

УДК 520.872; 520-14(084.121); 520.84(084.121); 520.36

СКАНИРУЮЩИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР ФАБРИ–ПЕРО НА 6-М ТЕЛЕСКОПЕ САО РАН

© 2021 А. В. Моисеев^{1*}¹ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 14 мая 2021 года; после доработки 17 мая 2021 года; принята к публикации 17 мая 2021 года

Сканирующий интерферометр Фабри–Перо (ИФП) — старейший из методов оптической панорамной (3D) спектроскопии. Он до сих пор не потерял актуальности благодаря возможности обеспечить высокое спектральное разрешение в большом поле зрения. В данной работе рассматривается история применения этого метода для исследования протяженных объектов (туманностей и галактик). Обсуждаются методики обработки и анализа данных. Основное внимание уделяется реализации наблюдений со сканирующим ИФП на 6-м телескопе САО РАН. В настоящее время он применяется здесь в составе многорежимного редуктора светосилы SCORPIO-2. Выполнен краткий обзор результатов исследования различных галактических и внегалактических объектов с помощью сканирующего ИФП на 6-м телескопе: областей звездообразования и молодых звездных объектов, спиральных, кольцевых, карликовых и взаимодействующих галактик, газовых подсистем, связанных с конусами ионизации активных галактических ядер, галактическими ветрами и т.п. Обсуждаются дальнейшие перспективы исследований с помощью сканирующего ИФП в САО РАН.

Ключевые слова: техника: интерферометрия — техника: обработка изображений — техника: спектроскопия изображений — инструменты: интерферометры

1. ВВЕДЕНИЕ

Интерферометры Фабри–Перо (ИФП), основанные на принципах, впервые описанных в работе Fabry and Perot (1901), уже более столетия применяются для исследования движений ионизованного газа в различных астрофизических объектах. Успешные измерения распределения лучевых скоростей в туманности Ориона были выполнены с помощью интерферометра, состоящего из двух плоскопараллельных зеркал, незадолго до начала Первой мировой войны (Buisson et al. 1914). После некоторого перерыва эта техника изучения газовых туманностей была возрождена в Марсельской обсерватории (Courtès 1960) и стала широко распространяться и совершенствоваться. В практику советской астрономии такие наблюдения были введены во многом благодаря П. В. Щеглову (Sheglov 1963). На разработанных им ИФП с помощью 48-см и 125-см телескопов Крымской станции ГАИШ МГУ проводились многочисленные исследования кинематики остатков сверхновых и других эмиссионных туманностей (Lozinskaya 1969; 1973).

Результатом наблюдений ИФП с фиксированным расстоянием между пластинами («эталоны

Фабри–Перо») является изображение — интерферограмма, на которой смешана пространственная и спектральная информация, так что каждой точке (x, y) в плоскости изображения соответствует длина волны λ , меняющаяся с расстоянием от оптической оси (рис. 1). На таком кадре измерить доплеровские скорости можно только в отдельных областях туманности, для которых выполняется условие максимума интерференции:

$$n\lambda = 2l\mu \cos \theta, \quad (1)$$

где l и μ — зазор и коэффициент преломления среды между пластинами интерферометра, а θ — угол падения лучей, пересчитываемый в радиус интерференционного кольца. Идея сканирующего интерферометра состоит в изменении величины правой части выражения (1). И хотя впервые возможность механического перемещения пластин ИФП была реализована еще в 1920-х гг., в наблюдениях сперва использовали более надежные схемы — наклон интерферометра к лучу зрения или же изменение давления, а следовательно, и μ среды, в которую помещен эталон. Подробное описание истории развития различных технических решений, завершившейся применением пьезоэлектрических сканирующих систем, обеспечивающим контролируемое изменение l , приведено в работе Atherton (1995).

*E-mail: moisav@sao.ru

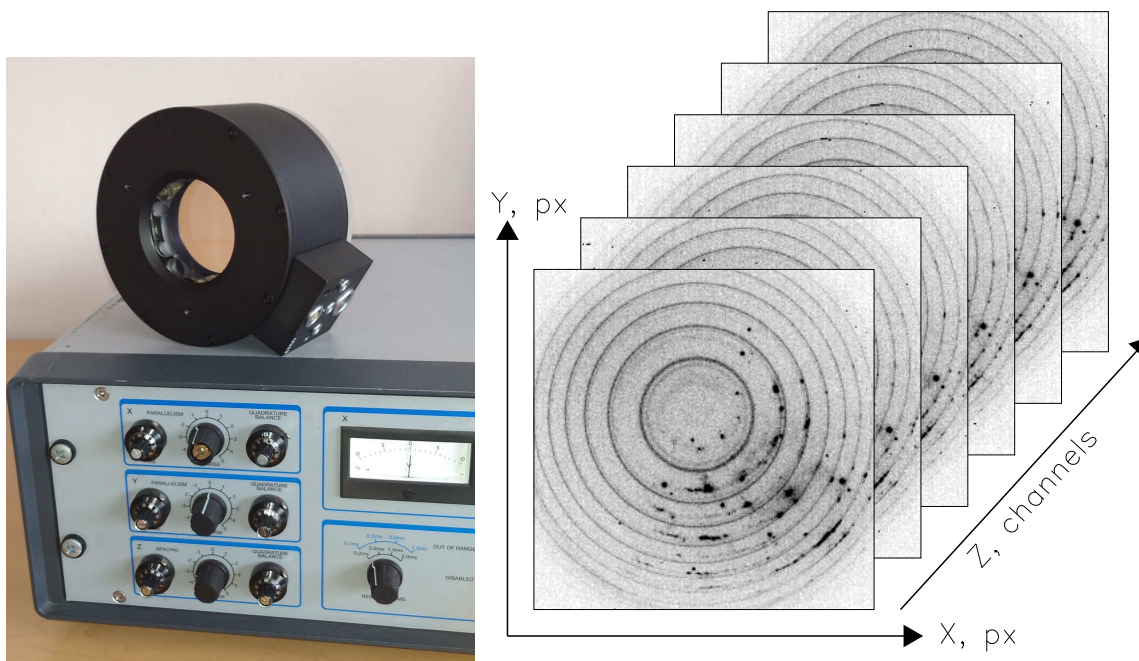


Рис. 1. Слева: сканирующий ИФП ET50-FS-100 и контроллер CS100, используемые в наблюдениях на 6-м телескопе. Справа: исходный куб «сырых» интерферограмм, полученных со SCORPIO-2 в феврале 2020 г. в линии H α ; показан каждый шестой канал. Кольца равномерной яркости — эмиссионные линии ночного неба в разных порядках интерференции. Видны области H II галактики NGC 4535.

В 1969 г. на 2.1-м телескопе обсерватории Kitt Peak с помощью ИФП, на котором сканирование осуществляется изменением давления, были выполнены наблюдения движений ионизованного газа в линии H α в галактике M 51. Детектором являлись фотопластинки, которые затем сканировались на микроденситометре. В результате удалось построить набор спектров эмиссионной линии, заполняющих изображение этой галактики (Tully 1974). Сходные принципы применялись в приборе «Galaxymetr», использовавшимся для построения полей скоростей газа в галактиках различных типов (de Vaucouleurs and Pence 1980).

С этих наблюдений берет начало оптическая панорамная (называемая также 3D) спектроскопия, оперирующая понятием «куба данных» в пространстве (x, y, λ) . Здесь длины волн λ (или доплеровские скорости в определенной спектральной линии) являются третьей (спектральной) координатой. По способу регистрации куба данных спектрографы делятся на два основных типа (Monnet 1995): с одновременной и последовательной регистрацией. В полевых (integral-field spectrographs — IFS) спектрографах одновременно регистрируются спектры от всех пространственных элементов, конструктивно выполненных в виде матрицы микролинз (Bacon et al. 1995), пучка световолокон (Agribas et al. 1991) или системы зеркал — резателей изображений (Bacon et al.

2014, Weitzel et al. 1996). Для решения спектрофотометрических задач оптимальной оказалась комбинация микролинз и световолокон (Courtes 1982), впервые реализованная в спектрографе MPFS на 6-м телескопе САО РАН (Afanasiev et al. 2001; 1990b).

В спектрометрах с последовательной регистрацией (ИФП и Фурье-спектрографы) третья координата в кубе данных появляется благодаря дополнительным экспозициям. В случае сканирующего ИФП речь идет о наборе интерферограмм, полученных при изменении оптического пути l_m между зеркалами (рис. 1). В этом случае возможно, хотя и в узком спектральном диапазоне, обеспечить большое поле зрения в комбинации с высоким спектральным разрешением. Последнее важно для изучения дисперсии лучевых скоростей газа по уширению эмиссионных линий в областях звездообразования (Melnick et al. 1987, Roy et al. 1986).

До конца прошлого века с помощью сканирующих ИФП было исследовано едва ли не больше туманностей и галактик, чем всеми остальными методами 3D-спектроскопии. Отметим вклад таких систем, как TAURUS (Taylor and Atherton 1980), TAURUS-2 (Gordon et al. 2000), HIFI (Bland and Tully 1989) и CIGALE (Boulesteix et al. 1984), работающих на телескопах диаметром от 3 метров. К сожалению, перечисление всех приборов и результатов выходит за рамки данного обзора. Отметим

Таблица 1. Системы со сканирующим ИФП на крупных и средних телескопах

Telescope/Device	FOV'	\mathcal{R}	Detector	References
10.4-m GTC/OSIRIS	8	400–800 ¹	CCD	González et al. (2014)
10-m SALT/RSS	8	1 500	CCD	Mitchell et al. (2015)
6.5-m Magellan/MMTF	27	400–1 000 ¹	CCD	Veilleux et al. (2010)
6-m BTA/SCORPIO-2	6.1	500 ¹ , 4 000, 16 000	CCD	Afanasiev and Moiseev (2011)
4.2-m WHT/GH α FaS	4.7	15 000	IPCS	Hernandez et al. (2008)
4.1-m SOAR/SAM-FP	3	11 000	CCD	Mendes de Oliveira et al. (2017)
2.5-m SAI MSU/MaNGaL	5.6	500 ¹	CCD	Moiseev et al. (2020)
2.1-m OAN/PUMA	10	16 000	CCD	Rosado et al. (1995)

¹ режим перестраиваемого фильтра

лишь две важные тенденции. Во-первых, необходимость выполнять сканирование в меняющихся атмосферных условиях делает выгодным стратегию многократного повторения циклов интерферограмм с короткими экспозициями. В таком случае эффективно себя показывают системы счета фотонов (Image Photon Counting System — IPCS), которые в других областях спектроскопии вытеснены ПЗС-матрицами с более высокой квантовой эффективностью. Во-вторых, сейчас сканирующие ИФП заметно менее популярны, сравнительно с IFS. Это связано как со значительно большей универсальностью последних при наблюдениях в небольших (менее 1') полях зрения, так и с тем, что данные, получаемые с ИФП, часто считаются слишком «сложными и непривычными» с точки зрения анализа и интерпретации, сравнительно с классической спектроскопией¹. Тем не менее в областях своей специализации, таких, как исследование кинематики и морфологии ионизованного газа, с ИФП возможно выполнять массовые однородные обзоры. Например, в ходе проекта GHASP была исследована кинематика 203 спиральных и иррегулярных галактик (Erinat et al. 2008).

