

УДК 524.3-14:520.84; 004.42

## СПЕКТРА: ОПТИМАЛЬНАЯ ЭКСТРАКЦИЯ ДЛИННОЩЕЛЕВЫХ СПЕКТРОВ В ТЕСНЫХ ПОЛЯХ

© 2017 А. Н. Саркисян<sup>1\*</sup>, А. С. Винокуров<sup>1</sup>, Ю. Н. Соловьева<sup>1</sup>,  
О. Н. Шолухова<sup>1</sup>, А. Е. Костенков<sup>1,2</sup>, С. Н. Фабрика<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

<sup>3</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 15 июня 2017 года; принята в печать 22 августа 2017 года

Мы представляем пакет программ для оптимальной экстракции длиннощелевых 2D-спектров в тесных звездных полях. Основным его преимуществом и отличием от существующих программ для экстракции спектров является наличие графического интерфейса и удобной системы визуализации данных и параметров экстракции. В основном пакет предназначен для исследования звезд близких галактик, находящихся в скученных полях, и скоплений звезд в галактиках. Кроме экстракции спектров нескольких звезд, которые тесно расположены или накладываются друг на друга, он позволяет экстрагировать спектры объектов с вычитанием налагающихся туманностей разной формы и разной степени ионизации. Этот же пакет может быть использован для изучения одиночных звезд при наличии сильного фона. В текущей версии предлагается оптимальная экстракция 2D-спектров апертурой и с использованием функции Гаусса в качестве PSF (point spread function). В дальнейшем пакет будет дополнен возможностью построения PSF на основе функции Моффата. Представлены детали графического интерфейса, проиллюстрированы основные возможности пакета и приведены результаты выполненной с его помощью экстракции спектров нескольких интересных объектов, полученных на разных телескопах.

Ключевые слова: *методы: анализ данных — техники: обработка изображений*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопия — один из ключевых методов изучения астрофизических объектов. Однако во многих случаях редукция спектральных данных является непростой задачей. Представляющие для нас особый интерес объекты, такие как LBV-звезды, B[e]-сверхгиганты и WR-звезды в близких галактиках [1–4], как правило, находятся в скученных полях. В наблюдениях на щели спектрографа может оказаться несколько звезд на расстоянии нескольких угловых секунд одна от другой, а величины исследуемых объектов чаще всего не превосходят  $18^m$ . В тесных звездных полях, особенно в галактиках с повышенным звездообразованием, почти всегда имеются H II-области. Звезды часто окружены туманностями и наблюдаются на фоне галактики, при этом фон может составлять около 20 зв. величины на квадратную секунду дуги. Важно, что ранняя массивная звезда и сама может сформировать туманность. LBV-звезды, WR-звезды, OB-звезды

в молодых звездных скоплениях, рентгеновские источники, ультраяркие рентгеновские источники (Ultraluminous X-ray sources, ULXs) почти всегда формируют окружающие туманности. Такие туманности могут иметь асимметричную форму или, в зависимости от степени ионизации окружающего газа, линии (например, линии водорода, O[III]  $\lambda\lambda 4959, 5007$ , He II  $\lambda 4685$ , многочисленные линии He I, N[II]  $\lambda\lambda 6548, 6583$ , S[II]  $\lambda\lambda 6716, 6730$ ) могут быть разной интенсивности в разных направлениях. Для наиболее полного и достоверного анализа наблюдательных данных во всех этих случаях необходима соответствующая процедура редукции.

Методика оптимальной экстракции спектров одиночных объектов, которая обеспечивает максимальное отношение  $S/N$ , была предложена К. Ногге в 1986 г. [5]. В основе методики лежит идея использования вместо простого суммирования сигнала при апертурной экстракции взвешенное суммирование с учетом доли полезного (принадлежащего объекту) сигнала. Это можно сделать, зная пространственный профиль объекта. При этом, как показано в упомянутой

\*E-mail: ars@sao.ru

статье, процедура взвешенного суммирования с учетом профиля эквивалентна его вписыванию в 2D-спектр. Вариации методики [5] в основном состоят в способе определения пространственного профиля объекта. Существуют два основных подхода: определение профиля по пространственным разрезам самого спектра либо использование аналитического профиля. Первый способ хорош тем, что позволяет получать профиль, не делая априорных предположений о его форме. Однако, очевидно, он не применим в случае наложения сигналов объектов в тесных группах.

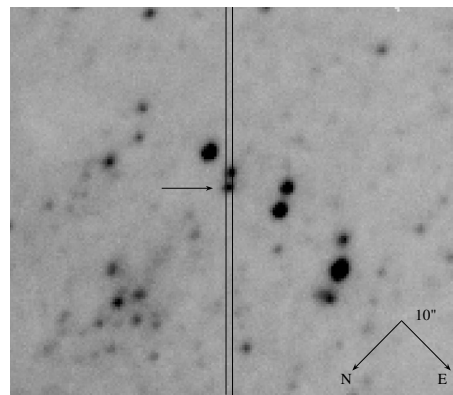
Экстракция спектров была также описана в статье Buie и Grundy [6], где предполагалась экстракция спектров одиночных звезд по данным телескопа им. Хаббла (HST). Однако этот метод не пригоден для редукции наземных наблюдений, при которых размер изображений звезд может заметно меняться. Проблема экстракции спектров в тесных звездных полях была рассмотрена Nupes [7]. В основе цитируемой статьи лежит предложенная Нопе [5] идея оптимальной экстракции спектра одиночной звезды, расширенная для случая налагающихся объектов.

Мы разработали программу с графическим интерфейсом, в которой могут быть осуществлены все основные процедуры экстракции спектров в длинноволновой спектроскопии, в том числе в случае тесных звездных полей. Наш код применим для любых линий окружающих туманностей.

Описание пакета программ SPEXTRA и его основных возможностей дано в разделе 2, где также детально рассмотрены все ключевые параметры и этапы экстракции спектров. В разделе 3 представлены результаты использования пакета для нескольких объектов разной природы. Области его применения и перспективы обсуждаются в Заключение.

## 2. ОПИСАНИЕ SPEXTRA

Программный пакет с графическим интерфейсом SPEXTRA (SPectrum EXTRAction) написан на языке IDL и позволяет проводить экстракцию одномерных спектров из 2D-спектров в тесных звездных полях. Предполагается, что исходные спектры прошли первичную обработку: вычитание электронной подложки (bias), исправление плоского поля (flat field), удаление следов космических частиц, исправление дисторсии (по крайней мере вдоль пространственной координаты). При этом линейаризация или калибровка по потоку не обязательны. Программа разрабатывалась для экстракции налагающихся спектров точечных объектов. Тем не менее она может быть применена и для



**Рис. 1.** Изображение объекта FSZ 301 в фильтре V с указанием положения щели ( $1''$ ) при получении его спектра. Объект указан стрелкой.

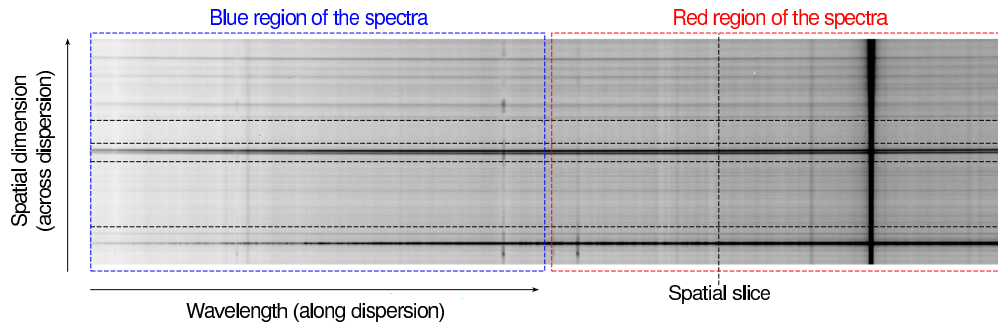
обработки результатов наблюдений других источников, пространственный профиль которых хорошо аппроксимируется функцией Гаусса, например, для звездных скоплений и ассоциаций, которые не разрешаются на отдельные звезды на исходном изображении.

Основные возможности программы:

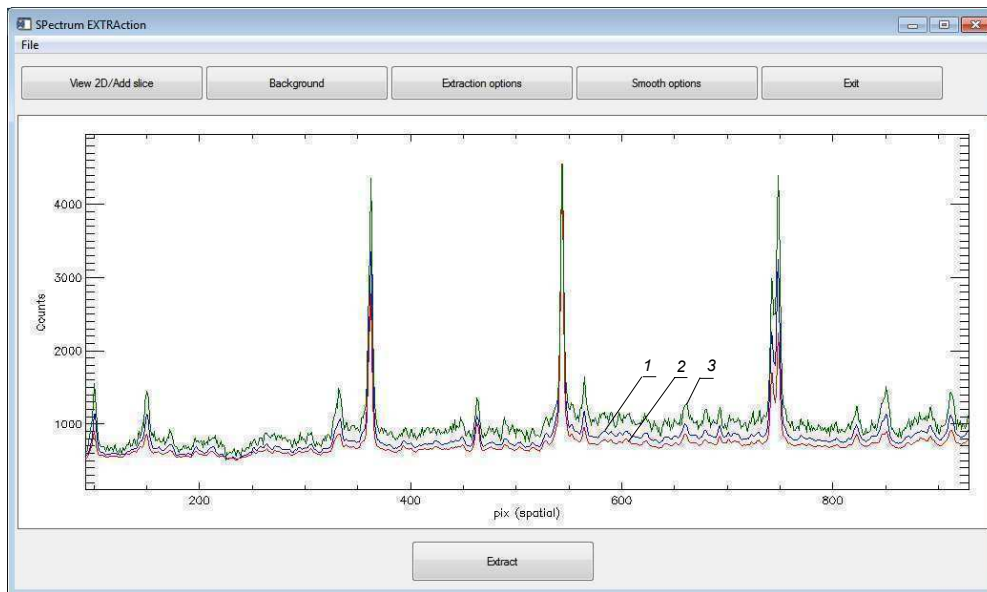
- экстракция апертурой;
- оптимальная экстракция с помощью функции Гаусса;
- экстракция спектров двух и более объектов, в том числе накладываются друг на друга;
- визуализация данных и параметров экстракции;
- контроль корректности результатов экстракции;
- одновременная экстракция с различными параметрами вычитания фона для учета вклада туманностей;
- сглаживание (скользящим средним) спектра перед экстракцией.

