонки на поверхности белых карликов проводится при помощи анализа аперриодической переменности их яркости. В наших работах предыдущих лет было показано, что аперриодическая переменность яркости аккрецирующих магнитных белых карликов должна иметь особенность (замывание) на частотах, больших чем обратное время остывания вещества под ударной волной в аккреционной колонке. В статьях этого года изложены результаты анализа аперриодической переменности яркости аккрецирующего белого карлика в двойной системе EX Нуа в рентгеновском и оптическом спектральных диапазонах. Показано, что аккреционная колонка на поверхности EX Нуа имеет площадь не более чем  $\sim 1e-4$  от площади белого карлика. Размеры колонки указывают на толщину замороженности вещества на внутренней границе диска  $dr/r < 3 \cdot 10^{-3}$ . Для систем с аналогичным размером магнитосферы, данная толщина замороженности аккрецируемой плазмы будет приводить к фракционной площади колонки на поверхности НЗ  $f < 10^{-6}$

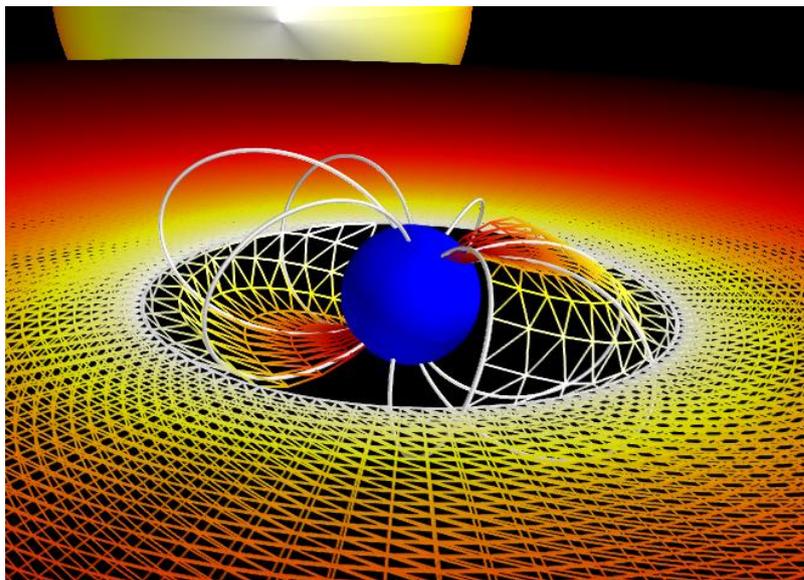


Рис. 1. Схематическое изображение аккреционного потока вокруг замагниченного белого карлика в двойной системе EX Нуа. Вблизи белого карлика его магнитное поле перехватывает контроль за движением аккрецирующего вещества, которое затем движется вдоль поверхности магнитосферы. Толщина, ширина слоя и полный темп аккреции определяют плотность вещества под поверхностью ударной волны у БК и, следовательно, время его остывания.

## **Обнаружение скоплений галактик в обзоре всего неба спутником PLANCK по эффекту Сюняева-Зельдовича, интерпретация данных и оптическое отождествление с помощью Российско-Турецкого телескопа**

Оптические наблюдения скоплений галактик, обнаруженных по эффекту Сюняева-Зельдовича в обзоре всего неба космической обсерватории им.Планка, были проведены при помощи Российско-Турецкого 1.5-м телескопа, а также при помощи 6-м телескопа САО РАН. Результаты этих наблюдений были использованы при подготовке каталога скоплений, обнаруженных в обзоре обсерватории им. Планка. Данные из этого каталога, в свою очередь, были использованы для того чтобы получить новые, независимые ограничения на параметры космологической модели.

## **Долгомасштабная переменность рентгеновских двойных систем с гигантами поздних спектральных классов.**

Предложен физический механизм, с помощью которого можно объяснить шум в темпе аккреции маломассивных рентгеновских двойных на временных масштабах, сравнимых с орбитальным периодом систем. С помощью численных расчетов показано, что в случае аккреции из ветра звезды гиганта позднего спектрального класса возмущения ветра орбитальным движением звезд (даже в случае орбитального движения с нулевым эксцентриситетом) и появление неразвитого турбулентного движения вблизи компактного объекта приводят к формированию характерного времени переменности темпа аккреции, близкого к орбитальному периоду системы. Согласно проведенным исследованиям наблюдательные проявления такого звездного ветра несильно отличаются от наблюдательных проявления ветра/короны аккреционного диска.

## **Отождествление рентгеновских источников из обзоров неба обсерваторий ИНТЕГРАЛ, РОСАТ, АСКА**

Наша группа продолжает проводить отождествление рентгеновских источников, обнаруженных в обзорах неба орбитальных обсерваторий. В результате этой работы существенно повышается полнота обзоров, что дает возможность анализировать различные звездные популяции в нашей Галактике. Для отождествления источников нами систематически проводятся наблюдения в оптическом диапазоне на телескопах РТТ150, БТА и т.д. , а также анализ фотометрических измерений, проводимых на других наземных телескопах. Вид спектров оптических объектов, соответствующих рентгеновским источникам, позволяет уверенно определять природу этих объектов.

## **Наблюдения рентгеновского транзиента MAXI J1828-249 обсерваториями ИНТЕГРАЛ и СВИФТ**

В работе проведен анализ наблюдений яркого рентгеновского транзиента MAXI J1828-249 при помощи наблюдений орбитальных обсерватории ИНТЕГРАЛ и СВИФТ. В рентгеновском спектре источника обнаружены две спектральные компоненты - компонента теплового излучения температурой около 0.7 кэВ и компонента степенной зависимости количества фотонов от энергии вплоть до 200 кэВ. Такой вид энергетического спектра источника характерен для двойных звездных систем с аккрецирующими черными дырами.

## **Моделирование функции светимости галактических двойных маломассивных рентгеновских источников.**

В сотрудничестве с Государственным Астрономическим Институтот им. Штернберга проведены расчеты долговременной эволюции популяции семейства двойных систем с маломассивной звездой и компактным компонентом – нейтронной звездой. Показано, что в диапазоне светимостей  $L_x > 1e37$  эрг/с большая часть ММРД балджа Галактики должна иметь вторичный компонент, сошедший с главной последовательности (маломассивные гиганты) и заполняющий полость Роша. Практически все рассмотренные модели предсказывают дефицит ММРД на рентгеновских светимостях около  $\sim 1e36.5$  эрг/с из-за перехода двойной системы с режима отвода углового момента магнитным звездным ветром на режим гравитационных волн. На малых светимостях существенное влияние на вид модельной функции светимости ММРД оказывает транзитный характер их поведения — темп аккреции на компактный компонент не всегда равен темпу обмена массами из-за неустойчивостей в аккреционном диске вокруг компактного объекта. Наилучшее согласие с наблюдаемыми системами достигается в моделях, предполагающих возможность рождения тяжелых нейтронных звезд с массами 1.4–1.9 $M_{\odot}$ .

## **Рентгеновская астрономия: вчера, сегодня, завтра**

(научно-популярные статьи)

Кратко рассказывается история развития рентгеновской астрономии, начиная с первых ракетных экспериментов до современных орбитальных обсерваторий. Описаны объекты исследования рентгеновской астрономии и достижения последних лет. Большое внимание уделено развитию технологий формирования изображений и технологий регистрации рентгеновского излучения.

