

УДК 520.353

БЛОК IFU В ФОКАЛЬНОМ РЕДУКТОРЕ SCORPIO-2 ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ ПОЛЕВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ БТА

© 2018 В. Л. Афанасьев^{1*}, О. В. Егоров², А. Е. Перепелицын¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 17 мая 2018 года; принята в печать 29 мая 2018 года

Мы описываем схему и особенности конструкции нового блока IFU (Integral Field Unit), предназначенного для интегральной полевой спектроскопии в составе фокального редуктора SCORPIO-2, который устанавливается в первичном фокусе 6-м телескопа БТА САО РАН. Конструкция блока основана на принципе формирования панорамных спектров с помощью линзового растра в сочетании с оптическими волокнами. В блоке используется прямоугольный растр из 22×22 квадратных линз, каждая размером 2 мм. Изображение объекта перестраивается оптикой с увеличением $23\times$ из фокальной плоскости телескопа в плоскость линзового растра. Масштаб изображения — $0''.75/\text{линзу}$, а поле зрения прибора — $16''.5 \times 16''.5$. Растр содержит также два дополнительных массива 2×7 линз для получения спектров ночного неба, изображения которых отстоят от центра на $\pm 3'$. При помощи оптических волокон изображения микрозрачков реформируются в две псевдощели, расположенные на входе коллиматора IFU. Набор объемных фазовых голографических решеток (VPHG) обеспечивает в режиме IFU спектральный диапазон 4600–7300 Å и разрешение $\lambda/\delta\lambda$ от 1040 до 2800. Квантовая эффективность панорамной спектроскопии со SCORPIO-2 — 6–13% в зависимости от применяемой решетки. Описана методика получения и редукции данных с блоком IFU и приводятся результаты тестовых наблюдений на 6-м телескопе сейфертовской галактики Mrk 78.

Ключевые слова: *инструменты: спектрографы — методы: анализ данных — методики: спектроскопические — методики: спектроскопия изображений*

1. ВВЕДЕНИЕ

Интегральными полевыми спектрографами (IFS), предназначенными для панорамной спектроскопии, в настоящее время оснащено большинство крупных телескопов. Концепция IFS была предложена в 1981 г. Куртесом [1] и опубликована в работе [2]. Различные варианты спектрографов были впервые реализованы в работах [3–5]. В прошлом веке панорамная спектроскопия представлялась многим астрономам методически сложной и применимой только для узкого класса задач, ограниченных малым полем зрения таких спектрографов. Появление за последние десятилетия новых технологических возможностей привело к созданию эффективных IFS, предназначенных для широкого круга задач, перечисление которых оставим за рамками данной работы. Отметим лишь специализированные спектрографы, которые

активно используются астрономами последние десятилетия — GMOS [6] и MUSE [7] для 8-метровых телескопов, а также SAURON [8] и PMAS [9] для телескопов класса 3–4 метра.

На 6-м телескопе первая версия IFS, который был назван MPFS (Multi Pupil Field Spectrograph), была создана в 1989 г. [5]. В различных модификациях этот спектрограф успешно проработал на телескопе до 2009 г., и по результатам наблюдений на нем было опубликовано более 100 статей по исследованию галактик разных типов и газовых туманностей Галактики. Описание последней версии спектрографа можно найти в работах [10, 11]. Основным недостатком этого прибора явилось низкое пропускание ($DQE < 5\%$) из-за использования в спектрографе зеркально-линзовой камеры. В настоящее время прибор находится на реконструкции — мы намерены установить в нем линзовую камеру и повысить пропускание в 5–6 раз.

С 2000 г. на БТА работает новый многоре-

*E-mail: vafan@sao.ru

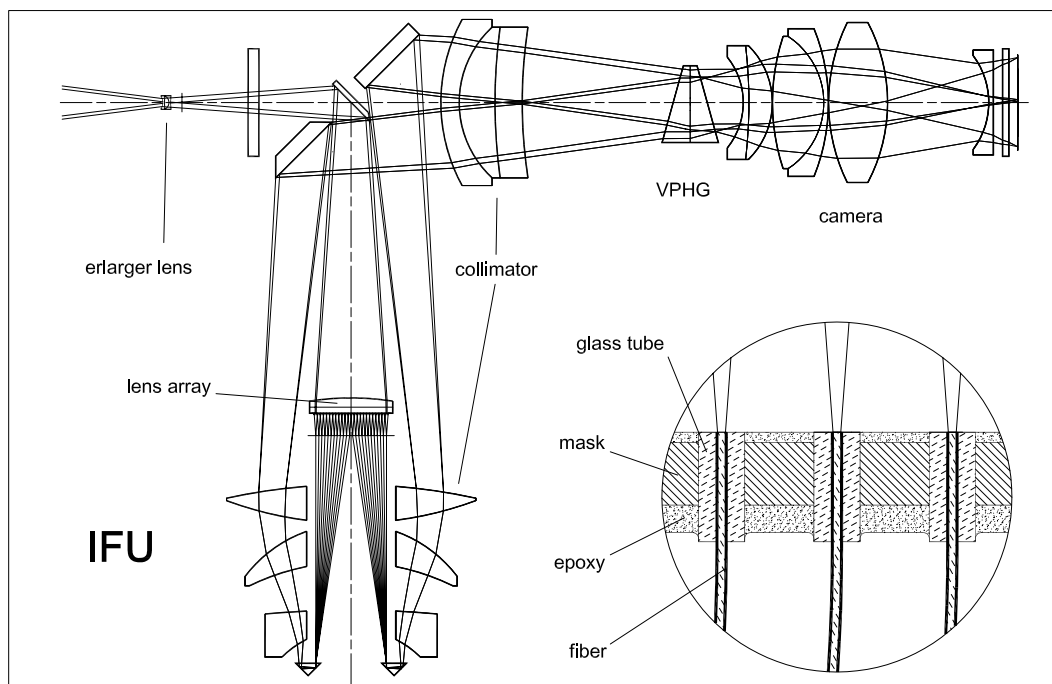


Рис. 1. Оптическая схема режима IFU в спектрографе SCORPIO-2. На врезке — узел линзового раstra и световодов.

жимный спектрограф SCORPIO [12]. В приборе реализованы режимы получения изображений, спектроскопия с длинной щелью, мультиобъектная спектроскопия, спектрополяриметрия и панорамная спектроскопия при помощи сканирующего интерферометра Фабри-Перо (IFP). Желание расширить его возможности и переход на светоприемник большего формата побудили нас начать в 2010 г. проект создания нового многорежимного спектрографа SCORPIO-2 [13]. Описание уже реализованных возможностей этого спектрографа можно найти на WEB-странице проекта [14]. В новом приборе предусмотрен режим панорамной спектроскопии и настоящая статья посвящена описанию режима IFU спектрографа SCORPIO-2: конструкции, методике обработки данных и первым результатам, полученным на БТА.

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА

Фокальный редуктор SCORPIO-2 устанавливается в первичном фокусе 6-м телескопа БТА. В отличие от большинства панорамных спектрографов больших телескопов, размещаемых во вторичных фокусах и имеющих входную светосилу $< F/8$, SCORPIO-2 имеет входную светосилу $F/4$. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на конструктивные особенности интегрального полевого блока IFU при небольших габаритах спектрографа, которые ограничивались объемом кабины первичного фокуса. Передний отрезок SCORPIO-2 (расстояние от посадочной

плоскости поворотного стола до щели) равен 38 мм, что не позволяет реализовать технические решения, аналогичные GMOS [6] и PMAS [9]. Нами найдено решение, которое позволяет разместить блок IFU в корпусе спектрографа, сохранив возможность быстрого переключения режимов работы. В основе нашего решения лежит принцип использования линзового раstra в сочетании оптическими волокнами, предложенный Куртесом [1] и впервые реализованный нами на БТА [5]. В отличие от [9] мы используем короткие световоды длиной 140–150 мм, что позволило расположить блок IFU внутри спектрографа. Это уменьшило световые потери и минимизировало вариации пропускания волокон из-за переменного изгиба. В режиме IFU мы используем другой коллиматор, вводимый в оптический пучок вместо коллиматора, предназначенного для фокального редуктора. Оптическая схема спектрографа в режиме IFU показана на рис. 1. Камера спектрографа (6-линзовый апохромат, $F = 109$ мм, $F/2.6$, $2\omega = 36^\circ$) используется во всех режимах и формирует изображение на входе ПЗС-матрицы EEV42-90 с форматом 4600×2048 px (1 px = 13.5 мкм). Коллиматор блока IFU (5-линзовый ахромат, $F = 240$ мм, $F/6$, $2\omega = 22^\circ$) по светосиле согласован с входной апертурой оптических волокон. Для уменьшения габаритов мы используем решение, при котором узел световодов расположен внутри коллиматора, имеющего в последних трех линзах прямоугольные отверстия размером 60×80 мм. Две псевдощели