Особо отметим, что помимо расширенного функционала, основным преимуществом и отличием от существующих программ для экстракции спектров, таких как longslit/MIDAS [8] и doslit/IRAF [9], является наличие у нашей программы интуитивно понятного графического интерфейса и удобной системы визуализации данных и параметров экстракции.

Для описания программы и более детального представления ее возможностей рассмотрим ее использование на примере экстракции спектра LBV-кандидата FSZ 301 в галактике M 33 [10]. Наблюдения были проведены на телескопе БТА САО РАН 29 октября 2011 г. при качестве изображений около  $1''5$ . Использовался редуктор светосилы SCORPIO [11] с гризмой 1200G (спек-



**Рис. 2.** 2D-спектр объекта FSZ 301. Вертикальной стрелкой показана пространственная координата (поперек дисперсии). Горизонтальной стрелкой показана координата длин волн (вдоль дисперсии). Левым и правым пунктирными прямоугольниками показана синяя и красная области спектра, которые используются для построения усредненных пространственных разрезов спектра в программе (см. Подраздел 2.2 и рис. 3). Вертикальной пунктирной линией показано произвольное положение пространственного разреза спектра. Горизонтальными пунктирными линиями показана область спектра, используемая для аппроксимации фона (см. Подраздел 2.3).



**Рис. 3.** Основное окно программы. В графическом окне отображены: линиями 1 и 2 (на мониторе синяя и красная) — два усредненных пространственных разреза спектра для синей и красной области соответственно, линией 3 (на мониторе зеленая) — пространственный разрез шириной 1 пиксель (один столбец вдоль дисперсии).

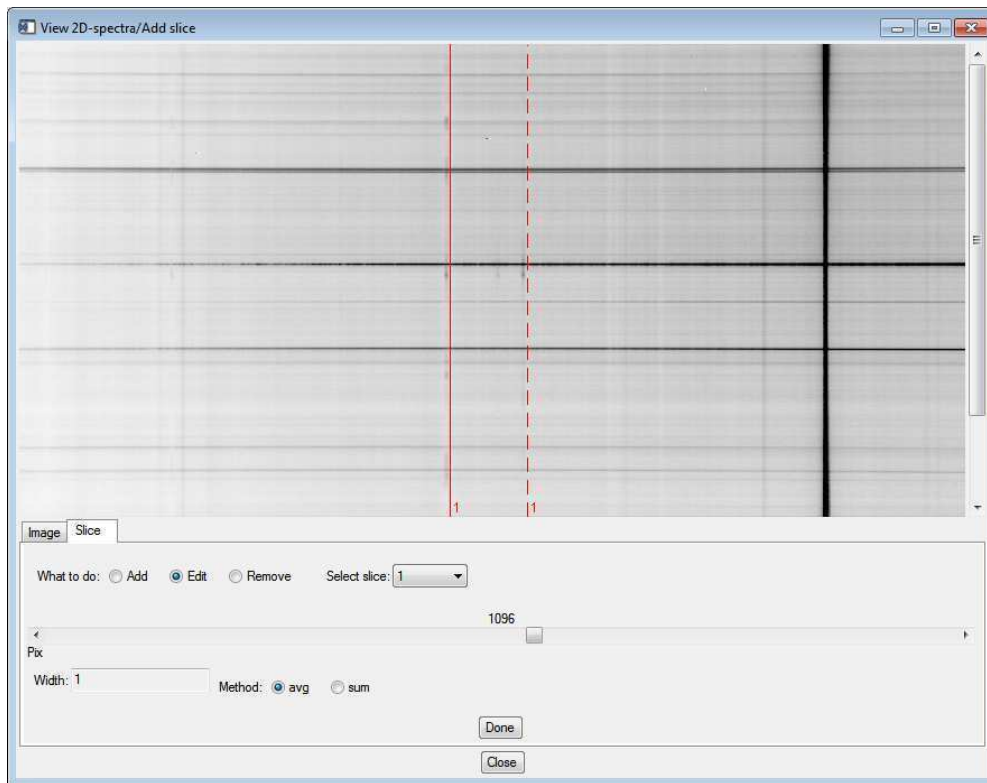
тральный диапазон 4000–5700 Å) и щелью 1'' (спектральное разрешение около 5 Å). На рис. 1 представлено изображение объекта в фильтре V с указанием положения щели, а на рис. 2 — 2D-спектр (размер кадра 2040 × 1020, пространственный масштаб изображения 0''357/пиксель). Последний кадр является суммой двух экспозиций по 1200 секунд с вычтенной подложкой (bias) и удаленными следами космических частиц. Также произведены деление на плоское поле, исправление дисторсии вдоль пространственной координаты и линейаризация спектра.

Как видно на рис. 1, вблизи FSZ 301 расположен еще один объект, который также попал

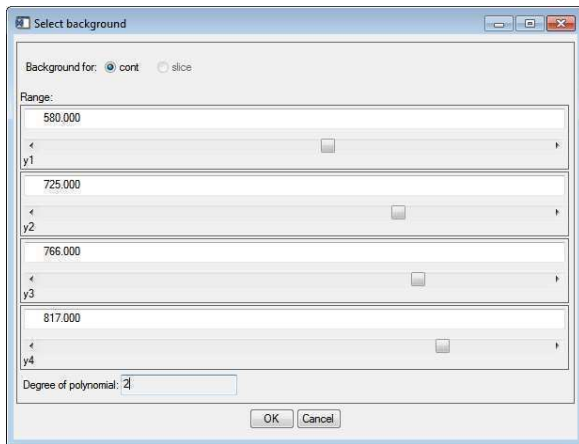
на щель в ходе наблюдений, и спектр которого пространственно налагается на спектр FSZ 301 (см. рис. 2). В дальнейшем в этом разделе для обозначения объектов и соответствующих им частей рисунков, линий и пр. будут использоваться цифры: «1» — для объекта FSZ 301 и «2» — для налагающегося объекта.

### 2.1. Начало работы с программой

При запуске SPECTRA отрывается основное окно программы, которое представлено на рис. 3. Оно содержит следующие элементы интерфейса: меню «File» для загрузки исходного FITS-файла со спектром; кнопки: «View 2D/Add slice» — для



**Рис. 4.** Окно просмотра 2D-спектра и добавления пространственного разреза: вкладка добавления пространственного разреза. В графическом окне, отображающем 2D-спектр, тонкими вертикальными сплошной и штриховой линиями (на мониторе они красные) показано положение двух заданных пользователем пространственных разрезов.



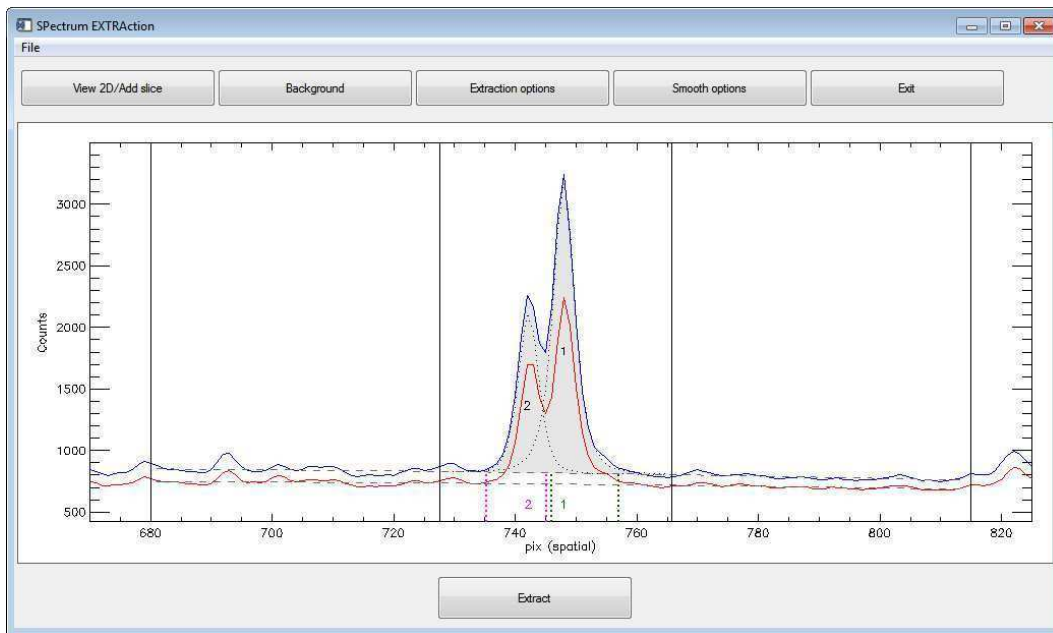
**Рис. 5.** Окно выбора параметров вычитания фона.

