

СОГЛАСОВАНО

УТВЕРЖДАЮ

Директор САО РАН,

Председатель Национального комитета
по тематике российских телескопов,



В.В.Власюк



К.А.Постнов

10 февраля 2020 г.

12 февраля 2020 г.

Циркулярное письмо Национального комитета по тематике российских телескопов

К использованию на 6-м телескопе САО РАН со второго полугодия 2020 г. объявляются следующие наблюдательные методы:

Методы общего пользования	2
Универсальный спектрограф ПФ БТА SCORPIO-1	2
Адаптер ПФ БТА	3
Основной Звездный Спектрограф (ОЗСП)	4
Методы с авторским сопровождением	8
Универсальный спектрограф ПФ БТА SCORPIO-2	8
Спекл-интерферометр ПФ БТА	10
Комплекс исследования быстрой переменности МРРР.....	13
Нэсмитовский Эшелле-Спектрограф (НЭС).....	17

В циркулярном письме дается краткое описание указанных приборов и методов по состоянию на начало 2020г. Дополнительную информацию можно найти на домашней странице САО <http://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/bta/instrum/>

Методы общего пользования

Универсальный спектрограф ПФ БТА SCORPIO-1

Статус прибора – общего пользования

Ответственный – Д.В. Опарин (doparin2@gmail.com)

Универсальный спектрограф SCORPIO-1 предназначен для наблюдений протяженных и звездообразных объектов в трёх режимах:

1. Прямые изображения в фотометрических системах Jounson-Cousins (UBVRI) и в среднеполосных (SED, ~100-250 Å) интерференционных фильтрах;
2. Спектроскопия с длинной щелью с разрешением $R=500-1000$ в диапазоне 350-1000 нм;
3. Многощелевая спектроскопия.

В качестве светоприемника используется ПЗС матрица EEV 42-40 форматом 2048×2048 элементов размером 13.5×13.5 мкм. Прибор устанавливается на адаптер ПФ БТА, посредством которого осуществляется наведение на объект, гидирование и спектральная и фотометрическая калибровка спектрографа. Управление прибором и регистрация данных осуществляется удаленно с Нижней научной площадки CAO РАН.

Параметры универсального спектрографа SCORPIO-1

1. ПРЯМЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Поле зрения 6.1×6.1 минуты дуги, масштаб изображения 0.357×0.357 сек.дуги при биннинге 2×2 и формате изображения 1024×1024 px. Кривые спектрального пропускания широкополосных и интерференционных фильтров в комплекте спектрографа приведены в <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/filters/filters.html#bvri>, <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/filters/filters.html#sed>.

2. СПЕКТРОСКОПИЯ С ДЛИННОЙ ЩЕЛЬЮ

Максимальная длина щели 6 минут дуги, для использования доступны сменные щели шириной 1".2 и 2".3. Вместо щели может устанавливаться маска, содержащая 8-точечный тест и маска для бесщелевой спектроскопии. Одновременно в спектрограф в дистанционно управляемой каретке может быть установлено 2 объемных голографических решетки VPHG с призмами прямого зрения (далее "гризм"). На текущий момент для использования доступны гризмы VPHG550G, VPHG550R, VPHG1200B, VPHG1200G, VPHG1200R. Параметры гризм приведены в <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio/grisms/grisms.html>.

3. СПЕКТРОСКОПИЯ С МНОГОЩЕЛЕВЫМ БЛОКОМ

Многощелевой блок состоит из 16 подвижных металлических полосок со щелями, дистанционно перемещаемыми в поле размером 2.'9×5.'9. Высота щелей – около 18", расстояние между центрами щелей – около 22". Положение каждой щели фиксируется с помощью двух электромагнитов. Время полной расстановки всех щелей (при требуемой точности 0."2-0."3) составляет около 10 минут. На текущий момент блок находится на реконструкции и не доступен для наблюдений.

Адаптер ПФ БТА

Статус прибора – общего пользования

Ответственный – Р.И.Уклеин (uklein@sao.ru)

Адаптер Первичного Фокуса БТА (далее – Адаптер) предназначен для внеосевого гидирования и телецентрической засветки входа устанавливаемой на нем аппаратуры различными калибровочными источниками света. Кроме фокальных редукторов SCORPIO и SCORPIO-2 на нем могут быть установлены и другие спектрографы весом до 150 кг и рабочим отрезком не более 40 мм. Доступны два основных модуля:

1. МОДУЛЬ ГИДИРОВАНИЯ – коррекция положения телескопа БТА на основе изображений с цифрового подсмотра, контроль прозрачности атмосферы и фокусировки телескопа на основе фотометрии опорных звезд;
2. МОДУЛЬ КАЛИБРОВКИ – телецентрическая засветка ПЗС-приемников устанавливаемых приборов источниками линейчатого и непрерывного спектров.

Адаптер устанавливается на поворотном столе в кабине первичного фокуса БТА. Управление Адаптером осуществляется удаленно с Нижней научной площадки САО РАН.

Параметры адаптера ПФ БТА

1. МОДУЛЬ ГИДИРОВАНИЯ

В качестве подсмотра используется камера Atik Titan с приемником Sony ICX424 форматом 659×494 элементов размером 7.4×7.4 мкм. В зависимости от положения диагонального зеркала Адаптера доступны два основных режима:

- FIELD (прямое поле зрения). В положении FIELD диагональное зеркало передает изображение основного поля зрения на подсмотр, что позволяет делать отождествление поля, в том числе устанавливать на щель яркие объекты. Размер поля FIELD на подсмотре составляет $3' \times 2'$.
- FIBERS (изображения опорных звезд). При положении FIBERS свет от объектов наблюдения принимается аппаратурой, установленной на Адаптере, а подсмотр принимает изображения опорных звезд. Угловой диаметр жгута световодов в проекции на небесную сферу при этом составляет $54''$, а размер поля для его перемещения — $10' \times 4'.5$. Центры гидировочных полей находятся на расстоянии $12'$ от центра полей зрения системы.

Кроме визуализации изображения с подсмотра программное обеспечение гидирования позволяет накладывать на изображение электронные кресты и метки. На захватываемом изображении отображаются либо положение щели в поле FIELD с исследуемым объектом, либо два креста в полях гидирования FIBERS, в центры которых захватываются звезды.

Оптимальным для гидирования является диапазон звездных величин 10^m – 15^m . Гидирование по звездам слабее 15^m возможно только при хорошем качестве изображений и достаточной прозрачности. Предельная звездная величина в полосе R для отношений сигнала к шуму $S/N = 5$ составляет около 17^m . Для контроля качества гидирования на монитор управляющего компьютера может выводиться график, на котором отображаются: текущее значение поглощения, размер изображения опорной звезды и величины коррекции телескопа БТА по азимуту и зенитному расстоянию.

Входной торец каждого из гидировочных жгутов перемещается вдоль оптической оси в пределах 0–9.7 мм для фокусировки опорной звезды, что дает возможность проводить при необходимости коррекцию фокуса телескопа во время длительной (более одного часа) серии спектральных экспозиций. Наличие двух гидировочных полей позволяет проводить процедуру контроля фокуса по одной из звезд, пока другое поле используется для сопровождения телескопа.