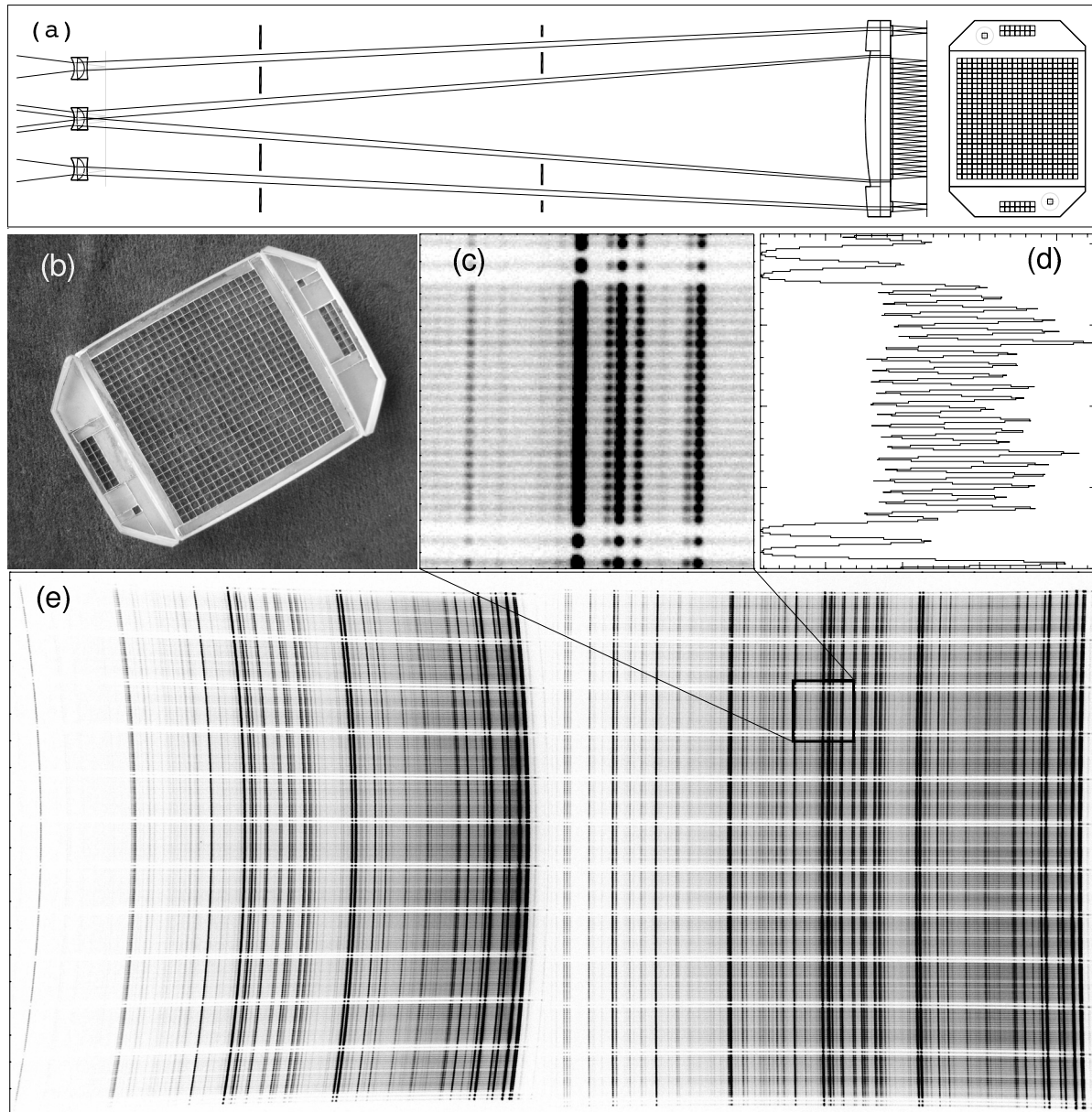


Рис. 2. Линзовый растр IFU SCORPIO-2: (а) оптическая схема формирования изображения, (б) внешний вид. Пример спектров, полученных в режиме IFU: (с) выделенный фрагмент изображения, (d) разрез поперек направления дисперсии, (е) изображения спектров калибровочного источника (подробнее см. в тексте).

длиной 56 мм проектируются коллиматором и камерой в плоскость светоприемника. Расстояние между центрами щелей равно 66 мм. Объемная фазовая голографическая решетка (VRHG) формирует на формате светоприемника два массива спектров. Рабочий участок спектра для каждой решетки выделяется полосовым интерференционным фильтром, вводимым в пучок после линзы увеличителя.

Представление о принципе работы режима IFU спектрографа дает рис. 2. На панели (а) рисунка приведена оптическая схема формирования изобра-

жения на линзовом растре. Центральная отрицательная линза проектирует увеличенное изображение исследуемого поля из фокальной плоскости главного зеркала БТА в плоскость линзового раstra. Используемый нами линзовый растр состоит из массива 22×22 прямоугольных линз размером 2×2 мм с фокусным расстоянием 13.5 мм. Увеличение изображения в нашем случае составляет $23\times$, что дает масштаб изображения $0''.75$ на линзу и размер поля зрения $16''.5 \times 16''.5$. Две другие линзы, установленные на расстояниях ± 20 мм от центра ($\pm 3'$), проектируют изображения участков ночно-

го неба на растры 2×7 линз. Для выполнения условия телецентризма перед каждым линзовым растром установлены полевые линзы. Фотография линзового раstra показана на рис. 2b. Каждая линза формирует изображение зеркала телескопа (микрозрачок) диаметром 150 мкм.

Полученная матрица микрозрачков реформируется при помощи оптических волокон в две псевдошели. На рис. 2e показаны спектры калибровочного источника (непрерывный спектр — кварцевая лампа, а линейчатый — лампа с наполнением Ag-Ne-He) от двух псевдошелей. Реформирование псевдошели осуществляется таким образом, что столбцы одной половины матрицы микрозрачков последовательно располагаются вдоль щели, разделяясь на группы по 22 микрозрачка, между которыми находятся изображения микрозрачков от ночного неба. Это демонстрируется на увеличенном фрагменте участка спектров IFU — рис. 2c и d.

2.1. Линзовый растр с оптическими волокнами

Остановимся более подробно на конструкции узла линзового раstra и световодов. Для реформирования матрицы микрозрачков мы используем оптическое волокно, изготовленное по нашему заказу фирмой «НЦВО-Фотоника»¹, со следующими параметрами:

- числовая апертура — 0.10 ± 0.01 ;
- материал сердцевины — кварцевое стекло с высокой концентрацией OH, световой диаметр 150 мкм;
- материал оболочки — легированное кварцевое стекло, диаметр 165 мкм;
- защитное покрытие — алюминий, диаметр 195–200 мкм.

Как уже отмечалось выше, размер микрозрачка в нашем случае составляет 150 мкм, а максимальная апертура сходящегося пучка после каждой линзы соответствует светосиле $F/4$ и согласована с входной апертурой световода. Ясно, что неточная установка световодов в позиции микрозрачков приведет к потере пропускания. Проблема точной расстановки световодов известна [9] и имеет несколько решений. В нашем случае мы предварительно установили блок IFU на телескопе и получили фотографический снимок матрицы микрозрачков. Положения микрозрачков были измерены на фотопластинке и далее была изготовлена маска с отверстиями диаметром 805–810 мкм, в которые вставлялись капиллярные стеклянные трубки с внутренним диаметром 205–215 мкм и внешним 780–790 мкм. Одним концом волокна вставлялись

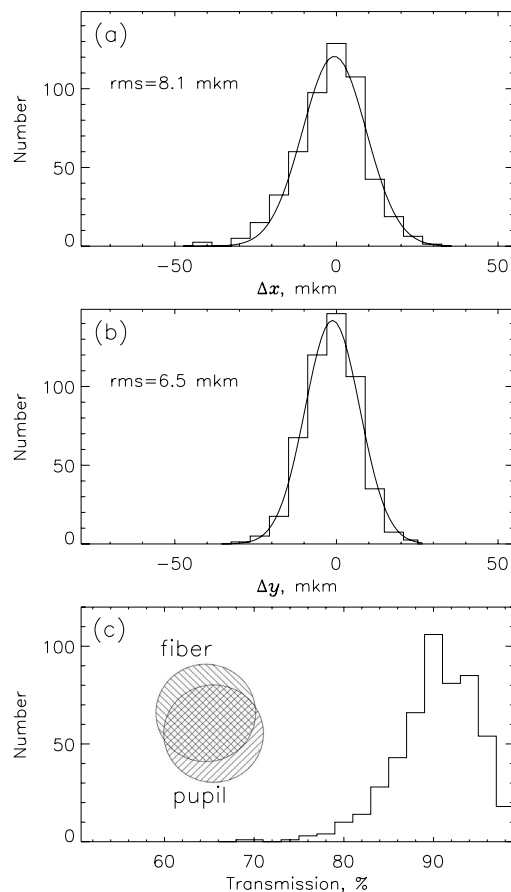


Рис. 3. Потери пропускания волоконно-линзового узла IFU из-за ошибок установки оптических волокон: (a) и (b) — распределение ошибок по осям X и Y , (c) — распределение величины пропускания волокон, среднее значение $91.5 \pm 3.3\%$.

в эти трубки, другим — в щель шириной 205 мкм между двумя стеклянными пластинами (см. врезку на рис. 1), и закреплялись с помощью оптического клея. Волокна вместе с трубками заливались эпоксидным клеем, после чего производилась полировка торцов световодов с обеих сторон. Следует отметить, что такая технология обеспечивает высокое качество обработки торцов световодов и как следствие — малые френелевские потери на входе и выходе волокон. После оптической обработки и установки блока в оправу были проведены измерения положений световодов. Их результаты показаны на рис. 3.