вызова окна просмотра 2D-спектра и добавления пространственных (поперек дисперсии) разрезов спектра (см. Подраздел 2.2), «Background» — для задания параметров вычитания фона (см. Подраздел 2.3), «Extraction option» — для задания параметров экстракции (см. разделы 2.3, 2.5), «Exit» — для выхода из программы, «Extract» — для запуска экстракции; графическое окно для отображения пространственных разрезов спектра, профилей

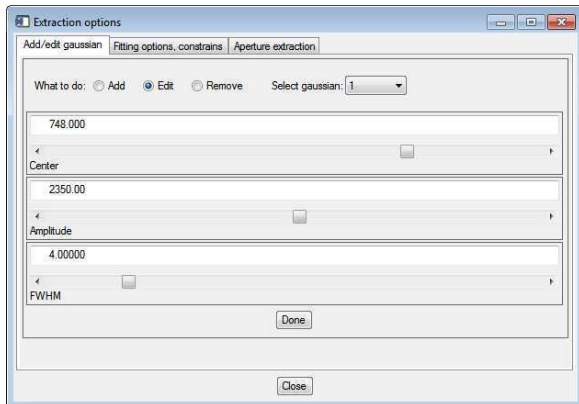
объектов, визуализации параметров экстракции (вычитания фона, апертуры и др).

Работа с программой начинается с загрузки исходного 2D-спектра в формате FITS. Файл, содержащий спектр, открывается из меню «File» в основном окне программы. Каталог, в котором находится файл со спектром, в дальнейшем используется как рабочая директория: в ней сохраняются результаты экстракции и дополнительные файлы и рисунки для контроля процесса экстракции.

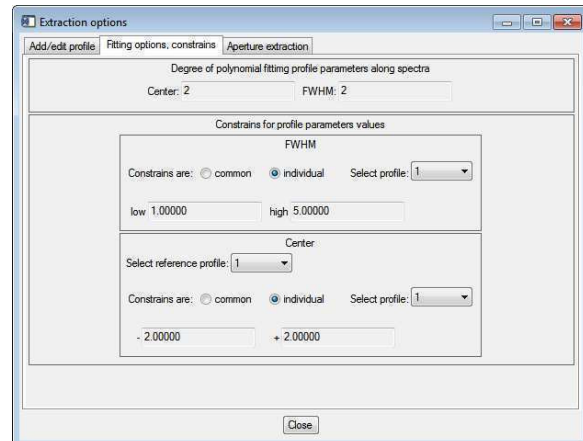
При открытии FITS-файла в основном окне программы отображаются два усредненных пространственных разреза спектра для синей и красной области (предполагается, что начало спектра соответствует коротким длинам волн). Усреднение производится вдоль дисперсии по первой половине пространственных столбцов (синяя область) для первого разреза и по второй половине пространственных столбцов (красная область) для второго (см. рис. 2). Эти разрезы дают информацию о положении объектов вдоль пространственной координаты, возможных геометрических искажениях и изменении спектра вдоль оси длин волн и позволяют в дальнейшем определить параметры фона и PSF.



**Рис. 6.** Фрагмент основного окна программы — визуализация параметров экстракции. Сплошными линиями (на мониторе они красная и синяя) показаны два усредненных пространственных разреза спектра. Вертикальными линиями показаны выбранные границы области спектра для аппроксимации фона. Горизонтальные штриховые линии — аппроксимация пространственных разрезов внутри границ для фона полиномом заданной степени. Пунктирными линиями показаны одиночные профили для двух объектов (обозначены цифрами 1 и 2) с введенными пользователем параметрами. Серой заливкой показан суммарный профиль для двух объектов (сумма двух профилей, отображенных пунктиром). Вертикальными пунктирными линиями показаны заданные пользователем границы апертур для первого и второго объектов.



**Рис. 7.** Окно выбора параметров экстракции: вкладка для определения начальных параметров профиля объекта.

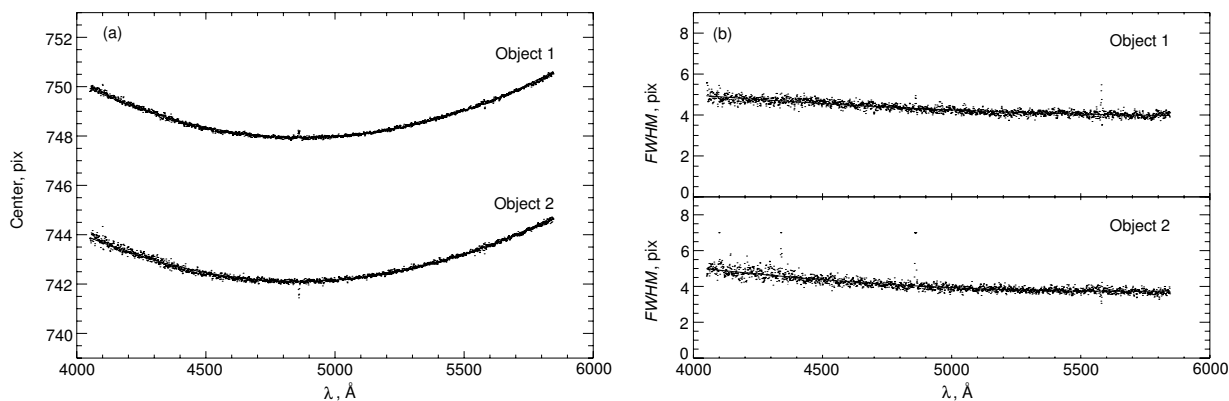


**Рис. 8.** Окно выбора параметров экстракции: вкладка для определения параметров аппроксимации профиля PSF.

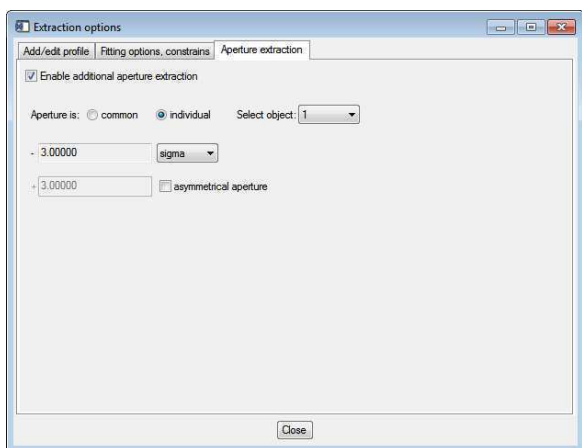
## 2.2. Просмотр 2D-спектра и его пространственных разрезов

В программе имеется возможность просмотреть исходный 2D-спектр. Окно просмотра (рис. 4) открывается по нажатию кнопки «View 2D/Add slice.» Наведением курсора мыши на открывшийся 2D-спектр можно посмотреть соответствующие пиксельные координаты, а на вкладке «Image» изменить уровни яркости.

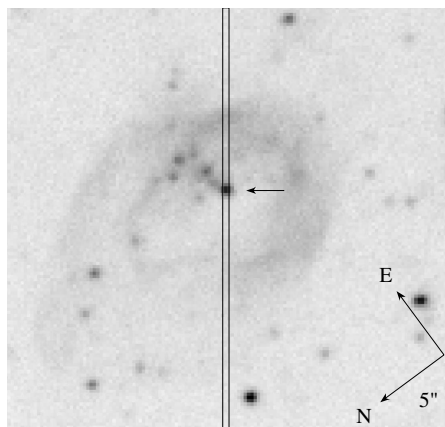
Кроме того, окно просмотра 2D-спектра позволяет добавить для рассмотрения дополнительные пространственные разрезы спектра (например, в линиях туманности). Для этого предназначена вкладка «Slice», на которой можно указать положение разрезов и их ширину для усреднения. Вкладка содержит следующие элементы интерфейса: кнопочное меню «What to do:» для выбора



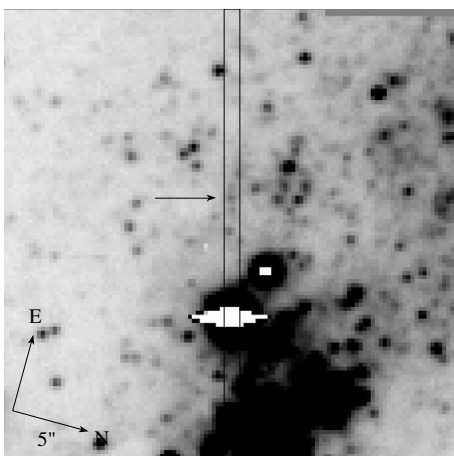
**Рис. 9.** Зависимости центра (а) и  $FWHM$  (b) гауссиан от длины волны. Точками показаны параметры, полученные при вписывании гауссианы в профиль объекта для каждого пространственного столбца, линиями — аппроксимация зависимости параметров от длины волны полиномом второй степени.



**Рис. 10.** Окно выбора параметров экстракции: вкладка для определения параметров апертурной экстракции.



**Рис. 12.** Изображение объекта Holmberg IX X-1 в фильтре  $R$  с указанием положения щели ( $0''.4$ ) при получении его спектра. Объект указан стрелкой.



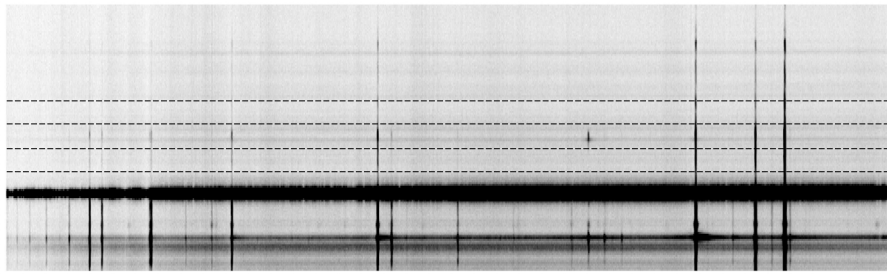
**Рис. 11.** Изображение объекта NGC 5408 X-1 в фильтре  $V$  с указанием положения щели ( $0''.7$ ) при получении его спектра. Объект указан стрелкой.

режима работы с разрезами: добавление «Add», редактирование «Edit» и удаление «Remove» разреза; меню выбора разреза для редактирования или удаления; слайдер для задания положения разреза «Pix»; поле для ввода ширины разреза для усреднения «Width», кнопочное меню «Method:» для выбора способа построения разреза (при ширине разреза более одного пикселя): медианное усреднение «avg» или суммирование столбцов «sum»; кнопка «Done» для сохранения параметров разреза.