2. МОДУЛЬ КАЛИБРОВКИ

Калибровочный модуль состоит из интегрирующей сферы (шар Ульбрихта), оптики осветителя калибровки и системы управления, интегрированной в интерфейсы управления приборов SCORPIO и SCORPIO-2. Интегрирующая сфера имеет два осветителя линейчатого спектра, осветитель непрерывного спектра и 32 порта для установки светодиодов в качестве осветителей, что дает три режима калибровки:

- NEON: лампа с He-Ne-Ar–наполнением для калибровки шкалы длин волн.
- QUARTZ: кварцевая галогеновая лампа непрерывного спектра для создания плоского поля.
- LEDES: система светодиодов, обеспечивающая формирование непрерывного спектра для плоского поля с приблизительно равномерной по спектру яркостью в широком диапазоне длин волн. Это позволяет проводить равноточную засветку плоского поля в различных спектральных диапазонах и уменьшает паразитный рассеянный свет в голубой области.

Подробное описание Адаптера приведено в статье: В.Л.Афанасьев, В.Р.Амирханян, А.В.Моисеев, Р.И.Уклеин, А.Е.Перепелицын, *Астрофизический Бюллетень*, 2017, том 72, No.4, с.497–507 <https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Bulletin/Vol72/N4/ASPB497.pdf>. Актуальное руководство для наблюдателей приведено на странице <https://www.sao.ru/hq/lsvfo/adap/>

Основной Звездный Спектрограф (ОЗСП)

Статус прибора – общего пользования

Ответственный – Д.О. Кудрявцев (dkudr@sao.ru)

Метод: спектроскопия и спектрополяриметрия (круговая поляризация) ярких звездообразных астрономических объектов на ОЗСП БТА в диапазоне длин волн 330-900 нм со спектральным разрешением $R=15000$

Общая информация

Основной звездный спектрограф (ОЗСП) предназначен для регистрации спектров звезд и звездообразных объектов блеском m_V до 14 зв. вел. в режиме спектроскопии и 12 зв. вел. в режиме спектрополяриметрии (круговая поляризация) в настраиваемых интервалах длин волн диапазона 3300-9000 АА с умеренным спектральным разрешением ($\lambda/\Delta\lambda = 2000-15000$). Спектрограф может применяться в решении задач по изучению магнитных полей звезд, определению химического состава звездных атмосфер и их физических параметров. Возможности использования ОЗСП в задачах, связанных с измерением лучевых скоростей, ограничены его температурной и механической нестабильностью: максимальная точность измерения V_r составляет около 1 км/с.

ОЗСП изготовлен Ленинградским оптико-механическим объединением одновременно с БТА и стационарно размещается внутри левой боковой стойки телескопа (фокус Нэсмит-2). За время работы на телескопе спектрограф был существенно модернизирован (Панчук и др., 2014), в частности переведен на наблюдения с помощью ПЗС, частично автоматизирован, существенной перестройке подверглась предщелевая часть, было изготовлено несколько поколений анализаторов круговой поляризации.

Состав прибора

Предщелевые устройства. Узел калибровочных ламп (эмиссионные линии Th-Ag для калибровки по длинам волн и галогенная лампа непрерывного спектра), локальный корректор положения звезды на щели спектрографа, камеры подсмотра поля и щели, являются общими для спектрографов ОЗСП и НЭС.

Оптика. Диаметр коллимированного пучка ОЗСП составляет 258 мм, световой диаметр коллиматора 310 мм, фокусное расстояние $F = 7929$ мм. Фокусное расстояние камеры спектрографа (камера №2) $F = 604$ мм, ее оптическая схема — Шмидта-Ньютона — содержит кварцевую коррекционную пластину, позволяющую вести работу в диапазоне длин волн 3300-10000 Å. Кривизна фокальной плоскости камеры исправлена линзой Пиацци-Смита.

Спектрограф оснащен комплектом сменных дифракционных решеток с углами блеска 8°, 15.5° и 24.7°, предназначенных для работы в первых трех порядках дифракции. Размер заштрихованной части решеток составляет 320×360 мм, плотность нарезки 600 штр/мм. Выделение рабочих порядков осуществляется светофильтрами. Смена дифракционных решеток выполняется в дневное время. В пределах наблюдательной ночи возможно изменение наблюдаемого участка спектра с помощью изменения угла наклона решетки.

Табл. 1. Основные параметры оптической схемы ОЗСП.

Угол излома пучка к оси Z	65°
Коллиматор	
Фокусное расстояние	7928.7 мм
Световой диаметр	310 мм
Угол наклона оси	3°
Угол между осями коллиматора и камеры	45°
Камера №2	
Фокус	604 мм
Диаметр зеркала	700 мм
Диаметр корректора	405 мм
Диаметр плоского зеркала	120 мм

Табл. 2. Параметры дифракционных решеток ОЗСП.

Угол блеска	8.0°	15.5°	24.7°	24.7°
Рабочий порядок	I	II	II	III
Рекомендуемый диапазон, А	4300-6500	3100-5600	5600-9000	4000-4900
Средняя обратная дисперсия (Å/мм)	26.1	13.2	13.2	8.8

Система регистрации. В качестве светоприемника на ОЗСП используется ПЗС-система, изготовленная в Лаборатории перспективных разработок САО, на основе чипа E2V CCD 42-90 (deep depletion) форматом 2050×4600 элементов. Размер одного элемента - 13.5×13.5 мкм. В случае использования решетки с углом блеска 24.7° в третьем порядке с указанной ПЗС- системой в области спектра 4000-5000 Å обратная линейная дисперсия составляет 0.1215 А/пикс. Ширина щели в этом случае равна 0.5" в проекции на небо. На одном снимке регистрируется участок спектра шириной 500 А.

Щелевая часть и спектрополяриметрия

На спектрографе возможно применение двух блоков щелей. Щель производства ЛОМО имеет высоту 50 мм, а ее ширина может быть переменной. Щель спектрографа, спроектированная в САО Чунтоновым Г.А., используется в спектрополяриметрических наблюдениях, т.к. конструктивно совмещена с синтетическим двулучепреломляющим кристаллом и двойным резателем изображений. Диафрагма диаметром 5" определяет высоту щели, а ее ширина остается постоянной и равна в проекции 0.5". В паре с этим щелевым блоком используется фазовая пластинка $\lambda/4$, которая может занимать два фиксированных положения (0 и 90°) относительно кристалла.

Набор калибровочных источников состоит из лампы непрерывного спектра (лампа накаливания) и источника эмиссионного спектра (лампа с Th катодом, заполненная Ag).

Хранение и обработка наблюдательных данных

Весь спектральный материал, полученный на ОЗСП, хранится в общем архиве наблюдательных данных САО в формате FITS. Для обработки изображений и экстракции одномерных спектров могут быть использованы стандартные процедуры из состава систем ESO-MIDAS, IRAF или другие программы (DECH, Reduce, и т.п.).

Более подробная информация о спектрографе ОЗСП, его характеристиках и инструментальных возможностях представлена на странице

<http://www.sao.ru/hq/lizm/mss/ru/>

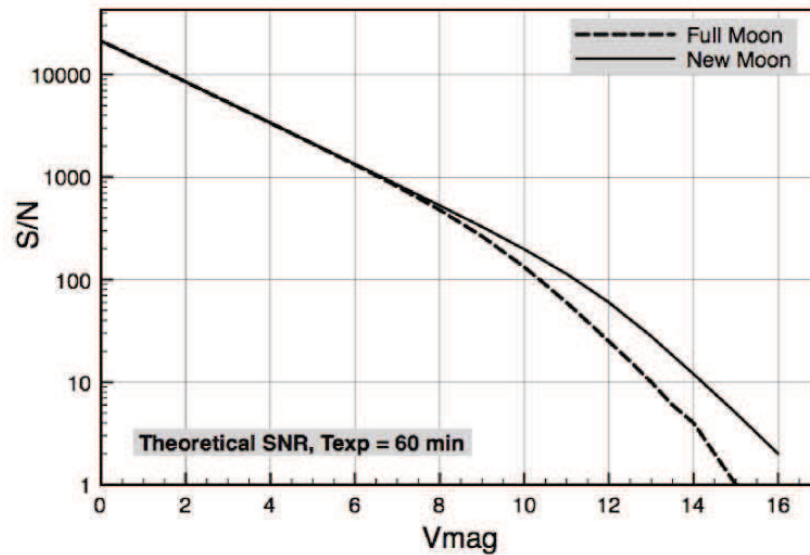


Рис. 7. Теоретическая проникающая способность ОЗСП в зависимости от фазы Луны при типичных условиях (FWHM изображения 1.2-1.5", $z = 20^\circ$, $\lambda_c = 4550 \text{ \AA}$, анализатор круговой поляризации в сочетании с резателем изображения, обратная линейная дисперсия 9 А/мм (0.1215 А/пикс.).