В таблице 1 приводятся характеристики современных систем на базе сканирующих ИФП на телескопах средних и больших диаметров, результаты работы которых были опубликованы в последние годы: название телескопа и прибора, поле зрения, спектральное разрешение $\mathcal{R} = \lambda/\delta\lambda$, тип детектора и ссылка на описание. К сожалению, современный список содержит меньше позиций, чем аналогичный, составленный более 30 лет назад (Bland and Tully 1989), хотя ряда перечисленных

в таблице 1 телескопов тогда еще не было. Более того, на момент написания данного обзора, согласно информации на сайтах соответствующих обсерваторий, часть перечисленных в таблице инструментов находится на реконструкции (система на SALT), либо выведена из эксплуатации (MMTF). Третью списка составляют ИФП низкого спектрального разрешения, работающие в режиме перестраиваемого фильтра (tunable filters) с шириной полосы 10–20 Å: здесь куб данных обычно содержит только несколько каналов (изображения в эмиссионной линии и в близком континууме).

Из таблицы 1 следует, что 6-м Большой Азимутальный Телескоп Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (БТА САО РАН) остается крупнейшим в мире телескопом, на котором регулярно проводятся наблюдения методом 3D-спектроскопии со сканирующим ИФП высокого ($\mathcal{R} > 10\,000$) спектрального разрешения. Кроме того, здесь доступны варианты интерферометров низкого ($\mathcal{R} < 1\,000$) и умеренного ($\mathcal{R} \sim 5\,000$) разрешения. Неудивительно, что такой широкий набор возможностей для наблюдений вместе с более чем сорокалетней историей этого метода на 6-м телескопе способствовали выполнению множества интересных работ по исследованию межзвездной среды как в Галактике, так и за ее пределами. Ниже будет рассмотрена история смены поколений приборов, использующих сканирующие ИФП на 6-м телескопе, и характеристики этого метода в составе прибора SCORPIO-2 (раздел 2). Далее, после обсуждения особенностей обработки и анализа данных (раздел 3) рассматриваются конкретные опубликованные результаты, касающиеся изучения кинематики различных типов галактик (раздел 4) и воздействия

¹Мы не рассматриваем здесь инструменты солнечных телескопов, где роль ИФП весьма значительна.

звздообразования на межзвездную среду на шкалах от нескольких парсек до десятка килопарсек (раздел 5). В Заключении (раздел 6) обсуждаются дальнейшие перспективы этого метода на нашем телескопе.

2. ИСТОРИЯ ИФП НА БТА

Идея применения на телескопе укорачивающей фокус оптической системы (фокального редуктора) предложена и реализована Г. Куртесом еще в 1950–60 гг. (Courtès 1960). Фокальный редуктор обеспечивает оптимальное соответствие угловых размеров изображений звезд и элементов детектора, увеличивает эквивалентную светосилу, что важно для исследования протяженных объектов. Оптика редуктора дает возможность установки в параллельном пучке между коллиматором и камерой диспергирующего элемента (гризм или ИФП), что превращает редуктор в многорежимный спектрограф. На 6-м телескопе изучение движений ионизованного газа в галактиках с помощью ИФП было начато группой из Марсельской обсерватории во взаимодействии с коллегами из САО РАН с помощью гостевого редуктора, обеспечивающего в первичном фокусе эквивалентную светосилу $F/1.5$ – $F/1.6$. Первые интерферограммы галактики NGC 925 были получены напрямую на фотопластинки 28 октября 1978 г.; в наблюдениях в сентябре 1979 г. перед фотокассетой был установлен двухкаскадный электронно-оптический преобразователь производства RSA. На основе полученных данных было построено поле лучевых скоростей в линии $H\alpha$. Несмотря на усреднение наблюдаемых скоростей в довольно крупных «пикселях» размером $14'' \times 14''$, удалось не только построить кривую вращения галактики, но и оценить возмущения в движении газа, вносимые спиральной волной плотности (Marcelin et al. 1982). В октябре 1980 г. и январе 1981 г. были получены первые интерферограммы эмиссии ионизованного газа в M 33, NGC 925 и VV 551 с помощью марсельского ИПС «COLIBRI» (от «Comptage linéaire de Brilliance», Boulesteix et al. 1982). По четырем интерферограммам было построено поле скоростей спиральной галактики NGC 2403 и ее кривая вращения (Marcelin et al. 1983).

С 1985 г. в САО РАН на основе коммерческих фотообъективов был создан фокальный редуктор для интерферометрических наблюдений, дающий эквивалентную светосилу $F/2.2$. ИФП с пьезоэлектрическим сканированием фирмы Queensgate Instruments Ltd. (Англия) был приобретен в рамках совместного проекта с CNRS (Франция). В качестве детектора использовался счетчик фотонов КВАНТ (Afanasiev et al. 1987) форматом 512×512 элементов с масштабом $0.46''/\text{px}$. Вся эта система,

детально описанная в работе Dodonov et al. (1995), в публикациях обычно именовалась SIGALE (от «Cinématique des Galaxies») в честь её прототипа — автоматизированного редуктора со сканирующим ИФП и ИПС, созданного марсельской группой для 3.6-м телескопа CFHT (Boulesteix et al. 1984). По-видимому, первой публикацией, основанной на результатах наблюдения SIGALE на 6-м телескопе, является исследование кинематики активной галактики Mrk 1040 (Afanasiev et al. 1990a). Счетчик фотонов КВАНТ был в 1997 г. заменен ПЗС-матрицей с низким шумом считывания, форматом $1 \text{ K} \times 1 \text{ K}$.

Также в рамках франко-советского сотрудничества были налажены наблюдения со сканирующим ИФП на 2.6-м телескопе Бюраканской астрофизической обсерватории (БАО) в Армении (Boulesteix et al. 1987). Первоначально французские коллеги привозили туда оригинальную систему SIGALE с CFHT, также побывавшую и на 6-м телескопе. Позже для 2.6-м телескопа был собран новый редуктор, а в качестве детектора применялась ПЗС со сдвигом изображения на закрытую половину чипа. При этом как сами ИФП, так и набор разделяющих светофильтров часто путешествовали из одной обсерватории в другую, по разные стороны Кавказского хребта. С 1991 г. речь шла уже о поездках между разными странами. В начале 2000-х годов по договоренности с коллегами из БАО интерферометр высокого разрешения и фильтры были переданы в САО РАН для проведения совместных исследований (см. раздел 5).

Несмотря на такие недостатки, как плохое качество изображений на краю поля зрения, невысокое пропускание оптики и отсутствие автоматизации, описанный выше фокальный редуктор использовался на БТА более десяти лет, пока не встал вопрос о его коренной модернизации. В 1999 г. в САО РАН под руководством В. Л. Афанасьева и при участии автора обзора были начаты работы по созданию нового редуктора светосилы SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005), увидевшего «первый свет» 21 сентября 2000 г.

SCORPIO² представлял собой многорежимный прибор, в котором ИФП являлся лишь одним из вариантов наблюдений наряду с прямыми снимками, спектроскопией с гризмами и спектрополяризацией. Эквивалентная светосила в первичном фокусе БТА — $F/2.6$ (первоначальная светосила до замены оптики в 2003 г. составляла $F/2.9$). В качестве детектора до 2003 г. использовалась ПЗС-матрица ТК1024, размером 1024×1024 , позже замененная на EEV 42-40

²После реконструкции, проведенной в 2019 г., прибор продолжил работу на БТА под названием SCORPIO-1.

форматом 2048×2048 пикселей. Поле зрения при этом изменилось незначительно (с $5'.4$ до $6'.1$), так как геометрический размер пикселя у данных ПЗС составлял 24 и 13.5 мкм соответственно. Обычно наблюдения с ИФП проводятся в режиме аппаратного биннинга с целью уменьшения времени считывания и повышения отношения S/N . В случае EEV 42-40 в основном применялся биннинг 4×4 или 2×2 px, что соответствует масштабу $0''.72$ и $0''.36$.

Универсальность прибора, высокая квантовая эффективность, возможность быстрой смены программы наблюдений в зависимости от текущих атмосферных условий привели к тому, что начиная с 2006 г. около 50% всех ночей на 6-м телескопе распределяются для наблюдений, выполняемых с помощью SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2011). Однако за более чем десять лет работы прибор заметно устарел, запросы и пожелания наблюдателей также постоянно росли. Поэтому под руководством В. Л. Афанасьева в CAO РАН был разработан новый фокальный редуктор SCORPIO-2, первые наблюдения с которым состоялись 22 июня 2010 г.

С 2013 г. наблюдения с ИФП на БТА проводятся только в составе SCORPIO-2. Прибор имеет ту же эквивалентную светосилу. В качестве детектора до 2020 г. применялась ПЗС E2V 42-90 форматом 4612×2048 с тем же размером пикселя 13.5 мкм, что сохраняло тот же угловой масштаб изображений, что и на старом SCORPIO. С 2020 г. начаты наблюдения с новой камерой на базе ПЗС E2V 261-84 форматом 4096×2048 с физическим размером пикселя 15 мкм, что дает масштаб $0''.8$ и $0''.4$ в режимах считывания с биннингом 4×4 и 2×2 соответственно. С обоими «прямоугольными» ПЗС полный формат детектора используется только при наблюдениях в спектральных режимах, а в случае ИФП или прямых снимков вырезается квадратный фрагмент 2048×2048 px.