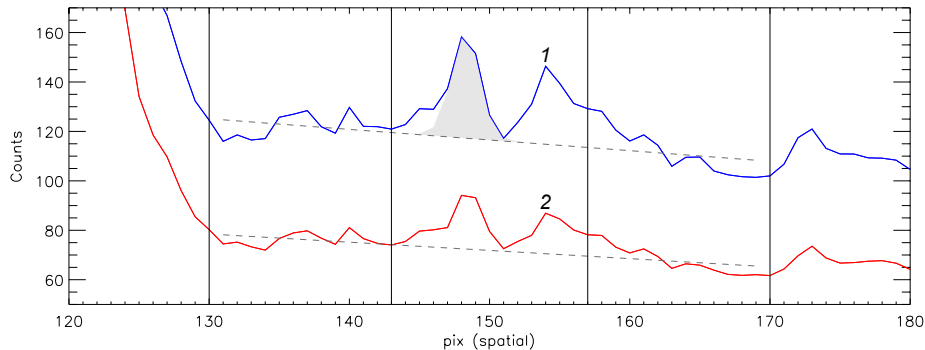
При добавлении пространственных разрезов их положение на спектре отображается в окне просмотра 2D-спектра, а сами разрезы отображаются в основном окне программы (см. рис. 3).

### 2.3. Фон

Следующим этапом экстракции является определение параметров для вычитания фона. Для этого



**Рис. 13.** 2D-спектр объекта NGC 5408 X-1. Пунктирными линиями показана область спектра, используемая для аппроксимации фона.



**Рис. 14.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров экстракции спектра объекта NGC 5408 X-1. Здесь и далее опущены элементы интерфейса, которые показаны на рис. 3 и рис. 6. Линии 1 и 2 (на экране синяя и красная) — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Вертикальные линии — выбранные границы для аппроксимации фона. Штриховые линии — аппроксимация фона в пространственных разрезах полиномом заданной (первой) степени. Серой заливкой отображен профиль Гаусса с начальными параметрами для аппроксимации профиля объекта.

применяется та же методика, что в работах [5, 7]: фон аппроксимируется в каждом пространственном столбце полиномом заданной степени. Область изображения для аппроксимации и степень полинома задаются в окне выбора фона (рис. 5), вызываемого кнопкой «Background» в основном окне. Окно содержит следующие элементы интерфейса: кнопки выбора задания параметров фона в общем случае («cont») и для определенных ранее (см. Подраздел 2.2) пространственных разрезов в линиях («slice»); слайдеры для задания границ области 2D-спектра при аппроксимации фона «y1», «y2», «y3», «y4»; поле для ввода степени полинома при аппроксимации фона «Degree of polynomial».

Визуализация в основном окне программы пространственных разрезов 2D-спектра (см рис. 6), выбранных регионов для аппроксимации фона и линий, аппроксимирующих фон с заданной степенью полинома, позволяет оптимально подобрать параметры для вычитания фона. Кроме того, в программе есть возможность индивидуально выбрать параметры фона для каждого из определенных ранее пространственных разрезов. В этом случае производится дополнительная экстракция спектра

с вычитанием фона, определенного по этим индивидуальным параметрам.

#### 2.4. PSF

Одним из ключевых моментов методики оптимальной экстракции является этап определения PSF (point spread function). Мы используем аналитическую модель PSF на основе профиля Гаусса.

Прежде всего с учетом пространственных разрезов 2D-спектра выбираются начальные параметры профиля (см. рис. 6, 7): центр, полуширина  $FWHM$  и амплитуда гауссианы. Эти параметры затем используются как нулевое приближение для аппроксимации попиксельных пространственных разрезов спектра. Полученные в результате такой аппроксимации параметры ширины и центра гауссианы определяют PSF в каждом пространственном столбце.

Для задания параметров экстракции и, в частности, параметров профиля служит окно выбора параметров экстракции (рис. 8), которое содержит три вкладки: «Add/edit profile», «Fitting option, constraints» и «Aperture extraction». Последняя

вкладка предназначена для определения параметров апертурной экстракции, которая будет описана в разделе 2.5.

На вкладке «Add/edit profile» (рис. 8) задаются начальные параметры профиля объекта. Здесь содержатся следующие элементы интерфейса: кнопочное меню «What to do:» для выбора режима работы с профилями: добавление «Add», редактирование «Edit» и удаление «Remove» профиля; меню выбора профиля для редактирования или удаления, слайдеры для задания параметров профиля: «Center», «Amplitude», «FWHM»; кнопка «Done» для сохранения параметров профиля.

На вкладке «Fitting option, constraints» (рис. 8) в разделе «Constraints for profile parameters values» можно наложить ограничения на параметры гауссиан (центр и  $FWHM$ ) при аппроксимации пространственных разрезов. Здесь для каждого из параметров профиля содержится группа элементов интерфейса для наложения ограничений на параметры при вписывании профиля в попиксельные пространственные разрезы спектра: кнопки выбора общего «common» или индивидуального «individual» способа задания ограничений со списком выбора профиля «Select profile:», для которого задаются ограничения, поля для ввода границ изменения параметров: «low» и «high» для  $FWHM$ , «-» и «+» для центра. Ограничения задаются в виде диапазона допустимых значений параметров. В случае двух и более объектов ограничения можно задать индивидуально для каждого профиля.

Вследствие геометрических искажений кадра 2D-спектра возможно смещение и уширение профиля объекта с изменением длины волны. Тем не менее изменение параметров  $FWHM$  и центра профиля с длиной волны должно быть плавным. Поэтому для его учета строятся «треки» для  $FWHM$  и центров гауссиан — аппроксимация зависимостей этих параметров от длины волны (положения вдоль дисперсии) полиномами низших степеней. Степени полинома можно задать на вкладке «Fitting option, constraints» в разделе «Degree of polynomial fitting profile parameters along spectra» (рис. 8), содержащем поля для ввода степени полинома для аппроксимации изменения параметров профиля вдоль дисперсии.

Полученные таким образом степенные зависимости параметров гауссиан представляют собой PSF для каждого объекта, учитывающую зависимость профиля от длины волны. Для контроля процесса построения PSF его результаты записываются в виде рисунков в рабочей директории. Для рассматриваемого случая они представлены на рис. 9.

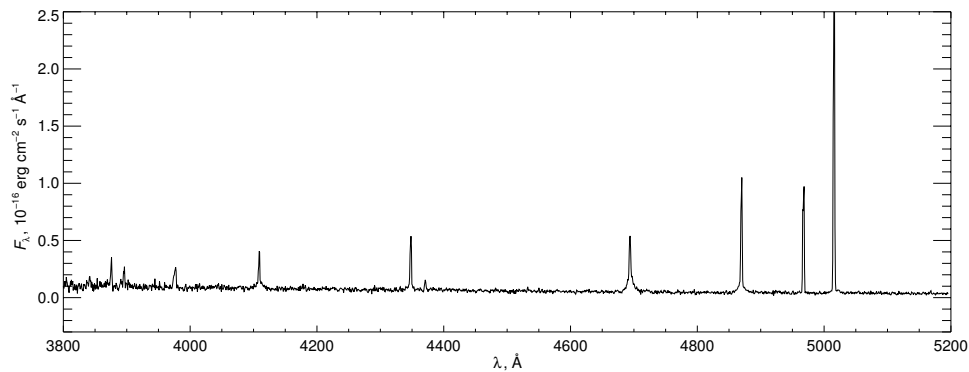
## 2.5. Экстракция апертурой

Помимо оптимальной экстракции программа позволяет произвести апертурную экстракцию спектра. Эта возможность реализована в виде дополнительной опции. При этом апертурная экстракция выполняется на основе результатов построения PSF для оптимальной экстракции: в качестве центра апертурой используется центр PSF, а ширину апертурой можно задать в относительных единицах ширины PSF. Поскольку PSF строится с учетом зависимости от длины волны, то привязка параметров апертурой к параметрам PSF позволяет учесть геометрические искажения 2D-спектра вдоль дисперсии при экстракции апертурой.

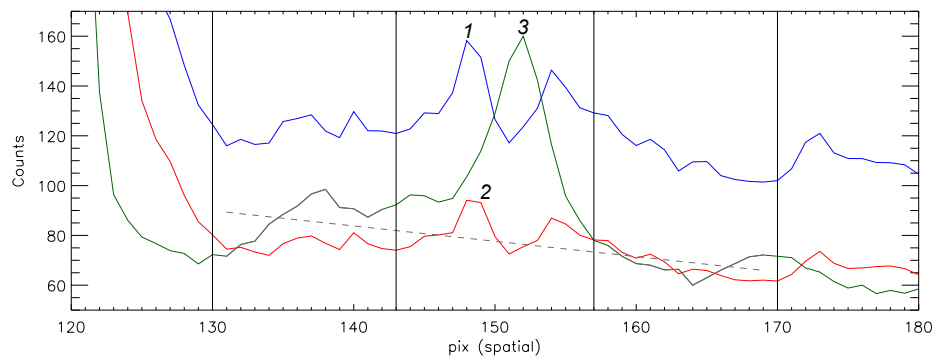
Для активации опции апертурной экстракции и для задания ее параметров в программе используется вкладка «Aperture extraction» окна выбора параметров экстракции (см. рис. 10). Вкладка содержит следующие элементы интерфейса: кнопку активации апертурной экстракции «Enable additional aperture extraction»; кнопки выбора общего «common» или индивидуального «individual» способа задания параметров апертурой со списком выбора объекта «Select object» для задания параметров в случае экстракции спектров двух и более объектов; поле для ввода значения апертурой «-» со списком выбора единиц апертурой («sigma», «px» или «arcsec»); кнопка включения режима асимметричной апертурой «asymmetrical aperture» с полем для задания положительной границы апертурой «+». Здесь можно задать ширину апертурой; единицы ширины либо относительные — единицы ширины PSF ( $\sigma$ ), либо абсолютные — число пикселей или секунд дуги (если для спектра указан пространственный масштаб). В случае экстракции двух и более объектов параметры ширины апертурой можно задать индивидуально для каждого из них. Кроме этого, предусмотрена возможность задания асимметричной апертурой (с разными границами апертурой относительно центра PSF).

