



СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Создан первый российский космический зеркальный рентгеновский телескоп ART-XC, работающий с 2019 года в составе обсерватории Спектр-РГ в точке либрации L2 – в 1,5 млн. км от Земли. ART-XC является единственным в мире зеркальным телескопом с широким полем зрения, что позволяет решить амбициозную задачу построения карты всего неба в жестком рентгеновском диапазоне энергий на недостижимом ранее уровне детализации. Создание этого телескопа открыло новое направление в отечественном космическом приборостроении в части разработки технологий изготовления рентгеновских зеркал косоугольного падения и позиционно-чувствительных, спектрометрических полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения. Кроме Российской Федерации, подобные технологии имеются только в США и в кооперации стран ЕС.

ОСНОВНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИДЕЯ

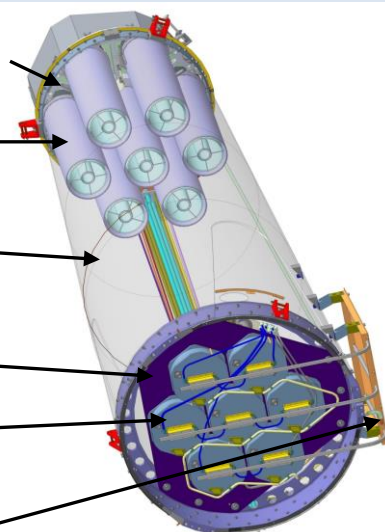
Развитие новых наукоемких технологий, способствующих обеспечению технологического суверенитета Российской Федерации в области космического приборостроения и создание на базе этих технологий не имеющего мировых аналогов отечественного космического рентгеновского телескопа для решения прорывных задач фундаментальной физики и астрофизики

ПРАКТИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, НОВИЗНА

- ВПЕРВЫЕ В РОССИИ СОЗДАН И УСПЕШНО ЗАПУЩЕН В КОСМОС РЕНТГЕНОВСКИЙ ЗЕРКАЛЬНЫЙ ТЕЛЕСКОП ART-XC
- ВПЕРВЫЕ В РОССИИ РАЗРАБОТАНА ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОСОГО ПАДЕНИЯ
- РАЗРАБОТАНА УНИКАЛЬНАЯ ДЛЯ РОССИИ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ЖЕСТКОМ РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ
- РЕШЕНА СЛОЖНЕЙШАЯ ЗАДАЧА ПРЕЦИЗИОННОЙ СБОРКИ И ЮСТИРОВКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
- ПОЛУЧЕНЫ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МИРОВОГО УРОВНЯ

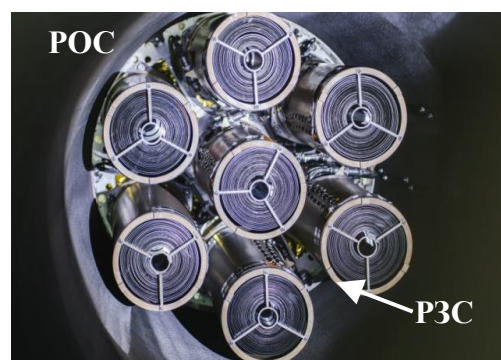
ЗЕРКАЛЬНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП ART-XC

- Рентгеновская оптическая система (РОС)
- Рентгеновская зеркальная система (РЗС)
- Углекладковый корпус
- Комплекс рентгеновских детекторов (КРД)
- Узел рентгеновского детектора (УРД)
- Элементы системы обеспечения теплового режима (СОТР)