Как следует из рисунка, пропускание, которое определяется ошибкой расстановки волокон, составляет около 90%. На реальное пропускание влияют также френелевские потери на оптических поверхностях (в нашем случае они меньше 15%) и хроматические aberrации линз раstra. Расчеты показывают, что в кружке диаметром 150 мкм концентрируется не менее 85% энергии от полихрома-

¹<http://www.forc-photonics.ru/>

тического изображения микрозрачка. Таким образом, можно заключить, что пропускание узла линзового раstra составляет величину не менее 65%. Механическая конструкция узла позволяет юстировать положение линзового раstra относительно массива волокон при помощи микрометрических винтов. Предусмотрена возможность контроля юстировки на телескопе.

2.2. Особенности работы VPHG в режиме IFU

В фокальном редукторе SCORPIO-2 используются в качестве диспергирующего элемента объемные фазовые голографические решетки (VPHG) с призмами прямого зрения. Применяемые в астрономической практике VPHG имеют высокое пропускание и малый рассеянный свет [15]. Если φ — угол вершины призмы, а θ — угол между оптической осью и осью коллимированного пучка, то угол падения на решетку α можно найти из соотношения $\sin(\varphi - \theta) = n_p \sin(\varphi - \alpha)$, где n_p — показатель преломления материала призмы. При работе в режиме обычной спектроскопии $\theta = 0$ (пучок параллелен оптической оси), а при работе в режиме IFU $\theta \neq 0$. Это приводит к тому, что эффективность VPHG для разных щелей будет неодинаковой.

В приближении Когельника [16] эффективность решетки для заданного угла падения α и длины волны λ дается следующим соотношением:

$$\eta(\lambda) = \frac{1}{2} \sin^2 \Psi + \frac{1}{2} \sin^2(\Psi \cos(\alpha + \beta(\lambda))), \quad (1)$$

где $\Psi = \frac{\pi \Delta n_g d_g}{\lambda \cos \alpha}$.

Здесь d_g — толщина желатинового слоя решетки; Δn_g — амплитуда модуляции показателя преломления n_g слоя, $\beta(\lambda)$ — угол рассеяния света с длиной волны λ на плоскость решетки. Эффективность решетки максимальна на длине волны λ_{\max} , если $\alpha = \beta(\lambda_{\max})$. Тогда угол α называется углом Брэгга, и выполняется условие:

$$\lambda_{\max} \nu_g m = n_g \sin(\alpha), \quad (2)$$

где ν_g — частота модуляции показателя преломления решетки, а m — порядок рассеяния, эквивалентный порядку дифракции у обычных дифракционных решеток. Отметим, что в этом случае величина $1/\nu_g$ эквивалентна числу штрихов нарезных решеток, α — углу блеска, а $\beta(\lambda)$ — углу дифракции. Углы между коллимированными пучками в IFU и оптической осью (см. рис. 1) равны $\pm 8^\circ$. На рис. 4а показаны вычисленные согласно соотношению (1) кривые эффективности для решетки VPHG1200@540, имеющей максимум

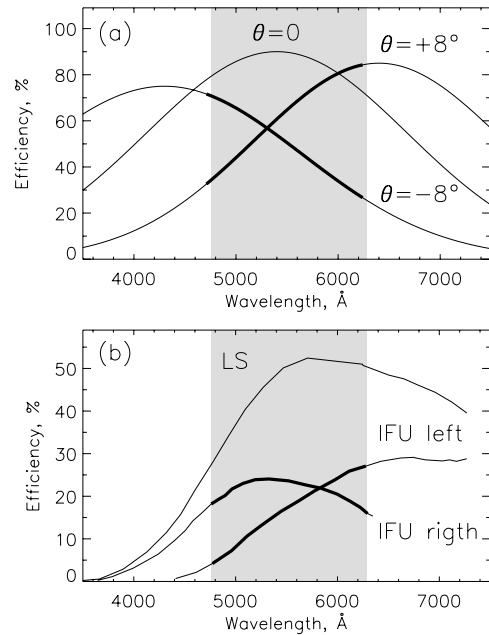


Рис. 4. Расчетные (а) и измеренные (б) эффективности решетки VPHG1200@540 в режиме IFU. Серым цветом показан выделяемый интерференционным фильтром спектральный интервал для этой решетки 4900–6150Å.

концентрации на $\lambda = 5400 \text{ \AA}$ и $1/\nu_g = 1200 \text{ мм}^{-1}$. Вычисления проводились при следующих значениях параметров решетки: $n_g = 1.582$, $\Delta n_g = 0.0286$, $d_g = 10.15 \text{ мкм}$ и значении угла Брэгга $19^\circ 2'$ в воздухе. Использовалась призма из стекла ЛК-8 ($n_p = 1.473$) с углом $\varphi = 36^\circ$. Как видно из рисунка, теоретические кривые эффективности для разных щелей существенно различаются — в среднем, что соответствует середине диапазона, эффективность VPHG в режиме IFU падает примерно в 1.5 раза по сравнению с режимом длинной щели (LS). При этом для «левой» щели ($\theta = +8^\circ$) эффективность растет с длиной волны, а для «правой» ($\theta = -8^\circ$) — падает.

Для проверки этого мы сравнили величину спектральных потоков от кварцевой лампы в режиме IFU с режимом LS для решетки VPHG1200@540, имеющейся в SCORPIO-2. При этом использовались данные об эффективности спектрографа в режиме LS с учетом спектральной чувствительности матрицы и пропускания оптики SCORPIO-2 [13]. Мы определяли не только разницу между эффективностью VPHG в разных режимах, но и разницу между пропусканием оптики, которая включала в себя пропускание линзового раstra со световодами. Результат сравнения реального спектрального пропускания для каждой щели в режимах IFU и LS показан рис. 4б. Как видно из рисунка, эффективность режима IFU в

Таблица. Параметры решеток в режиме IFU

Grating	Spectral coverage, Å	Dispersion, Å px ⁻¹	Resolution, λ/δλ
VPHG940@600	4700–7300	0.90–1.15	1044–1269
VPHG1200@540	4800–6150	0.81–0.90	1186–1351
VPHG1800@510	4600–5400	0.40–0.50	1957–2118
VPHG1800@590	5700–6500	0.41–0.51	2375–2453
VPHG1800@660	6300–7100	0.42–0.52	2571–2582
VPHG2300@520	4930–5630	0.30–0.40	2739–2815

центре спектрального диапазона уменьшается в среднем в 2.5 раза по сравнению с режимом LS. Эта оценка, с учетом пропуска линзового растра со световодами порядка 60–65%, согласуется с нашими расчетами.

Параметры используемых в режиме IFU решеток приведены в таблице, где указаны: название решетки (перед символом @ указано число штрихов, после него — длина волны максимальной концентрации в нм), спектральный диапазон, выделяемый фильтром, интервал дисперсий в Å px⁻¹ и пределы разрешения λ/δλ, которые вычислялись по измеренным ширинам линий.

2.3. Вариации разрешения и гнутия спектрографа в режиме IFU

Стабильность разрешения (PSF) по всему регистрируемому полю в режиме IFU являются одной из важнейших характеристик прибора. Величины вариаций полуширин линий в спектрах, формируемых отдельными световодами, должны быть малы и плавно меняться по полю зрения. Это, в первую очередь, определяет успех вычитания спектра ночного неба. Вариация ширин поперек дисперсии влияет на качество экстракции спектров и, как следствие на фотометрическую воспроизводимость прибора. На рис. 5 показаны измеренные FWHM по монохроматическим изображениям отдельных световодов в спектре неона. Спектр был получен с решеткой VPHG1800@660 в диапазоне 6300–7100 Å, где регистрируется много ярких линий. На рис. 5а показаны изменения полуширины линий вдоль дисперсии. Отметим, что разброс точек определяется ошибками измерений. Увеличение величины FWHM на краю формата обусловлено плавным изменением углового увеличения решетки (magnification) и ухудшением разрешения камеры на краю поля. Первое обстоятельство приводит к заметному изменению величины дисперсии

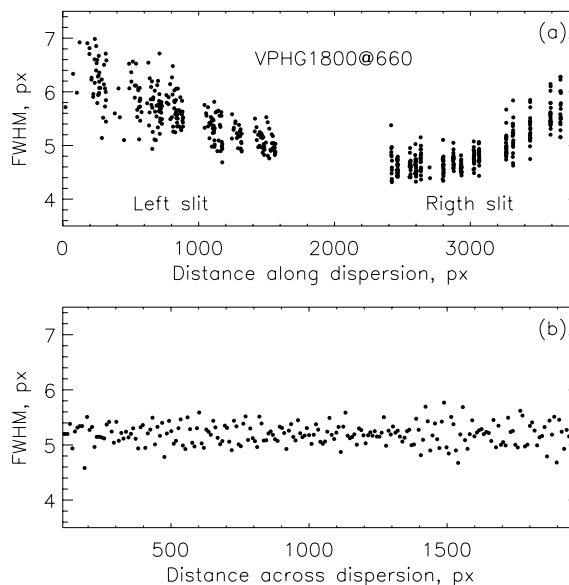


Рис. 5. Вариации ширины линий спектра сравнения в режиме IFU для решетки VPHG1800@660: (а) вдоль направления дисперсии и (б) поперек дисперсии.

на левой щели от 0.52 Å px⁻¹ до 0.40 Å px⁻¹, что дает изменение профиля линии в шкале скоростей с 110 км с⁻¹ до 120 км с⁻¹. Такие изменения приемлемы для большинства задач, где требуется анализ профилей линий исследуемых объектов. Вариации ширины профиля вдоль псевдощели (рис. 5б) с точностью до ошибок измерений отсутствуют. Этот результат важен для выбора алгоритмов экстракции спектров и позволяет надеяться на реализацию хорошей фотометрической стабильности режима IFU.

