

УДК 520.6.05, 523.9-739

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ СО СВЕРХВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ В ПРОЕКТЕ “АРКА”

© 2011 г. С. В. Кузин¹, С. А. Богачев¹, А. А. Перцов¹, С. В. Шестов¹, А. А. Рева^{1,2}, А. С. Ульянов^{1,2}

E-mail: kuzin@lebedev.ru.

Наблюдение “горячей” короны с субсекундным пространственным разрешением важно для решения ряда фундаментальных задач физики Солнца. Космическая обсерватория “АРКА”, разрабатываемая в ФИАН, впервые предоставит изображения горячей короны с пространственным разрешением ~ 0.18 угл. сек. Обсуждаются научные и технические особенности обсерватории.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в ФИАН разработан новый проект по исследованию солнечной активности в вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ), ультрафиолетовом (УФ) и оптическом диапазонах волн. Цель проекта – создание и вывод на околоземную орбиту космической солнечной обсерватории нового поколения (рабочее название АРКА) для проведения фундаментальных гелиофизических исследований и решения задач мониторинга активных солнечных областей со сверхвысоким пространственным разрешением. Характеристики аппаратуры позволяют ее установить и полноценное функционирование на малой унифицированной космической платформе “Караг” разработки НПО им. С.А. Лавочкина. Основные инструменты обсерватории – это два уникальных двузеркальных телескопа системы Ричи–Кретьена с диаметром главных зеркал 50 см и эффективным фокусным расстоянием 15 м, которое обеспечит возможность наблюдения Солнца с рекордным пространственным разрешением в 0.18 угл. сек (130 км на поверхности Солнца). Последнее в 10 раз превышает угловое разрешение солнечных обсерваторий с широким полем зрения (STEREO, ТЕСИС/КОРОНАС-ФОТОН и др.) и в 6 раз – специализированной солнечной обсерватории высокого разрешения TRACE.

За счет большого числа спектральных диапазонов впервые в рамках одной обсерватории будет обеспечено одновременное наблюдение всех слоев солнечной атмосферы: фотосферы, хромосферы, переходного слоя и горячей короны, а также плазмы солнечных вспышек. При создании научной аппаратуры будут применены новые технологии, в частности технологии создания высокоточных асферических зеркал с многослойным по-

крытием диаметром более 30 см, нанесения многослойных фильтров на ПЗС-матрицы, создана система стабилизации изображений и др. В создании обсерватории участвует кооперация ведущих научных институтов Российской академии наук: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Институт физики микроструктур РАН (ИФМ), Институт космических исследований РАН (ИКИ).

НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ И ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СПЕКТРАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ ОБСЕРВАТОРИИ АРКА

Эксперимент направлен на решение одной из основных задач физики солнечной и звездных корон – механизмов их нагрева. Наиболее распространенными теориями нагрева являются микропроцессы энерговыделения (так называемые нановспышки) или диссипация энергии волн, формируемых в нижних областях Солнца. Для регистрации нановспышек необходимо провести наблюдения солнечных структур с температурами от 100 тыс. до 2 млн. градусов с пространственным разрешением не хуже 200 км. Для наблюдения диссипации волн необходимо синхронно наблюдать все основные слои солнечной атмосферы от хромосферы до нижней короны с временным разрешением до нескольких секунд.

В основе метода исследований в проекте АРКА лежит метод изображающей спектроскопии Солнца в ВУФ-диапазоне, разработанный в ФИАН под руководством С.Л. Мандельштама и И.А. Житника. Впервые метод был применен в космическом эксперименте ТЕРЕК на межпланетной станции ФОБОС-1 (1988 г.) [1] и успешно зарекомендовал себя в ходе экспериментов СПИРИТ [2] и ТЕСИС [3] на спутниках КОРОНАС-Ф и КОРОНАС-ФОТОН. Метод изображающей спектроскопии основан на получении изображений Солнца в максимально узких спектральных интервалах (оптимально – в мо-

¹ Учреждение российской академии наук Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва.

² Московский физико-технический институт.

Таблица 1. Спектральные каналы регистрации аппаратуры АРКА

Спектральный диапазон	Спектральные линии	Объект наблюдения	Температурный диапазон
132 Å	Fe XX Fe XXIII	Вспышечная плазма	Выше 10 млн. К
171 Å	Fe IX Fe X	Корона Солнца	0.8–1.0 млн. К
195 Å	Fe XII	Корона Солнца	~1.6 млн. К
304 Å	He II	Переходный слой Солнца	~80 тыс. К
211 Å	Fe XIV	Корона Солнца	~2.0 млн. К
284 Å	Fe XV	Корона Солнца	~2.2 млн. К
1216 Å	HI 1216 Å	Хромосфера Солнца	~30 тыс. К
Оптический	Непрерывное излучение с максимумом чувствительности около 5000 Å	Фотосфера Солнца	~6 тыс. К