## **Широкополосная спектроскопия рентгеновских новых**

По данным орбитальных обсерваторий SWIFT, INTEGRAL, MAXI/ISS и наземного телескопа PTT-150 выполнено исследование широкополосных (от оптики до жесткого рентгена) спектров излучения рентгеновских новых MAXI J1828-249 и SWIFT J174510.8-262411 во время их вспышек в 2012-2014 гг. Рентгеновские новые – это необычные тесные двойные системы, вспыхивающие лишь изредка из-за нестационарной аккреции вещества с маломассивного нормального компонента системы на вырожденный - черную дыру. Показано, что оптическое и инфракрасное (OIR) излучение новых в значительной мере определяется продолжением степенной спектральной компоненты, ответственной за их жесткое рентгеновское излучение. Вклад внешних холодных областей аккреционного диска, даже с учетом рентгеновского прогрева его поверхности, оказывается умеренным во время "высокого" состояния источников (когда в рентгеновском спектре наблюдается мягкая чернотельная компонента излучения) и практически отсутствует во время "низкого" или "жесткого" состояния. Обычно считается, что OIR-излучение маломассивных двойных полностью определяется прогревом жестким рентгеном внешних областей диска. Полученный результат наоборот предполагает, что значительная доля их OIR- и UV-излучения формируется в той же области основного энерговыделения, где образуется жесткое излучение. Это может быть комптоновское или синхротроновское излучение высокотемпературной плазмы в центральной раздутой неустойчивостями области аккреционного диска, синхротронное излучение горячей короны над диском или синхротронное излучение его релятивистских струй (джетов).

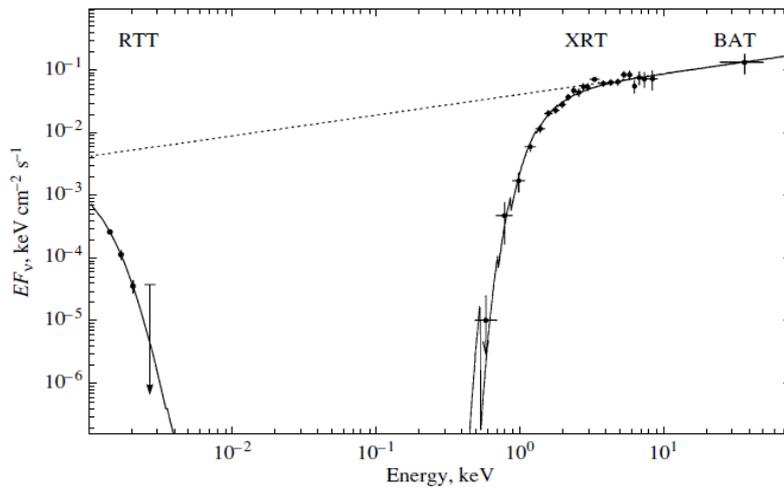


Рис.3 Спектр рентгеновской новой SWIFT J174510.8-262411 во время ее “жесткого” состояния и аппроксимация степенным законом, искаженным из-за фотопоглощения

56

### Открытие обсерваторией INTEGRAL линий гамма-излучения радиоактивного Ni от SN 2014J

С помощью обсерватории INTEGRAL зарегистрировано излучение в гамма-линиях прямого вылета на энергиях 158 и 812 кэВ от распада радиоактивного Ni-56 в оболочке Сверхновой 2014J. Наблюдения были выполнены 30 января 2014 г. через две недели после взрыва. Поскольку в это время оболочка была абсолютно непрозрачна, факт регистрации означает, что заметная (~10%) доля Ni-56, синтезированного при взрыве, была выброшена в ее внешние слои. Параметры зарегистрированного излучения свидетельствуют о сильной асимметрии взрыва сверхновой. Это первая регистрация радиоактивного излучения Ni-56 от сверхновых, регистрация неожиданная, т.к. никель полностью исчезает (распадаясь с характерным временем 8.8 дней) задолго до момента просветления оболочки. Все надежды на наблюдение рентгеновского и гамма-излучения от сверхновых типа Ia традиционно связывались с распадом Co-56 (дочернего продукта Ni-56), причем появиться это излучение должно было намного позже - через 50-100 дней после взрыва (такое излучение от SN 2014J действительно в указанные сроки было зарегистрировано обсерваторией INTEGRAL – см. ниже).

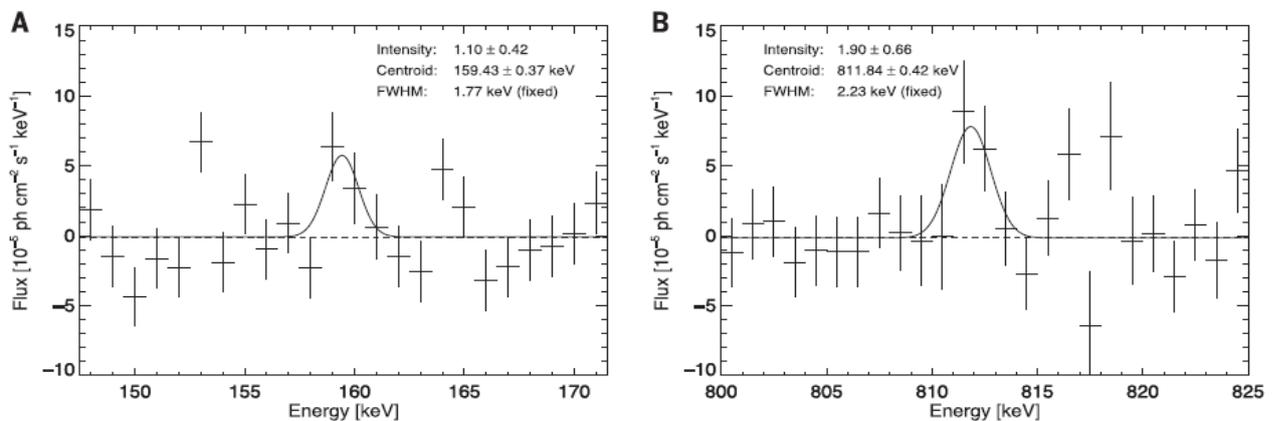
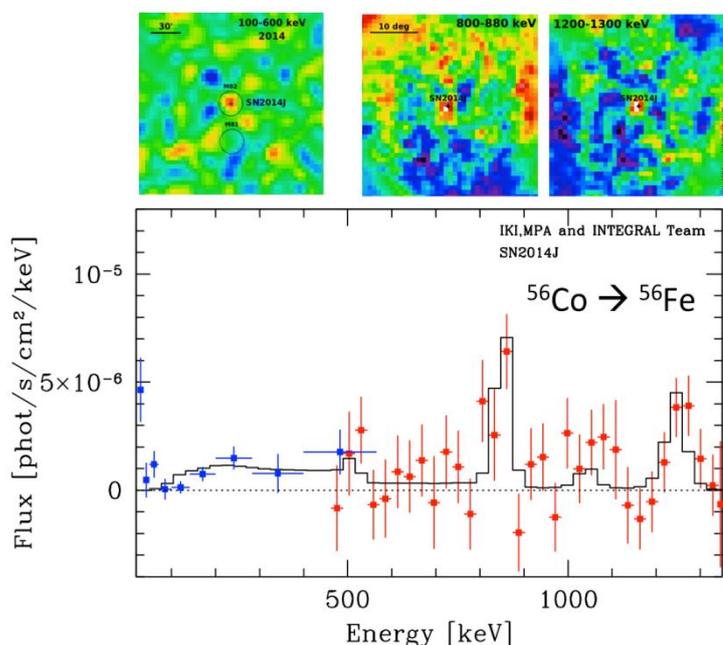