Телескоп ART-XC
Образец для КДИ

Масса телескопа	350 кг	
Размеры	Длина	3,5м×диаметр 0,9м
Количество модулей	7	
Потребляемая мощность	150 Вт	
Диапазон энергий	4–30 кэВ	
Эффективная площадь	385 см ² на 8,1 кэВ	
Поле зрения	~0,3 град ²	
Энергетическое разрешение	9 % на 13,9 кэВ	
Временное разрешение	23 мкс	
Параметры РОС		
Число РЗС	7	
Номинальное фокусное расстояние	2 700 мм	
Число вложенных в РЗС зеркальных оболочек	28	
Профиль зеркальных оболочек	Сопряженные параболюид-гиперболюид	
Диаметр зеркальных оболочек	49–145 мм	
Толщина оболочек	0,25–0,35 мм	
Материал оболочек	Ni/Co	
Покрытие зеркал	Ir	
Параметры КРД		
Число детекторов	7	
Тип детектора	Двухсторонний стриповый диод Шоттки	
Размер кристалла (CdTe)	29,95мм×29,95мм×1,00мм	
Рабочая площадь	28,56 мм × 28,56 мм	
Число стрипов	48 × 48	
Ширина стрипа	520 мкм	
Межстриповое расстояние	75 мкм	

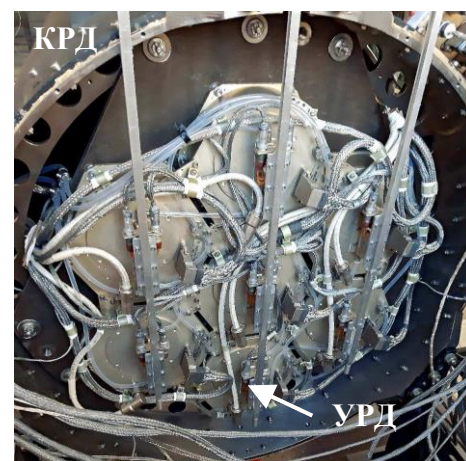


РОС

РЗС



Телескоп ART-XC
Летный образец



КРД

УРД

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ЗЕРКАЛ КОСОГО ПАДЕНИЯ

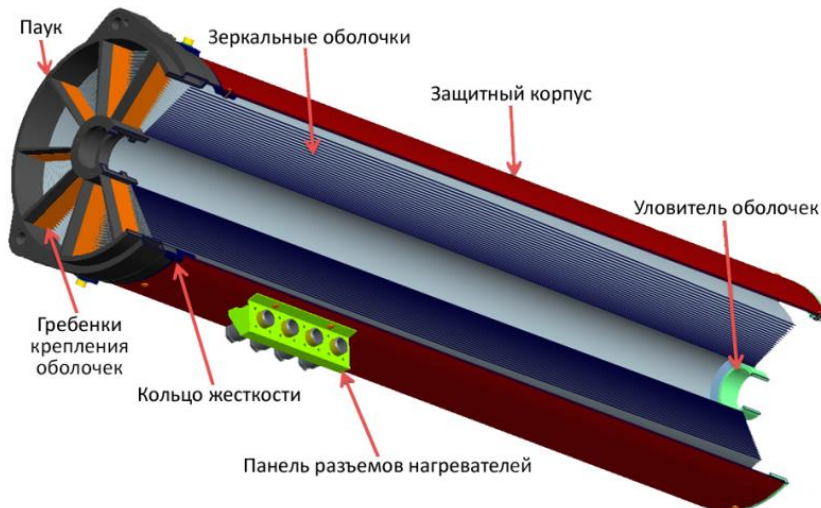
Изготовление зеркальных оболочек

1	Точение матрицы из алюминиевой заготовки двойного вакуумного переплава
2	Нанесение на поверхность матрицы слоя NiP толщиной 120-150 мкм
3	Прецизионное точение, обеспечивающее точность профиля лучше 1 мкм
4	Суперполирование матрицы до высоты микронеровностей 0,8 нм
5	Высаждение на матрицу оболочки из Ni/Co толщиной 0,25 – 0,3 мм методом гальванопластики и снятие оболочки
6	Напыление на оболочку слоя Ir толщиной 10 нм



Демонстрация сотрудниками РФЯЦ-ВНИИЭФ В.В.Путину образца зеркальной оболочки РЗС телескопа ART-XC и исходной матрицы (2012 г.)