ЛИТЕРАТУРА

1. А.С. Васильев, А.М. Евзеров, М.В. Лобачев, И.В. Пейсахсон Оптикомеханическая промышленность, вып.2, с.31 (1977).
2. В.Е. Панчук. Спектральный комплекс фокуса Нэсмита 6-м телескопа БТА. VII. Основной звездный спектрограф. Препринт САО No.154 (2001).
3. В.Е.Панчук, Г.А.Чунтонов, И.Д.Найденов, Астрофиз. бюлл., т.69, с. 360 (2014).
4. Телескоп БТА. Техническое описание. Книга 4. Основной звездный спектрограф, Ленинград: ЛОМО (1974).

Методы с авторским сопровождением

Универсальный спектрограф ПФ БТА SCORPIO-2

Статус прибора – авторский

Ответственные – В.Л.Афанасьев (vafan@sao.ru), А.В.Моисеев (moisav@sao.ru)

Универсальный спектрограф SCORPIO-2 предназначен для наблюдений протяженных и звездообразных объектов в шести режимах:

1. Прямые изображения в фотометрических системах Johnson-Cousins (UBVRI), SDSS (ugriz) и в узкополосных (2.5-25 нм) интерференционных фильтрах;
2. Спектроскопия с длинной щелью с разрешением $R=500-4000$ в диапазоне 350-950 нм;
3. Спектрополяриметрия (измерения параметров Стокса) с длинной щелью;
4. Поляриметрия изображений в широких и среднеполосных фильтрах;
5. Панорамная спектроскопия со сканирующим интерферометром Фабри-Перо
6. Интегральная полевая спектроскопия с линзовым растром.

В качестве светоприемника используется ПЗС матрица EEV 42-90 форматом 4612×2048 элементов размером 13.5×13.5 мкм. Прибор устанавливается на адаптер ПФ БТА, посредством которого делается наведение на объект, гидирование и спектральная и фотометрическая калибровка спектрографа. Управление прибором и регистрация данных осуществляется удаленно с Нижней научной площадки САО РАН.

Параметры универсального спектрографа SCORPIO-2

1. ПРЯМЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Поле зрения – 6.1×6.1 минуты дуги, масштаб изображения – 0.357×0.357 сек.дуги при биннинге 2×2 и формате изображения 1024×1024 px. Кривые спектрального пропускания широкополосных и интерференционных фильтров в комплекте спектрографа приведены в https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/filters_rus.html.

2. СПЕКТРОСКОПИЯ С ДЛИННОЙ ЩЕЛЬЮ

Максимальная длина щели – 6 минут дуги, ширина щели изменяется в пределах 0.5-7 секунд дуги. Перед щелью может устанавливаться маска, содержащая 13-ти точечный тест и диафрагмы, ограничивающие высоту щели на 2 и 1 минуту дуги, что необходимо при спектрополяриметрических наблюдениях. Спектрограф содержит 9 объемных голографических решеток VPHG с призмами прямого зрения (далее “гризм”), установленных в турели, переключаемой дистанционно. Параметры гризм приведены в https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/grisms_rus.html.

3. СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЯ

Для измерения параметров Стокса в спектрографе используется два типа анализаторов поляризации, установленных в параллельном пучке – одиночная призма Волластона в комбинации с ахроматическими фазовыми пластинами ($\lambda/2$ и $\lambda/4$) и двойная призма Волластона, состоящая из двух призм Волластона, выделяющих направления колебаний электрического вектора 0-90 и 45-135 градусов соответственно. В первом случае регистрируется два длинно-

целевых спектра высотой 2", а во втором – четыре спектра с высотой 1'. Инструментальная поляризация прибора не превышает 0.1% в режиме измерения линейной поляризации (параметры Стокса Q и U) и 0.01% в режиме измерения круговой поляризации. Методика наблюдений описана в статье (Афанасьев и Амирханян, 2012, Астрофизический бюллетень, т.67, с.455, <https://www.sao.ru/Doc-k8/Science/Public/Bulletin/Vol67/N4/p455.pdf>). За консультациями по проведению наблюдений следует обращаться к ответственному астроному Афанасьеву В.Л. (vafan@sao.ru)

4. ПОЛЯРИМЕТРИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Для измерения линейной поляризации протяженных и звездообразных изображений в различных фильтрах используется вращающийся дихроичный анализатор поляризации. Поле зрения ограничено размером анализатора и имеет диаметр 6 угловых минут. Наблюдения проводятся стандартным методом Фесенкова, при котором регистрируются изображения в трех фиксированных углах поляризатора –60, 0 и 60 градусов. За консультациями по проведению наблюдений следует обращаться к ответственному астроному Афанасьеву В.Л. (vafan@sao.ru)

5. СКАНИРУЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ-ПЕРО (ИФП)

Наблюдения с ИФП состоят из последовательного получения нескольких десятков изображений интерференционных колец от изучаемого объекта (или калибровочной лампы интерферометра). Радиус колец является функцией длины волны и оптического пути между пластинами интерферометра. Полный набор таких изображений, заполняющий свободный спектральный диапазон интерферометра (interfringe), называют «циклом сканирования». После обработки изображения могут быть представлены в виде «куба данных». Управление сканированием (изменением расстояния между плоскопараллельными зеркальными пластинами) осуществляется посредством контролера CS100 фирмы [IC Optical Systems Ltd.](http://www.icoptical.com), управляемого от персонального компьютера. В комплекте SCORPIO-2 четыре ИФП, реализующих спектральное разрешение R от 250 до 16000 в спектральном диапазоне 480-700 нм (https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/ifp_rus.html). Поле зрения в этом режиме ограничено размером фильтра и имеет диаметр 6 угловых минут. Спектрограф укомплектован набором светофильтров, выделяющих узкий спектральный диапазон вокруг эмиссионных линий H -alpha, [OIII]5007, [NII]6548,6583, [SII]6717,6731. Описание процесса наблюдений и обработки данных, получаемых со сканирующим ИФП на 6-м телескопе, приводится в статьях: Moiseev A.V. 2002, Bull. SAO, 54, 77, Moiseev A.V., Egorov O.V., 2008, Astroph. Bull., 63, 181, Moiseev A.V., 2015, Astroph. Bull., 70, 494; За консультациями по проведению наблюдений следует обращаться к ответственному астроному Моисееву А.В. (moisav@sao.ru)

6. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ПОЛЕВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ С ЛИНЗОВЫМ РАСТРОМ