Таблица 2. Технические характеристики аппаратуры АРКА

Оптическая схема	Система Ричи–Кретьена
Зеркала	Нормального падения с многослойным покрытием
Диаметр главного зеркала	500 мм
Эффективное фокусное расстояние	15000 мм
Расстояние между зеркалами	2000 мм
Поле зрения	12 × 12 угловых минут (0.8 × 0.8 радиуса Солнца)
Детекторы	ПЗС матрицы обратной засветки 4096 × 4096 пикселей
Размер пикселя ПЗС	13 мкм
Эффективное угловое разрешение	0.18 угловых секунд
Общий вес научной аппаратуры	90 кг
Энергопотребление	60 Вт
Телеметрия	50 Гбайт в сутки
Габариты каждого телескопа (длина × ширина × высота)	2200 × 520 × 520

нохроматических линиях), в ВУФ- и мягкой рентгеновской областях спектра. Именно в этих спектральных областях лежит основное излучение переходного слоя, “спокойной” и “горячей” короны Солнца, а также верхней хромосферы. Большое число одновременно работающих каналов регистрации изображений позволяет прямо сравнивать интенсивность излучения в разных диапазонах спектра, что создает практическую основу для многоволнового и многотемпературного анализа солнечной плазмы. Кроме того, одновременное исследование нескольких слоев Солнца (например, активных процессов в короне и динамики плазмы в хромосфере) является также мощным средством изучения механизмов и путей распространения энергии в атмосфере Солнца.

Для обсерватории “АРКА” были отобраны спектральные диапазоны регистрации изображений (см. табл. 1), обеспечивающие наибольшую информативность наблюдений. Полосы пропус-

кания каналов центрированы относительно линий ВУФ- и УФ-диапазонов.

ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ АРКА

В качестве основных инструментов обсерватории предлагаются два 4-канальных телескопа системы Ричи–Кретьена, реализованные по одной оптической схеме, но адаптированные под работу в разных спектральных диапазонах (рисунок). Основные характеристики аппаратуры АРКА приведены в табл. 2.

Телескопы работают независимо друг от друга, поэтому можно осуществлять наблюдение Солнца в двух спектральных каналах одновременно. Работа каждого телескопа в нескольких каналах обеспечивается за счет нанесения на квадранты зеркал индивидуальных многослойных покрытий. Выбор рабочего участка зеркала и соответственно диапазона наблюдений осуществляется

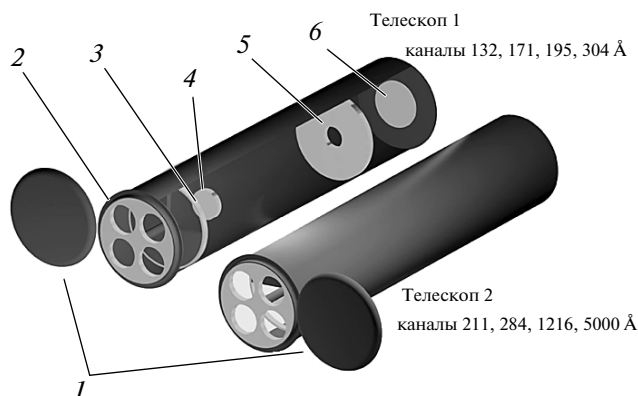
заслонкой, расположенной за входным окном инструмента. Подобная схема была апробирована в эксперименте ТЕСИС [4], где используется телескоп на две длины волны (171 и 304 Å), оснащенный механическим переключателем.

Эффективное фокусное расстояние телескопов АРКА составляет 15 м, что обеспечивает угловое разрешение 0.18 секунд дуги при поле зрения 0.8×0.8 радиусов Солнца. Блокировка солнечного излучения видимого и УФ-диапазонов осуществляется входными свободно висящими тонкопленочными фильтрами и специальными покрытиями-фильтрами на поверхности ПЗС-детекторов. Интенсивность рассеянного света понижается за счет светогерметизации отдельных узлов аппаратуры. Использование телескопов с большим фокусным расстоянием в спутниковых экспериментах требует применения двузеркальных оптических схем, позволяющих сохранить относительно компактные размеры телескопа (1.5–2.0 м в длину).

Возможность повышения пространственного разрешения наблюдений в проекте АРКА связана с прогрессом в следующих технологиях: создании рентгеновских многослойных покрытий, изготовлении зеркал большой площади, разработке детекторов на основе ПЗС-матриц с линейным размером более 4000 пикселей и создании систем стабилизации изображений.

Для вырезания узких спектральных диапазонов в телескопах АРКА будут использованы многослойная оптика нормального падения с эффективной полосой отражения (несколько ангстрем) и тонкопленочные фильтры. Эффективность таких оптических систем очень высока: десятки процентов от исходного потока. Так, в ходе эксперимента ТЕСИС экспозиция при регистрации невозмущенной короны составляет порядка 0.5 с. Применение подобных оптических элементов позволит достигать сверхвысокого временного разрешения и в обсерватории “АРКА”. Компенсировать более чем 80-кратное уменьшение потока излучения на один пиксел детектора (за счет высокого углового разрешения и двузеркальной оптической схемы) можно за счет большей площади зеркал, более высокой чувствительности детектора и увеличения яркости источников на Солнце во время вспышек и других проявлений солнечной активности.