Гнутия присущи любому прибору, установленному в подвижном фокусе телескопа. Измерения гнутий SCORPIO-2 в режиме LS показывают высокую позиционную стабильность прибора — в диапазоне зенитных расстояний $z = 5^\circ$ – 60° они не превышают 0.8 px (около 10 мкм). Особенность режима IFU состоит в том, что в пучок вводится только часть коллиматора — трехлинзовый коллектив и диагональное зеркало. Три последних линзы коллиматора, находящиеся в одном корпусе с волоконно-линзовым блоком — неподвижны. При изменении зенитного расстояния и вращении прибора это вызывает смещения положения линий. Как показывают измерения гнутий в режиме IFU (рис. 6), за время экспозиции 15–20 мин смещение изображения не превышает 0.3 px и не приводит к ухудшению разрешения. Учитывая структуру каждого изображения («модуляции» интенсивности как в направлении дисперсии, так и вдоль псевдощели), эффекты гнутия легко учесть — при редукации наших данных каждое изображение при-

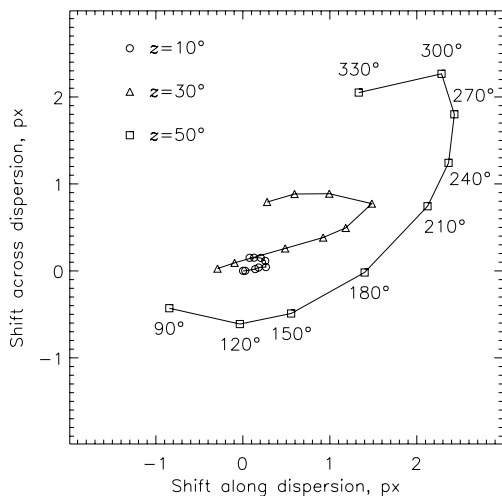


Рис. 6. Гнутия SCORPIO-2 в режиме IFU на разных зенитных расстояниях и при вращении прибора. Для смещений, измеренных на зенитном расстоянии 50° , указаны соответствующие значения угла поворотного стола.

водится к единой системе координат с точностью не хуже 0.1 px.

3. ОБРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Полный набор данных, получаемый во время наблюдений с IFU на SCORPIO-2, включает:

- кадры тока смещения («электрического нуля») (BIAS); обычно снимается в начале и конце ночи;
- спектр равномерной засветки плоского поля (FLAT); снимается непосредственно перед и после наблюдений объекта;
- эталонный спектр (ETA), полученный путем засветки лампой плоского поля маски I2dots и отражающий расположение спектров от «небесных» световодов на кадре; снимается один раз до или после съемки объекта;
- спектр сравнения He-Ne-Ag калибровочной лампы (NEON); как и FLAT, снимается перед и после наблюдений объекта;
- спектры наблюдаемого объекта (OBJ); для удаления следов космических частиц следует получать не менее трех экспозиций;
- спектры спектрофотометрического стандарта (STAR), снятые незадолго перед или после наблюдений объекта на близком зенитном расстоянии;
- спектры сумеречного неба (SUNSKY); снимаются вечером перед закатом и утром перед рассветом.

Для обработки наблюдательных данных мы используем стандартные процедуры, применяемые в 3D-спектроскопии. Можно применять любые программы для анализа данных с IFU спектрографов (например, r3D [17]). Мы отдаем предпочтение разработанному нами пакету программ IFURED, реализованному в среде IDL. Все этапы редукиции в IFURED учитывают особенности данных, получаемых с помощью блока IFU на SCORPIO-2.

На рис. 7 показаны необработанные кадры разных типов: (a) OBJ, (b) NEON, (c) ETA и (d) FLAT. В процессе проведенных тестовых наблюдений ни разу не был снят SUNSKY, поэтому мы не приводим его пример и не рассматриваем его в описании процедуры обработки данных.

Как видно из рис. 7, спектры от левой и правой щелей перекрываются примерно в центре снимка. Помимо этого, при наблюдениях с решеткой VPHG940@600 второй порядок от левой щели дает вклад в красную часть спектра, полученного от правой щели (эффект хорошо заметен на снимках ETA, рис. 7с). В связи с этим при обработке данных мы фиксируем границы спектров от правой и левой щелей на полученных кадрах, обрезая области перекрытия.

Далее в этой главе описаны основные этапы обработки с помощью пакета IFURED². На рис. 8 приведена блок-схема процедуры обработки данных IFU, представляющая последовательность выполняемых действий. В качестве примера мы рассмотрим данные, полученные с решеткой VPHG940@600 для галактики Mrk 78.

3.1. Сборка начальных 2D-спектров

На этом начальном этапе мы усредняем все имеющиеся кадры BIAS. Полученный таким образом файл MEANBIAS вычитается из всех индивидуальных экспозиций.

Далее мы производим коррекцию возможных смещений (которые могут быть вызваны гнутями внутри прибора) между различными экспозициями как внутри одного набора, так и между разными типами данных. Сперва методом кросс-корреляции определяется смещение в направлении, перпендикулярном дисперсии, между отдельными экспозициями объекта — все кадры смещаются к первой экспозиции. Далее аналогичным образом определяется смещение между спектрами плоского поля и объектом. После этого все оставшиеся кадры подстраиваются под спектры плоского поля. Для

²Так как возможны существенные изменения в алгоритме работы программы после публикации данной статьи, рекомендуем также ознакомиться с ее описанием на сайте проекта [14].

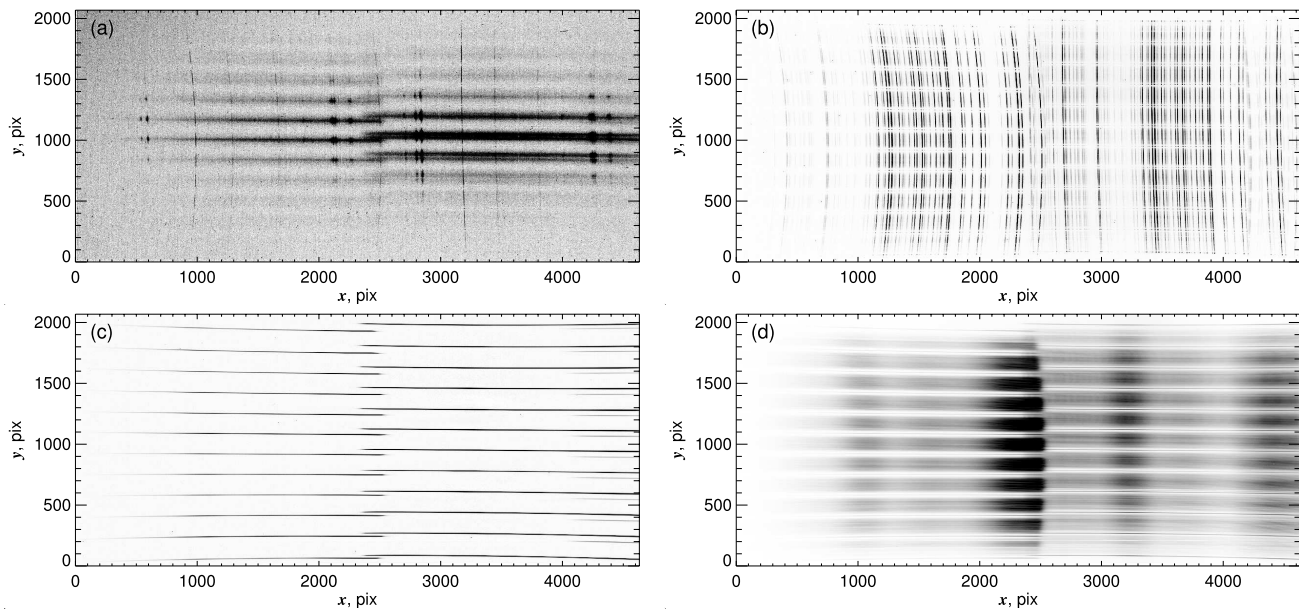


Рис. 7. Пример необработанных кадров из набора данных, полученных с решеткой VPHG940@600: (a) OBJ — спектр объекта Mrk 78; (b) NEON — калибровочный спектр He-Ne-Ag лампы; (c) ETA — эталонный спектр, снятый с маской 12dots; (d) FLAT — спектр плоского поля.

отдельных экспозиций OBJ, NEON и STAR определяются также смещения вдоль дисперсии и производится их коррекция. На практике смещения обычно не превышают 1 пикселя, но могут быть больше между кадром STAR и остальным набором данных, так как спектрофотометрический стандарт снимается при другом, хоть и близком, положении телескопа.

Отдельные экспозиции каждого типа данных складываются друг с другом попарно. При этом происходит удаление следов космических частиц. На каждом кадре из пары ищутся пиксели, сигнал в которых значимо превышает число отсчетов в том же пикселе на другом кадре. Значения интенсивностей в этих пикселях заменяются на величины из другого кадра пары.

На этом этапе происходит разделение спектров от правой и левой щелей. Создается куб данных с двумя каналами вдоль спектральной оси. Каждый из каналов содержит спектр от правой или левой щели, соответственно. В дальнейшем спектры от каждой щели обрабатываются по отдельности одинаковым образом.

3.2. Исправление геометрических искажений

Следующий этап заключается в построении геометрической модели траекторий спектров от отдельных световодов на кадре. Анализируются эталонный спектр ETA и калибровочный спектр He-Ne-Ag лампы NEON.