Все перечисленные выше ПЗС-камеры с азотным охлаждением изготовлены в лаборатории перспективных разработок CAO РАН, последняя версия этих камер описана в работе Ardilanov et al. (2020).

2.1. Набор ИФП в CAO РАН

Список сканирующих пьезоэлектрических интерферометров типа ET50-FS-100 (световой диаметр 50 мм), доступных для наблюдений со SCORPIO-2, дан в таблице 2. Здесь: n — порядок интерференции по центру поля зрения для наблюдений в несмещенной линии $H\alpha$; $\Delta\lambda = \lambda/n$ — расстояние между соседними порядками, определяющее свободный спектральный диапазон; $\delta\lambda$ —

Таблица 2. Параметры сканирующих ИФП в SCORPIO-2 (для $\lambda = 6563 \text{ \AA}$)

	IFP20	IFP186	IFP751	IFP501
n	20	188	751	501
$\Delta\lambda, \text{ \AA}$	328	34.9	8.7	13.1
$\delta\lambda, \text{ \AA}$	13	1.7	0.44	0.80
F	25	21	20	16
n_z	—	40	40	36

полуширина аппаратного контура, которая определяет спектральное разрешение; $F = \Delta\lambda/\delta\lambda$ — добротность (finesse), в первую очередь, зависит от характеристик отражающих покрытий зеркал интерферометра; n_z — число каналов, на которое разбивается свободный спектральный интервал, задающее размерность куба данных по «спектральной» координате. Интерферометр самого низкого порядка (IFP20) используется для наблюдений в режиме перестраиваемого фильтра, когда выполняется сканирование только небольшой части от $\Delta\lambda$, поэтому параметр n_z здесь неактуален. Подробнее об этом виде наблюдений см. Moiseev et al. (2020).

Интерферометры IFP751, IFP186 и IFP20 изготовлены для CAO РАН английской фирмой IC Optical Systems Ltd.³ (бывшая Queensgate Instruments) в 2009, 2012 и 2016 гг. соответственно. Интерферометр IFP501 использовался для наблюдений в системе SIGALE еще в 80–90 г. прошлого века, а после — в SCORPIO. Он все еще в рабочем состоянии, но IFP751 предпочтительнее для большинства задач, решаемых с высоким спектральным разрешением. Старый интерферометр, работающий в $n(H\alpha) = 235$, применявшийся в SIGALE и SCORPIO, сейчас неработоспособен и заменен на IFP186.

Необходимость работать с разными n вызвана двумя основными причинами. Во-первых, как и в случае с классической спектроскопией, низкое разрешение — это возможность добиться с теми же экспозициями большего отношения S/N в каждом спектральном канале, т.е. наблюдать более слабые объекты, чем с высоким разрешением. Но, когда линия объекта практически совпадает по длине волны с линиями излучения ночного неба, более высокое разрешение может стать актуальным. Во-вторых, так как технически сложно добиться $F > 30$, для достижения высокого спек-

³<https://www.icopticalsystems.com/>

трального разрешения $\delta\lambda$ требуются высокие порядки интерференции n :

$$\mathcal{R} = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda F}{\Delta\lambda} = nF.$$

Это, в свою очередь, приводит к уменьшению расстояния между соседними порядками $\Delta\lambda$, ограничивая доступный для однозначного измерения диапазон скоростей. Так, IFP751 обеспечивает в линии $H\alpha$ инструментальный контур с $FWHM \approx 20 \text{ км с}^{-1}$, что позволяет изучать распределение дисперсии скоростей и многокомпонентную структуру эмиссионных линий в областях звездообразования (раздел 5). При этом рабочий диапазон наблюдаемых скоростей составляет всего $\Delta v \approx 390 \text{ км с}^{-1}$, что меньше разброса скоростей во взаимодействующих или активных галактиках. Поэтому, используя только данные интерферометра, мы уже не можем отличить линию на длине волны λ от компонента с доплеровским смещением $\lambda + \Delta\lambda$. Иногда это удается сделать с привлечением дополнительной информации, например, длиннощелевой спектроскопии. Зато с IFP186 ($\Delta v \approx 1600 \text{ км с}^{-1}$) интерпретация таких кинематических компонент будет практически однозначной, но ценой потери разрешения (здесь $FWHM \approx 77 \text{ км с}^{-1}$).

Дополнительная проблема при наблюдениях со сканирующим ИФП возникает в «красном» спектральном диапазоне, где разница длин волн между яркими близкими линиями ионизованного газа составляет около 15 \AA , что меньше $\Delta\lambda$ для $n > 400$. Речь идет о системах линий $H\alpha + [N II]\lambda 6548, 6583$ и $[S II]\lambda 6716, 6731$. Поскольку узкополосные фильтры с $FWHM = 12\text{--}25 \text{ \AA}$, описанные в следующем разделе, не полностью подавляют излучение соседних линий, важно, чтобы разница длин волн линий различалась на не целое число $\Delta\lambda$. Оптимальным является разделение линий с длинами волн λ_1 и λ_2 на полпорядка, т.е. условие:

$$|\lambda_2 - \lambda_1| = (0.5 + k)\Delta\lambda = (0.5 + k)\frac{\lambda_1}{n}, \quad (2)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$. Рисунок 2 иллюстрирует проблему выбора n для оптимального разделения всех перечисленных выше пар близких спектральных линий, которым соответствуют различные наклонные линии на графике. Понятно, добиться идеального выполнения соотношения (2) для всех пар невозможно, но если задаться более мягким критерием — разделением линий в пределах $(0.3\text{--}0.7)\Delta\lambda$, то ему удовлетворяют несколько диапазонов значений n . Первый соответствует $k = 0$ и $n \approx 150\text{--}200$. Параметры IFP186 были выбраны, исходя из этого критерия. Следующая «оптимальная» область с $n \approx 750$ соответствует интерферометру IFP751. В

третьей области с $n \approx 1100$ почти для всех выбранных пар линий выполняется «жесткий» критерий (2). С такими интерферометрами ($n = 1051, 1353$) выполнялись первые наблюдения на БТА (Marcelin et al. 1982). Но при этом $\Delta v < 300 \text{ км с}^{-1}$ в линии $H\alpha$, что слишком мало для многих задач внегалактической астрономии. Кроме того, поскольку с ростом \mathcal{R} уменьшается ширина интерференционных колец, необходимо следить, чтобы по всему полю зрения кольца уверенно разрешались элементами детектора.

Разумеется, оптимальным было бы использование единственного ИФП, позволяющего точно менять зазор между пластинами от 10 до 500 мкм, что перекрывает весь требуемый диапазон n . К сожалению, это невозможно для доступных на рынке пьезоэлектрических интерферометров, а лабораторные разработки не были завершены (Marcelin et al. 2008).

2.2. Узкополосные фильтры

В соответствии с выражением (1), в случае монохроматического излучения в каждом пикселе интерферограммы присутствует сигнал на длинах волн, соответствующих разным порядкам интерференции, так что $n\lambda = \text{const}$. При рассмотрении куба данных это означает «упаковку» излучения с разными длинами волн внутри узкого спектрального интервала (см. рис. 3, а также Fig. 2 в статье Daigle et al. 2006). Поэтому необходимо выделить изучаемый спектральный интервал, чтобы уменьшить паразитную засветку от изучаемого объекта, а также от линий ночного неба. Идеальным решением было бы применение узкополосного фильтра с прямоугольным профилем пропускания шириной $\Delta\lambda$, центрированного на требуемую эмиссионную линию. Близкой к этому идеальному варианту является система двух ИФП с сильно различающимися порядками интерференции, настроенными так, чтобы при сканировании их пики пропускания всегда совпадали на требуемой длине волны. Спектральное разрешение задается интерферометром с большим зазором ($n \approx 200\text{--}1000$), а свободный спектральный интервал определяется интерферометром с $n = 10\text{--}30$. Последнее дает для линии $H\alpha$ $\Delta\lambda = 200\text{--}600 \text{ \AA}$. Выделение столь широкой полосы не представляет проблем для современных среднеспосных интерференционных фильтров и практически реализовано в случае ИФП в режиме перестраиваемого фильтра (Moiseev et al. 2020, Veilleux et al. 2010). Системы на базе сдвоенных ИФП давно и эффективно работают на солнечных телескопах (см., к примеру, Kentischer et al. 1998) и даже применялись для наблюдений ярких комет (Morgenthaler et al. 2001).

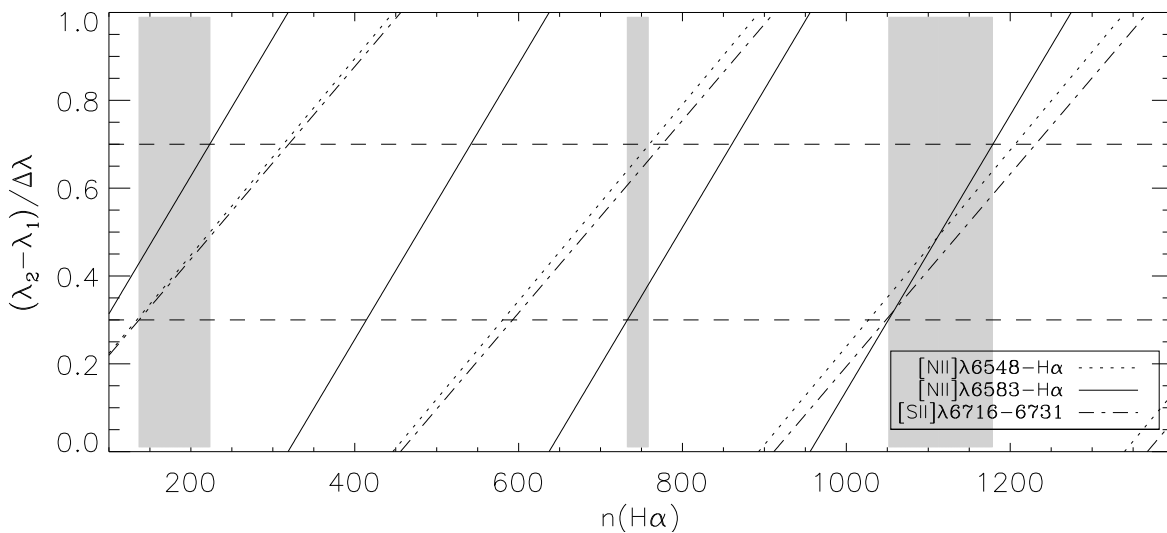


Рис. 2. График изменения относительного расстояния между близкими линиями в зависимости от порядка интерференции (на длине волны $\text{H}\alpha$). Линиями различного типа показаны разные варианты пар $\lambda_1 - \lambda_2$. Горизонтальными штрихами выделена область «хорошего разделения», где наблюдаемое расстояние между линиями лежит в диапазоне $(0.5 \pm 0.2)\Delta\lambda$. Серая заливка соответствует диапазонам n , где данное условие выполняется.