Рис.4 Гамма-линии Ni-56, зарегистрированные от SN 2014J на энергиях 158 и 812 кэВ через 2

### Открытие гамма-излучения кобальта-56 от SN 2014J, вспыхнувшей в галактике M82

С помощью обсерватории INTEGRAL впервые зарегистрировано гамма-излучение от распада радиоактивного кобальта-56 в сверхновой типа Ia (SN 2014J). Эта сверхновая вспыхнула 14 января 2014 г. в галактике M82 на расстоянии 3.5 Мпк. Она стала наиболее близкой к нам сверхновой типа Ia с момента зарождения рентгеновской астрономии. Хотя SN Ia широко используются для космологических измерений как “стандартные свечи”, их природа понята плохо. Считается, что наблюдается термоядерный взрыв белого карлика, накопившего критическую массу вещества при аккреции в двойной системе, либо взрыв при слиянии двух белых карликов – компонентов системы.

При взрыве синтезируется ряд изотопов, вплоть до элементов группы железа. Согласно расчетам, из радиоактивных элементов больше всего образуется Ni-56, который распадается в Co-56, а затем (с характерным временем 111 дней) в обыкновенное железо (Fe-56). Распад этого изотопа считается ответственным за оптическую светимость сверхновой на поздней стадии (через несколько недель после взрыва). Обсерватория ИНТЕГРАЛ, обнаружив гамма-кванты, характерные для распада кобальта-56, напрямую подтвердила предположения теоретиков и доказала, что сверхновые Ia связаны с термоядерными взрывами белых карликов, сверхплотных остатков звезд. Дальнейшие наблюдения позволят лучше понять особенности взрыва и правомочность использования



SN Ia для измерения расстояний.

Рис. 5 Регистрация обсерваторией ИНТЕГРАЛ источника гамма-излучения на месте SN 2014J через ~ 2 месяца после взрыва, а также его спектр, характерный для распада Co-56 (гамма-линии 511, 847 и 1238 кэВ, комптонизационный и аннигиля-ционный континуум ниже 511 кэВ).

### Низкочастотный шум, квазипериодические осцилляции и фрактальная размерность рентгеновских кривых блеска аккрецирующих черных дыр

Происхождение низкочастотного шума (LFN) и квазипериодических осцилляций (QPO), наблюдаемых в потоке рентгеновского излучения галактических черных дыр в двойных системах, все еще не известно, несмотря на многочисленные попытки моделирования этих явлений. Существуют известные корреляции между частотой QPO, мощностью LFN, потоком рентгеновского излучения, спектральным состоянием системы, но до сих пор нет модели, способной объяснить эти зависимости. Необходима дополнительная информация, которая поможет сдвинуться в понимании этих явлений. Сотрудники ИКИ РАН попытались получить такую информацию из фрактального анализа рентгеновских кривых блеска маломассивной двойной системы с черной дырой GX 339-4 - известной рекуррентной рентгеновской новой. Использовались наблюдения мощных вспышек источника обсерваторией RXTE. Оказалось, что фрактальная размерность кривых блеска сильно зависит от присутствия QPO в спектре рентгеновской мощности, более того - выявлена связь между величиной фрактальной размерности и частотой пика QPO. Предложен дополнительный к анализу Фурье метод, позволяющий исследовать характер излучения аккреционного диска на разных временных масштабах. Сделан вывод, что фрактальный анализ рентгеновских кривых блеска маломассивных двойных, содержащих черную дыру, имеет хороший научный потенциал и способен предоставить дополнительную информации о геометрии аккреционного течения и о фундаментальных свойствах исследуемой системы.

### Широкополосная рентгеновская спектроскопия ультраярких рентгеновских источников

По данным обсерваторий глубоких наблюдений, проведенных обсерваториями XMM-Newton и

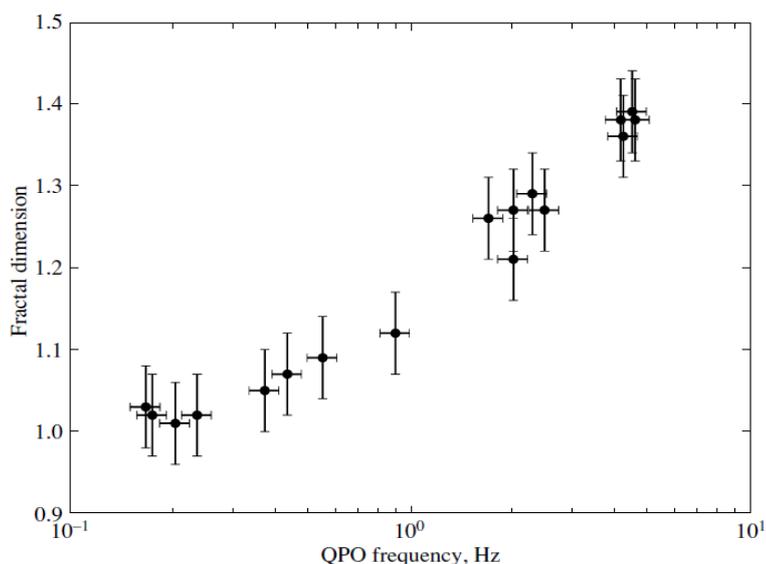


Рис. 4 Зависимость фрактальной размерности от частоты пика QPO в кривых блеска рекуррентной рентгеновской новой GX 339-4

ИНТЕГРАЛ в широком рентгеновском диапазоне энергий 0.5-100 кэВ, построены спектры двух ультраярких рентгеновских источников NoIX X-1 и M82 X-1. Полученные спектры можно описать моделью комптонизации излучения в облаке газа с умеренной температурой (кТ~2-3 кэВ) и большой оптической толщиной  $\tau \sim 15-25$ . Спектры также демонстрируют завал на энергиях выше 10 кэВ. Условия, которым соответствуют полученные спектры, могут реализовываться при сверхкритической аккреции вещества на черную дыру звездной массы, сопровождаемой сильным оттоком газа.

### Построение каталога коротких гамма-транзиентов, зарегистрированных в эксперименте SPI/INTEGRAL

Исследование основано на данных спектрометра SPI международной астрофизической обсерватории ИНТЕГРАЛ. Используя специально разработанный авторами алгоритм, в данных искались всплески продолжительностью от 1 мс до нескольких десятков секунд. Всего было найдено более 420 всплесков из которых: 223 были ассоциированы с

источником повторных гамма-всплесков SGR1806-20 и аномальным рентгеновским пульсаром AXP 1E1547.0-5408, 48 всплесков отождествлены с гамма-всплесками с подтверждением по данным других обсерваторий и 160 событий отнесены к кандидатам в гамма-всплески. Таким образом, по результатам работы составлен обширный каталог всплесков и приведены их как спектральные, так и временные характеристики.