Выбранная апертурой для наилучшего подбора ее параметров отображается в основном окне программы в соотношении с пространственными разрезами (рис. 6). Заметим, однако, что поскольку апертурой задается относительно параметров PSF (по крайней мере относительно центра PSF), а на данном этапе PSF еще не определена точно, то апертурой в окне отображается с использованием параметров, введенных пользователем в качестве начального приближения для аппроксимации PSF (см. Подраздел 2.4).





**Рис. 15.** 1D-спектр объекта NGC 5408 X-1. Видны линии водорода бальмеровской серии, а также линии He II  $\lambda 4686$ , линии кислорода O[III]  $\lambda\lambda 4959, 5007$ . Узкие компоненты линий водорода и He II, а также линии кислорода принадлежат окружающей ULX-туманности. Широкие компоненты линий формируются в ветре ULX.



**Рис. 16.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров вычитания фона для объекта NGC 5408 X-1 в случае вычитания вклада туманности в линии H $\beta$ . Линии 1 и 2 (на экране они синяя и красная) — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Линия 3 (на мониторе зеленая) — разрез двумерного спектра поперек дисперсии в линии H $\beta$ . Вертикальные линии — выбранные границы для аппроксимации фона в разрезе в линии H $\beta$ . Штриховая линия — аппроксимация фона в разрезе в линии H $\beta$  полиномом заданной (первой) степени.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ SPEXTRA

Здесь мы приводим результаты экстракции спектров нескольких интересных объектов, выполненной с помощью программы SPEXTRA. Для каждого из объектов представлены исходные данные (2D-спектр), выбранные параметры экстракции и экстрагированные спектры.

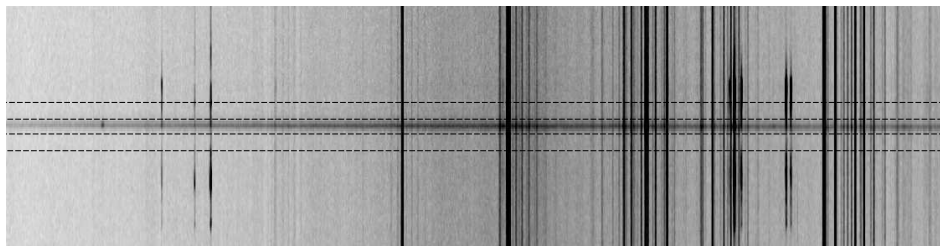
#### 3.1. Ультраяркие рентгеновские источники

Программа SPEXTRA используется для экстракции спектров оптических двойников ультраярких рентгеновских источников (ULX). Ультраяркие рентгеновские источники являются переменными в рентгеновском диапазоне объектами, изотропная светимость которых превышает эддингтоновский предел для черных дыр звездных масс ( $L > 10^{39}$  эрг с $^{-1}$ ). ULX наблюдаются в галактиках и являются одними из лучших кандидатов в аккрецирующие черные дыры. Большинство ультраярких источников находится в очень плотных звездных полях, и часто они окружены туманностями.

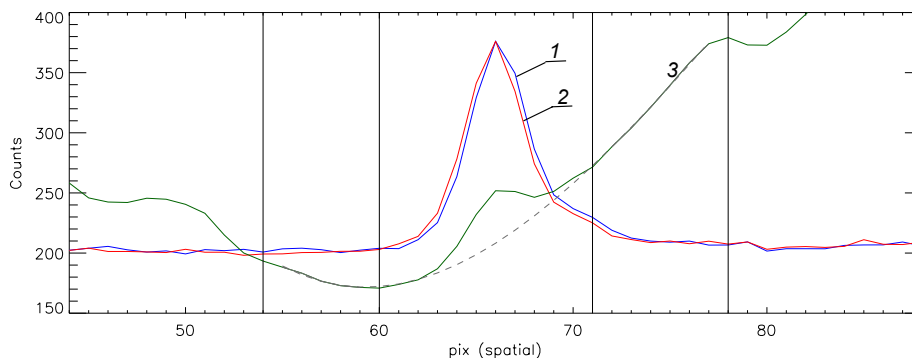
Возможности программы SPEXTRA по экстракции спектров объектов этого типа демонстрируются на примере двух источников: NGC 5408 X-1 и Holmberg IX X-1 (см. рис. 11 и 12).

Спектральные наблюдения NGC 5408 X-1 (видимая звездная величина  $V = 22^m4$ ) проведены на телескопе VLT с помощью спектрографа FORS2 [12] 12 апреля 2010 г. [13]. Получено три спектра с экспозицией 850 с на гризме GRIS1200B (диапазон 3660–5110 Å). Спектральное разрешение составило  $\lambda/\Delta\lambda = 1420$ . Используемая при спектроскопии щель имела ширину 0".7. Применялось аппаратное бинирование  $2 \times 2$  пикселя (0".25/пиксель, дисперсия 0.72 Å/пиксель). Размер изображений звезд в течение ночи варьировался от 0".5 до 0".7.

Оптический спектр Holmberg IX X-1 ( $V = 22^m8$ ) был получен на телескопе Subaru 28 февраля 2011 г. [14]. Наблюдения проводились в длиннощелевой моде с использованием спектрогра-



**Рис. 17.** 2D-спектр объекта Holmberg IX X-1. Пунктирными линиями показана область спектра, используемая для аппроксимации фона.



**Рис. 18.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров вычитания фона для объекта Holmberg IX X-1 в случае вычитания вклада туманности в линии  $H\alpha$ . Линии 1 и 2 (на экране они синяя и красная) — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Линия 3 (на мониторе зеленая) — разрез двумерного спектра поперек дисперсии в линии  $H\alpha$ . Вертикальные линии — выбранные границы для аппроксимации фона в разрезе в линии  $H\alpha$ . Штриховая линия — аппроксимация фона в разрезе в линии  $H\alpha$  полиномом заданной (второй) степени.

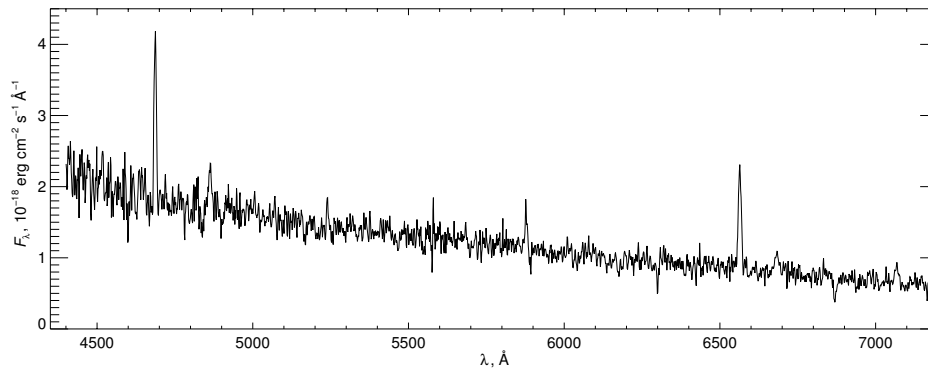
фа FOCAS [15]. Использовалась гризма 300В (диапазон 3650–8300 Å), ширина щели равнялась 0"4. Спектральное разрешение составило примерно 1000. В стандартных режимах гризма 300В используется совместно с фильтрами, которые позволяют убрать следующие порядки спектров, что критично для ярких объектов. Поскольку объекты этого типа являются крайне слабыми в оптическом диапазоне, наблюдения проводились в режиме без фильтров, что позволило получить максимальное пропускание и покрыть область 4000–7000 Å. Спектральный диапазон ограничивался только наличием значительного количества рассеянного света в приборе на длинах волн более 3800 Å и наложением спектра следующего порядка при  $\lambda > 7000$  Å. При наблюдениях применялось аппаратное бинирование  $1 \times 2$  пикселя, что соответствует дисперсии 1.34 Å/пиксель и масштаб изображения 0"21/пиксель. Размер изображений в течение наблюдений менялся в пределах 0"6–0"7.

Перед экстракцией одномерных спектров объектов в пакете программ MIDAS проводилась стандартная обработка спектральных данных, включающая вычитание электронного нуля, деле-

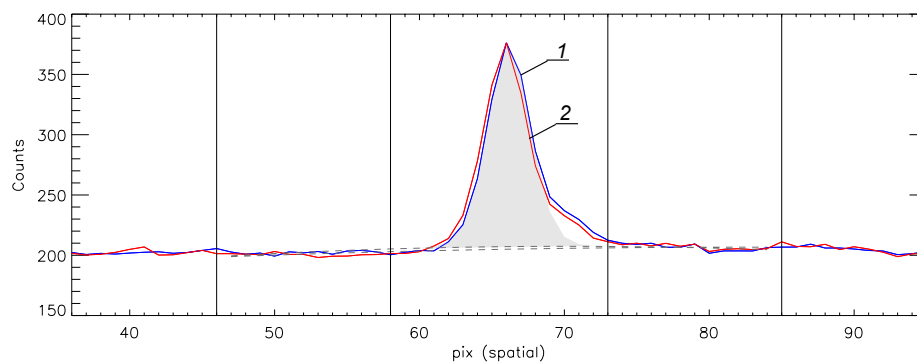
ние на плоское поле, удаление следов космических частиц, сложение отдельных экспозиций, линеаризацию спектров, учет атмосферного поглощения и переход от инструментальных единиц плотности потока к энергетическим. Дополнительно для данных, полученных на телескопе Subaru, следом за вычитанием bias производилось вычитание области overscap, представляющей собой неэкспонируемые во время наблюдений области матрицы и предназначенные для контроля за вариациями уровня bias в каждом из четырех каналов считывания. Кроме того, для построения двумерной дисперсионной кривой с точностью не хуже  $10 \text{ km s}^{-1}$  для данных Subaru исправлялась геометрическая дисторсия. Обе процедуры выполнялись с помощью специализированных программ [16] в среде IRAF.