К сожалению, автору не известны результативно работающие системы для ночных наблюдений с помощью сдвоенного сканирующего ИФП, хотя соответствующие проекты неоднократно анонсировались (Marcelin et al. 2008, Rangwala et al. 2008). В качестве частичного исключения можно рассматривать прибор WHAM, применявшийся для исследованию диффузного газа как Млечного Пути (Haflner et al. 2003), так и Большого Магелланового Облака (Ciampa et al. 2021). Высокое спектральное разрешение и чувствительность достигаются с помощью двух эталонов Фабри–Перо с фиксированным зазором, но низкое угловое разрешение (1°) не позволяет использовать его для исследования большинства галактик и туманностей.

Простым и распространенным решением для выделения требуемого участка спектра является применение узкополосных фильтров с полосой пропускания $FWHM \gtrsim \Delta\lambda$. Но при этом возникает сразу несколько причин, ограничивающих эффективность наблюдений. Во-первых, для выделения эмиссионных линий галактик в заданном диапазоне красных смещений необходим набор фильтров с перекрывающимися кривыми пропускания, центрированных на соответствующие системные скорости. Во-вторых, изготовление интерференционных фильтров достаточно большого диаметра с шириной полосы несколько нанометров, имеющих пропускание в максимуме не ниже 70–80%, сопряжено с рядом технических трудностей. Такие фильтры предлагаются лишь несколькими производителями в мире и весьма дороги. Набор из 10–15 таких фильтров близок по стоимости к ска-

нирующему ИФП с тем же световым диаметром. В-третьих, профиль пропускания таких фильтров, как правило, близок к гауссову. Это может приводить к существенным вариациям пропускания внутри рабочего спектрального диапазона, а также к паразитной засветке из соседних порядков интерференции в крыльях профиля пропускания фильтра. Отметим также, что длина волны максимума пропускания узких фильтров заметно (в единицах $FWHM$) меняется с температурой окружающей среды.

Линии наблюдаемого объекта, «приходящие» из соседних порядков интерференции, часто рассматриваются наблюдателями как мешающий фактор. Автору известны статьи, в которых исследователи ошибочно принимали эмиссию $[\text{N II}]$ из других порядков за вторую подсистему ионизованного газа в линии $\text{H}\alpha$. С другой стороны, если при выборе параметров интерферометра соблюдалось условие (2), а эмиссионные линии в исследуемом объекте достаточно узкие для их уверенного разделения, то возникает возможность исследования кинематики газа сразу в двух эмиссионных линиях. В случае $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$ речь идет о линиях с разным механизмом возбуждения. Становится возможным исследовать эффекты, связанные с ударными волнами, за фронтом которых возможно усиление наблюдаемого свечения в запрещенных линиях азота относительно линий серии Бальмера. Поэтому распределение яркости и лучевых скоростей в этих линиях могут различаться. Рисунок 3 показывает пример одновременного наблюдения линий азота и водорода в галактике NGC 1084 (см. также раздел 5). Такой режим наблюдений актуален и

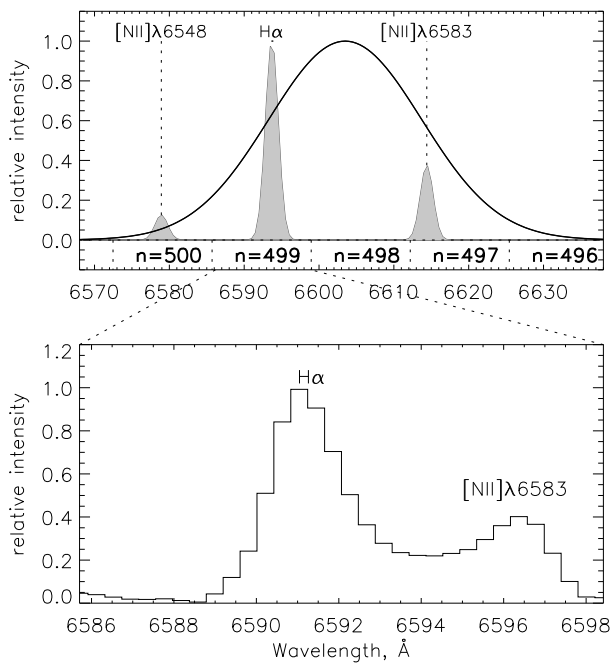


Рис. 3. Линии ионизованного газа в галактике NGC 1084 (Moiseev 2000). Вверху: схема взаимного расположения в шкале длин волн линий $H\alpha$ + $[N II]$ (серая заливка) и узкополосного фильтра (жирная линия). Подписаны порядки интерференции ($n = \dots$), разделенные интервалами $\Delta\lambda$. Внизу: наблюдаемый с ИФП спектр.

при исследовании ионизованного газа в галактиках ранних типов, в центральных областях которых линия $H\alpha$ скрывается в мощной абсорбционной подложке от спектра звездного населения, тогда как $[N II]$ продолжает быть видимой. В то же время в областях $H II$ на периферии звездного диска линия $H\alpha$ значительно ярче, чем $[N II]$. Пример одновременного построения полей лучевых скоростей в этих линиях для галактики NGC 7742 приводится в работе Sil'chenko and Moiseev (2006).

С имеющимися в SCORPIO-2 фильтрами для наблюдений доступны объекты с лучевыми скоростями от -200 до $13\,500$ км с $^{-1}$ в линии $H\alpha$ до примерно $6\,000$ км с $^{-1}$ в линии $[S II]\lambda 6717$ и примерно до $17\,000$ км с $^{-1}$ в $[O III]\lambda 5007$. Разумеется, с этим набором можно наблюдать и другие линии. Так, поле скоростей полярного кольца на $z = 0.06$ ($V_{\text{sys}} \approx 18\,000$ км с $^{-1}$) было построено в линии $H\beta$ (Finkelman et al. 2011). Актуальный список фильтров доступен на странице прибора⁴, там же можно получить последнюю версию программы для подбора оптимального фильтра на выбранную линию с учетом красного смещения и температуры воздуха.

Этот набор светофильтров собирался в САО РАН в течение многих лет, благодаря различ-

ным совместным программам и грантам. Начало коллекции было положено несколькими фильтрами для наблюдения вблизи линии $H\alpha$, предоставленными коллегами из БАО и изготовленными фирмой Barr Associates Inc. (США) по заказу Марсельской обсерватории. Этот набор был расширен фильтрами, изготовленными для САО РАН в НИИПП (г. Москва). В дальнейшем из разных источников приобретались фильтры производства Andover Corporation (США). К сожалению, через 15 лет использования покрытия фильтров НИИПП частично деградировали. Сейчас эти фильтры практически все заменены на аналоги от Andover Corporation. Большинство фильтров имеют световой диаметр 50 мм (2 дюйма) — распространенный стандарт у многих производителей. К сожалению, этого размера не хватает, чтобы перекрыть поле зрения по диагонали, поэтому в углах кадров имеет место виньетирование, заметное на интерферограммах на рис. 1. Хорошим компромиссом между размером и стоимостью являются квадратные фильтры с шириной стороны 50 мм, изготовленные в Custom Scientific, Inc. (США). Они практически полностью перекрывают поле зрения SCORPIO-2.

На основе опыта по разделению близких линий из соседних порядков, наша команда в САО РАН сейчас отдает предпочтение фильтрам с $FWHM \approx 30$ Å, что в два раза шире, чем те, с которыми начинались наблюдения на БТА с ИФП. Одно из преимуществ таких фильтров — близкий к прямоугольному профиль кривой пропускания, в отличие от гауссовского у более узких фильтров.

3. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Первичная обработка данных, получаемых со сканирующим ИФП, включает в себя как стандартные процедуры редукиции ПЗС-кадров (учет тока смещения, плоского поля и удаление следов космических частиц), так и специфические: поканальная фотометрическая коррекция, переход в шкалу длин волн с помощью учета фазового смещения. Основные принципы и алгоритмы достаточно подробно описаны в ряде работ: Bland and Tully (1989), Gordon et al. (2000), Moiseev (2002). Подробное описание пакета программ IFPWID, используемого для обработки наблюдений с ИФП на SCORPIO, дано в работе Moiseev and Egorov (2008); там же рассмотрена методика вычитания бликов, приводится оценка точности измерения лучевых скоростей и дисперсии скоростей с разными ИФП. Дополнительные процедуры, используемые для повышения точности построения шкалы длин волн с помощью « Λ -куба», описаны в статье автора обзора в 2015 г.