### **Исследование галактики M31 в широком диапазоне длин волн**

По данным трех рентгеновских обсерваторий (RXTE, INTEGRAL и SWIFT) был получен спектр суммарного излучения галактики Андромеда (M31) в широком рентгеновском диапазоне 3-100 кэВ. Показано, что суммарный спектр галактики может быть представлен в виде суперпозиции спектров двойных систем, излучающих в оптически тонком и оптически толстом режимах. Были сделаны оценки на излучательную способность в двух широких энергетических диапазонах 2-20 кэВ и 20-100 кэВ.

### **О происхождении циклотронных линий в спектрах рентгеновских пульсаров**

Циклотронные особенности (линии) резонансного рассеяния наблюдается в спектрах некоторых рентгеновских пульсаров и показывают существенные изменения их энергии со светимостью пульсара. Такое поведение часто ассоциируется с возникновением и ростом аккреционной колонки, которая, как полагают, отвечает за происхождение наблюдаемого излучения и циклотронных линий. Однако такой сценарий неизбежно предполагает большой градиент напряженности магнитного поля в области формирования линии, что является весьма проблематичным для получения относительно узких линий. В нашей работе рассмотрена физически более реальная ситуация, при которой циклотронная линия образуется в отраженном от поверхности нейтронной звезды излучении, которое изначально сформировалось в аккреционной колонке. Модель отражения разработана и применена для объяснения наблюдаемых изменений энергии циклотронной линии в спектре рентгеновского пульсара V0332+53 в широком диапазоне светимости.

### **Исследование влияния нестационарного поля Галактики на точность определения координат внегалактических источников**

В рамках решения задач навигации и определения точности положений реперных (опорных) источников на небе начаты работы по моделированию и вычислению влияния на них нестационарного гравитационного поля Галактики. Было показано, что наблюдаемые изменения угла отклонения световых лучей в гравитационном поле случайно движущихся точечных масс могут рассматриваться как стохастический процесс. Получено выражение для среднеквадратичного угла отклонения видимого положения источника на небе от истинного, а также для автокорреляционной функции. Начато построение двумерных карт зависимости среднеквадратичного угла отклонения для разных моделей распределения вещества в Галактике.

### **Исследование пространственного распределения галактических источников и межзвездной пыли**

Продолжены исследования пространственного распределения источников рентгеновского излучения и изучение свойств и распределения межзвездной пыли вблизи балджа Галактики. В частности, на основе уточненной функции светимости и пространственного распределения плотности массивных двойных рентгеновских систем и начат поиск таких объектов в балдже Галактики. Для этих целей, на основе данных обзоров обсерваториями ИНТЕГРАЛ и ASCA, были отобраны несколько десятков кандидатов в такие системы и проведено уточнение их координат в мягком рентгеновском диапазоне энергий. Для нескольких объектов были выполнены серии оптических наблюдений с целью определения их природы и проведен предварительный анализ полученных спектров. Также для этих целей будут использованы данные инфракрасного обзора VVV/ESO.

Кроме того, последние могут быть использованы для изучения распределения гигантов красного сгущения в центральных областях Галактики. Такой подход уже позволил нам получить первые карты изменения закона поглощения и поглощения в области неба с галактических координатах  $|l| < 7^\circ$ ,  $|b| < 5^\circ$  и показать, что закон поглощения в этой области значительно отличается от стандартного.

### **Использование масштабных моделей в наземных экспериментах, воспроизводящих теплообмен в условиях космического пространства**

Предлагается метод экспериментального исследования температурных режимов космических устройств с помощью их уменьшенных тепловых моделей. Данный метод основан на критериях подобия, сформированных на основе математической узловой модели исследуемого объекта. Достоверность предлагаемого масштабного теплового эксперимента может быть повышена за счет корректировки узловой модели, а, следовательно, и критериев подобия, по результатам теплового эксперимента с полноразмерным объектом.

### **ART-XC/СРГ – результаты термовакуумных тестов**

Представлены результаты физического теплового моделирования телескопа ART-XC миссии СРГ и, отдельно, моделирования температурного режима зеркал телескопа. Сложность данного моделирования заключается в том, что температура рентгеновских зеркал и детекторов телескопа должна быть стабилизированы с высокой точностью в ограниченном диапазоне. Эксперимент проводился в течение недели при различных тепловых условиях в криовакуумной установке, имитирующей основные тепловые факторы космического пространства. Были выявлены недостатки системы термостабилизации и выработаны рекомендации по их исправлению. Данные рекомендации реализованы при изготовлении образца телескопа для конструкторско-доводочных испытаний и будут проверены в процессе данных испытаний.

### **ART-XC/СРГ Статус разработки рентгеновских фокальных детекторов**

Представлены результаты исследование характеристик полупроводникового рентгеновского детектора, изготавливаемого в ИКИ РАН для телескопа ART-XC миссии СРГ. Материал детектора – CdTe, размер 30x30 мм, тип – стриповый, количество стрипов по одной стороне – 48. Детектор используется совместно со специализированной микросхемой VA64TA1. Представлены характеристики детектора при различной настройке специализированной микросхемы, проявление эффекта поляризации при различной рабочей температуре, а так же результаты экспериментов с детектором на рентгеновском калибровочном стенде ИКИ РАН.

### **Открыто гамма-излучение кобальта-56 от сверхновой типа Ia (SN2014J) в близкой галактике M82.**

Астрофизики ИКИ РАН и их зарубежные коллеги впервые зафиксировали гамма-излучение от распада радиоактивного изотопа кобальта-56 после вспышки сверхновой SN2014J. В процессе термоядерного горения углерода и кислорода в сверхплотном веществе белого карлика (плотность  $\sim 10^9$  г/см<sup>3</sup>) образуется большое количество радиоактивного никеля-56. После взрыва происходит цепочка распадов: никель превращается в кобальт-56, который затем распадается в железо ( $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ ). Обсерватория ИНТЕГРАЛ впервые смогла обнаружить гамма-кванты, характерные для распада кобальта-56. Эти результаты напрямую доказали теоретическую концепцию того, что сверхновые типа Ia — это гигантские термоядерные взрывы белых карликов, сверхплотных остатков звезд.

## Нагрев газа в ядрах скоплений галактик за счет диссипации энергии турбулентных движений.

Используя простую модель, связывающую амплитуду флуктуаций горячего газа в скоплениях галактик со скоростями турбулентных движений, впервые измерен спектр мощности скорости газа. Предполагая, что наблюдаемые движения являются частью турбулентного каскада с Колмогоровским спектром, оценен темп нагрева газа за счет диссипации энергии турбулентных движений. Измеренный темп по порядку величины согласуется с темпом охлаждения газа за счет излучения. Можно сделать вывод, что именно этот механизм отвечает за нагрев газа, что согласуется с теорией совместной эволюции сверхмассивных черных дыр и атмосфер горячего газа в эллиптических галактиках и скоплениях галактик (Nature, 2014).