Сборка РЗС из зеркальных оболочек

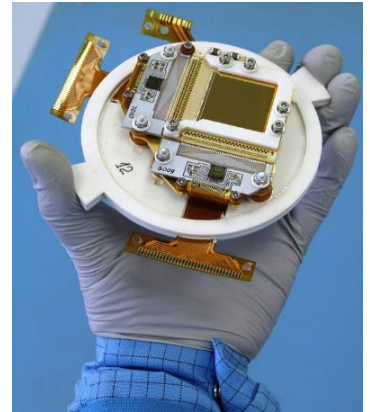


Сборка РОС из РЗС



РЕНТГЕНОВСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ ТЕЛЕСКОПА

Координатно-чувствительные, спектрометрические детекторы рентгеновского излучения СД01, построенные на основе кристалла теллурида кадмия (CdTe), предназначены для регистрации отдельных фотонов с энергией от 4 до 118 кэВ. Детектор определяет энергию фотона, время регистрации и место взаимодействия фотона с материалом кристалла. Количество элементов изображения детектора: 48x48. Размер элемента изображения: 595x595 мкм. Энергетическое разрешение: 1,5 кэВ (на энергии 13,9 кэВ).

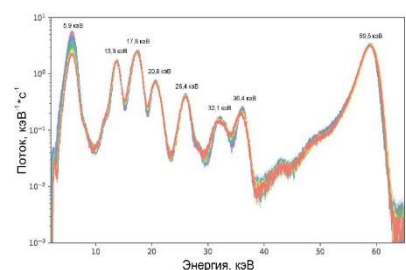


Именно возможность регистрации отдельных фотонов, а также одновременное построение изображения и измерение спектра излучения отличает эти детекторы от детекторов рентгеновского излучения, используемых в медицинской и таможенной технике. При создании детекторов разработаны уникальные технологические процессы крепления кристаллов CdTe и подключения проводников к электродам на кристалле.

Комплекс рентгеновских детекторов телескопа состоит из семи блоков УРД (включающих по одному детектору СД01), двух блоков электроники (БЭ01 и БЭ02) и блока коммутации (БК). Масса комплекса 39,6 кг, потребляемая мощность - 42 Вт.



Калибровка детекторов в полёте производится от калибровочного источника рентгеновского излучения (изотопы ^{55}Fe и ^{241}Am). Калибровка проводится раз в два месяца и занимает 1 час на детектор. Набранные за период с декабря 2019 г. (фиолетовый цвет) по сентябрь 2023 г. (красный цвет) спектры калибровочного источника подтверждают стабильность характеристик детекторов. Уменьшение потока в линии 5,9 кэВ связано с постепенным распадом изотопа ^{55}Fe .

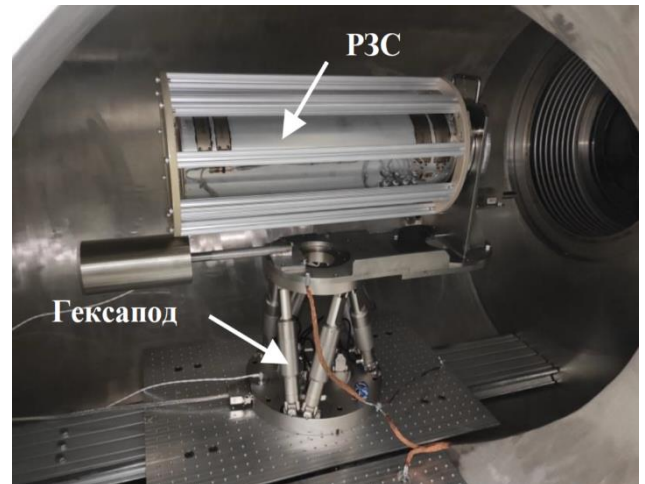


НАЗЕМНАЯ КАЛИБРОВКА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ДЕТЕКТОРОВ