Сперва происходит поиск траекторий от каждого «небесного» световода на кадре ETA. Изображения от каждой щели разбиваются на несколько десятков интервалов вдоль дисперсии, и на каждом участке ищутся положения пиков распределения интенсивности в направлении перпендикулярном дисперсии. Те участки, где число найденных пиков не равно 12, отбрасываются. Координаты оставшихся точек описываются полиномом второй степени. Результирующая погрешность определения положения траекторий световодов не превышает 0.2 пикселя (см. рис. 9а).

Поиск линий на кадрах NEON происходит путем отождествления пиков на распределении интенсивности в спектре, проинтегрированном вдоль траектории центрального «небесного» световода. При этом поиск пиков может проходить как автоматически, так и при помощи кросс-корреляции с модельным спектром He-Ne-Ag лампы, построенным для каждой используемой решетки. Далее производится итеративный поиск центров линий в спектрах, полученных путем интегрирования вдоль остальных «небесных» световодов — координаты, определенные по предыдущему спектру, используются в качестве начального приближения. Найденные таким образом координаты каждой линии аппроксимируются полиномом второй степени.

В качестве узлов сетки геометрической модели 2D-спектров (сиреневые точки на рис. 9b) используются точки пересечения отождествленных траекторий «небесных» световодов (красные линии на рис. 9b) и линий He-Ne-Ag лампы (оранжевые линии на рис. 9b). Также к ним добавляется еще ряд

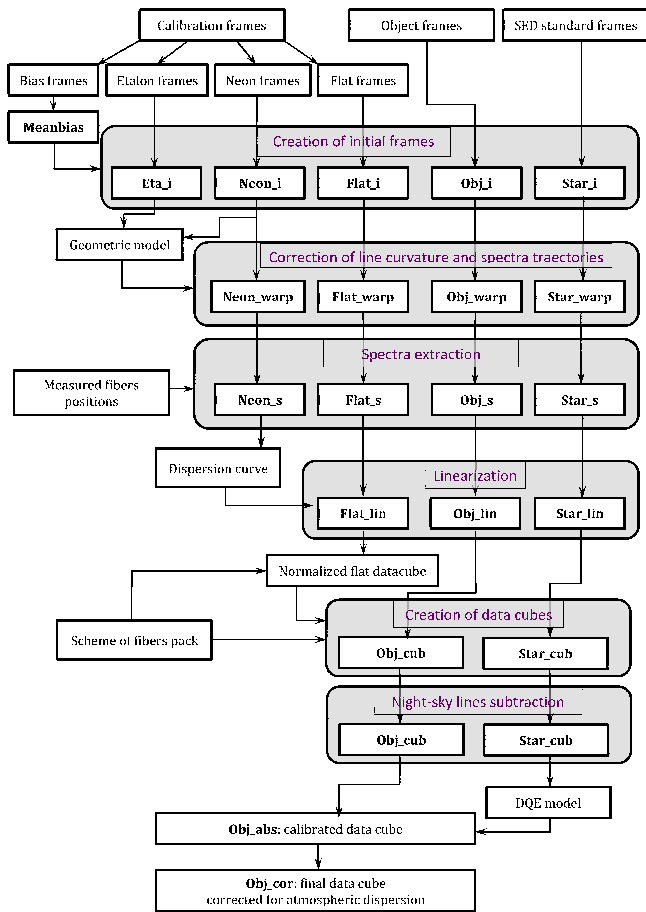


Рис. 8. Блок-схема процедуры обработки данных с помощью пакета IFURED. Жирным шрифтом показаны имена файлов, создающихся на каждом этапе обработки.

граничных точек с каждой стороны кадра, полученных путем экстраполяции построенной сетки за пределы спектра. Далее коррекция геометрических искажений происходит с помощью WARP_TRI — стандартной процедуры в IDL. Результат коррекции показан на рис. 9с для NEON.

3.3. Экстракция спектров

На полученных кадрах поток от каждого волоконного световода попадает не в один единственный пиксель вдоль щели, а рассеивается на несколько соседних. Цель процедуры экстракции спектров — получить интегральный спектр от каждого световода.

Для выполнения данного этапа мы используем файл, содержащий лабораторные измерения положений всех световодов вдоль каждой щели. Зная координаты на кадре ETA отождествленных на предыдущем этапе «небесных» световодов, методом интерполяции мы вычисляем координаты центров траекторий от всех световодов на кадре FLAT.

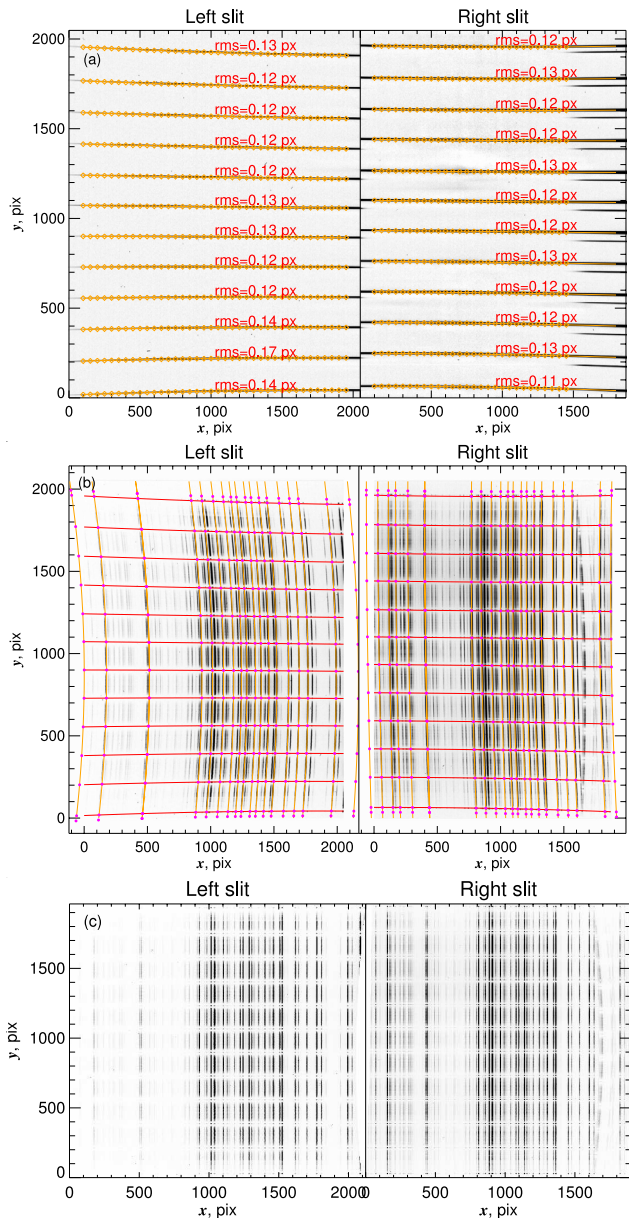


Рис. 9. Иллюстрация процедуры исправления геометрических искажений. Справа и слева приведены результаты для правой и левой щелей, соответственно. (a) — отождествление траекторий «небесных» световодов на спектре ETA; указана точность процедуры для каждого световода. (b) — спектр NEON, отождествленные линии (оранжевый) и траектории «небесных» световодов (красный), точки их пересечения (сиреневый). Сделана экстраполяция за пределы наблюдаемого спектра. (c) — NEON после коррекции геометрических искажений.

Экстракция спектров в IFURED может проводиться двумя способами. Простая экстракция заключается в интегрировании потока в прямоугольной апертуре вокруг найденных центров траекторий световодов на 2D-спектре. При этом полуширина апертуры берется равной половине расстояния

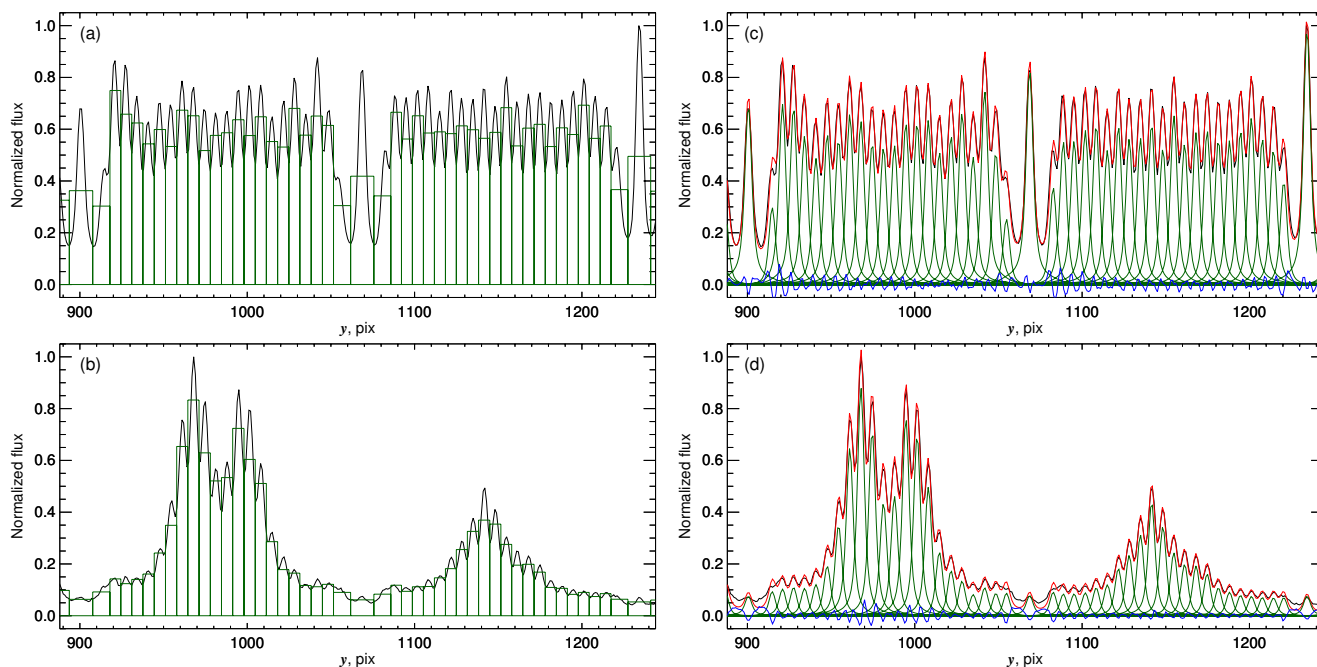


Рис. 10. Распределение нормированной интенсивности поперек дисперсии в спектрах FLAT (а, с) и ОВJ (b, d) от правой щели. Ширина и площадь прямоугольников на панелях (а, b) соответствуют размеру области интегрирования и потоку от каждого световода при простой экстракции спектров. На панелях (с, d) зеленым цветом показаны модели распределения интенсивности от каждого световода, красным — интегральный модельный спектр, а синим — разница между наблюдаемым и экстрагированным распределением интенсивностей при оптимальной экстракции.