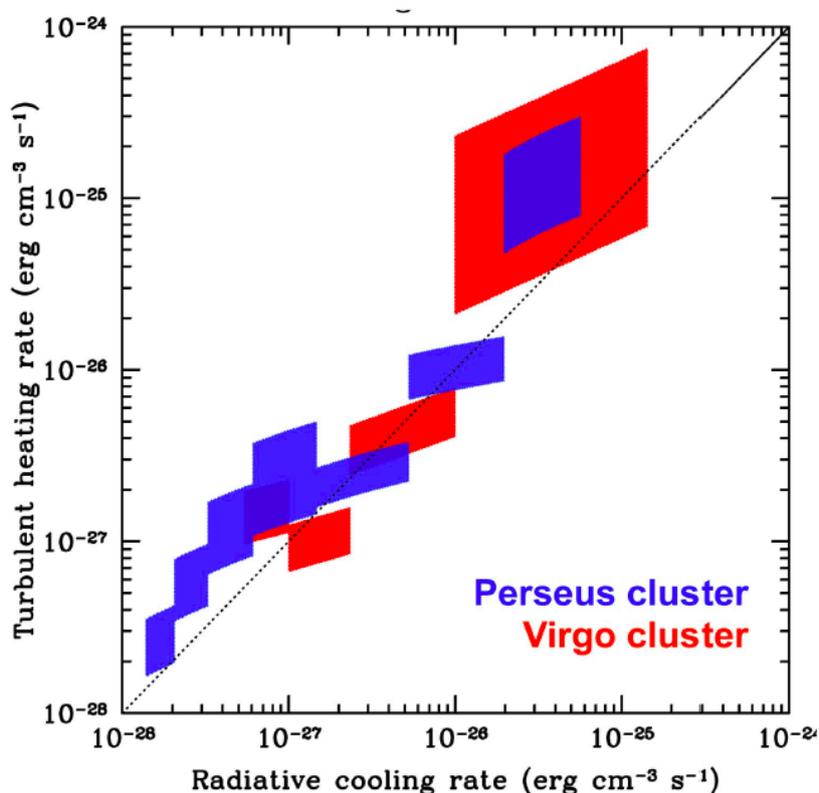


Рис 5. Сравнения темпов охлаждения и турбулентного нагрева газа в ядрах скоплений галактик.

### Происхождение сверхновых типа Ia

Белый карлик, на поверхности которого происходит стационарное ядерное горение аккрецируемого вещества, является мощным источником мягкого рентгеновского и ультрафиолетового излучения в течение ~нескольких миллионов лет до взрыва сверхновой. Это излучения может быть обнаружено не только непосредственно (как от отдельных источников так и от галактики в целом), но и по его эффекту на межзвездную среду. Существование многочисленной популяции белых карликов, гораздо более горячих, чем характерные температуры звезд, способно изменить диффузный фон ионизирующего излучения в родительской галактике, что отразится на ионизационном балансе межзвездной среды. Это приведет к появлению в спектре излучения межзвездной среды линий, не характерных для ионизации излучением обычного (старого) звездного населения, например рекомбинационных линий гелия II и запрещенных линий металлов.

Таким образом, исследуя линейчатое излучение межзвездной среды, можно "калориметрировать" популяцию белых карликов и измерять суммарный темп термоядерного горения водорода на поверхности белых карликов в галактике. Анализ спектров ~11,500 пассивных галактик из Слоановского обзора неба показал, что на поверхности типичного белого карлика в этих галактиках сгорает не более ~0.03-0.05 солнечной массы водорода в этом режиме.

Построена модель популяционного синтеза белых карликов следующего поколения. В модели описание двойных на этапе переноса вещества производится на основе детальных расчетов эволюции звезды-донора. При помощи этой модели рассчитаны популяции аккрецирующих белых карликов в галактиках с различной историей звездообразования и предсказана зависимость темпа вспышек Сверхновых от времени. Продемонстрировано, что результаты отличаются от предсказаний традиционных «быстрых» расчетов, что демонстрирует важность полных эволюционных расчетов при моделировании популяций аккрецирующих белых карликов.

### **Теоретическое и экспериментальное исследование аккреции на черные дыры и нейтронные звезды.**

Продолжены работы по теоретическому и экспериментальному исследованию аккреции на компактные объекты – нейтронные звезды и черные дыры в рентгеновских двойных звездных системах и на сверхмассивные черные дыры в активных ядрах галактик. Продолжено исследование проявлений пограничного слоя у поверхности аккрецирующей нейтронной звезды. Предложен и теоретически обоснован метод диагностики природы белого карлика (гелиевый или углеродно-кислородный) в ультракомпактных рентгеновских двойных методами рентгеновской спектроскопии, по спектру отраженной компоненты. Его эффективность подтверждена на основе наблюдений обсерваторией XMM-Newton ряда ультра-компактных рентгеновских двойных, в которых природа звезды-донора определена другими методами. На основе данных наблюдений звездообразующих галактик в локальной Вселенной и в сверхглубоких обзорах обсерватории Chandra откалибровано соотношение между полной рентгеновской светимостью галактики и ее темпом звездообразования в широком диапазоне темпов звездообразования (до  $10^3 M_{\odot}/\text{год}$ ) и красных смещений (до  $z \sim 1.4$ ).

### **Активные ядра галактик, крупномасштабная структура Вселенной и барионные акустические осцилляции.**

Исследованы проявления крупномасштабной структуры Вселенной в угловом распределении активных ядер галактик. Предложена «минималистическая» модель, одновременно описывающая функцию светимости и корреляционную функцию активных ядер галактик в рамках современной космологической  $\Lambda$ CDM модели. При помощи этой модели продемонстрировано, что рентгеновская активность типичной активной галактики поддерживается за счет аккреции горячего газа из гало в режиме с низкой излучательной эффективностью. Исследованы перспективы больших рентгеновских обзоров неба, таких как обзор телескопом eROSITA обсерватории Спектр-РГ, для обнаружения Барионных Акустических Осцилляций в угловом распределении АЯГ. Сформулированы требования к оптическим “follow-up” наблюдениям, необходимые для решения задач космологии.

### **Исследование влияния диффузии элементов на химический состав межгалактического газа скоплений галактик.**

В работе показано, что неправильное предположение об обилии гелия в скоплениях галактик является причиной смещенной оценки угломерного расстояния до скопления галактик. Общая амплитуда смещения угломерного расстояния около 10-25 % для ошибки в предположении обилия гелия порядка 2-5 раз. Для того чтобы определить максимальный эффект диффузии была решена система уравнений Бюргерса для многокомпонентной межгалактической плазмы. Для модели изотермического скопления, гравитационная седиментация приводит к увеличению обилия гелия и металлов в центральной области скопления на фактор порядка 5-10 за характерное время 3-7 миллиарда лет (пунктирная и сплошная линия, рисунок). В моделях скоплений с холодными ядрами, напротив, термодиффузия может противодействовать гравитационной седиментации и эффективно вымещать гелий и металлы из центра скопления (левая панель рисунка). В обоих случаях, ожидается значительная, до 40 %, ошибка в определении обилия металлов на основе рентгеновской спектроскопии и недооценка угломерного расстояния на 10-25 %.