Выбранные при наблюдениях позиционные углы и хорошее качество изображений позволили получить спектры обоих объектов без вклада соседних звезд. Однако в обоих случаях на спектры источников накладываются спектры окружающих их туманностей.

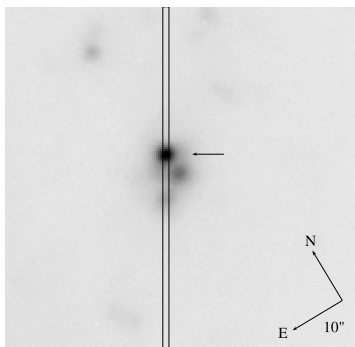
При экстракции спектра NGC 5408 X-1 пространственный профиль объекта аппроксимировался одной функцией Гаусса с начальными параметрами: центр — 148.3 пикселя, амплитуда —



**Рис. 19.** 1D-спектр объекта Holmberg IX X-1. В спектре видны формирующиеся в объекте широкие линии  $H\alpha$ ,  $H\beta$ , He II  $\lambda 4686$  и линии He I  $\lambda\lambda 5876, 6678, 7065$ . Вклад окружающей источник туманности полностью вычтен.



**Рис. 20.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров экстракции спектра объекта Holmberg IX X-1. Линии 1 и 2 (синяя и красная на мониторе) — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Вертикальные линии — выбранные границы области спектра для аппроксимации фона. Штриховые линии — аппроксимация фона в пространственных разрезах полиномом заданной (второй) степени. Серой заливкой отображен профиль Гаусса с начальными параметрами для аппроксимации профиля объекта.



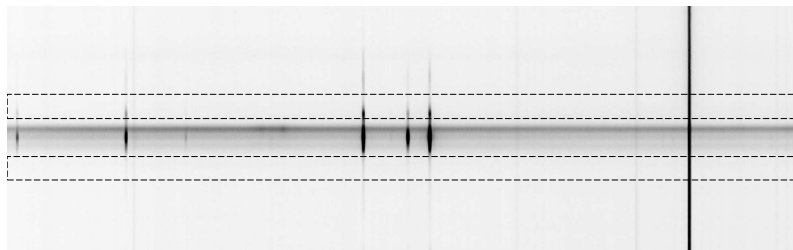
**Рис. 21.** Изображение объекта NGC 2403 M-2 в фильтре  $V$  с указанием положения щели ( $1''$ ) при получении его спектра. Объект указан стрелкой.

44 отсчета,  $FWHM$  — 2.3 пикселя. В модуле программы, предназначенном для выделения фона, с двух сторон от спектра объекта на расстоянии 5 и 9 пикселей (см. рис. 13 и 14) были выбраны области шириной 13 пикселей (примерно  $3''$ ).

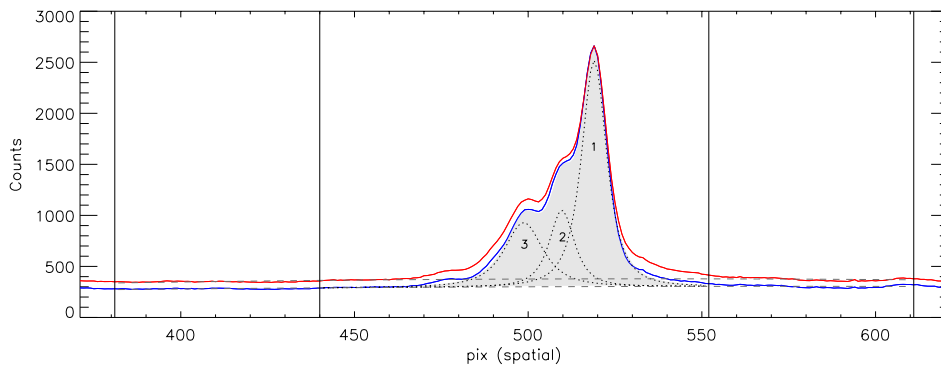
Аппроксимация фона производилась полиномом первой степени.

Результирующий одномерный спектр объекта с широкими компонентами линий, принадлежащими источнику, и узкими компонентами, принадлежащими окружающей источник туманности, представлен на рис. 15. Окружающая NGC 5408 X-1 туманность крайне неоднородна и имеет размер примерно  $2''$  (см. разрез двумерного спектра поперек дисперсии в линии  $H\beta$  на рис. 16), поэтому ее вклад (узкие линии, рис. 15) не удалось полностью учесть.

Напротив, туманность вокруг Holmberg IX X-1 имеет значительный пространственный размер около  $13''$  и относительно слабый градиент интенсивности вдоль щели (см. рис. 17 и разрез двумерного спектра поперек дисперсии в линии  $H\alpha$  на рис. 18), и в процессе экстракции спектра источника вклад туманности был полностью устранен (рис. 19). При экстракции Holmberg IX X-1 использовалась одна функция Гаусса с начальными



**Рис. 22.** 2D-спектр объекта NGC 2403 M-2. Пунктирными линиями показана область спектра, используемая для аппроксимации фона.



**Рис. 23.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров экстракции спектра объекта NGC 2403 M-2. Сплошные линии — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Вертикальные линии — выбранные границы области спектра для аппроксимации фона. Штриховые линии — аппроксимация фона в пространственных разрезах полиномом заданной (второй) степени. Пунктирные линии, обозначенные цифрами 1, 2, 3 — профили Гаусса для трех объектов с начальными параметрами для аппроксимации профилей объектов. Серой заливкой отображен суммарный профиль (сумма трех профилей, отображенных пунктиром) для трех объектов. Объекту NGC 2403 M-2 соответствует первый профиль.

параметрами: центр — 66.2 пикселей, амплитуда — 170 отсчетов,  $FWHM$  — 3.4 пикселя. Для учета вклада фона использовались две области шириной 12 пикселей (примерно  $2''.5$ ) на расстоянии 8 и 7 пикселей от объекта (см. рис. 17 и 20), аппроксимация фона производилась полиномом второй степени.

### 3.2. Центры молодых звездных скоплений

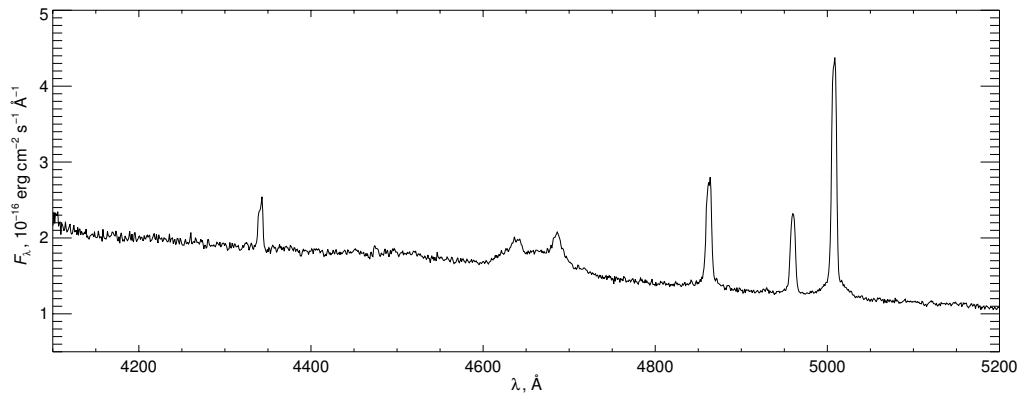
Согласно современным представлениям в центрах молодых звездных скоплений в результате сегрегации массы за времена порядка 1 млн лет формируются очень массивные звезды, которые впоследствии могут эволюционировать до стадии черных дыр промежуточных масс [17].

С 2015 г. лабораторией физики звезд САО РАН на телескопе БТА ведется наблюдательная программа «Массивные звезды в близких галактиках», направленная на поиск массивных звезд в центрах молодых звездных скоплений в галактиках местного объема с высоким темпом звездообразования. В рамках программы 30 марта 2017 г. был

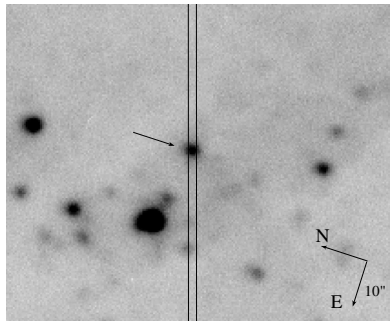
получен спектр эмиссионного объекта из галактики NGC 2403 (см. рис. 21). Наблюдения проводились с использованием редуктора светосилы SCORPIO и гризмы 1200G (4000–5700 Å). Применялось аппаратное бинирование  $1 \times 2$ . Масштаб изображения вдоль пространственной координаты —  $0''.357/\text{пиксель}$ . Спектральное разрешение составляло приблизительно 5 Å. Было получено два спектра с суммарным временем накопления 1800 с. Щель имела ширину  $1''$ , а размер изображений составлял около  $3''$ .

Для экстракции спектра эмиссионного объекта использовался двумерный спектр, прошедший стандартную обработку спектральных данных: вычитание электронного нуля, учет плоского поля, удаление следов космических частиц, линейаризацию спектра и исправление за атмосферное поглощение.