В составе SCORPIO-2 имеется блок для интегральной спектроскопии (IFU), состоящий из линзового раstra 22×22 микролинз размером 2×2 мм, на который проектируется изображение протяженного объекта. Каждая линза раstra формирует изображение главного зеркала БТА. Полученная таким образом матрица микрозрачков реформируется при помощи оптических световодов в две псевдощели, изображение которых подается на вход спектрографа. Оптическая схема (https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/ifu_rus.html) спектрографа при этом перестраивается - вместо щели вводится блок микрообъективов, проектирующий

изображение объекта на линзовый растр и вводится другой коллиматор, взамен стандартного коллиматора редуктора светосилы. Масштаб изображения на входе IFU, равен 0.75"/линзу а поле зрения 16.5"×16.5". В дополнение к основным, в линзовом растре используются по 14 микрозрачков сверху и снизу, с помощью которых одновременно со спектром объекта формируется спектр от фона неба на удалении $\pm 3'$ от центра изображения. Набор имеющихся в составе SCORPIO-2 объемных фазовых голографических решеток обеспечивает спектральный диапазон 460-730 нм и разрешение $\lambda/\delta\lambda$ от 1040 до 2800 в режиме IFU. Рабочий спектральный диапазон для каждой решетки выделяется полосовыми фильтрами из комплекта спектрографа. Подробное описание блока IFU, методики наблюдений, получаемых данных и их обработки приведено в статье: Afanasiev V.L., Egorov O.V., Perepelitsyn A.E., [2018, Astrophysical Bulletin, 2018, 73, 373 \(Русский PDF\)](#). За консультациями по проведению наблюдений следует обращаться к ответственному астроному Афанасьеву В.Л. (vafan@sao.ru)

В соответствие с «ПОЛОЖЕНИЕМ О ПОРЯДКЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ УНУ БТА» от 21.10.2019 г., выполняемые на SCORPIO-2 исследования проводятся по совместным с сотрудниками лаборатории спектроскопии фотометрии внегалактических объектов САО РАН научным программам, а подаваемые в НКТРТ заявки должны быть согласованы с руководителем работ В.Л.Афанасьевым.

Спекл-интерферометр ПФ БТА

Статус прибора – авторский

Ответственный – Максимов А.Ф. (max@sao.ru)

Спекл-интерферометр (СИ) первичного фокуса БТА в основном предназначен для исследования структуры компактных объектов (одиночные звезды, двойные и кратные системы звезд, астероиды и пр.) с дифракционным разрешением близким к разрешению оптики телескопа в видимом диапазоне спектра. Объекты со сложной структурой, такие как асимметричные звездные оболочки, эмиссионные области галактических ядер и т.д., также доступны для наблюдений, но для них необходима одновременная запись точечного источника (опоры). СИ выполняет регистрацию мгновенных спекл-изображений объектов в спектральном диапазоне от 500 до 900 нм с экспозициями, не превышающими время "замороженности" атмосферной турбулентности (5-30 мс). Методика наблюдений предполагает также получение калибровочных изображений темнового и плоского полей.

В настоящее время предельная звездная величина регистрации составляет 15^m. Достижимая точность разрешения двойных систем звезд с малой разницей блеска по единичному измерению составляет 0.02". Максимальная разность блеска между компонентами – 6^m.

В состав СИ входят:

- Блок сменных микрообъективов для увеличения изображений с целью согласования диаметра пятна в спекл-интерферограмме (2 мкм в первичном фокусе БТА) с размерами элемента приемника излучения (16 мкм). Микрообъективы 2.5-, 10- и 16-кратного увеличения обеспечивают масштабы в фокальной плоскости камеры 0.055, 0.014 и 0.008

"/элемент, соответственно. Размеры полей зрения при этом (сторона квадратного раstra) составляют 28.2, 7.1 и 4.4". Задний рабочий отрезок микрообъективов равен 160 мм.

- Компенсатор атмосферной хроматической аберрации. Предназначен для устранения искажений в регистрируемых спекл-интерферограммах, возникающих из-за атмосферной дисперсии. Изображение размывается вдоль вектора дисперсии и разрешение в этом направлении ухудшается. Чтобы исключить этот эффект, необходимо наличие в оптическом тракте элемента с дисперсией противоположенного знака. Компенсатор построен на основе двух призм прямого зрения, вращающихся вокруг оптической оси инструмента в противоположных направлениях. Каждая призма представляет собой пару клиньев (крон+флинт) на оптическом контакте и обеспечивает дисперсию 330"/20 нм на длине волны прямого зрения 550 нм. Механизм вращения обеих призм выполнен зависимым и предполагает разворот призм на равные углы относительно оптической оси. Компенсация осуществляется в пределах зенитных расстояний от 0 до 60 град.
- Блок с набором интерференционных фильтров для работы в спектральных полосах с центрами от 550 до 850 нм и с различной шириной полосы пропускания от 40 до 100 нм. Интерференционные фильтры предназначены для соблюдения условия когерентности при регистрации спекл-интерферограмм. В СИ на турели установлены 5 интерференционных фильтров, которые вводятся в световой тракт поворотным механизмом. Все фильтры имеют внешний диаметр 25 мм (световой диаметр 21 мм) и толщину 6 мм. Фильтры в наборе могут меняться в зависимости от задач регистрации объектов. В настоящее время в СИ установлен набор, включающий следующие фильтры: (центр/полуширина) 550/20 нм, 676/10 нм, 694/10 нм, 700/50 нм, 800/100 нм. В свободное от фильтра окно турели, предназначенное для работы в полихроматическом свете, установлена гризма, используемая при наблюдениях в режиме лунных покрытий. Одновременное получение фотометрических кривых в различных спектральных каналах необходимо для сравнения различных областей звездных атмосфер. Для двойных и кратных систем это позволяет измерять относительные потоки в разных диапазонах спектра и уточнить спектральные типы компонентов систем.
- Контроллер привода шаговых двигателей для управления оптическими элементами СИ TMPM-310 производства компании Trinamic. С помощью этого же контроллера включается и выключается регистрирующая EMPPD - камера. Контроллер подключается к РОМ-порту управляющего компьютера посредством стандартного интерфейса последовательного обмена RS-232. Микрообъективы перемещаются линейным позиционирующим механизмом типа LM-160 фирмы OWIS. Точность установки составляет 2 мкм на 50 мм длины подвижной части. Призмы компенсации дисперсии приводятся во вращение дифференциальным механизмом с приводом от двух независимых двигателей через зубчатую передачу с отношением 10:1. Турель с интерференционными фильтрами установлена непосредственно на вал шагового двигателя FL39ST.
- Регистрирующая камера с электронным умножением зарядов (EMPPD) iXon Ultra DU-897-PS0 производства компании Andor, имеющая формат 512×512 элементов разрешения размером 16×16 мкм каждый. В камере используется матрица с обратной засветкой типа PPD97 (E2V) с размером светочувствительной области 8.2×8.2 мм и квантовой эффективностью 96% (550 нм). Для уменьшения темнового тока матрица имеет высокоэффективную систему охлаждения на базе четырехкаскадного охладителя на элементах Пельтье. Минимальная достижимая температура при воздушном охлаждении составляет -70 °С. Темновой ток при этом снижается до величин менее 0.01 электрона в

секунду на элемент разрешения. Выходной узел выполнен в виде двух независимых регистров считывания. Один используется при считывании как в нормальных CCD-матрицах, другой работает в режиме электронного усиления заряда. Соответственно камера имеет два независимых канала вывода информации. Выходные данные представлены 16-разрядным кодом и определяют динамический диапазон камеры. При тактовой частоте считывания выходного регистра с электронным усилением 10 МГц частота кадров составляет 18-25 Гц в зависимости от времени экспозиции. При этом среднеквадратичное значения шума считывания для единичного усиления составляет порядка 40 эл. При работе с максимальным усилением шум считывания эффективно снижается до значений менее 1 эл. Коэффициент усиления может регулироваться программно от 1 до 1000.