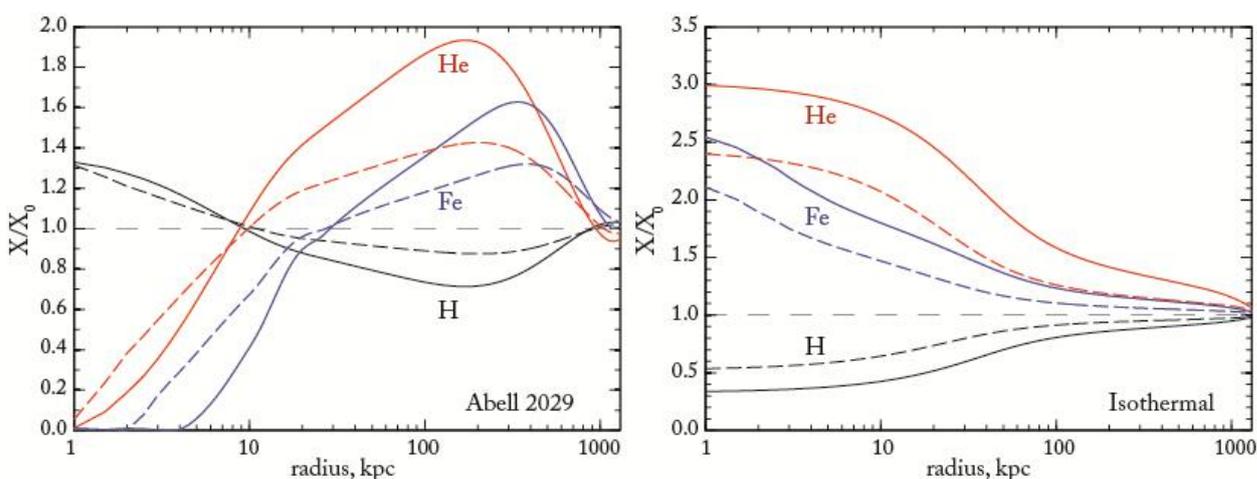


Рис. 6. Радиальные профили обилия химических элементов, возникающие в результате диффузии в горячем газ скоплений.

### Вспышки излучения в результате приливного разрушения звезд сверхмассивными черными дырами

Приливное разрушение звезды (Tidal Distraction Event, TDE) сверхмассивной черной дырой (СМЧД) в центре неактивной галактики должно сопровождаться вспышкой мягкого рентгеновского излучения, возникающего в результате аккреции захваченной части вещества разрушенной звезды на СМЧД. Мы провели систематический поиск подобных вспышек среди ярких источников, обнаруженных обсерваторией ROSAT в ходе обзора всего неба (т.е. источников из RASS Bright Source Catalog), при помощи данных их последующих случайных наблюдений обсерваторией XMM-Newton. Поскольку промежуток между наблюдениями ROSAT и XMM-Newton типично составляет более 10 лет, ожидается, что в случае ассоциации источника с TDE данные XMM-Newton должны продемонстрировать уменьшение его яркости более чем на порядок величины. В результате поиска было обнаружено 3 кандидата, свойства которых совместимы с ожидаемыми в случае ассоциации с TDE, для еще одного источника ассоциация с TDE также возможна, но и его связь с активным галактическим ядром не может быть исключена. Это позволяет получить оценку средней частоты TDE в локальной Вселенной, соответствующую темпу порядка 30 событий за миллион лет в пересчете на отдельную галактику.

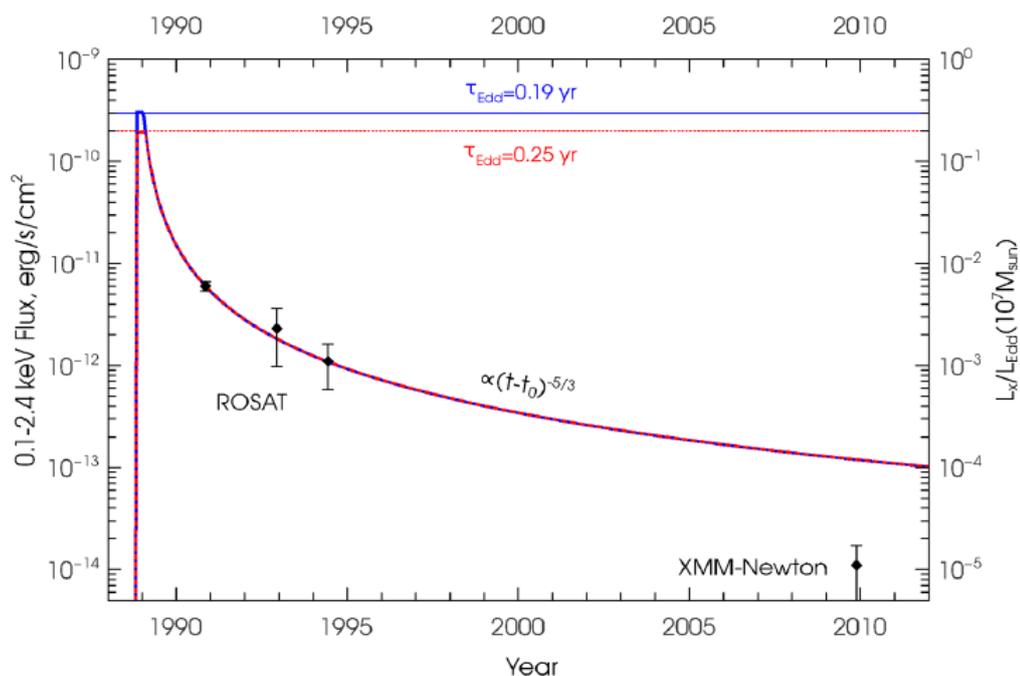
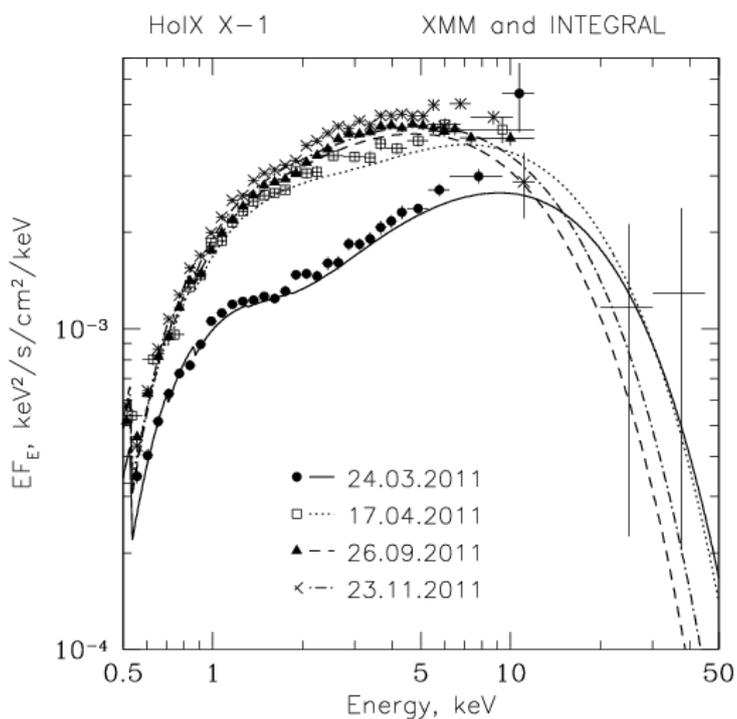


Рис. 7. Кривая блеска одного из найденных кандидатов (RBS 1032) по данным ROSAT и XMM-Newton вместе с подгонкой степенного спада, ожидаемого в случае ассоциации с TDE.