⁴<https://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/scorpio-2/>

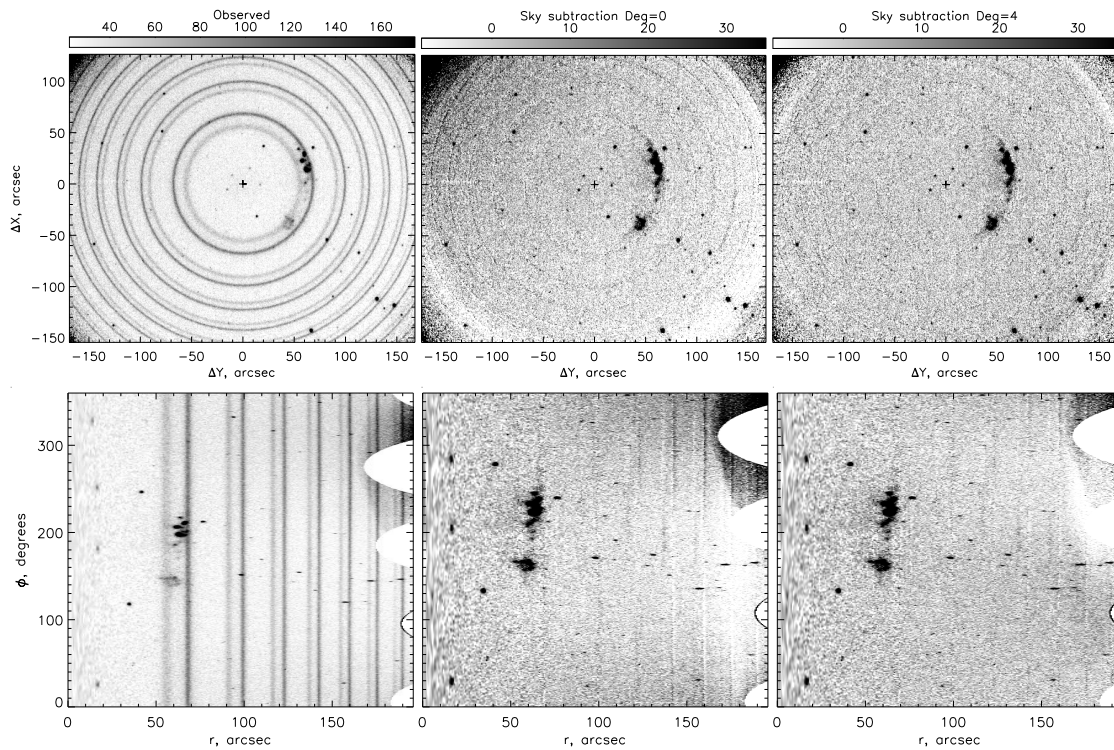


Рис. 4. Вычитание линий ночного неба на примере наблюдений галактики UGC 4115. Верхний ряд — наблюдаемые кадры, нижний — они же в полярной системе координат (r, ϕ) . Слева направо: исходная интерферограмма, вычитание неба при простом усреднении (полиномом степени 0) и при описании линий неба полиномом 4-й степени.

3.1. Вычитание фона неба

Рассмотрим подробнее процедуру вычитания фона ночного неба в пакете IFPWID, в которую были внесены некоторые важные модификации, не описанные в статьях 2002–2015 гг. При наблюдениях с системой счета фотонов вариации яркости фона (эмиссионные линии верхней атмосферы Земли, рассеянный свет Луны и т.д.) усредняются в итоговом кубе благодаря многократному повторению циклов сканирования с короткими (10–30 с) временами накоплений отдельных интерферограмм. Это позволяет производить его вычитание из спектров, переведенных в шкалу длин волн, усредняя по площадкам, свободным от излучения объекта, подобно тому, как это обычно делается в классической спектроскопии. Такой принцип использовался в пакете ADHOC (J. Boulesteix), разработанном для обработки данных SIGALE. Современные модификации этого алгоритма описаны Daigle et al. (2006). Но в наблюдениях с ПЗС ненулевые шум и время считывания требуют экспозиций длительностью несколько минут. Здесь уже нельзя пренебречь вариациями фона внутри полученного куба, его необходимо вычитать в каждом кадре еще до перехода в шкалу длин волн, усредняя эмиссию неба по азимутальному углу φ в концентрических кольцах (Moiseev 2002). Важно

точно определять центр системы интерференционных колец от линий неба. В пакете IFPWID предусмотрен режим автоматического поиска центра по минимуму отклонений усредненного профиля фона от наблюдаемого.

При наблюдениях объектов низкой яркости становятся существенными отклонения картины фона от простой концентрической модели из-за вариаций по полю аппаратного контура, связанного с aberrациями оптики, настройками ИФП, наклоном детектора и т.п. Отклонения возрастают к краю поля зрения, где интерференционные кольца тоньше, и важно как можно более точно построить модель фона. Ранее нами применялась методика усреднения фона в отдельных секторах по углу φ . Она работает хорошо для объектов, занимающих небольшое поле зрения (Moiseev and Egorov 2008). Лучший результат дает построение модели фона в полярной системе координат. Здесь интенсивность фона на данном радиусе r может быть представлена в виде простой функции $I_r(\varphi)$. На рис. 4 показаны примеры описания этой функции полиномом, где нулевая степень соответствует простому азимутальному усреднению $I_r(\varphi) = const$. Видно, что полином 4-й степени позволяет добиться лучшего результата вычитания фона.

В настоящий момент в связи с ростом числа задач по наблюдениям объектов, занимающих все поле зрения прибора (построение мозаик для близких галактик и т.п.), мы работаем над моделированием точного распределения интенсивности эмиссионных линий неба с учетом вариации аппаратного контура. Подобный подход применялся, например, для данных IFS MUSE (Soto et al. 2016, Streicher et al. 2011).

3.2. Представление и анализ куба данных

Проблема оптимальной визуализации и представления кубов данных как в процессе анализа, так и в публикациях, является общей для всех методов 3D-спектроскопии. Несмотря на известный прогресс в динамической визуализации «объемных» спектральных данных (Punzo et al. 2015), для их интерпретации и объяснения полученных результатов коллегам удобнее оперировать двумерными картами и графиками. Специфика кубов данных ИФП (большое поле зрения и малая протяженность по спектральной координате) позволяет использовать методы визуализации, сходные с теми, что применяются при анализе радионаблюдений молекулярного и атомарного газа. Рисунок 5 демонстрирует это на примере карликовой галактики NGC 428, исследованной с ИФП на SCORPIO-2 (Egorova et al. 2019). Поканальные карты позволяют увидеть пространственное расположение областей с разной кинематикой. Диаграмма «позиция–скорость» ($P-V$) концентрирует внимание на лучевых скоростях и форме спектральных линий вдоль заданного направления. Карта распределения яркости в эмиссионной линии $H\alpha$ полезна для выделения отдельных областей $H II$, профили которых можно рассматривать индивидуально. Распределение лучевых скоростей (поле скоростей) может описываться теми или иными модельными приближениями (раздел 4.1), а карта дисперсии лучевых скоростей σ позволяет изучить турбулентные движения газа (раздел 5). Для получения таких карт профиль спектральной линии подгоняется функцией Фойгта, представляющей собой свертку профилей Лоренца (описывающего инструментальный контур ИФП) и Гаусса (аппроксимация исходного профиля, не уширенного прибором). Ширина инструментального контура определяется по линиям калибровки. Подробнее методика построения карт дисперсии скоростей, свободных от аппаратного уширения, описана Moiseev and Egorov (2008).

3.3. Наблюдения в линиях поглощения

Выше обсуждалось только применение сканирующего ИФП для 3D-спектроскопии эмиссионных линий ионизованного газа. Это наиболее популярное приложение для данной техники. В то же

время, очевидна возможность использовать ИФП для панорамных наблюдений в линиях поглощения. Определенную проблему составляют переналоженные сигналы из соседних порядков и модуляция, вносимая в наблюдаемый спектр узкополосным фильтром (раздел 2.2). Поэтому важно, чтобы изучаемая спектральная линия была достаточно контрастна и не имела бленд внутри свободного спектрального диапазона ИФП. В 1990-х годах на 1.5-м и 4-м телескопах Cerro Tololo Inter-American Observatory была выполнена серия успешных массовых наблюдений звезд в шаровых скоплениях (Gebhardt et al. 1995) и избранных площадок в направлении на бар Млечного Пути (Rangwala et al. 2009) с помощью ИФП в линии $Ca II \lambda 8542$. В последнем случае удалось измерить как лучевые скорости, так и оценить металличность по EW ($Ca II$) более чем 3000 звезд. В тот момент этот метод являлся серьезным конкурентом мультиобъектной спектроскопии в данном конкретном приложении. С аналогичной техникой на 0.9-м телескопе той же обсерватории было получено поле лучевых скоростей звездного компонента и измерена угловая скорость вращения бара в галактике раннего типа NGC 7079 (Debattista and Williams 2004). Отметим работу этого же коллектива на телескопе CFHT, где сканирующий ИФП сочетался с системой адаптивной оптики (Gebhardt et al. 2000) для исследования динамики звезд в центре шарового скопления M 15.

В связи с отсутствием фильтров для выделения красной линии кальция на 6-м телескопе со SCORPIO мы пробовали измерять скорости звезд в скоплениях по абсорбции $H\alpha$. В тестовых наблюдениях шарового скопления M 71 одновременно были получены лучевые скорости около 700 звезд до $m_v \approx 18^m$ с точностью индивидуальных измерений 2–4 км с⁻¹ (Moiseev 2002). В дальнейшем этот метод применялся для измерения лучевых скоростей и выделения членов рассеянных скоплений Млечного Пути по заявке А. С. Расторгуева (ГАИШ МГУ). В 2002–2003 гг. такие измерения были выполнены для несколько скоплений. К сожалению, результаты не были доведены до публикации.