- Управляющий компьютер. Благодаря применению компьютера в промышленном исполнении с расширенным диапазоном температур эксплуатации удалось скомпоновать все узлы спекл-интерферометра непосредственно в кабине первичного фокуса телескопа. При этом отпала необходимость в размещении части оборудования в аппаратной комнате телескопа, коммутации этого оборудования посредством оптоволоконных линий, а также нахождении персонала на телескопе во время наблюдений. Кроме того, наличие рядом с компьютером накопителя SSD с емкостью 256 ГБ и интерфейсом USB-3 позволило записывать данные на диск, минуя ОЗУ компьютера, что, в свою очередь, существенно сократило процесс перезаписи данных во время наблюдений. До недавнего времени в СИ использовался компьютер NISE-2100 с процессором Intel Atom D525 компании Nexcom. В 2018 году управляющий компьютер был заменен на более высокопроизводительный промышленный компьютер eBOX700-891-FL на базе процессора Intel Core i7-6700TE с объемом оперативной памяти 8 ГБ и жестким диском объемом 1 ТБ. При этом отпала необходимость во внешнем накопителе, поскольку емкости внутреннего диска хватает для записи данных в течение всего сета наблюдений. Замена компьютера позволила также устранить перебои в передаче кадров, передаваемых по сети через протокол VNC, за счет большей производительности. Планируется также, в перспективе, автоматизировать часть задач, выполняемых в настоящее время вручную в процессе наблюдений, а также возложить на компьютер первичную обработку данных.

Во время наблюдений все узлы СИ располагаются на фланце, который, в свою очередь, закрепляется на поворотном столе СПФ. Управление модулем осуществляется через линию связи Gigabit Ethernet по протоколу доступа VNC от компьютера общего пользования в аппаратной (ком.505).

Обработка полученных изображений включает геометрическую и фотометрическую коррекцию, усреднение мгновенных изображений, накопление корреляционных функций второго и третьего порядков и восстановление изображений с дифракционным разрешением.

Полное восстановление изображений произвольной структуры возможно при вычислении как модуля, так и фазы изображения. Соответствующие рекурсивные вычисления весьма затратны с точки зрения времени счета и требуют значительных компьютерных мощностей.

Для этих целей используется высокопроизводительная рабочая станция на базе платформы Server ASUS ESC4000 G3.

Описание прибора изложено в публикации:

А.Ф. Максимов, Ю.Ю. Балега, В.В. Дьяченко, Е.В. Малоголовец, Д.А. Растегаев, Е.А. Семерников. Спекл-интерферометр 6-м телескопа САО РАН на основе EMCCD: характеристики и первые результаты. // Астрофизический бюллетень, 2009, том 64, № 3, стр. 308-321.

Комплекс исследования быстрой переменности МРРР

Статус прибора – авторский

Ответственный – В.Л.Плохотниченко (pvl@sao.ru)

Метод исследования оптической переменности астрофизических объектов с высоким временным разрешением предназначен для поиска и исследования быстропеременных процессов и явлений у астрофизических объектов, периодических, иррегулярных, вспышечных, с характерными временами от минут до микросекунд. Позволяет выполнение синхронных наблюдений с точной привязкой к UT, обеспечиваемой используемыми навигационными системами.

Объектами для изучения являются кандидаты в «чёрные дыры» звёздных масс, пульсары, вспыхающие звёзды и любые другие быстропеременные объекты. В основе методов поиска и исследования вариаций их излучения заложен принцип регистрации отдельных квантов с набором пространственных, спектральных и поляризационных характеристик с последующим анализом их совокупности.

В методе используется Многомодовый Панорамный ФотоПоляриметр (МРРР), см. [1,2], на выходе которого формируются т.н. фотонные листы – ряды моментов регистрации отдельных квантов света с их пространственными, энергетическими, а также поляризационными характеристиками, накапливающиеся и в долговременной памяти компьютера. Эти данные могут быть обработаны с помощью различных программ, в частности, для статистического анализа распределений интервалов между квантами, исследования кривых блеска с любым заданным окном, начиная с микросекундного, сфазированных кривых блеска, корреляционных функций, спектра мощности.

Конструкция состоит из:

- фокальной платформы с зеркально-щелевым узлом подзора рабочего поля и формирования параллельных пучков света от участка неба с исследуемым объектом;
- узла оптических блоков с анализатором линейной поляризации на входе оптического пучка и устройством дистанционной установки блоков в рабочее положение;
- двух фотоприёмных устройств на основе координатно-чувствительных детекторов с системой регистрации многомерных стохастических потоков квантов на основе двух хронометрических устройств Квантохрон 4-48 [6], с 30 нс временным разрешением, и привязкой к UT, обеспечиваемой сервером времени;
- EMCCD-камеры с системой регистрации, позволяющей принимать до 14 кадров/с.

Прибор предназначен для установки в первичном фокусе БТА.

Особенности:

1. **Подсмотр рабочего поля** проводится с помощью зеркально-щелевого узла, направляющего приходящий от зеркала телескопа свет в объектив конечного переброса изображения. Размер рабочего поля $2'.5 \times 3.5'$ с используемой ныне TVCCD-камерой. Узел позволяет устанавливать ширину щели в диапазоне 0-10" и с помощью перемещения его вдоль щели выбирать её размер в 10" или 60". Эта функция используется при выполнении поляризационных и спектральных измерений для минимизации вклада излучения фона (в особенности при яркой Луне или в сумерках). Кроме того, в щелевом узле имеется окно с установленной в нём линзой поля с размером 1', используемой при введении её на ось телескопа для поиска и наблюдения слабых объектов в широком поле. За щелевым блоком находится ахроматический объектив-коллиматор, прозрачный в УФ диапазоне, формирующий параллельный пучок от осевого источника.
2. **Определение трёх параметров Стокса** выполняется с помощью анализатора линейной поляризации в виде двойной призмы Волластона [3], вводимой в параллельный пучок излучения осевого объекта. Он разделяется на две компоненты по границе склейки призм и позволяет одновременно измерять интенсивность излучения с главными плоскостями поляризации, ориентированными под углами 0 и 90 градусов в одной половине пучка, и 45, 135 градусов – в другой.
3. **Определение спектральных (фотометрических) характеристик** зарегистрированного излучения производится с помощью дихроичных зеркал (в оптических блоках) в сочетании с UBVR-фильтрами, а также спектральных блоков (призма Аббе и дифракционная решетка).

Светоприемниками являются два координатно-чувствительных детектора квантов: - «синий» с мультищелочным катодом [4,9] и «красный» с GaAs катодом [5,7,8,10], имеющие максимумы квантовой эффективности 10% и 30% на длинах волн 400 нм и 500 нм, соответственно. Эти детекторы представляют собой приборы с внешним фотоэффектом и микроканальным умножением электронных лавин. Последние поступают на многоэлементные коллекторы, связанные с зарядо-чувствительными усилителями и аналого-цифровыми преобразователями, кодирующие координаты центроидов этих лавин. Рабочее поле «синего» детектора - 15 мм, «красного» - 14 мм (более 60" в выбранном масштабе переброса изображения), пространственное разрешение в центре поля составляет 0.05 мм, временное разрешение (мёртвое время) - 1 мкс. Допустимая предельная скорость регистрации на каждом КЧД - 100000 отсчётов/сек по всему полю и 30000 - от звездообразного источника.