### **Завал в спектре жесткого рентгеновского излучения ультраярких рентгеновских источников - свидетельство сверхкритической аккреции вещества на черные дыры**

Впервые надежно зарегистрирован завал в спектре излучения ультраярких рентгеновских источников на энергиях выше 10 кэВ. Для двух источников этого типа (HoIX X-1 и M82 X-1) по данным продолжительных наблюдений обсерваториями ИНТЕГРАЛ и XMM-Newton получены широкополосные рентгеновские спектры, которые можно описать моделью комптонизации в облаке газа с умеренной температурой ( $kT \sim 2-2.5$  кэВ) и большой оптической толщиной ( $\tau \sim 15-25$ ). Такие условия не характерны для стандартных аккреционных дисков, но могут реализовываться при сверхкритической аккреции вещества на черную дыру. Полученные результаты подтверждают существование уникального спектрального состояния, присущего ультраярким рентгеновским источникам, не похожего ни на одно из известных спектральных состояний обычных рентгеновских двойных систем.

Рис. 8. Рентгеновский спектр источника HoIX X-1 в разные периоды времени.



### Измерения космического рентгеновского фона Вселенной и эксперимент МВН

Изложена история изучения космического рентгеновского фона Вселенной в диапазоне энергий 1-100 кэВ и перспективы его исследования при помощи планирующегося эксперимента Монитор Всего Неба/МВН. Кратко рассказано о природе космического рентгеновского фона и его использовании для изучения космологической эволюции черных дыр. Основной объем работы посвящен методам измерений космического рентгеновского фона, начиная с первых ракетных и стратостатных экспериментов, и заканчивая измерениями, проведенными при помощи орбитальных рентгеновских обсерваторий последнего поколения. Особое внимание уделено проблемам учета вклада фоновых событий в измерения инструментов рентгеновского и жесткого рентгеновского диапазонов.



Рис. 9. Общий вид эксперимента Монитор Всего Неба/МВН. Основная задача эксперимента— измерение поверхностной яркости КРФ с максимально возможной точностью в диапазоне энергий  $\sim 70$  кэВ. Надежность учета инструментального фона детекторов будет обеспечиваться периодическим перекрытием апертуры детекторов вращающимся колесом (в верхней части инструмента), стабильность энергетической шкалы и эффективности детекторов будет контролироваться наблюдениями калибровочных источников, периодически вдвигаемых в поле зрения детекторов (вставки в нижней части коллиматоров). Термостабилизация создается блоком обеспечения теплового режима (управление системой размещено в коробке между коллиматорами).

Ведутся работы по созданию монитора всего неба (МВН) для Международной космической станции. Проведены испытания КДИ МВН.

В ИКИ РАН проведен этап квалификационных испытаний научной аппаратуры эксперимента МВН (СПИН-Х-МВН и БУМВН) на внешние воздействующие факторы. Выявлены некоторые особенности работы рентгеновских детекторов, в части "микрофонного эффекта".

### **Опытно-конструкторская работа Спектр-Рентген-Гамма**

#### **Изготовление и отладка рентгеновского телескопа АРТ-ХС для орбитальной рентгеновской обсерватории Спектр-РГ**

Коллектив лаборатории в 2014 году продолжает работы по изготовлению и отладке рентгеновского телескопа АРТ-ХС для орбитальной обсерватории Спектр-РГ. Среди прочего лаборатории занимается написанием программного обеспечения, необходимого для работ по отладке оборудования. В ходе конструкторско-доводочных испытаний были получены различные замечания к приборам, предложены и сделаны исправления. По результатам работ написаны несколько статей, сделаны доклады на конференции по инструментам рентгеновских обсерваторий.

Проводится разработка и создание наземного научного комплекса (ННК) проекта Спектр-Рентген-Гамма. Сотрудниками лаборатории в 2014 году проведены работы по развертыванию центра научных данных в составе ННК. Проведены испытания технологического образца ЦНД.

Ведутся работы по созданию рентгеновского телескопа ART-XC для проекта Спектр-Рентген-Гамма. Проведены испытания КДИ образцов рентгеновских детекторов для телескопа ART-XC, разработка которых проведена в секторе 524.1.

На стендах КИС ИКИ РАН проведены квалификационные (конструкторско-доводочные) испытания приборов КРД, ССОИ, БУСОТР, МУП, БОКЗ-МФ, входящих в состав астрофизического телескопа ARC-XC орбитальной обсерватории СПЕКТР-РГ. Испытания включали в себя все виды внешних воздействующих факторов: механические, температурные, вакуум, электро-магнитные, электростатические, электрические интерфейсы. Далее приборы поставляются в РФЯЦ-ВНИИЭФ для сборки телескопа.

В НПО им.С.А.Лавочкина проводились работы по интеграции астрофизических телескопов ART-XC и eROSITA с космическим аппаратом СПЕКТР-РГ. Через средства бортового радиокомплекса получены первые тестовые научные данные от приборов. На астрономическом телескопе RTT-150 (обсерватория TUBITAK, Турция) проведена замена устаревшего оборудования - мотор-генератора 400Гц на новый электронный преобразователь. Новая аппаратура позволит проводить качественные наблюдения астрономических объектов, ввиду отсутствия вибраций, шума в здании обсерватории и отсутствия необходимости обслуживания. Работы проводятся совместно с сотрудниками Казанского университета и Университета г. Анталья, Турция.

### **Научно- исследовательская работа «Микрофон»**

Проведен первый этап НИР по разработке проектной концепции новой астрофизической обсерватории «Рентгеновский микрофон», предназначенной для исследования быстрой переменности компактных рентгеновских источников – черных дыр, нейтронных звезд, АГН. Проведена проработка возможности создания детекторов большой площади на основе раздвижных и раскладных конструкций.

### **Раздел Астропыль**

Проведенные наблюдения на телескопе Цейс-1000 (п.Симеиз, Крым), с разработанным широкоугольным поляриметром, показали возможность измерять поляризационные параметры протяженных астрономических объектов до уровней в сотые доли процента. Предложена методика определения дифференциальных параметров линейной поляризации, основанная на выравнивании средних значений и средних квадратичных отклонений яркости в кадрах снятых при различных атмосферных условиях. Предложен метод привязки всех снимков к единой сетке на небесной сфере на основе метода применявшегося в космическом эксперименте COBE/DIRBE. В качестве параметра описывающего поляризацию протяженного объекта, предложено использовать коэффициент корреляции между яркостным и поляризационным сигналами в разных частях объекта («корреляционная поляризация»), что позволяет исследовать объекты занимающие все поле зрения, для которых невозможно одновременно измерить величину атмосферного фона.



Рис. Карта амплитуды корреляционной поляризации галактики M51 для излучения в узкой спектральной полосе вблизи 512 нм с разрешением 40 угл.сек. Точками отмечены положения центров яркости галактик NGC5194 и NGC5195.

## Раздел «Радиоинтерферометр»

**1. Исследования меры вращения в ядре радиогалактики M 87.** Получены карты галактики в поляризованном излучении на волнах 2 и 3 см с разрешением 0.2 мсек. дуги, рис. 1. Структура активной области ядра и кинематика соответствуют анти центрифуге. Окружающая тепловая плазма поступает на «диск», перетекает по спиральной траектории к центру и эжектируется в виде вращающегося биполярного потока, уносящего избыточный угловой момент. По мере перетекания плазма разогревается до релятивистских температур. В плазме возбуждаются кольцевые токи – магнитные поля. Синхротронное излучение структуры наблюдается через окружающую тепловую плазм.