На рис. 22 показан двумерный спектр. На нем пунктирными линиями изображены границы выбранного для экстракции фона размером 59 пикселей (около  $21''$ ). Разрез 2D-спектра вдоль пространственной оси приведен на рис. 23. Расстояние



**Рис. 24.** 1D-спектр объекта NGC 2403 M-2. Спектр содержит характерную для звезд Вольфа–Райе бленду C III/N III  $\lambda\lambda 4640 - 4650$ , широкую линию He II  $\lambda 4686$ , линии He I  $\lambda\lambda 4471, 4921, 5015$ , а также видны узкие линии водорода ( $H\beta$ ,  $H\gamma$ ) и кислорода (O[III]  $\lambda\lambda 4959, 5007$ ).



**Рис. 25.** Изображение объекта J 004056.10+410308.7 в фильтре V с указанием положения щели ( $1''$ ) при получении его спектра. Объект указан стрелкой.

от эмиссионного объекта до ближайших границ фона составляет 79 и 33 пикселя (примерно  $28''$  и  $12''$ ) для нижнего и верхнего участков соответственно. Выбранный фон был аппроксимирован полиномом второй степени. Поскольку данный случай представляет собой пример тесного поля звезд, имеет место наложение спектра эмиссионного объекта и спектров расположенных вблизи объектов. С учетом этого условия вертикальный разрез двумерного спектра, содержащий спектры нескольких объектов, описывался тремя профилями Гаусса со следующими начальными параметрами: центр — 519, 509.7, 498.7 пикселя, амплитуда — 2217, 750, 630 отсчетов,  $FWHM$  — 8.5, 8.5, 13 пикселей, для первой (описывающей эмиссионный объект), второй и третьей гауссианы соответственно. Заметим, что ширина третьей гауссианы отличается от двух первых, поскольку она введена для учета вклада нескольких накладывающихся неразрешающихся источников, суммарный профиль которых можно описать функцией Гаусса.

На рис. 24 показан результат экстракции спектра эмиссионного объекта. Спектр содержит

характерную для звезд Вольфа–Райе бленду C III/N III  $\lambda\lambda 4640 - 4650$ , широкую линию He II  $\lambda 4686$ , линии He I  $\lambda\lambda 4471, 4921, 5015$ , а также видны узкие линии водорода ( $H\beta$ ,  $H\gamma$ ) и кислорода (O[III]  $\lambda\lambda 4959, 5007$ )

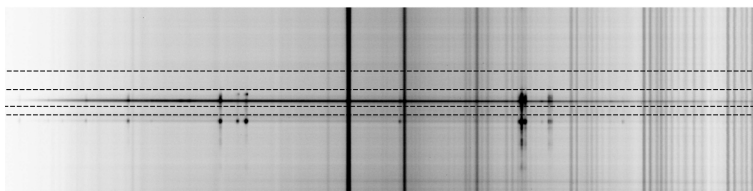
### 3.3. LBVs

Программный пакет SPEXTRA был использован для экстракции спектров ярких голубых звезд (LBV) и кандидатов в них в галактиках M 31 и M 33 [3]. На примере звезды J 004056.10+410308.7 (см. рис. 25) демонстрируются возможности SPEXTRA по извлечению спектра объекта, находящегося в сложной туманности.

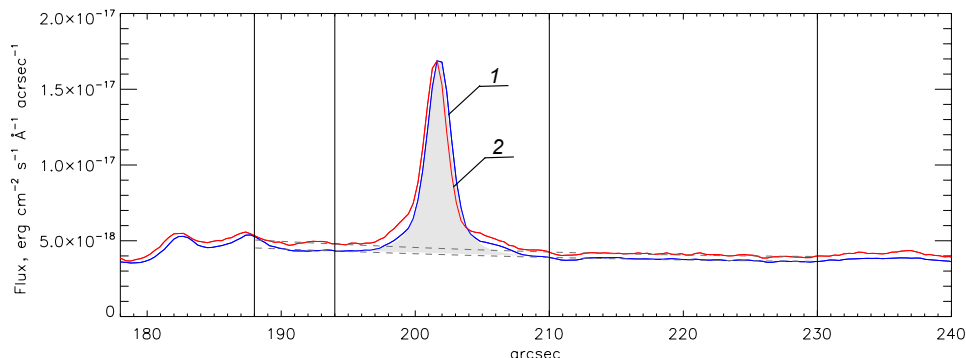
Спектральные наблюдения для объекта были проведены на телескопе БТА САО РАН 18 октября 2012 г. по программе «Массивные звезды в близких галактиках.» Использовался редуктор светосилы SCORPIO и гризма 550G ( $3640 - 7800 \text{ \AA}$ ). Было получено два спектра с экспозицией 1200 с. Спектральное разрешение составляло  $2.1 \text{ \AA}$ , щель имела ширину  $1''$ , размер изображений — около  $2''$ .

Перед экстракцией одномерных спектров объектов в пакете программ IDL проводилась стандартная обработка спектральных данных, включающая вычитание bias, деление на плоское поле, удаление следов космических частиц, сложение отдельных экспозиций, линеаризацию спектров, учет атмосферного поглощения и переход от инструментальных единиц плотности потока к энергетическим. Пространственная координата переведена из пикселей в секунды.

Мы демонстрируем возможности программы для учета различного фона. На рис. 25 видно наличие около звезды яркой туманности. На двумерном спектре (рис. 26) видно, что в спектре туманности



**Рис. 26.** 2D-спектр объекта J 004056.10+410308.7. Пунктирными линиями показана область спектра, используемая для аппроксимации фона.



**Рис. 27.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров экстракции спектра объекта J 004056.10+410308.7. Линии 1 и 2 (синяя и красная на экране) — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Вертикальные линии — выбранные границы области спектра для аппроксимации фона. Штриховые линии — аппроксимация фона в пространственных разрезах полиномом заданной (второй) степени. Серой заливкой отображен профиль Гаусса с начальными параметрами для аппроксимации профиля объекта.

присутствуют линии разного возбуждения:  $H\alpha$ ,  $O[III] \lambda 5007$ ,  $S[II]$ , которые накладываются на спектр звезды и требуют корректного вычитания.

Рассмотрим три варианта вычитания фона, используя специальную возможность программы. Первый вариант — вычитание фона без учета эмиссионных линий. На рис. 27 представлен разрез 2D-спектра вдоль пространственной оси.

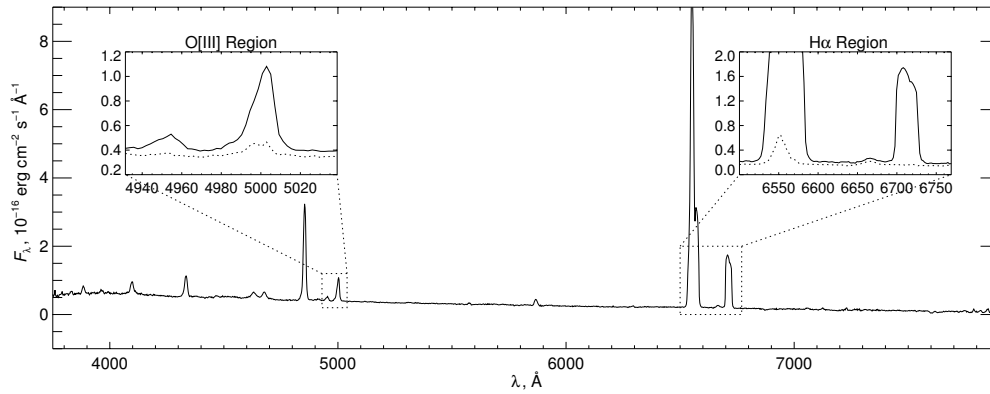
Для аппроксимации фона выбирались две области шириной  $6''$  и  $20''$  с двух сторон от объекта на расстоянии примерно  $8''$  (см. рис. 26 и 27). Фон аппроксимировался полиномом второй степени. При экстракции спектра J 004056.10+410308.7 пространственный профиль объекта аппроксимировался одной функцией Гаусса с начальными параметрами: центр —  $202''$ , амплитуда —  $1.31 \times 10^{-17}$  эрг  $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2} \text{Å}^{-1} \text{угл. сек}^{-1}$ ,  $FWHM$  —  $2''$ .

Результирующий одномерный спектр объекта представлен на рис. 28 сплошной линией. В спектре виды линии водорода бальмеровской серии, а также линии  $He I \lambda\lambda 5876, 6678$ . Узкие компоненты линий водорода,  $N[II] \lambda\lambda 6548, 6583$ ,  $S[II] \lambda\lambda 6716, 6730$  и линии кислорода  $O[III] \lambda\lambda 4959, 5007$  принадлежат окружающей туманности. Широкие компоненты линий формируются в звезде.

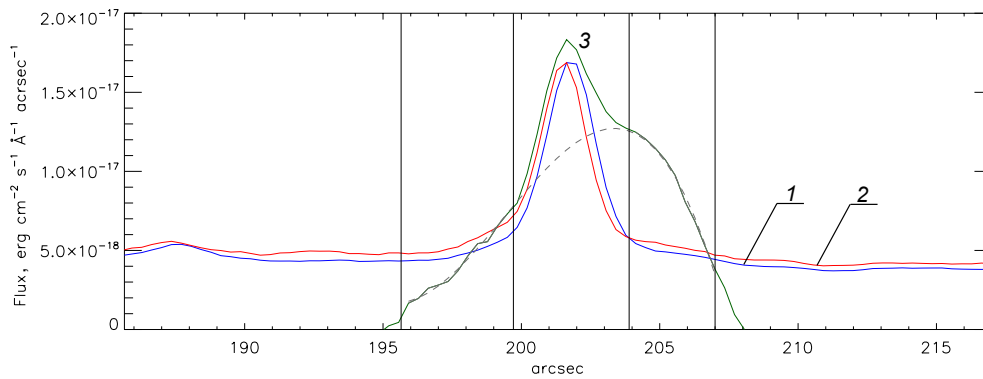
Следующий вариант вычитания фона предполагает учет выбранной эмиссионной линии. Мы взяли для примера линию  $H\alpha$  и сделали разрез поперек дисперсии по трем пикселям ( $9.3 \text{ Å}$ ).