между соседними пиками. На рис. 10a,b показан пример использования такого метода на спектрах FLAT и ОВJ. Площадь прямоугольников на нем соответствует интегральному потоку в апертуре.

Недостаток метода простой экстракции заключается в том, что он не учитывает рассеяние света от каждого световода: функции рассеяния точки (PSF) отдельных световодов перекрываются. Часть рассеянного света вносится за счет рассеяния в оптике прибора. В отличие от MPFS, где рассеяние из-за использования зеркально-линзовой камеры достигает 10–15%, в SCORPIO-2 рассеяние света в приборе не превышает 2%, что достигается за счет нанесения AR-покрытий на оптические поверхности и использования объемных фазовых голографических решеток. Для учета эффекта рассеяния мы используем метод оптимальной экстракции. Для этого в начале строится модель распределения потока от световодов вдоль щели. Функция рассеяния на выходе световода хорошо описывается функцией Фойгта, которая имеет протяженные и малококонтрастные крылья в контуре. Ширина PSF каждого световода определяется путем подгонки распределения интенсивности вдоль щели на кадрах FLAT. Для учета вариации ширины PSF подобная процедура применяется для нескольких десятков срезов вдоль щели на разных длинах волн. Полученные значения ширины PSF каждого световода интерполируются на весь

спектральный диапазон и фиксируются для всех типов данных. Итоговая экстракция спектров для всех типов данных происходит путем вписывания 254 профилей Фойгта с фиксированным положением центра и ширины в распределение интенсивности вдоль щели для каждого пикселя вдоль дисперсии — свободными параметрами являются только интенсивности каждого профиля. Иллюстрация применения процедуры оптимальной экстракции к данным FLAT и ОВJ показана на рис. 10c,d.

3.4. Линеаризация

Для привязки полученных данных к шкале длин волн (линеаризации спектра) используются калибровочный спектр He-Ne-Ag лампы (NEON). Положения линий на кадре NEON определяются методом кросс-корреляции с модельным эмиссионным спектром, заранее построенным для каждой используемой решетки. Положения отождествленных линий используются для построения дисперсионной кривой — зависимости длины волны спектра от координаты на кадре. При этом IFURED позволяет задать степень полинома кривой как вдоль оси дисперсии, так и вдоль щели для коррекции возможных остаточных геометрических искажений. Построенная дисперсионная кривая используемая для линеаризации всего набора данных.

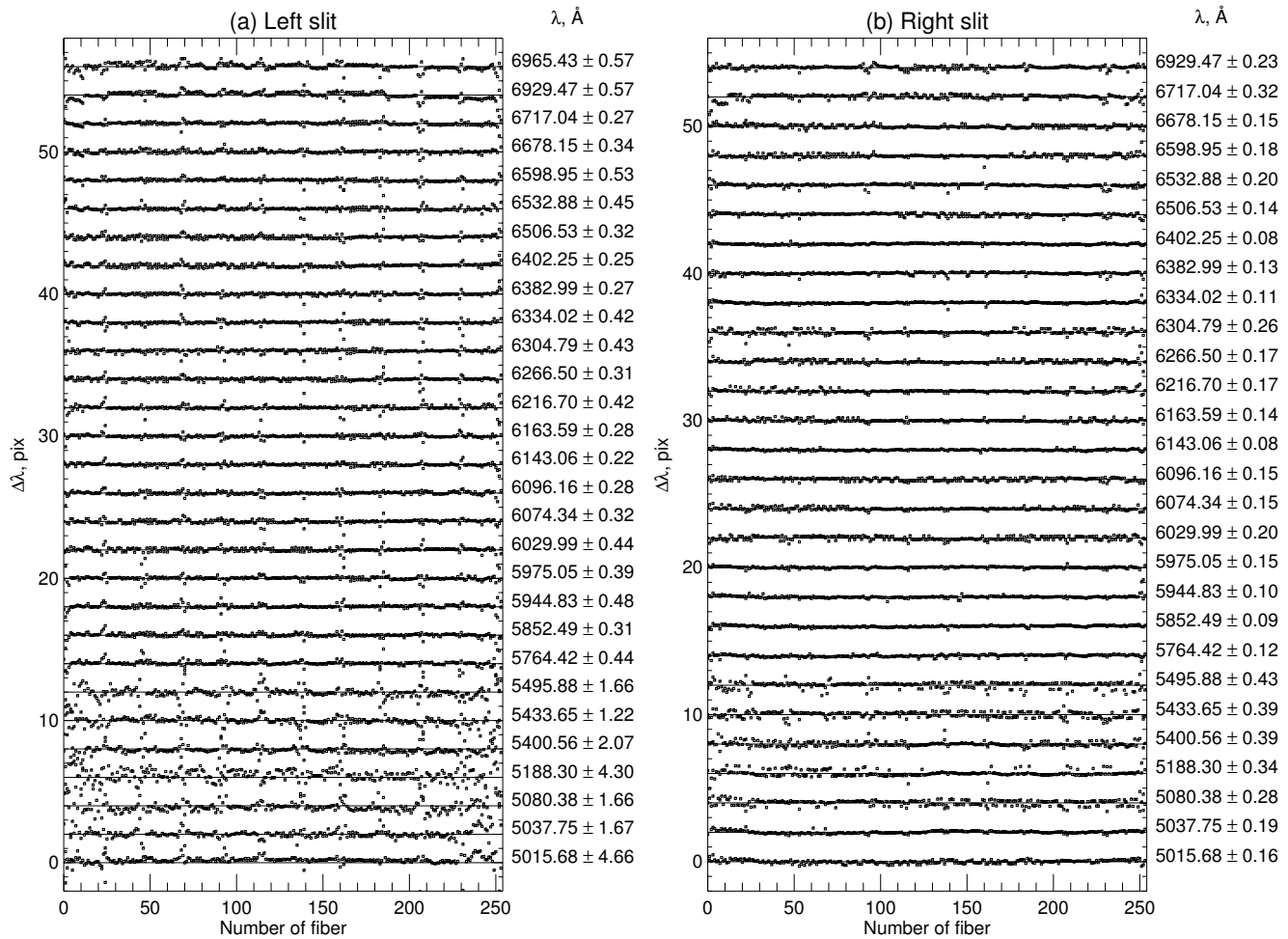


Рис. 11. Распределение отклонения положений отождествленных линий He-Ne-Ar лампы от лабораторных длин волн после процедуры линейризации вдоль (а) левой и (б) правой щелей.

На рис. 11 показаны отклонения положений отождествленных линий He-Ne-Ar лампы от лабораторных длин волн после процедуры линейризации с использованием дисперсионной кривой в виде полинома 3-й степени вдоль дисперсии и 2-й степени вдоль щели. Отметим, что большой разброс в синей части спектра левой щели связан с низким отношением сигнал-шум для линий в этой части спектра из-за короткой экспозиции кадра NEON в используемом для демонстрации наборе данных.

3.5. Нормировка на плоское поле и создание кубов данных

Необходимым этапом обработки данных является коррекция наблюдаемых спектров за неравномерность пропускания для каждого спектра, которая обусловлена оптическим виньетированием по полю зрения матрицы и вариацией пропускания световодов. По умолчанию в IFURED для этой цели используется кадр «плоского поля»

FLAT, представляющий собой спектр лампы плоского поля (кварцевой или светодиодной), который снимается при помощи системы калибровки SCORPIO-2 [18]. Неравномерность пропускания исправляется после сборки кубов данных.

Куб данных представляет собой трехмерный массив, в котором две координаты являются пространственными, а третья — спектральной. Их сборка происходит в соответствии с заданной схемой упаковки световодов в блоке IFU. При этом линейризованные спектры от левой и правой щелей формируют верхнюю и нижнюю половины куба данных, размером 22 × 24 пикселя. Верхний и нижний ряды образуют спектры ночного неба (NS). Так как число световодов для формирования этих рядов меньше, чем число пикселей, то для равномерного их заполнения спектры от NS выводятся в каждый второй пиксель в ряду, а распределение интенсивностей в остальных пикселях заменяется усредненными спектрами соседей.