**1.1 Мера вращения в направлении джета.** Окружающая замагниченная тепловая плазма частично поглощает проходящее излучение и меняет ориентацию поляризации. Показано, что регулярная составляющая меры вращения в направлении контрджета экспоненциально спадает от  $RM \approx 10^4$  до нулевого уровня на расстоянии  $\rho = -2$  мсек. дуги (0.15 пк). В джете экспоненциальный спад наблюдается до  $\rho=3$  мсек. дуги, а далее происходит замедленное снижение до  $RM=200$  рад/м<sup>2</sup> на расстоянии  $\rho=6$  мсек. Максимум регулярной составляющей  $RM$  смещен от центра ядра на  $\sim 60$  мпк, что определяется наклоном диска. Повышения меры вращения на  $RM \approx 2000$  рад/ м<sup>2</sup> наблюдаются в местах расположения ярких фрагментов в биполярном потоке, вызываемые локальными магнитными полям. Толщина экрана достигает  $L \approx (0.05-0.5)$  пк, плотность тепловых электронов  $N_e \approx 10^5$  см<sup>-3</sup> и магнитное поле  $B \approx (200-500)$  мГс.

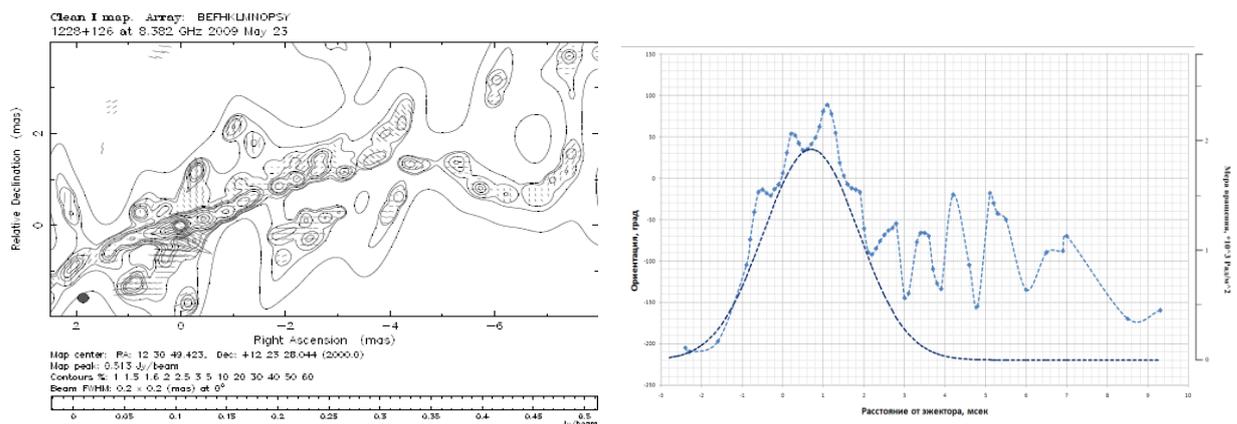


Рис. 1. Распределение радиояркости в M 87 на волне 3 см, разрешение 0.2 мсек. дуги, эпоха 23.05.2009. Уровень и ориентация поляризации обозначены черточками - слева. Распределение ориентации поляризации и меры вращения вдоль биполярного потока на волне  $\lambda=2$  см – справа.

**1.2. Мера вращения в направлении низкоскоростного потока.** Джет окружен низкоскоростным потоком, наблюдаемым в виде параллельных цепочек компонент. Ориентация поляризации компонент верхней цепочки  $X_{3B} \approx 80^\circ (1.25/\rho - 1)$ ,  $\lambda=3$  см и  $X_{2B} \approx$

$80^\circ$  ( $2.1/\rho - 1$ ),  $\lambda=2$  см, а их разность  $\Delta X_{2,3} \approx 68^\circ/\rho$ , что соответствует мере вращения  $RM \approx 1.4 \cdot 10^3/\rho$ , рад/м<sup>2</sup>. Разность ориентаций поляризации в нижней части соответствует уменьшению меры вращения от  $\sim 2200 \pm 500$  рад/м<sup>2</sup>,  $\rho=0.6$  до  $\sim 1400 \pm 500$  рад/м<sup>2</sup>,  $\rho=2.2$ .

## 2. Исследования мазерных источников на сети «КВАЗАР-КВО»

Введен в действие радио интерферометрический комплекс «КВАЗАР-КВО» в режим исследований структуры мазерных источников космического радиоизлучения в линиях водяного пара  $\lambda=1.35$  см и гидроксила  $\lambda=18$  см, в том числе в поляризованном излучении. Начаты наблюдения активных областей звездообразования в Орионе КЛ, W3OH, W49.

**2.1. Активные зоны газопылевого комплекса W3OH.** Проведен анализ тонкой структуры активной области в объекте W3OH в линиях гидроксила  $\lambda=18$  см. В одной из зон выделена структура: биполярный поток и диск, наблюдаемый с ребра, рис. 2. Окружающее вещество стекает по рукавам к центру и эжектируется в виде биполярного потока. Остаток аккрецирует на формирующееся центральное тело – протозвезду. Центральный яркий компактный источник - эжектор, расположен между двух компонент – тангенциальных направлений спирали, удаленных на расстояние 70 и 100 мсек. дуги. Размеры центрального источника не превышают 5 мсек дуги, яркость  $T_b \approx 0.6 \times 10^{12}$  К. Скорости источников соответствуют твердотельному вращению, уносящему избыточный угловой момент.

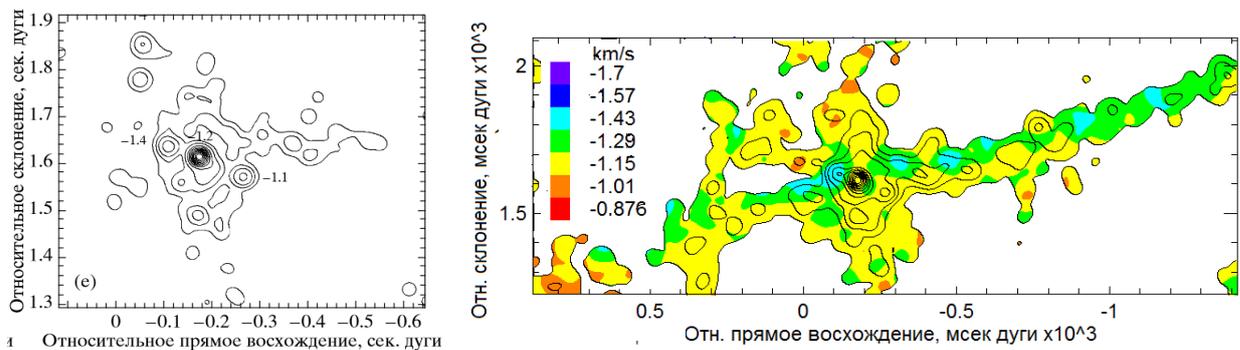


Рис. 2. Ядро-спиральная структура, видимая с ребра, и биполярный выброс в W3OH. Наблюдения на системе КВАЗАР-КВО в линии гидроксила на частоте 1665 МГц.

Дальнейшие исследования тонкой структуры компактных источников запланированы на космическом интерферометре РАДИОАСТРОН.