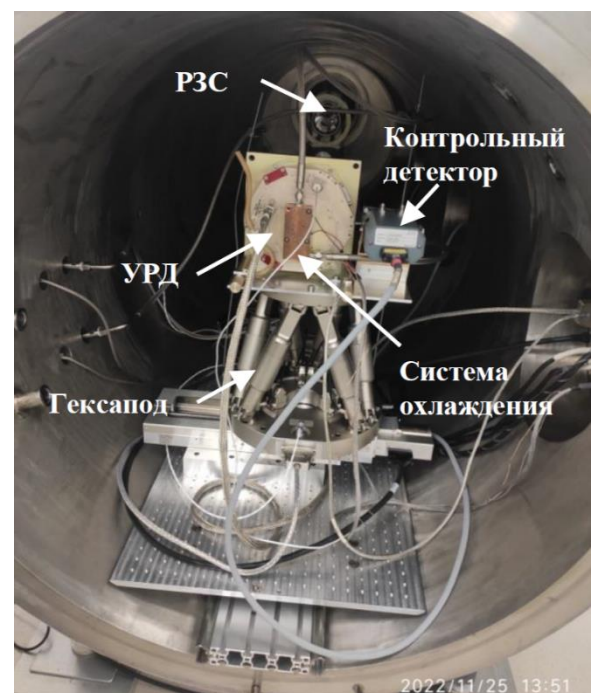
Наземный калибровочный стенд

Для калибровки детекторов и РЗС в ИКИ РАН был создан уникальный наземный испытательно-калибровочный стенд (НИКС). Стенд состоит из двух чистовых помещений класса ИЗО 8, технологической (серой) зоны, хранилища радиоактивных материалов, рентгенопровода и технологического модуля для размещения источников и генераторов рентгеновского излучения



Калибровка рентгеновских оптических систем и детекторов

Оборудование для калибровки. Гексаподы предназначены для позиционирования и ориентации детекторов и РЗС друг относительно друга и относительно пучка рентгеновского излучения. Жидкостная система охлаждения с термоэлектрическими модулями имитирует систему охлаждения на космическом аппарате и обеспечивает захлаживание исследуемого детектора до требуемой температуры. Контрольные детекторы рентгеновского излучения используются для независимой фиксации параметров рентгеновского пучка в процессе испытаний и промеров однородности и профиля пучка перед испытаниями.