Мы также проводили на 6-м телескопе эксперименты по построению полей скоростей звезд в галактиках с помощью ИФП в линии $Ca II \lambda 6495$, но из-за малого контраста линии точность измерений была невысока. С другой стороны, отражающие покрытия IFP186 и IFP751 оптимизированы для наблюдений в том числе в области 8500–9500 Å, а новый детектор E2V 261-84 обладает относительно высокой чувствительностью в этом диапазоне при практически полном отсутствии муара (фрингов). Поэтому в случае приобретения соответствующих фильтров задачи по картированию

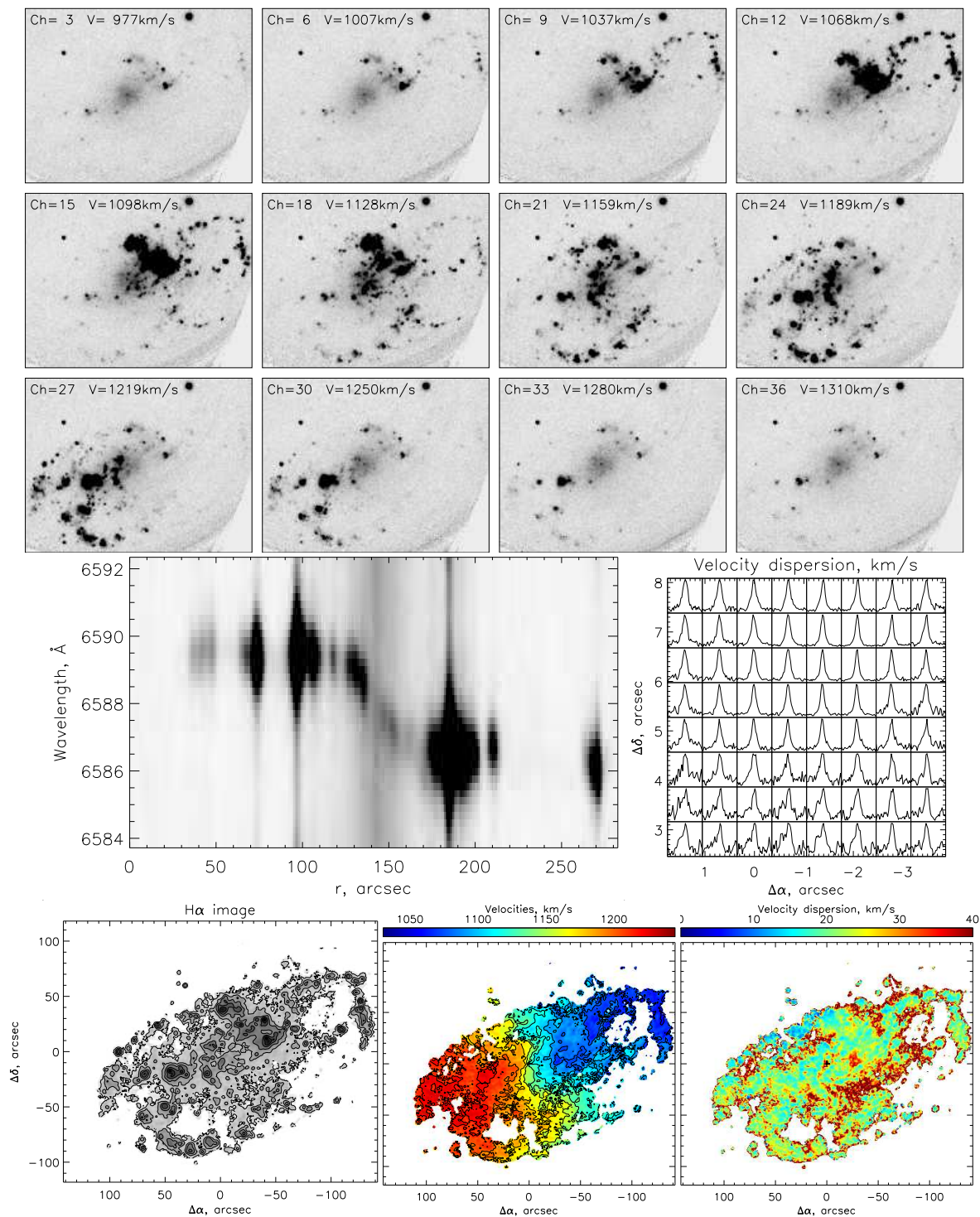


Рис. 5. Различные представления куба данных для галактики NGC 428. Вверху: поканальная карта. Показан каждый третий канал, указаны лучевые скорости. Посередине: PV-диаграмма вдоль большой оси галактики (слева) и примеры спектров эмиссионной линии H α вблизи ядра (справа). Внизу: карты, построенные в результате аппроксимации спектров профилем Фойгта: поток в эмиссионной линии, поле лучевых скоростей и дисперсии скоростей.

протяженных объектов в линиях триплета Ca II со SCORPIO-2 могут иметь интересные перспективы.

4. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ: ОБЪЕКТЫ С ДОМИНИРОВАНИЕМ КРУГОВОГО ВРАЩЕНИЯ

В этом разделе кратко обсуждаются исследования с ИФП на БТА тех галактик, в которых в наблюдаемой кинематике газа доминирует регулярное круговое вращение. Часто целью их изучения являлся поиск отклонений от этой симметричной картины. Поэтому сперва разберем используемые нами методы выделения круговой составляющей из наблюдательных данных.

4.1. Анализ полей скоростей вращающихся дисков

Наблюдаемая лучевая скорость точки, вращающейся по орбите, наклоненной к картинной плоскости на угол i , определяется выражением:

$$V_{\text{OBS}} = V_{\text{SYS}} + V_R \sin \varphi \sin i + V_\varphi \cos \varphi \sin i + V_Z \cos i, \quad (3)$$

где R, φ — радиальная и азимутальная координаты в плоскости орбиты, V_{SYS} — системная скорость, а V_φ, V_R, V_Z — соответственно азимутальная, радиальная и вертикальная составляющие вектора скорости.

Методы определения параметров, описывающих движения ионизованного газа в дисках галактик по данным 3D-спектроскопии, можно условно разделить на несколько групп:

1. Независимый поиск параметров из выражения (3) в узких кольцах поля скоростей вдоль радиуса — метод «наклонного кольца».
2. Гармоническое разложение распределения лучевых скоростей по азимутальному углу в узких кольцах.
3. Одновременная подгонка моделью всего поля лучевых скоростей. Возможно использование карты других моментов, определяемых по профилю линии (поверхностная яркость и дисперсия скоростей), или же результатов численных расчетов.
4. Модельное описание всего куба данных в заданной эмиссионной линии.

Рассмотрим их подробнее.

4.1.1. Поиск параметров в узких кольцах

Относящийся к первой группе метод «наклонного кольца» (tilted-ring) изначально был применен для анализа полей скоростей по радиоданным HI в линии 21 см (Rogstad et al. 1974). Классическое его описание, ставшее основой популярной процедуры ROTCUR, вошедшей в пакеты анализа радиоданных GIPSY и AIPS, дано в ряде работ Begeman (1989), Teuben (2002). Ниже кратко излагаются основы этой методики, адаптированной для анализа полей скоростей ионизованного газа (Moiseev 2014b, Moiseev et al. 2004).

В предположении чисто кругового вращения тонкого плоского диска ($V_R = V_Z = 0, V_\varphi = V_{\text{ROT}}$) выражение (3) трансформируется в:

$$V_{\text{OBS}}(r, PA) = V_{\text{SYS}} + V_{\text{ROT}}(R(r)) \times \frac{\cos(PA - PA_{\text{kin}}) \sin i}{(1 + \sin^2(PA - PA_{\text{kin}}) \text{tg}^2 i)^{1/2}}, \quad (4)$$

где r — видимое расстояние от центра вращения в картинной плоскости, PA — позиционный угол. Расстояние до центра вращения в плоскости галактики:

$$R(r) = r(1 + \sin^2(PA - PA_0) \text{tg}^2 i)^{1/2}. \quad (5)$$

В формуле (4) PA_{kin} и PA_0 — позиционные углы кинематической оси и линии узлов диска. В случае чисто круговых движений $PA_{\text{kin}} \equiv PA_0$. Наблюдаемое поле скоростей разбивается на эллиптические кольца, задаваемые уравнением (5) для $R = \text{const}$. В каждом кольце с помощью χ^2 -минимизации выполняется аппроксимация наблюдаемой зависимости $V_{\text{OBS}}(PA)$ модельной кривой (4). В результате на данном R получаем набор параметров, характеризующих ориентацию орбит (PA_{kin}, i), скорости кругового вращения и системную.

Если есть уверенность, что в плоскости диска нет сильных изгибов, то можно положить наклон и системную скорость независимыми от радиуса ($i = i_0, V_{\text{SYS}} = \text{const}$), в таком случае радиальные вариации PA_{kin} будут отражать особенности распределения некруговых компонент вектора скорости. В частности, радиальные потоки газа под действием гравитационного потенциала галактического бара приводят к «развороту» PA_{kin} относительно PA_0 диска. Сравнение с ориентацией эллиптических изофот позволяет отличить случай бара, т.е. изменение формы орбит в плоскости галактики, от наклонного или изогнутого диска, т.е. круговых орбит в другой плоскости (см. обсуждение и ссылки в Egorova et al. (2019), Moiseev et al. (2004)).

Метод «наклонного кольца» достаточно гибок и позволяет проверять гипотезы о характере движений газа, фиксируя различные комбинации параметров в уравнении (4). Можно также оценивать

амплитуду радиальных движений, полагая в формуле (3) $V_r \neq 0$, что актуально для столкновительных кольцевых галактик (Bizyaev et al. 2007). В работе Sil'chenko et al. (2019) использовалась модификация метода, позволяющая последовательными итерациями описать движение газа в сильно изогнутых дисках даже в случае плохого заполнения полей скоростей.

4.1.2. Гармоническое разложение

Возмущения кругового движения неосесимметричным гравитационным потенциалом (спиральная волна, бар, приливное взаимодействие) приводят к тому, что в правой части выражения (3) появляются гармонические члены вида $A_j \cos j\varphi$, $B_j \sin j\varphi$, $j = 1, 2, \dots$. Иными словами, распределение лучевых скоростей в узком кольце на данном радиусе $V_{OBS}(\varphi)$ раскладывается в ряд Фурье, в котором системная скорость — это коэффициент при нулевой гармонике и т.д. Sakhibov and Smirnov (1989) одними из первых применили эту идею для определения параметров спиральной волны плотности из полей скоростей, полученных с ИФП. Franx et al. (1994) использовали сходную методику для определения формы гравитационного потенциала галактик раннего типа. В работе Lyakhovich et al. (1997) последовательно изложена идея применения метода Фурье-анализа полей скоростей для восстановления полного трехмерного вектора скорости газа в диске при определенных предположениях о характере спиральной структуры (раздел 4.2). К сожалению, предложенная методика восстановления вектора скорости не получила широкого распространения. Возможной причиной являлась необходимость весьма кропотливого анализа с привлечением также фотометрических данных, так как результат часто оказывался чувствительным к выбору параметров ориентации диска. С другой стороны, само по себе применение Фурье-анализа для описания полей лучевых скоростей как газового, так и звездного компонента галактик стало в последнее время популярно благодаря программе Kinemetry (Krajinović et al. 2006). Здесь опыт гармонического разложения распределений поверхностной яркости обобщен на более высокие моменты функции распределения лучевых скоростей: на собственно лучевую скорость (1-й момент), дисперсию скоростей (2-й момент) и т.д. При этом не требуется даже допущения о плоском диске, метод может прилагаться даже к данным о кинематике звезд в галактиках ранних типов. А в случае газа в дисковых галактиках Kinemetry может использоваться как фильтр высоких пространственных частот, выделяющий регулярную компоненту поля скоростей.