На рис. 29 представлен разрез 2D-спектра вдоль пространственной оси в линии  $H\alpha$ . Фон выбирался с двух сторон от спектра объекта в областях шириной  $5''$  и  $3''$  на расстоянии примерно  $2-3''$ . В данном случае фон аппроксимировался полиномом третьей степени. Результирующий одномерный спектр объекта представлен на рис. 28 пунктирной линией во врезке, отображающей область линии  $H\alpha$ . На этой врезке рисунка видно, что вклад туманности, излучающей в узких линиях  $H\alpha$ ,  $N[II]$ ,  $S[II]$ , практически полностью был вычтен из спектра. Осталась только широкая линия  $H\alpha$  ( $FWHM = 12.8 \text{ Å}$ ), принадлежащая самой звезде.

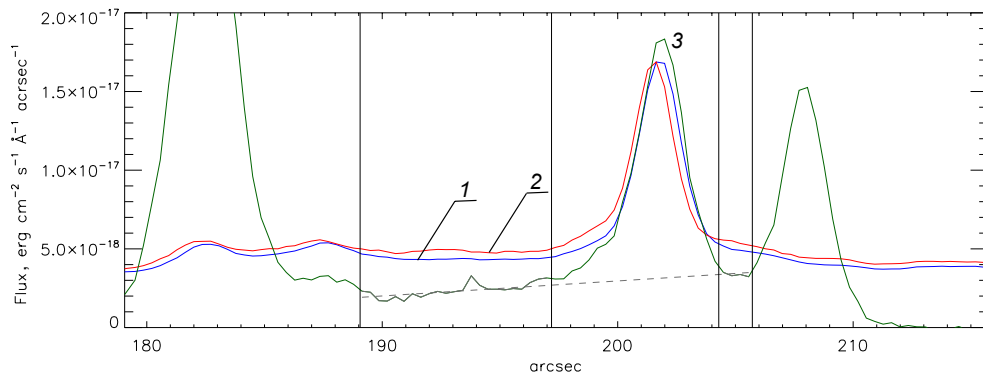
Еще один вариант вычитания фона мы использовали для линии  $O[III] \lambda 5007$ , также эмиссионной линии, принадлежащей окружающей туманности. Мы сделали разрез этой линии поперек дисперсии по трем пикселям ( $9.3 \text{ Å}$ ). На рис. 30 представлен разрез 2D-спектра вдоль пространственной оси в линии  $O[III] \lambda 5007$ . В данном случае границы фона вбирались равными  $188-197$ ,  $204-206$ , а для аппроксимации фона использовался полином первой



**Рис. 28.** 1D-спектр объекта J 004056.10+410308.7. Сплошной линией изображен спектр, фон для которого был взят без учета линий туманности. На левой врезке изображена область линий O[III]  $\lambda\lambda$ 4959, 5007. Пунктирной линией на левой врезке показан спектр, фон для которого взят с учетом разреза в линии O[III]. На правой врезке изображена область линии H $\alpha$ . Пунктирной линией на правой врезке показан спектр, фон для которого взят с учетом разреза в линии H $\alpha$ .



**Рис. 29.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров вычитания фона для объекта J 004056.10+410308.7 в случае вычитания вклада туманности в линии H $\alpha$ . Линии 1 и 2 (на мониторе синяя и красная) — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Линия 3 (на экране зеленая) — разрез двумерного спектра поперек дисперсии в линии H $\alpha$ . Вертикальные линии — выбранные границы для аппроксимации фона в разрезе в линии H $\alpha$ . Штриховая линия — аппроксимация фона в разрезе в линии H $\alpha$  полиномом заданной (третьей) степени.



**Рис. 30.** Фрагмент основного окна программы при определении параметров вычитания фона для объекта J 004056.10+410308.7 в случае вычитания вклада туманности в линии O[III]  $\lambda$ 5007. Линии 1 и 2 (на мониторе синяя и красная) — усредненные пространственные разрезы 2D-спектра объекта. Линия 3 (на экране зеленая) — разрез двумерного спектра поперек дисперсии в линии O[III]  $\lambda$ 5007. Вертикальные линии — выбранные границы для аппроксимации фона в разрезе в линии O[III]  $\lambda$ 5007. Штриховая линия — аппроксимация фона в разрезе в линии O[III]  $\lambda$ 5007 полиномом заданной (первой) степени.

степени. Результирующий одномерный спектр объекта представлен на рис. 28 пунктирной линией во врезке, отображающей область линии O[III]  $\lambda$ 5007. Здесь видно, что вклад туманности, излучающей в узких линиях O[III], удалось практически полностью вычистить из спектра. Отметим, что различие в уровне континуума между разными вариантами учета фона объясняется тем, что в случае вычитания фона для линий частично вычитаются крылья спектра объекта.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан пакет программ для оптимальной экстракции длиннощелевых 2D-спектров в тесных звездных полях, включающий графический интерфейс для удобства пользователя. Для звезд Галактики тесные поля могут наблюдаться в рассеянных или шаровых скоплениях. Кроме экстракции спектров нескольких звезд, которые могут быть тесно расположены или даже накладываться друг на друга, пакет позволяет экстрагировать спектры объектов с вычитанием налагающихся туманностей разной формы и разной степени ионизации. В основном он используется при исследовании звезд близких галактик, находящихся в скученных полях, скоплениях звезд в галактиках, однако этот же пакет может быть использован для изучения одиночных звезд, например, звезд Галактики или одиночной звезды в других галактиках при наличии сильного фона. Этот пакет также может быть использован при наблюдениях одиночных ярких или слабых звезд Галактики.

Для оптимальной экстракции было предложено (раздел 3) несколько интересных объектов, которые находятся на мощном фоне родительских галактик: ультраяркие рентгеновские источники (Подраздел 3.1), центры молодых звездных скоплений (Подраздел 3.2), проэволюционировавшие звезды LBV (Подраздел 3.3). В последнем пункте показана экстракция спектра с учетом различных линий туманностей: линии высокой ионизации O[III]  $\lambda\lambda$ 4959, 5007 и низкой ионизации H $\alpha$ , N[II]  $\lambda\lambda$ 6548, 6583, S[II]  $\lambda\lambda$ 6716, 6730. Линии высокой и низкой ионизации, которые могут обладать разной структурой и размером подстилающей туманности, полностью вычитаются программой в ходе экстракции.

Пакет программ с графическим интерфейсом и руководство пользователя размещены на сайте <http://www.sao.ru/jet/>. В текущей версии реализован вариант экстракции 2D-спектров в тесных звездных полях апертурой и с применением функции Гаусса. В зависимости от типа спектрографа

кружок рассеяния одиночной звезды (PSF) может иметь разную интенсивности в крыльях звезды. Поэтому в дальнейшем пакет будет дополняться возможностью аппроксимации профиля объекта функцией Моффата [18].

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за поддержку, оказанную Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 16-02-00567, 16-32-00210, 16-02-00758); исследование также выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 14-50-00043) в части разработки интерфейса программы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 1025 (1994).
2. S. Fabrika, O. Sholukhova, T. Becker, et al., *Astron. and Astrophys.* **437**, 217 (2005).
3. O. Sholukhova, D. Bizyaev, S. Fabrika, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **447**, 2459 (2015).
4. K. F. Neugent, P. Massey, and C. Georgy, *Astrophys. J.* **759**, 11 (2012).
5. K. Horne, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **98**, 609 (1986).
6. M. W. Buie and W. M. Grundy, *Icarus* **148**, 324 (2000).
7. R. I. Hynes, *Astron. and Astrophys.* **382**, 752 (2002).
8. K. Banse, P. Crane, P. Grosbol, et al., *Messenger* **31**, 26 (1983).
9. D. Tody, *Proc. SPIE* **627**, 733 (1986).
10. S. N. Fabrika, O. N. Sholukhova, and S. A. Zakharova, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **43**, 133 (1997).
11. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
12. I. Appenzeller, K. Fricke, W. Fürtig, et al., *Messenger* **94**, 1 (1998).
13. D. Cseh, F. Grisé, P. Kaaret, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435**, 2896 (2013).
14. S. Fabrika, Y. Ueda, A. Vinokurov, et al., *Nature Physics* **11**, 551 (2015).
15. N. Kashikawa, K. Aoki, R. Asai, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **54**, 819 (2002).
16. "Subaru Data Reduction Cookbooks," <https://www.naoj.org/Observing/DataReduction/index.html>.
17. M. Freitag, M. A. Gürkan, and F. A. Rasio, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **368**, 141 (2006).
18. A. F. J. Moffat, *Astron. and Astrophys.* **3**, 455 (1969).



**SPEXTRA: Optimal Extraction Code for Long-Slit Spectra in Crowded Fields****A. N. Sarkisyan, A. S. Vinokurov, Yu. N. Solovieva, O. N. Sholukhova, A. E. Kostenkov, and S. N. Fabrika**

We present a code for the optimal extraction of long-slit 2D spectra in crowded stellar fields. Its main advantage and difference from the existing spectrum extraction codes is the presence of a graphical user interface (GUI) and a convenient visualization system of data and extraction parameters. On the whole, the package is designed to study stars in crowded fields of nearby galaxies and star clusters in galaxies. Apart from the spectrum extraction for several stars which are closely located or superimposed, it allows the spectra of objects to be extracted with subtraction of superimposed nebulae of different shapes and different degrees of ionization. The same package can be used to study single stars in the case of a strong background. In the current version, the optimal extraction of 2D spectra with an aperture and the Gaussian function as PSF (point spread function) is proposed. In the future, the package will be supplemented with the possibility to build a PSF based on a Moffat function. We present the details of GUI, illustrate main features of the package, and show results of extraction of the several interesting spectra of objects from different telescopes.

Keywords: *methods: data analysis—techniques: image processing*