ОТДЕЛЬНЫЕ ЭТАПЫ СБОРКИ И ИСПЫТАНИЙ ЛЕТНОГО ОБРАЗЦА ТЕЛЕСКОПА ART-XC

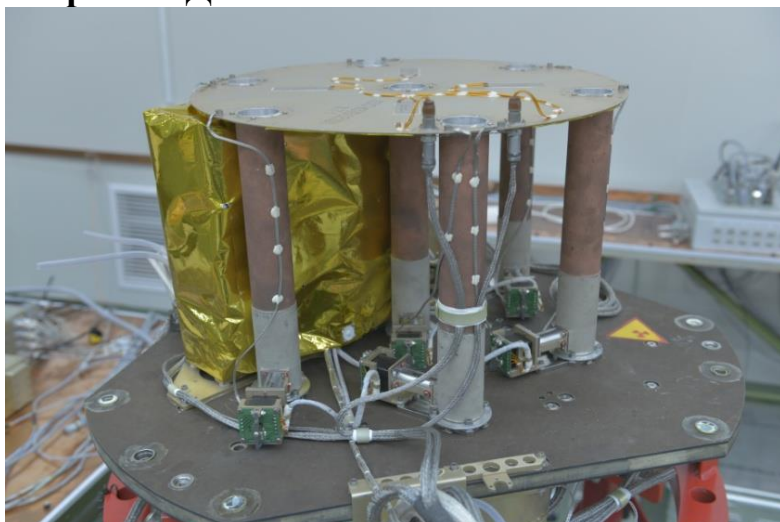
Установка РОС в корпус



**Юстировка мест установки
детекторов относительно
РОС**



Сборка КРД



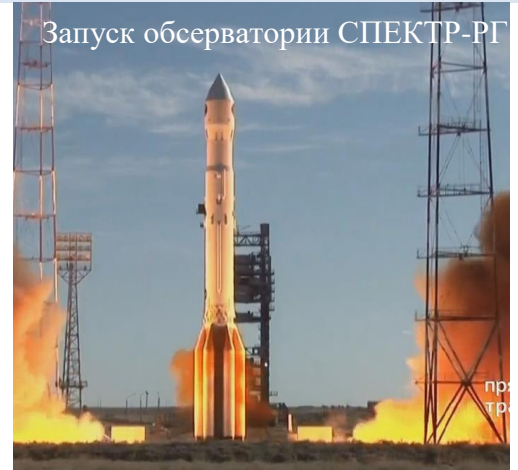
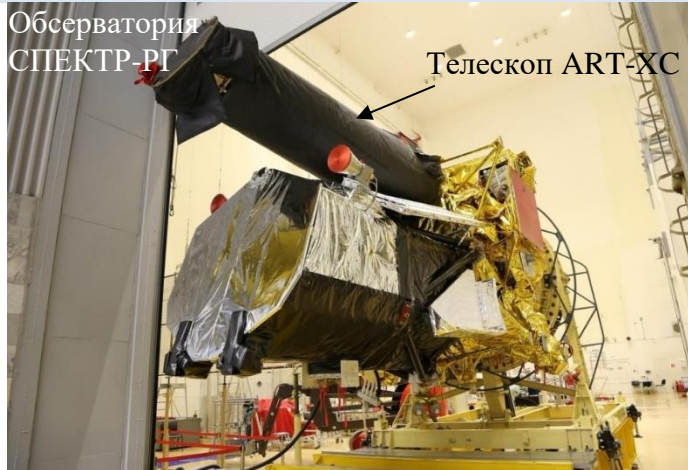
**Окончательная сборка и установка
черной неотражающей ЭВТИ**



**Термовакuumные испытания
летного образца телескопа**



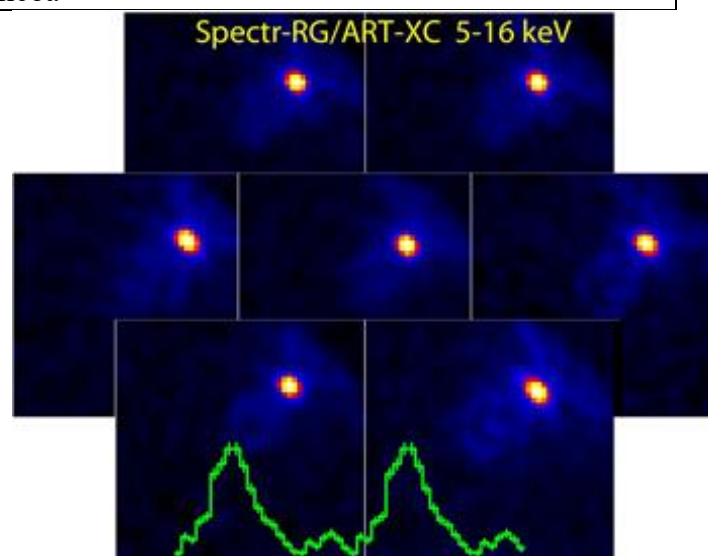
ЗАПУСК И НАЧАЛО РАБОТЫ ТЕЛЕСКОПА ART-XC В СОСТАВЕ ОБСЕРВАТОРИИ СПЕКТР-РГ



Дата	Время	Событие
2019.07.13	15:31	Запуск
2019.07.13	17:31	Окончание разгона космического аппарата и отделение от него разгонного блока ДМ-03
2019.07.13	18:43	Включение подсистем телескопа и сохранение ими бортовой информации
2019.07.13	18:58	Включение системы терморегулирования телескопа
2019.07.18	18:42	Получение первой телеметрической информации с первого детектора
2019.07.21		Включение всех детекторов и подтверждение их работоспособности
2019.07.22		Первая коррекция орбиты
2019.07.23	18:31	Открытие крышки телескопа
2019.07.27		Открытие первого калибровочного источника рентгеновского излучения и проведение первой калибровки первого детектора, начало ввода детекторов в эксплуатацию
2019.07.30	17:29	«Первый свет» (изображение пульсара Cen X-3 во всех детекторах)
2019.08.06		Вторая коррекция орбиты
2019.08.25		Завершение ввода в эксплуатацию семи детекторов, начало фазы калибровки и проверки работоспособности телескопа ART-XC
2019.10.05		Завершение фазы калибровки и проверки работоспособности ART-XC
2019.12.12		Начало обзора всего неба