4.1.3. Моделирование всего поля

Метод «наклонных колец» позволяет достаточно адекватно понять характер движений в плоском диске. Если же плоскость диска изгибается, то можно получить первое приближение для параметров изгиба. Однако оценка параметров при аппроксимации наблюдений в узком кольце выражением (4) бывает неустойчивой, особенно в случае неполного заполнения кольца точками с надежными измерениями скоростей. Прежде всего, имеет место вырождение по $V_{ROT}-i$, особенно при малых углах наклона $i < 30-40^\circ$. Действительно, для M -колец получаем, что полное поле скоростей при фиксированном динамическом центре описывается $4 \times M$ свободными параметрами. Для наблюдений с ИФП галактик размером несколько $arcmin$, как на рис. 5, это число может составлять несколько сотен (ширина колец близка к величине пространственного разрешения). Что, очевидно, чрезмерно. На практике V_{ROT} , i , PA_{kin} плавно меняются с радиусом и можно задать простые аналитические выражения для радиальных изменений ориентации орбит и кривой вращения, положив также $V_{SYS} = const$.

Описание поля скоростей в рамках единой двумерной модели с несколькими свободными параметрами сильно повышает устойчивость решения. Так, Soccato et al. (2007) смогли хорошо описать поле лучевых скоростей газа в галактиках NGC 2855 и NGC 7049 по данным прибора VIMOS, используя модель изогнутого диска всего с семью параметрами. Поскольку при сильных изгибах луч зрения мог несколько раз пересечь диск, то важно было одновременно принимать в расчет распределение яркости в эмиссионной линии. Сходный подход был применен нами для исследования ориентации орбит сильно наклоненного и изогнутого диска в галактике Agr 212 (Moiseev 2008). Удалось найти устойчивое модельное решение для описания кинематики ионизованного газа, распределенного в отдельных изолированных областях H II.

Для плоского слабозвмущенного диска двумерная модель позволяет надежно определить параметры его ориентации даже в случае положения «плашмя» (face-on, $i < 20^\circ$). В качестве примера можно привести наше исследование с ИФП практически круглого газового кольца в Объекте Хога (рис. 6) с $i = 18 \pm 4^\circ$. Здесь удалось сделать выбор между плоской и слегка изогнутой моделью кольца (Finkelman et al. 2011). В качестве другого примера моделирования плоских дисков можно привести работу Fathi et al. (2006), в которой используется параметризация кривой вращения моделью звездного экспоненциального диска.

Кроме того, возможно выполнять прямое сравнение данных численных гидродинамических расчетов с наблюдаемыми полями скоростей, например, для случая галактик с перемычками (Fathi et al. 2005).

4.1.4. Моделирование куба данных

Мощность современных компьютеров позволяет перейти от подгонки двумерных полей скоростей и распределений яркости к более информативной аппроксимации всего куба данных. Как и в случае метода наклонного кольца, впервые такие алгоритмы были применены к кубам радиоданных, поскольку при наблюдениях в линии 21 см пространственное разрешение обычно не велико и существенен эффект усреднения лучевых скоростей внутри синтезированной диаграммы направленности (beam smearing). А поскольку яркость в этой линии связана с плотностью HI, то распределение интенсивности часто можно задавать в виде гладкой функции по радиусу. Удачным примером является популярный пакет TiRiFiC (Józsa et al. 2007), позволяющий исследовать изгибы и другие особенности пространственной структуры газовых дисков.

В случае оптических кубов данных такое моделирование актуально, прежде всего, для кинематики газа в галактиках на больших красных смещениях, где так же важен эффект beam smearing, поскольку пространственное разрешение сравнимо с размерами изучаемых объектов. Отметим программные пакеты GalPak^{3D} (Bouché et al. 2015) и ^{3D}BAROLO (Di Teodoro and Fraternali 2015). Последний потенциально может быть применен и для анализа кубов, полученных с ИФП. В работе Bekiaris et al. (2016) уже демонстрировалась возможность такого анализа с помощью пакета GBKFIT на примере данных наблюдений дисковых галактик с ИФП в обзоре GHASP.

4.2. Спиральные галактики

Ещё в самых первых наблюдениях с ИФП на БТА (раздел 2) были обнаружены возмущения полей лучевых скоростей в NGC 925 и NGC 2903, связанные с их спиральными рукавами (Marcelin et al. 1982; 1983). Позже эти данные были проанализированы методом гармонического разложения (Sakhibov and Smirnov 1989), что позволило определить параметры двухрукавной волны плотности, понять направление радиальных движений газа в рукавах, измерить угловую скорость вращения спирального узора и бара (в NGC 925). Дальнейшее развитие этого метода анализа было инициировано исследованиями галактики Mrk 1040 (NGC 931), отличающейся двухпиковой кривой вращения с необычно резким

скачком скорости вращения в 10 кпк от центра и заметными некруговыми движениями в диске. Эти пекулярности интерпретировались либо как необычно крупный (20 кпк размером) бар, невидимый из-за пылевого поглощения в сильно наклоненном диске (Amram et al. 1992), либо как присутствие вихревых структур (Afanasiev and Fridman 1993). Последняя интерпретация была связана с гипотезой о гидродинамической генерации спиральных волн в газовом диске (Mogozov 1979), альтернативной классической теории волн плотности звездного диска. Для работы гидродинамического механизма требовался резкий скачок скорости вращения, подобный наблюдаемому в Mrk 1040, воспроизводимый также в лабораторных опытах на вращающейся мелкой воде (Fridman et al. 1985). Гигантские вихри, вращающиеся в противоположную сторону относительно вращения галактики (антициклоны), должны наблюдаться в системе координат, связанной со спиралью и в случае классического механизма генерации. Но их расположение отличается от предсказаний гидродинамической теории. Соответствующие критерии приведены в работе Lyakhovich et al. (1997), посвященной методу восстановления картины трехмерных движений газа на основе Фурье-анализа полей скоростей.

В рамках совместного проекта Vortex (САО РАН, Институт астрономии РАН, ГАИШ МГУ) на 6-м телескопе было получено несколько десятков полей скоростей, для которых был выполнен Фурье-анализ. К сожалению, до публикации были доведены только результаты восстановления трехмерных векторов скорости в дисках спиральных галактик NGC 157 (Fridman et al. 2001a) и NGC 3631 (Fridman et al. 2001b, Fridman et al. 1998). В обоих случаях были обнаружены гигантские вихревые структуры, связанные с классическим механизмом генерации волн плотности. Также были опубликованы результаты анализа кинематики еще 15 галактик выборки методом «наклонного кольца» (Fridman et al. 2005). Здесь были построены кривые вращения, свободные от влияния некруговых движений, а также выделены многочисленные области с пекулярной кинематикой ионизованного газа, в которых отличия от кругового вращения достигают 50–150 км с⁻¹. Иногда здесь наблюдается два кинематических компонента в проекции на луч зрения. Столь большие пекулярные скорости не связаны со спиральными волнами, а обусловлены, скорее всего, либо «галактическими фонтанами», вызванными звездообразованием (раздел 5), либо взаимодействием с окружением, включая аккрецию газовых облаков. Часть этих пекулярных областей была обнаружена еще в ранних наблюдениях с длиннощелевым спектрографом 6-м телескопа

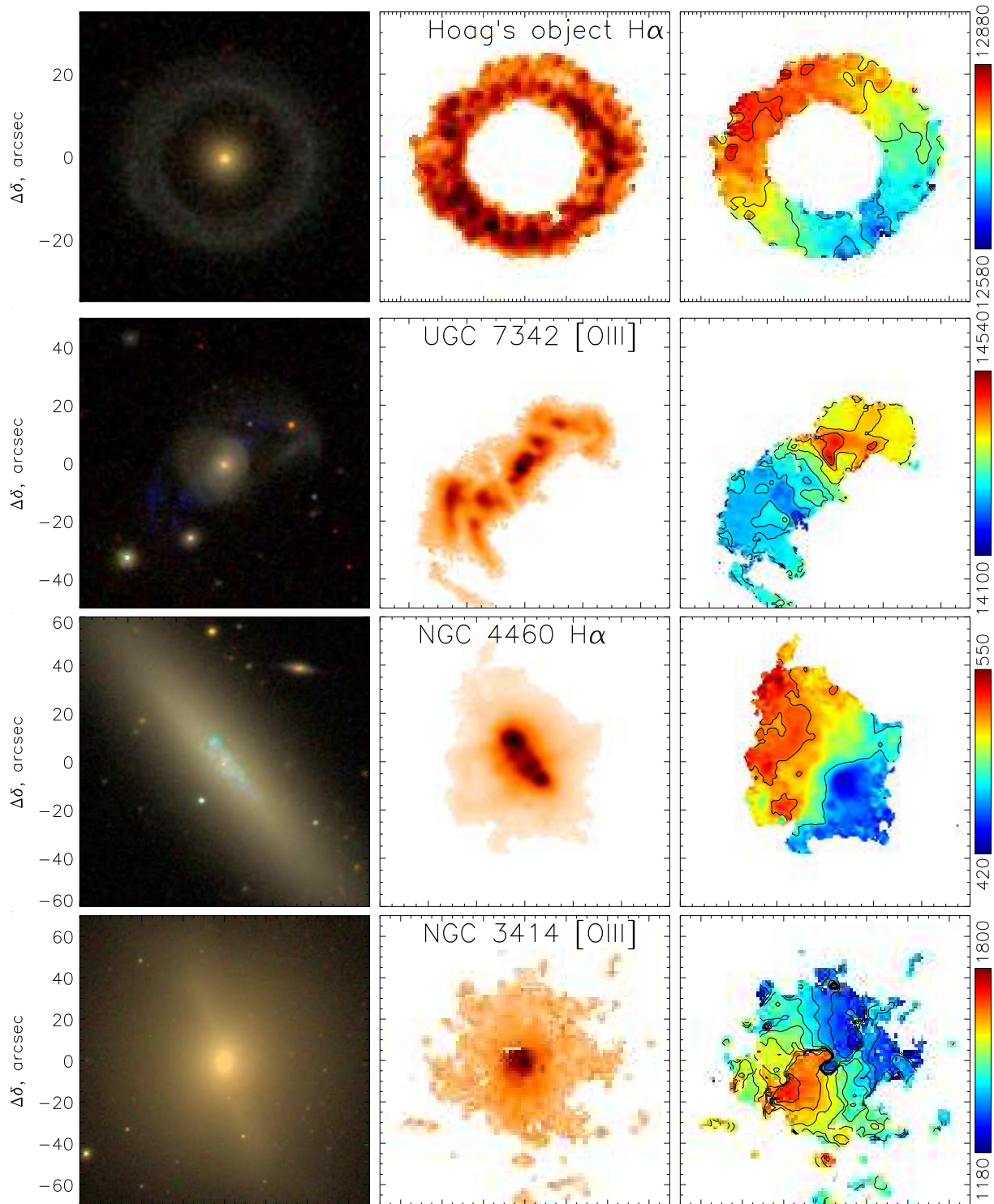


Рис. 6. Галактики с доминированием кругового вращения в кинематике газа. Слева направо: изображение из SDSS, распределения яркости в указанной эмиссионной линии и поле скоростей ионизованного газа, построенные из наблюдений с ИФП на БТА. Шкала — в км с^{-1} . Сверху вниз: объект Хога (Finkelman et al. 2011), активная галактика UGC 7342 (Keel et al. 2015), галактический ветер в NGC 4460 (Orpin and Moiseev 2015), внутренний полярный диск в линзовидной галактике NGC 3414 (Sil'chenko et al. 2019).