Далее формируется сглаженный по длине волны

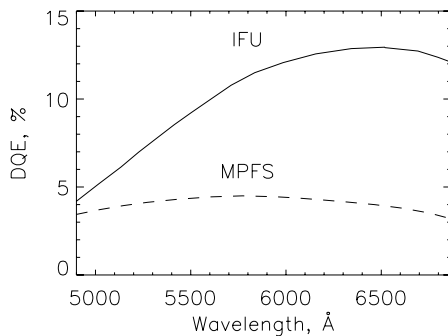


Рис. 12. Измеренная квантовая эффективность IFU SCORPIO-2 с решеткой VPHG940@600. Для сравнения штриховой линией показана квантовая эффективность спектрографа MPFS с отражательной дифракционной решеткой с числом штрихов 600 мм^{-1} .

куб данных FLAT. Поскольку спектр FLAT не плоский, необходима нормировка FLAT на спектральное распределение яркости плоского поля. Его мы определяем как среднее по всем спектрам в кубе. После этого каждый сглаженный спектр в кубе FLAT нормируется на спектральное распределение яркости плоского поля. Все остальные кубы данных корректируются за неоднородность засветки путем деления на полученный таким образом нормированный 3D-спектр плоского поля.

В тех случаях, когда нами получены спектры сумеречного неба SUNSKY, мы можем по ним определить насколько хорошо произведено исправление неоднородностей в кубах данных при помощи нормированного FLAT — возможные ошибки связаны с нарушением условия телецентризма в тракте калибровки. В этом случае по исправленному кубу SUNSKY формируется вторичное нормированное плоское поле (согласно алгоритму, описанному выше), на которое делятся кубы OBJ и STAR.

3.6. Вычитание линий ночного неба

Для вычитания спектра ночного неба из кадров OBJ и STAR используются спектры от «небесных» световодов, соответствующие пустым площадкам в стороне от наблюдаемого объекта. В собранных кубах данных они формируют верхний и нижний ряды для левой и правой щелей, соответственно. Для каждой колонки в кубе данных используется спектр от «небесного» световода из той же колонки; для верхней и нижней половин используется соответственно верхний и нижний ряд.

3.7. Калибровка потока, коррекция атмосферной экстинкции и дисперсии

Привязка потоков к энергетическим величинам производится стандартным образом — наблюдаемый интегральный спектр STAR одного из

спектрофотометрических стандартов (например, из списка [19]) сравнивается с известным для него спектральным распределением энергии. Используя измеренные коэффициенты атмосферной экстинкции для CAO [20, 21], можно рассчитать величину поглощения на зенитном расстоянии, соответствующем наблюдаемому стандарту. После этого легко непосредственно оценить ожидаемое число фотонов от спектрофотометрического стандарта, попадающих на зеркало телескопа, и сравнить с наблюдаемым значением на разных значениях длины волны. Полученная в результате кривая квантовой эффективности (DQE) (см. рис. 12) используется для учета спектральной чувствительности прибора. После этого потоки в наблюдаемом кубе данных OBJ умножаются на вычисленный по кубу STAR коэффициент перехода от отсчетов к энергетическим единицам, а также на нормировочный коэффициент, учитывающий разницу между зенитными расстояниями объекта и спектрофотометрического стандарта и времени их экспозиции. Как видно из рисунка, в режиме IFU с решеткой VPHG940@600 на 6000 Å DQE $\sim 13\%$. Для этой же решетки наши измерения в режиме длиной щели дают оценку DQE $\sim 42\%$ [13]. Результат сравнения режима LS и IFU показывает, что в последнем эффективность прибора падает приблизительно в 3 раза. Это согласуется с нашими оценками в разделе 2.2, где делается вывод о падении эффективности в 2.5 раза. Для сравнения на этом же рисунке пунктирной линией показана кривая DQE спектрографа MPFS, полученная с решеткой 600 штр. мм^{-1} . Отметим, что использовались данные, полученные со сходной дисперсией: 1.2 Å мм^{-1} для IFU и 1.42 Å мм^{-1} для MPFS. Максимальное значение DQE у MPFS около 4.5%, что почти в три раза меньше полученной нами эффективности в режиме IFU. Эффективность режима IFU при работе с более высокой дисперсией (VPHG с модуляцией 1800 и 2300 мм^{-1}) падает до величины около 6%.

Последним этапом обработки данных является коррекция за атмосферную дисперсию. Для этого строится зависимость положения барицентра объекта OBJ в поле зрения от длины волны, используемая для коррекции файла OBJ. При этом смещения во всем диапазоне спектра не превышают пикселя для зенитных расстояний меньше 50° .

3.8. Анализ обработанных данных

Помимо описанных процедур обработки, пакет IFURED содержит средства для визуализации данных и их базового анализа. На рис. 13 приведено изображение галактики Mrg 78 в континууме, полученное из собранного куба данных,

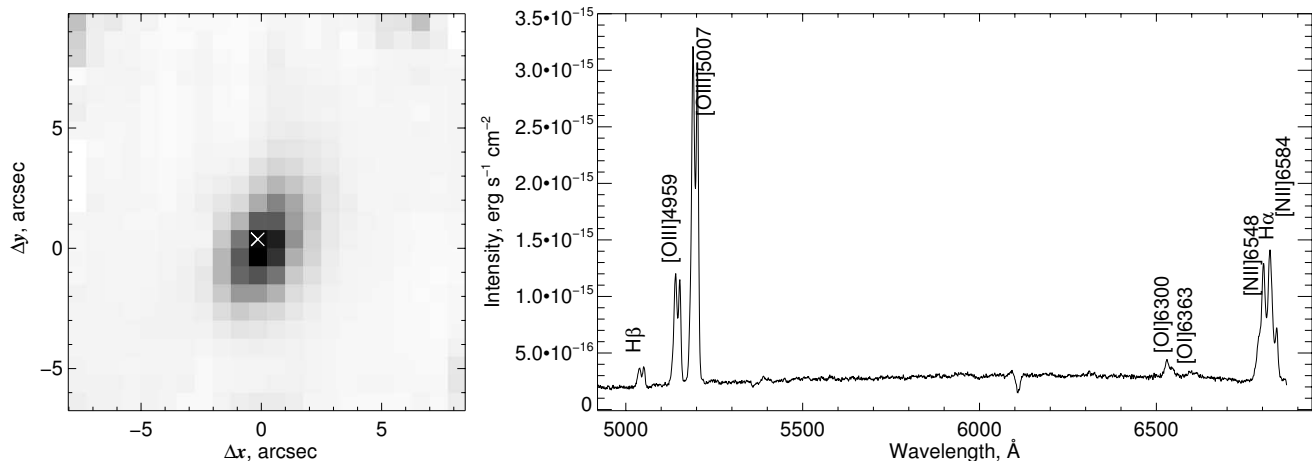


Рис. 13. Интегральное изображение Mrk 78 в континууме. Справа в качестве примера показан спектр, соответствующий отмеченному красным крестиком пикселю, а также идентификация наблюдаемых ярких эмиссионных линий.

а также пример спектра, соответствующего пикселю вблизи центра галактики. Как видно из рисунка, использование решетки VPHG940@600 с IFU позволяет исследовать эмиссионные линии в спектральном диапазоне от $H\beta$ до $[NII]6584 \text{ \AA}$ (а в случае более близких объектов — до $[SII]6731 \text{ \AA}$).

В качестве примера использования IFURED для базового анализа данных на рис. 14 показаны карты потоков и лучевых скоростей галактики Mrk 78 в линиях $H\alpha$, $[NII]6584 \text{ \AA}$ и $[OIII]5007 \text{ \AA}$ и $H\beta$. Эти изображения получены путем аппроксимации каждой эмиссионной линии однокомпонентным профилем Гаусса и подстилающим полиномом 2-й степени с использованием процедуры MPFIT [22], который описывает континуум. Дубликаты линий ($[OIII]4959/5007$ и $[NII]6548/6584$) при этом аппроксимируются двумя компонентами с фиксированным расстоянием между ними и одинаковой полушириной. Изофоты на рисунке показывают распределение яркости в континууме.

На приведенных картах во всех эмиссионных линиях видны две яркие области в Mrk 78, в то время как в континууме галактика проявляется в основном между этими областями. Поле скоростей в линии $H\alpha$ показывает регулярное вращение, а искажение его в запрещенной линии $[OIII]$ указывает на наличие некруговых движений.

Заметим, однако, что в случае Mrk 78 аппроксимация профилей линий однокомпонентной гауссианой дает лишь грубое представление о кинематике и морфологии газа в галактике. Предшествующие наблюдения Mrk 78 выявили сложную кинематику ионизованного газа, выражающуюся в наблюдаемых многокомпонентных профилях эмиссионных линий [23]. Раздвоение профилей линий также отчетливо видно и на нашем рис. 13. Подробный

анализ кинематики и механизмов ионизации газа в галактике Mrk 78 требует отдельной статьи.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В многорежимном спектрографе SCORPIO-2, разрабатываемом для 6-м телескопа, реализован узел IFU с линзовым растром, предназначенный для панорамной спектроскопии. Отметим основные моменты:

1. Принцип работы IFU — квадратный растр микролинз с увеличивающей в $23\times$ масштаб изображения телескопа оптикой.
2. Линзовый растр содержит 22×22 квадратных микролинз размером 2 мм, масштаб изображения равен $0''.75/\text{линзу}$, поле зрения $16''.5 \times 16''.5$.
3. Изображения микрозрачков при помощи оптических волокон реформируются в две псевдощели, расположенные на входе коллиматора IFU. Каждая щель содержит 254 волокна (242 от объекта + 12 от фона неба). На выходе спектрографа формируются два массива по 254 спектра каждый.
4. Набор объемных фазовых голографических решеток VPHG обеспечивает в режиме IFU спектральный диапазон $4600\text{--}7300 \text{ \AA}$ и разрешение $\lambda/\delta\lambda$ от 1040 до 2800.
5. Квантовая эффективность режима IFU составляет $6\text{--}13\%$ в зависимости от применяемой решетки, что при прочих равных условиях превышает эффективность спектрографа MPFS приблизительно в три раза.
6. Разработан пакет программ IFURED для первичной редукации данных.