Возможность создания высокоточных асферических зеркал большого диаметра связана с прогрессом в изготовлении элементов рентгеновской оптики для нужд EUV-литографии, где требуется точность обеспечения формы в десятки ангстрем [5]. В настоящее время в ИФМ РАН уже созданы зеркала подобного типа, а также разработаны и практически реализованы методы их контроля при изготовлении [6].



Принципиальная схема телескопов АРКА. 1 — защитная крышка; 2 — панель входных окон с фильтрами; 3 — переключатель каналов (выбор рабочего квадранта зеркала); 4 — вторичное зеркало, оснащенное системой управления и фокусировки; 5 — первичное зеркало; 6 — блок фильтров и детекторов.

Другим необходимым условием реализации сверхвысокого разрешения будет уменьшение влияния дифракции на поддерживающих сетках входных фильтров телескопов. Для обеспечения углового разрешения в 0.18 угл. сек на длине волны 300 Å необходимо иметь ячейку поддерживающей структуры не менее 18×18 мм. На сегодняшний день в ИФМ РАН имеется опыт изготовления свободно висящих тонкопленочных фильтров размером более 100 мм [7]. В предыдущих космических экспериментах использованы фильтры на поддерживающих сетках размером порядка 2×2 мм, что обуславливалось необходимостью обеспечения сохранности фильтров при воздействиях, возникающих во время запуска аппаратуры в космос. Одним из решений этой проблемы может быть вакуумирование телескопа перед запуском.

Производство широкоформатных ПЗС-матриц в последние годы перешло из стадии эксперимента в стадию создания промышленных образцов. В ходе эксперимента ТЕСИС проходят летные испытания детекторы нового типа с размером ПЗС-матриц 2048×2048 пикселей, созданные в ФИАН. Использование в этих детекторах матриц с обратной засветкой (back illuminated), позволяет прямо регистрировать ВУФ- и мягкое рентгеновское излучение без использования систем конверсии. Применение таких матриц позволило на практике достичь углового разрешения 1.5 угл. сек. Ресурсом для последующего увеличения разрешения в проекте АРКА является увеличение размера ПЗС-матриц — переход на детекторы размером 4096×4096 пикселей.

Регистрация изображений со сверхвысоким пространственным разрешением требует также применения системы стабилизации изображений. Зарубежная практика создания подобной

аппаратуры (эксперимент TRACE) показала, что наиболее эффективна стабилизация изображения на основе системы обратной связи. Стабилизация осуществляется сдвигом вторичного (малого) зеркала двузеркальной оптической системы по управляющему сигналу детектора солнечного лимба. В настоящее время в ФИАН ведутся работы по созданию подобной системы стабилизации изображений для эксперимента ЛИРА-В на международной космической станции.

В ходе эксперимента АРКА будет реализован режим одновременного управления комплексом всей научной аппаратурой обсерватории. Подобные системы управления, разработанные в ФИАН [8], зарекомендовали себя в ходе предыдущих экспериментов. Во время эксперимента СПИРИТ [2] был реализован режим управления двумя потоками данных, а в эксперименте ТЕСИС [3] впервые реализовано управление четырьмя потоками, что впервые в мире позволило получать одновременные изображения Солнца в четырех произвольных каналах регистрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация проекта АРКА позволит решить актуальные задачи физики солнечной и звездных корон, связанные с трансформацией энергии. В ходе реализации проекта будет существенно развит метод изображающей спектроскопии при сверхвысоком пространственном разрешении. При разработке и изготовлении аппаратуры будут развиты новые технологии в областях рентгенов-

ской оптики, детекторов ВУФ- и УФ-диапазонов, систем стабилизации изображения, бортовых компьютеров и управления длительным автономным экспериментом.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 08-02-01301-а и 08-02-13633-офи_ц; программы фундаментальных исследований Президиума РАН Программы № 16, часть 3, программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН “Плазменные процессы в солнечной системе”, гранта № 218816 (проект SOTERIA, www.soteria.eu) седьмой рамочной программы Европейского Союза (FP07/2007-2013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Житник И.А., Тиндо И.А., Урнов А.М. и др. // Тр. ФИАН. 1989. Т. 195. С. 3.
2. Житник И.А., Кузин С.В., Собельман И.И. и др. // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. С. 495.
3. Кузин С.В., Богачев С.А., Житник И.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 1. С. 39.
4. Зуев С.Ю., Кузин С.В., Полковников В.Н., Салащенко Н.Н. // Изв. РАН. Сер. физ. 2010. Т. 74. № 1. С. 58.
5. Naulleau P.P., Goldberg K.A., Lee S.H. et al. // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 35. P. 7252.
6. Клоенков Е.Б., Пестов А.Е., Полковников В.Н. и др. // Рос. нанотехнологии. 2008. Т. 3. № 9–10. С. 90.
7. Chkhalo N.I., Gusev S.A., Drozdov M.N. et al. // SPIE Proc. 2010. V. 7521. 752105.
8. Перцов А.А., Игнатьев А.П., Житник И.А., Кузин С.В. // ПТЭ. 2008. № 5. С. 67.