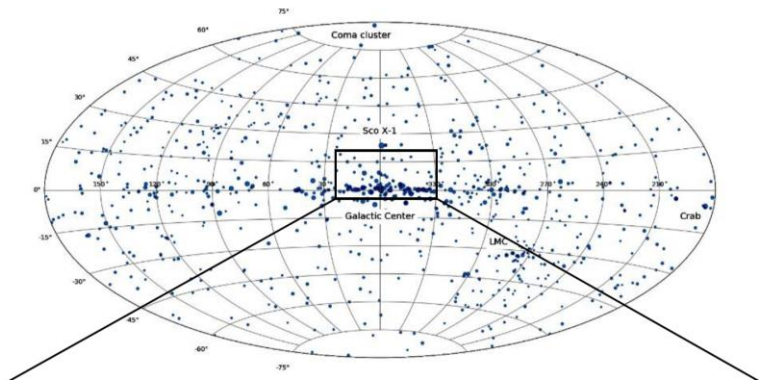
«Первый свет».

Изображения рентгеновского пульсара Cen X-3, полученные 30 июля 2019 г. семью модулями телескопа ART-XC в диапазоне энергий 5–16 кэВ. Зеленые кривые – пульсирующий сигнал с периодом 4,8 с

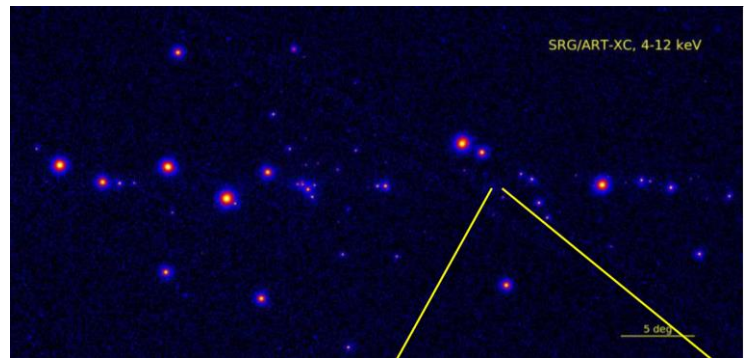


НЕКОТОРЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕЛЕСКОПА ART-XC

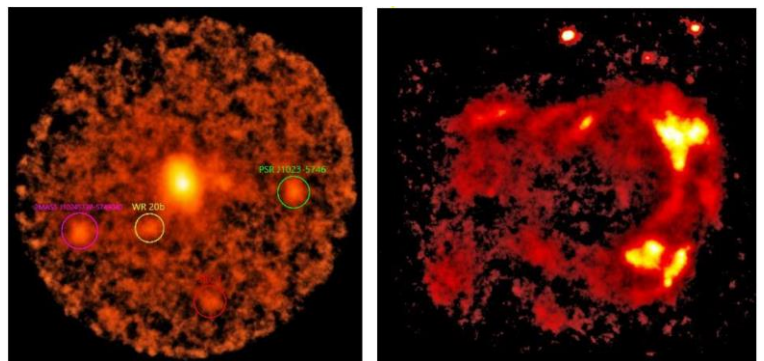
Положение на небе более 900 объектов, обнаруженных телескопом ART-XC за первый год обзора всего неба. Открыто более сотни новых источников (нейтронные звезды, черные дыры)