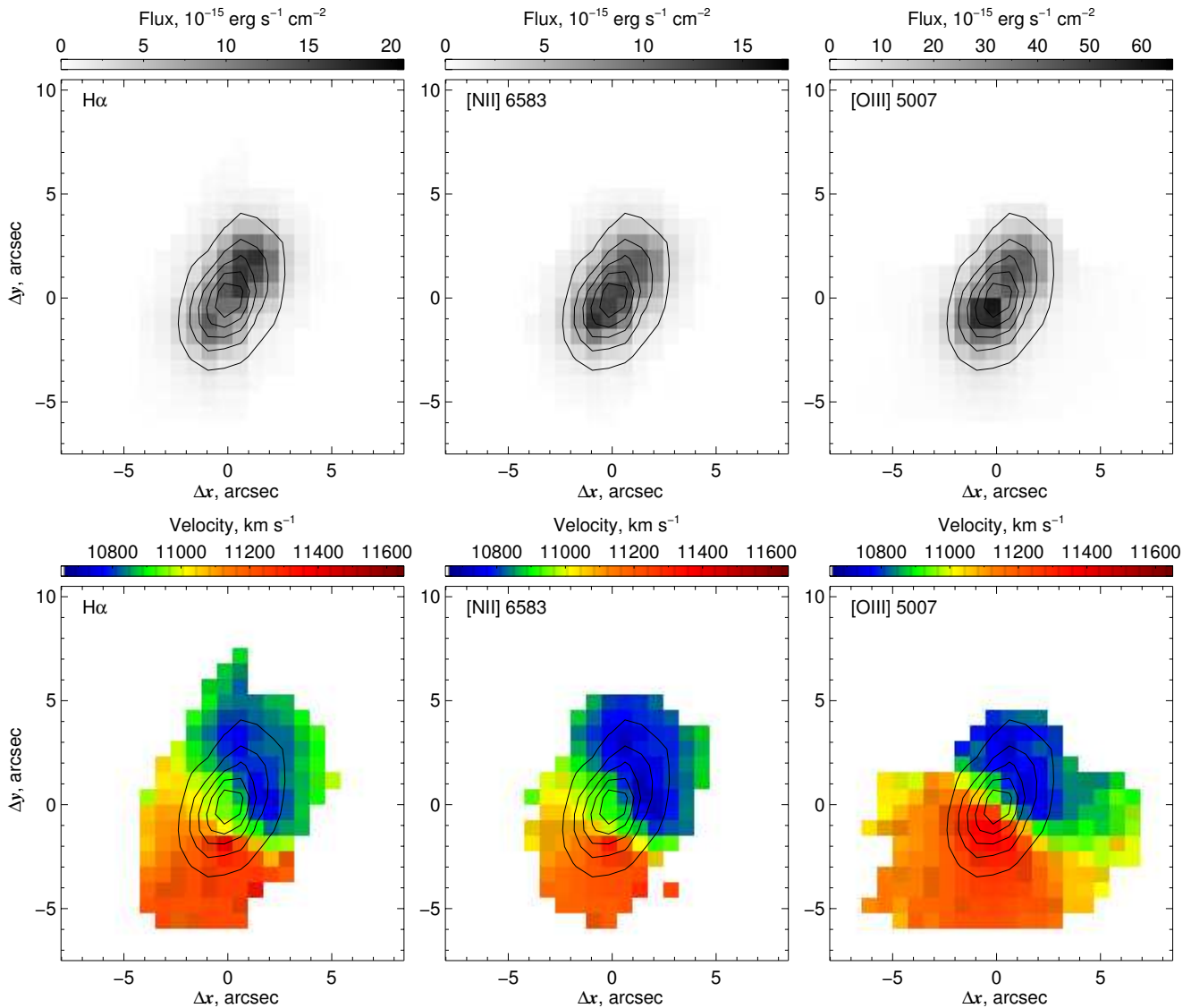


Рис. 14. Результат аппроксимации линий $H\alpha$, [NII]6584 Å и [OIII]5007 Å (слева направо) однокомпонентной гауссианой и континуумом. Сверху вниз: распределение потока в линии и поля лучевых скоростей. Изофоты показывают распределение яркости в континууме.

Режим IFU в спектрографе SCORPIO-2 предназначен для панорамной спектроскопии центральных частей галактик в области линий $H\beta$ и $H\alpha$, для диагностики состояния ионизации газа и изучения его кинематики. Также планируется исследование звездной составляющей центральных частей галактик в линиях поглощения — химсостав, дисперсия и поле скоростей звезд. Мы рассматриваем этот режим как дополнение к фотометрии, спектроскопии с длинной щелью и панорамной спектроскопии с интерферометром Фабри-Перо при наблюдениях протяженных объектов со SCORPIO-2.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Р. И. Уклеина за измерение гнутый на БТА и администрацию САО РАН за выделение наблюдательного времени для технических испытаний. Работа поддержана грантом РФФ, проект 17-12-01335.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Courtes, Astrophysics and Space Science Library **92**, 123 (1982).
2. C. Vanderriest, G. Courtès, and J. Donas, Journal of Optics **15**, 237 (1984).
3. R. Bacon, G. Adam, A. Baranne, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **113**, 347 (1995).

4. S. Arribas, P. M. Gray, R. Terlevich, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **171**, 293 (1990).
5. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, V. V. Vlasyuk, and O. K. Silchenko, Preprint /No/ 54, (Spec. Astrophys. Obs. of RAS, Nizhnij Arkhyz, 1990).
6. G. J. Murray, J. R. Allington-Smith, R. Content, et al., *Proc. of the SPIE* **4841**, 1750 (2003).
7. F. Laurent, F. Henault, E. Renault, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 1564 (2006).
8. R. Bacon, Y. Copin, G. Monnet, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **326**, 23 (2001).
9. M. M. Roth, A. Kelz, T. Fechner, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **117**, 620 (2005).
10. V. L. Afanasiev, V. V. Vlasyuk, S. N. Dodonov, and S. V. Drabek, *Multipupil Spectrograph MPFS. User's Manual* (1995), https://serv.sao.ru/hq/lfsvo/devices/mpfs/MPFS_V1/MPFS_V1.html.
11. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and A. V. Moiseev, in *Stellar Dynamics: from Classic to Modern*, Edited by L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov (2001), p. 103.
12. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
13. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
14. <http://www.sao.ru/hq/lfsvo/devices/scorpio-2/index.html>.
15. S. C. Barden, J. A. Arns, W. S. Colburn, and J. B. Williams, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112**, 809 (2000).
16. H. Kogelnik, *The Bell System Technical Journal*, **48**, 2909 (1969).
17. C. Sandin, T. Becker, M. M. Roth, et al., *Astron. and Astrophys.* **515**, A35 (2010).
18. V. L. Afanasiev, V. R. Amirkhanyan, A. V. Moiseev, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 458 (2017).
19. J. B. Oke, *Astron. J.* **99**, 1621 (1990).
20. S. I. Neizvestny, *Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **17**, 26 (1983).
21. T. A. Kartasheva and N. M. Chunakova, *Astrofizicheskie Issledovaniia Izvestiya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii* **10**, 44 (1978).
22. C. B. Markwardt, *ASP Conf. Ser.* **411**, 251 (2009).
23. M. Whittle and A. S. Wilson, *Astron. J.* **127**, 606 (2004).

IFU Unit in Scorpio-2 Focal Reducer for Integral-Field Spectroscopy on the 6-m Telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences

V. L. Afanasiev, O. V. Egorov, and A. E. Perepelitsyn

We describe the scheme and design features of the new IFU unit (Integral Field Unit) meant to perform integral-field spectroscopy as a part of SCORPIO-2 focal reducer, which is mounted in the prime focus of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. The design of the unit is based on the principle of the formation of array spectra using a lens raster combined with optical fibers. The unit uses a rectangular raster consisting of 22×22 square 2-mm diameter lenses. The image of the object is transferred by an optical system with a $23\times$ magnification from the focal plane of the telescope to the plane of the lens raster. The image scale is $-0''.75/\text{lens}$ and the field of view of the instrument has the size of $16''.5 \times 16''.5^2$. The raster also contains two extra 2×7 lens arrays to acquire the night-sky spectra whose images are offset by $\pm 3'$ from the center. Optical fibers are used to transform micropupil images into two pseudoslits located at the IFU collimator entrance. When operating in the IFU mode a set of volume phase holographic gratings (VPHG) provides a spectral range of 4600–7300 Å and a resolution $\lambda/\delta\lambda$ of 1040 to 2800. The quantum efficiency of SCORPIO-2 field spectroscopy is 6–13% depending on the grating employed. We describe the technique of data acquisition and reduction using IFU unit and report the results of test observations of the Seyfert galaxy Mrk 78 performed on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: *instruments: spectrograph — techniques: data analysis — techniques: spectroscopic — techniques: image spectroscopy*