Последовательности квантов, зарегистрированные обоими КЧД, мультиплексируются смесителем многозарядных стохастических сигналов и подаются общим потоком в систему сбора данных, см. ниже.

В качестве дополнительного детектора в МРРР используется EMCCD-камера, размещенная вместе с *BVR* оптическими фильтрами в торце прибора. Видеоряд от неё накапливается отдельным компьютером. Каждый кадр имеет размер ~250 Кб. Предельная частота считывания без промежутков между ними - 14 кадр/с. Фон неба при наблюдении с камерой безлунного неба в прямом фокусе и в интегральном свете обнаружим над уровнем теплового шума до частоты 10 кадров/с.

MPPP позволяет использовать в наблюдениях любой из дистанционно устанавливаемых пяти режимов, а именно,

a — широкополосный режим, в котором входное излучение разделяется на два потока в области ~ 450 нм, после чего «синий» и «красный» компоненты поступают на соответствующие фотоприемные устройства (т. е. на «синий» и «красный» КЧД).

b — высокочувствительный режим с EMCCD камерой [4], при котором накапливаются последовательности кадров в интегральном цвете или полосах BVR с временным разрешением до 0.1с, с синхронной регистрацией отраженных дихроичным зеркалом потоков квантов в U -полосе «синим» КЧД.

c — фотометрический режим с регистрацией потоков квантов в одной из полос U или B , и одновременно с этим в двух полосах V и R ;

d — спектральный режим с призмой Аббе, формирующей в бесщелевом варианте спектр с 5-ю элементами разрешения (при секундных изображениях), регистрируемый «красным» КЧД, при одновременной регистрации излучения в U -полосе «синим» КЧД;

e — спектральный режим с дифракционной решеткой, формирующей спектр с 50-ю элементами разрешения, при аналогичном использовании 2-х КЧД.

Эти режимы могут использоваться как с линзой поля, так с площадками, сформированными зеркально-щелевым узлом. В параллельный пучок излучения исследуемого объекта может устанавливаться анализатор поляризации (двойная призма Волластона). При наблюдениях ярких объектов можно уменьшать ширину щели и этим несколько повышать спектральное разрешение.

Для обеспечения оптимального соотношения интенсивностей регистрируемых потоков излучения и защиты от опасных для детекторов перегрузок перед каждым из КЧД установлен дырчатый ослабитель с изменяемым дистанционно пропусканием от 100 до 3% (при факторе 2) или полным перекрытием пучков.

Общее пропускание MPPP в синей, зеленой и красной полосах составляет около 60%.

Система сбора данных накапливает в памяти компьютера последовательности закодированных моментов регистрации квантов (фотонные листы). Она состоит из двух одинаковых компьютеров с установленными в них PCI платами хронометрических устройств «Квантохрон-4/48» [6], фиксирующих и сохраняющих 64-х разрядные коды фотонов во внутренней оперативной памяти типа FIFO, а также третьего компьютера для управления процессом сбора и накопления получаемой информации в долговременной памяти. Первые два компьютера, чередуясь в течение секундных интервалов, принимают и сохраняют мультиплексированные смесителем стохастические потоки кодов координат пришедших фотонов и добавляют к ним коды моментов их регистрации (точность измерения времени - 30 нс), привязанные к Мировому Времени (по GPS).

При этом накопление данных происходит в течение любого промежутка времени, ограничиваемого только ёмкостью дисковых накопителей в компьютере. Допустимая скорость приёма данных 10^6 отсч/с.

Управление МРРР выполняется в интерактивном режиме, при котором с помощью контроллера шаговых двигателей устанавливаются в рабочие положения узлы прибора, а также с помощью графического интерфейса выбираются параметры электронных компонентов. Этот интерфейс демонстрирует схему оптического блока, установленного на оптической оси прибора, символы клавиш воздействия на его исполнительные механизмы, параметры его состояния, суммарную кривую блеска принимаемых на КЧД потоков излучения с секундным временным разрешением и зенитный угол телескопа. Во время работы телескопа по сигналу «tracking» регистрируется информация и о его состоянии. Все получаемые отсчёты каждую секунду фиксируются в журнале работы прибора.

Дистанционная установка режимов функционирования прибора позволяет гибко перенастраивать его в соответствии с целью наблюдений и проводить их комплексно и многопланово.

Управление кластером компьютеров сбора данных также выполняется в интерактивном режиме с помощью графического интерфейса, содержащего два планшета изображений рабочих полей, регистрируемых детекторами. На отдельном экране отображаются с секундным временным разрешением скорости регистрации квантов в нескольких многоугольных площадках, выбираемых на этих полях.

«Фотонные листы» - накопленные данные о квантах, зарегистрированных во всех сформированных в МРРР световых пучках, могут быть обработаны совместно, как синхронные временные ряды, соответствующие потокам с разными цветовыми или спектральными характеристиками и в различных поляризациях.

Литература

1. Plokhotnichenko V., Beskin G., Debur V., Panferov A., Panferova I., The Multicolor Panoramic Photometer-Polarimeter with high time resolution based on the PSD. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, A 513, 167.
2. В.Л.Плохотниченко, Г.М.Бескин, В.Г.де-Бур, С.В.Карпов, Д.А.Бадьин, З.В.Любецкая, А.П.Любецкий, В.В.Павлова, Многомодовый панорамный сотоспектрополяриметр высокого временного разрешения. // Астрофизический бюллетень, 2009, 64, 3, с. 322–331.
3. E. Oliva, Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser. 123, 589, 1997.
4. V. Debur, T. Arkhipova, G. Beskin, M. Pakhomov, V. Plokhotnichenko, M. Smirnova, A. Solin. The Position-Sensitive Detector for the 6-meter optical telescope. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, A 513, 127.
5. В.Г.де-Бур, Г.М.Бескин, С.В.Карпов, В.Л.Плохотниченко, А.С.Терехов, С.С.Косолобов, Г.Э.Шайблер, Координато-чувствительный детектор высокого временного разрешения с арсенид-галлиевым фотокатодом. // Астрофизический бюллетень, 2009, 64, 4, с.404-410.
6. В.Л.Плохотниченко, А.В.Солин, А.Г.Тихонов, Система регистрации случайных потоков многомерных сигналов "Квантохрон 4-48", Астрофизический бюллетень. 2009, 64, 2, с.204-210.
7. В. Л. Плохотниченко, Г. М. Бескин, С. В. Карпов, А. В. Солин, А. А. Солин, В. Г. де-Бур, А. С. Терехов, С. Н. Косолобов, Г. Э. Шайблер, С. В. Моисеев, В. В. Павлова, С. С. Моисеев, Координатно-чувствительные детекторы с высоким временным разрешением для оптических наблюдений. 16-анодный GaAs детектор для зелёно-красного диапазона, АБ САО, 2020, в печати.