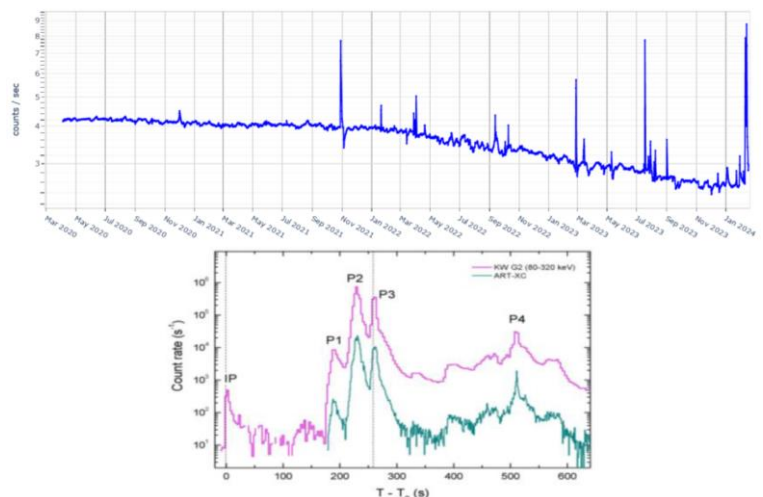
Уникально четкая и детальная карта области вблизи центра Галактики, полученная в диапазоне энергий 4–12 кэВ в течение первого года работы телескопа Спектр-РГ/ART-XC



Структуры высокоэнергичного излучения и ударных волн в скоплении звезд Вестерлунд 2 и остатке вспышки сверхновой RXJ1713, полученные телескопом ART-XC с высокой детальностью.



Телескопом ART-XC впервые осуществлен мониторинг радиационной обстановки в точке L2. Хорошо видны солнечные вспышки и гамма-всплески, в том числе, самый мощный за всю историю наблюдений, с общим энерговыделением $\sim 10^{55}$ эрг (внизу)



СРАВНЕНИЕ С СУЩЕСТВУЮЩИМИ ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ И ЗАРУБЕЖНЫМИ АНАЛОГАМИ

Отечественных аналогов ART-XC не существует. Ближайшим зарубежным аналогом является телескоп NuSTAR (США)

Параметр	Телескоп ART-XC	Телескоп NuSTAR	Примечание
Масса телескопа	350 кг	360 кг (2 модуля)	
Размеры	Длина 3,5 м × диаметр 0,9 м	Длина 10 м × две зеркальные системы диаметром 0,4 м	Требуемое фокусное расстояние NuSTAR достигается за счет раздвижной фермы
Диапазон энергий	4–30 кэВ	3–78 кэВ	
Эффективная площадь	385 см ² на 8,1 кэВ	~ 400 см ² на модуль	
Поле зрения, охват (произведение эффективной площади на поле зрения)	~ 0,3 град ² (диаметр 36'), ~44 град ² × см ²	~0.03 град ² (поле квадратное ~ 10'× 10'), охвата нет	NuSTAR работает только в режиме наведения; ART-XC может работать в режиме наведения, сканировании и обзора
Орбита	Точка либрации L2 (1,5 млн. км от Земли)	Низкая, на высоте 445 км от поверхности Земли	

На сегодняшний день ART-XC является **единственным в мире** зеркальным рентгеновским телескопом, пригодным для проведения обзора всего неба или значительных областей неба в жестком диапазоне энергий.

СОЦИАЛЬНЫЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Создание телескопа ART-XC обеспечило технологический прорыв в отечественном приборостроении в части изготовления рентгеновской оптики скользящего падения и позиционно-чувствительных, спектрометрических полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения. Новизна и значимость этих разработок подтверждена 29 публикациями и 4 патентами на изобретения, выпущенными в процессе создания телескопа. Телескопом ART-XC получены научные результаты мирового уровня, изложенные в более чем 50 публикациях в высокорейтинговых научных изданиях и телеграммах об открытиях. За создание телескопа ART-XC и его работу в составе обсерватории «Спектр-РГ» ИКИ РАН удостоен престижной международной премии им. Марселя Гроссмана. Разработанные технологии, а также созданные в ИКИ РАН и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» технологические и испытательные комплексы, применяются в настоящее время для разработки и создания инструментов нового поколения для проектов Федеральной космической программы России. Созданы новые рабочие места в области наукоемких технологий, обеспечено привлечение молодых специалистов, аспирантов, студентов.