8. Плохотниченко В. Л., де-Бур В. Г. и др. GaAs-КЧД на БТА, (Техническое описание) / Плохотниченко В. Л., де-Бур В. Г., Моисеев С. В., Солин А. В., Терехов А. С., Бескин Г. М., Карпов С. В., Моисеев С. С., Павлова В. В., Солин А. А., Городовой Е. П. // Научно-технический отчет САО РАН, Нижний Архыз, -2018, -N337, -с. 1-138
9. Плохотниченко В. Л., де-Бур В. Г., и др. Разработка фотоприёмных устройств на основе КЧД разных типов / Плохотниченко В. Л., де-Бур В. Г., Моисеев С. В., Солин Солин Солин А. В., установленного на оптической оси прибора Бескин Г. М., Карпов С. В., Павлова В. В., Любецкая З. В., Плохотниченко П. В., Городовой Е. П. // Научно-технический отчет САО РАН, Нижний Архыз, -2019, N 339, -с. 1-135
10. V. L. Plokhotnichenko, G. M. Beskin, S. V. Karpov, A. V. Solin, A. A. Solin, A. S. Terekhov, S. N. Kosolobov, G. E. Scheibler, V. G. de Bur, S. V. Moiseev, V. V. Pavlova, and S. S. Moiseev, Photosensor Device Based on a 16-Electrode Position-Sensitive High Time Resolution Detector, Vol. 75, No. 1, 2020 (in press)

Нэсмитовский Эшелле-Спектрограф (НЭС)

Статус прибора – авторский

Ответственные – Панчук В.Е. (panchuk@ya.ru), Юшкин М.В. (maks@sao.ru)

Нэсмитовский эшелле-спектрограф (НЭС) стационарно установлен на платформе фокуса Нэсмит-2 телескопа БТА и предназначен для спектроскопии звездообразных объектов с высоким спектральным разрешением во всем оптическом диапазоне длин волн. Спектральное разрешение НЭС может варьироваться от $R = 30\,000$ до $R = 90\,000$, а спектральный диапазон от $\lambda = 3050 \text{ \AA}$ до $\lambda = 10000 \text{ \AA}$, в зависимости от выбранного варианта наблюдений.

НЭС оснащен светоприемником на базе матрицы ПЗС E2V CCD42-90 форматом 2048×4612 элементов с размером элемента 13.5×13.5 мкм (<https://www.sao.ru/hq/adlab/cam4290-3.html>). Детектор изготовлен по технологии глубокого обеднения кремния и имеет просветляющее покрытие Astro Multi-2, что обеспечивает высокую квантовую эффективность во всем рабочем диапазоне НЭС. Формат светоприемника позволяет одновременно регистрировать на кадре спектральную полосу шириной 3000 Å. Приемник постоянно смонтирован на спектрографе, снабжен криостатом, заправляемым жидким азотом. Время выхода спектрографа в рабочий режим после включения фотоприемного устройства – 40 мин.

НЭС снабжен двумя сменными элементами скрещенной дисперсии, предназначенными для работы в двух спектральных поддиапазонах: наземном УФ – видимом, с рабочей полосой 3050 – 7800 Å (т.н. «синий» диапазон), и видимом – ближнем ИК, с рабочей полосой 4800 – 10000 Å (т.н. «красный» диапазон). Смена элементов скрещенной дисперсии (дифракционных решеток в оправках) требует длительного времени и производится в дневное время, между сетами наблюдений. Смена спектральной полосы, регистрируемой на приемнике излучения в пределах рабочего диапазона используемого элемента скрещенной дисперсии, может быть произведена в течение сета наблюдений, однако нежелательно такую смену делать ночью, поскольку эта процедура требует дополнительной калибровки как шкалы длин волн, так и неоднородности чувствительности светоприемника.

В качестве входных деккеров НЭС имеет набор: «классическая» щель размером 0.6"×2.5" в проекции на небесную сферу, резатель изображения на три среза, размером 0.6"×2.0" каждый и

общим размером входной диафрагмы $1.8'' \times 2.0''$, резатель изображения на три среза, размером $0.4'' \times 2.0''$ каждый и общим размером $1.2'' \times 2.0''$, регулирующую щель с изменяемой шириной от $0.2''$ до $2.0''$ и высотой от $0.2''$ до $40.0''$. Выбор входного деккера производится в зависимости от наблюдательной задачи, при этом спектральное разрешение НЭС определяется из соотношения $R \cdot s'' = 30\,000$, где s'' – ширина входной щели в угловых секундах.

В предщелевой части НЭС установлен корректор наклонов волнового фронта, который обеспечивает режим автоматического гидирования, а также компенсирует колебания оптико-механической конструкции телескопа, как на собственных частотах, так и вследствие порывов ветра.

Блок ламп спектра сравнения содержит лампу полого катода, покрытого солями тория, с аргоновым наполнением колбы (Th-Ag), предназначенную для калибровки шкалы длин волн, и две галогеновые лампы с выравнивающим фильтром, для калибровки эффектов «плоского поля».

Подсмотр входной щели при работе в телевизионном режиме считывания кадров обеспечивает регистрацию объектов до 15^m в полосе V при идеальных погодных условиях (т.е., при размере турбулентного диска звезды около $1''$ и отличной прозрачности). Для наблюдений предельно слабых объектов при плохих погодных условиях, подсмотр используется в режиме суммирования кадров.

В настоящее время на НЭС возможно проведение наблюдений в шести режимах:

1. Спектроскопия звездообразных объектов в видимом диапазоне с резателем изображения $3 \times 0.6'' \times 2.0''$.
2. Спектроскопия звездообразных объектов в видимом диапазоне с резателем изображения $3 \times 0.4'' \times 2.0''$.
3. Спектроскопия звездообразных объектов в наземном УФ-диапазоне с нормальной щелью $0.6'' \times 2.5''$.
4. Спектроскопия звездообразных объектов в ближнем ИК-диапазоне с резателем изображения $3 \times 0.6'' \times 2.0''$.
5. Спектроскопия звездообразных объектов в ближнем ИК-диапазоне с резателем изображения $3 \times 0.4'' \times 2.0''$.
6. Спектроскопия звездообразных и протяженных объектов с регулируемой щелью.

Параметры НЭС в различных режимах наблюдения

1. СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ $3 \times 0.6'' \times 2.0''$.

Спектральное разрешение: $R = 50\,000$.

Рабочий диапазон длин волн: $3900 - 7800 \text{ \AA}$.

Предельная звездная величина: $m_V = 15.0^m$ ($S/N = 10$, $\text{Exp} = 1^h$).

В качестве элемента скрещенной дисперсии используется нарезная крупногабаритная дифракционная решетка, работающая в первом порядке дифракции, с плотностью штрихов 300 штр/мм . На входе в спектрограф устанавливается резатель изображения на три среза, размером $0.6'' \times 2.0''$ каждый. Между срезами имеются темные промежутки высотой $2.0''$,

суммарная высота изображения одного спектрального порядка с использованием резателя соответствует 10".

Спектральный диапазон в коротковолновой части ограничен высотой монохроматического изображения щели. На длинах волн больше 6000 Å появляется скважность между соседними порядками. В случае необходимости регистрации определенных спектральных линий (не попадающих в стандартный кадр), сдвиг спектра вдоль дифракционных порядков осуществляется наклоном эшелле-решетки в главной плоскости.

Данный режим наблюдений, наряду с аналогичным вариантом в ближнем ИК-диапазоне, имеет максимальную проникающую способность. Здесь и далее предельная звездная величина соответствует блеску звездообразного объекта или поверхностной яркости протяженного объекта, спектр которого регистрируется с максимальным отношением сигнал/шум $S/N=10$ за время экспозиции 1^h при качестве изображения 1.0" и идеальной прозрачности атмосферы. Следует отметить, что во всех вариантах наблюдений на НЭС, на единичном кадре регистрируется спектр одновременно в двух или трех фотометрических полосах, поэтому уточненное отношение сигнал/шум для того или иного объекта с определенной звездной величиной в фильтре V , будет зависеть от спектрального класса этого объекта.

2. СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДИМОМ ДИАПАЗОНЕ С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ 3×0.4"×2.0".

Спектральное разрешение: $R = 75\ 000$.

Рабочий диапазон длин волн: 3900 – 7800 Å.

Предельная звездная величина: $m_V = 14.5^m$ ($S/N = 10$, $Exp = 1^h$).

Данный режим во всем аналогичен предыдущему, за исключением устанавливаемого на входе в спектрограф резателя изображения. В этом варианте используется резатель с размером каждого среза 0.4"×2.0". Это позволяет в полтора раза повысить спектральное разрешение. При этом количество света, попадающего в спектрограф, пропорционально снижается.

Наблюдения в таком режиме проводятся при идеальных погодных условиях и/или в случае необходимости получения спектров с более высоким спектральным разрешением.

3. СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ОБЪЕКТОВ В НАЗЕМНОМ УФ-ДИАПАЗОНЕ С НОРМАЛЬНОЙ ЩЕЛЬЮ 0.6"×2.5".

Спектральное разрешение: $R = 50\ 000$.

Рабочий диапазон длин волн: 3050 – 6000 Å.

Предельная звездная величина: $m_B = 12^m$ ($S/N = 10$, $Exp = 1^h$).

Используется «классическая» входная щель и дифракционная решетка скрещенной дисперсии 300 штр/мм. Режим предназначен для получения спектров вплоть до коротковолновой границы прозрачности земной атмосферы. «Синяя» граница рабочего диапазона 3050 Å указана условно, поскольку она ограничена концентрацией озона в атмосфере, который испытывает сильные вариации как сезонные, так и в течение ночи, к тому же распределение озона в атмосфере

неравномерное и граница прозрачности может варьироваться в зависимости от азимута и зенитного расстояния объекта. Оптика НЭС позволяет получать спектры хорошего качества вплоть до области аномальной дисперсии плавленого кварца. Квантовая эффективность приемника излучения на «синей» границе диапазона около 20%.

Из-за плотного расположения высоких спектральных порядков, данная конфигурация НЭС не позволяет использовать резатель изображения, как следствие, проникающая способность прибора снижается. Предельная звездная величина указана также условно, поскольку поток излучения после бальмеровского скачка (на длинах волн короче 3646 Å) будет зависеть от типа объекта.

4. СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДИМОМ И БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНАХ С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ 3×0.6"×2.0".

Спектральное разрешение: $R = 50\,000$.

Рабочий диапазон длин волн: 4800 – 10000 Å.

Предельная звездная величина: $m_V = 15.0^m$ ($S/N = 10$, $E_{\text{exp}} = 1^h$).

Используется нарезная крупногабаритная дифракционная решетка скрещенной дисперсии с плотностью штрихов 150 штр/мм и резатель изображения 3×0.6"×2.0" на входе в спектрограф. Дифракционная решетка скрещенной дисперсии имеет максимальную концентрацию энергии в красном и ближнем ИК-диапазоне. Плотность штрихов уменьшена в сравнении с аналогичным элементом в вариантах наблюдений «1» и «2», для сокращения расстояния между соседними спектральными порядками и, как следствие, более эффективного использования полезной площади светоприемника.

Величина свободного спектрального интервала дифракционных порядков эшелле-решетки резко возрастает с длиной волны, поэтому приемник излучения в данном режиме наблюдений необходимо развернуть вокруг оптической оси камеры спектрографа, длинной стороной вдоль спектральных порядков. Спектр регистрируется без скважности вплоть до длины волны 9000 Å, следовательно, смещать изображение спектра вдоль порядков для выбора отдельных спектральных линий нет необходимости. Эшелле-решетка устанавливается в одном положении, обеспечивающем максимальную концентрацию энергии в центре кадра.

Наряду с вариантом «1», данный режим обеспечивает максимальную проникающую способность спектрографа.

5. СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ ОБЪЕКТОВ В ВИДИМОМ И БЛИЖНЕМ ИК ДИАПАЗОНАХ С РЕЗАТЕЛЕМ ИЗОБРАЖЕНИЯ 3×0.4"×2.0".

Спектральное разрешение: $R = 75\,000$.

Рабочий диапазон длин волн: 4800 – 10000 Å.

Предельная звездная величина: $m_V = 14.5^m$ ($S/N = 10$, $E_{\text{exp}} = 1^h$).

Как и вариант «2», этот вариант наблюдений во всем аналогичен предыдущему за исключением резателя изображения, устанавливаемого на входе в спектрограф.

Режим наблюдений с более узкими срезами используется при идеальных погодных условиях, или в случае необходимости получения изображения с более высоким спектральным разрешением.

6. СПЕКТРОСКОПИЯ ЗВЕЗДООБРАЗНЫХ И ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ЩЕЛЬЮ.

Спектральное разрешение: до 90 000.

Рабочий диапазон длин волн: 3050 – 10000 Å.

Данный режим наблюдений на НЭС используется в особых случаях: при необходимости получения сверхвысокого (или сверхнизкого) спектрального разрешения, по сравнению с предыдущими режимами, а также для исследования эмиссионных спектральных линий протяженных объектов.

На входе в спектрограф устанавливается регулируемая щель, ширина которой может варьироваться от 0.2" до 2.0", что, согласно приведенному выше соотношению формально соответствует спектральному разрешению от 150 000 до 15 000. Однако из условия согласования монохроматического изображения входной щели и размера элемента разрешения приемника излучения предельное спектральное разрешение НЭС – 90 000. Для получения $R = 90\,000$ ширина входной щели должна быть 0.3". В таком режиме наблюдать можно только самые яркие объекты с величиной в полосе V до 10^m (в пределе до 12.5^m).

В данной конфигурации НЭС возможно увеличить ширину входной щели и получать изображения спектра с разрешением 20 000 – 30 000. При этом можно использовать режим работы матрицы ПЗС с бинированием (увеличение эффективной площади элемента разрешения за счет объединения зарядов в соседних элементах приемника). Такой режим позволит увеличить предел чувствительности спектрографа.

Высота регулируемой входной щели может увеличиваться до 40". При этом изображения соседних спектральных порядков будут накладываться друг на друга. В случае наблюдений протяженных эмиссионных объектов, у которых поток в континууме на несколько порядков меньше потока в отдельных спектральных линиях (например, планетарные туманности), наложением соседних порядков можно пренебречь. При этом мы получаем изображения отдельных спектральных линий с угловым разрешением вдоль щели, ограниченным атмосферной турбулентностью. Масштаб изображения вдоль щели на матрице ПЗС составляет 0.197 "/pix.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

В соответствии с «ПОЛОЖЕНИЕМ О ПОРЯДКЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ УНУ БТА» от 21.10.2019 г., выполняемые на НЭС исследования проводятся по совместным с сотрудниками лаборатории астроспектроскопии САО РАН научным программам, а подаваемые в НКТРТ заявки должны быть согласованы с руководителем работ В.Е.Панчуком.

Описание прибора, контактную информацию и образцы спектров можно найти в публикациях:

- Panchuk, V.E.; Klochkova, V.G.; Yushkin, M.V.; Naïdenov, I.D. [The high-resolution spectrograph of the 6-m Large Azimuthal Telescope \(BTA\)](#) // Journal of Optical Technology, Volume 76, Issue 2, pp. 87-97 (2009);
- Panchuk, V.E.; Klochkova, V.G.; Yushkin, M.V. [The high-resolution Echelle Spectrograph of the 6-m telescope of the special astrophysical observatory](#) // Astronomy Reports, Volume 61, Issue 9, pp. 820-831 (2017);

а также на странице Лаборатории астроспектроскопии CAO РАН <https://www.sao.ru/hq/ssl/>.