(Afanasiev et al. 1988; 1992). Карты ИФП позволили исследовать их в деталях.

Интересна галактика NGC 1084, на периферии которой обнаружена сложная структура профилей эмиссионных линий. Здесь от самой яркой в линии $H\alpha$ сверхассоциации перпендикулярно спиральной ветви отходит эмиссионный «отрог»⁵. Пекулярный компонент в $H\alpha$, смещенный относительно основного на $-100... + 150 \text{ км с}^{-1}$, часто сопровождается ударным возбуждением линии $[N II]$, наблюдается между областями $H II$. Moiseev (2000) предложил две интерпретации наблюдаемой картины, связанные как с галактическими фонтанами, так и со следами прошлых взаимодействий. Позже появились дополнительные аргументы в пользу как недавнего (менее 40 млн. лет, Ramya et al. 2007), так и более раннего (порядка 1 млрд. лет, Martínez-Delgado et al. 2010) поглощения карликового спутника.

Наряду со спиральными волнами плотности пекулярные некруговые движения газа возникают под воздействием трехосного гравитационного потенциала бара. Возмущение поля скоростей приводит к повороту PA_{kin} относительно PA внешних изофот, что воспроизводится в численных моделях (см. Moiseev and Mustsevoi 2000, Moiseev et al. 2004, и ссылки там). Это позволяет находить околоядерные бары (минибары) внутри центрального килопарсека даже в тех случаях, когда бар не виден на оптических изображениях. В одной из первых работ по поиску минибаров методом 3D-спектроскопии (Zasov and Sil'chenko 1996) использовались в том числе наблюдения с ИФП на БТА. Показателен случай галактики NGC 972. Здесь бар в сильно запыленной центральной области сперва был обнаружен по возмущению поля скоростей, а потом найден на снимках в ближнем ИК, свободных от пылевого поглощения (Zasov and Moiseev 1999). В этой же галактике обнаружена систематическая разница лучевых скоростей в эмиссионных линиях $H\alpha$ и $[N II]$, связанная с ударной волной на кромках бара (Afanasiev et al. 2001). Эффект замедления скоростей вращения в запрещенных линиях на кромках бара был описан ранее в работах Afanasiev et al. (1979), Afanasiev and Sharovalova (1994). К сожалению, это направление не получило дальнейшего развития. Автор считает, что сравнение лучевых скоростей в балмеровских и запрещенных линиях может использоваться для изучения свойств галактических баров в современных обзорах, выполненных методом 3D-спектроскопии.

⁵Сейчас в базе NED эта область именуется как «NGC 1084 spur».

Отметим работу Smirnova et al. (2006), где по данным ИФП со SCORPIO была измерена угловая скорость вращения бара в галактике NGC 6104, а также исследование кандидатов в галактики с двойными барами, основанное на совместном использовании данных ИФП и MPFS (Moiseev et al. 2004).

Анализ поля лучевых скоростей позволяет строить достаточно надежные кривые вращения с уверенным определением угла наклона i , свободные от влияния областей некруговых движений. Это важно для построения моделей распределения массы в галактиках. В качестве одной из первых работ такого рода, выполненных на 6-м телескопе, отметим статью Ryder et al. (1998), которая является также одним из первых примеров одновременного использования в исследовании полей скоростей ионизованного газа (данные ИФП в $H\alpha$) и нейтрального водорода (наблюдения в линии 21 см). Эти данные хорошо дополняют друг друга, так как в $H I$ более протяженный диск, но пространственное разрешение недостаточно для исследования внутренних областей, где помогают измерения в линии $H\alpha$. В работе Moiseev (2014b) такое совмещение кривых вращения выполнено для ряда близких карликовых галактик.

4.3. Галактики ранних типов ($E-S0$)

В последние десятилетия претерпевает изменение прежняя точка зрения о том, что эллиптические и линзовидные галактики лишены холодного и теплого газа. Важную роль здесь сыграла оптическая 3D-спектроскопия, в том числе на 6-м телескопе. В работах Plana and Boulesteix (1996), Plana et al. (1998) исследовались распределение и кинематика ионизованного газа в $I1 E$ и $S0$ галактиках. В трех случаях были обнаружены две кинематически выделенные газовые подсистемы, возможно, располагающиеся в разных основных плоскостях эллипсоидов, что явно указывало на внешнее происхождение газа. Последующие наблюдения линзовидных галактик методами панорамной спектроскопии позволили существенно продвинуться в исследовании звездного населения и ионизованного газа галактик ранних типов, но относительно малое поле зрения не позволяло изучить их внешние части. Таких ограничений не было в работе Sil'chenko et al. (2019), представивших результаты наблюдений со SCORPIO/SCORPIO-2 протяженных газовых дисков в 18 линзовидных галактиках методами панорамной и длиннощелевой спектроскопии (см. пример NGC 3414 на рис. 6). Оказалось, что современное звездообразование обычно происходит там, где газ лежит точно в плоскости звездного диска и следует круговому вращению. В галактиках без текущего звездообразования протяженные

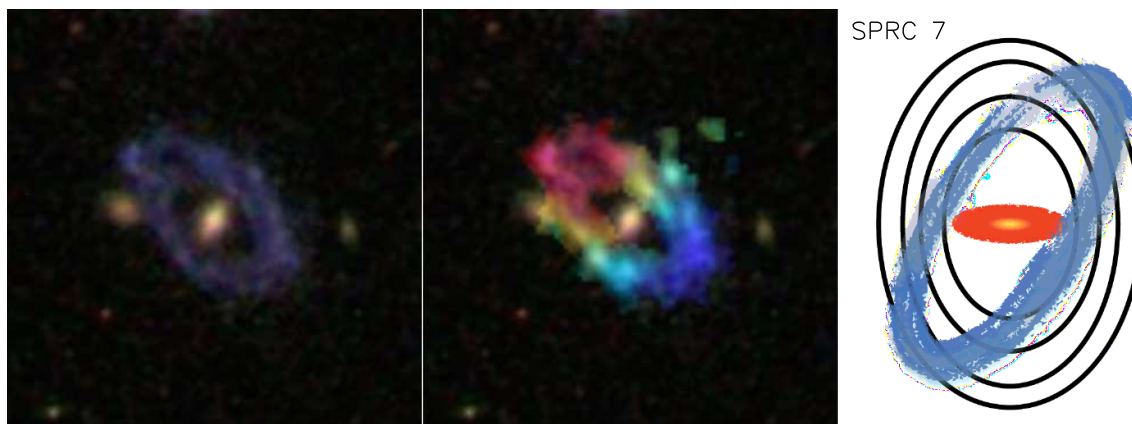


Рис. 7. Полярное кольцо в SPRC-7. Слева направо: цветное изображение из SDSS; совмещение данных SDSS с полем скоростей по данным ИФП, цвета соответствуют наблюдаемым лучевым скоростям, интенсивность шкалирована в соответствии с распределением яркости в эмиссионной линии $H\beta$; распределение гравитационного потенциала темного гало согласно численным расчетам. Схематично показаны центральный диск и полярное (наклонное) кольцо (Moiseev et al. 2015a).

газовые диски либо находятся в динамически стабильной квазиполярной ориентации, либо являются результатом захвата вещества с отличающимся направлением момента вращения, что приводит к ударной ионизации газа. Полученные данные указывают на существенное отличие геометрии аккреции газа в линзовидных и спиральных галактиках: аккреция в S0-галактиках обычно происходит вне плоскости звездного диска.

4.4. Галактики с полярными кольцами и родственные им объекты

Другой пример внешних газовых структур дают галактики с полярными кольцами (ГПК). Здесь протяженные кольца или диски из газа, пыли и звезд вращаются в плоскости примерно перпендикулярной к основному галактическому диску. Считается, что образование ГПК связано с событием, приносящем вещество с иным орбитальным моментом: слиянием двух галактик, аккрецией хозяйской галактикой вещества спутника или газовых филаментов. Фотометрическое и спектральное исследование ГПК на БТА началось группой из Санкт-Петербургского университета еще в 1990-х. Позже исследование наиболее сложных с точки зрения морфологии кандидатов в ГПК из каталога Whitmore et al. (1990) начало проводится методами 3D-спектроскопии, причем сочетались оба доступных на БТА метода. С помощью MPFS исследовалась кинематика звездного населения центральной галактики в поле $16'' \times 16''$. Поле скоростей ионизованного газа картировалось на ИФП с большим полем зрения. При необходимости анализ дополнялся данными фотометрии и длиннощелевой спектроскопии (Hagen-Thorn et al. 2005, Merkulova et al. 2012; 2009). Характерен пример UGC 5600, в

которой большая часть газа лежит вне плоскости звездного диска, причем во внутренних областях речь идет о полярном кольце, а во внешних — о сильном изгибе газового диска (Shalyapina et al. 2007). С помощью аналогичных наблюдений в галактике NGC 7468 (Shalyapina et al. 2004a) был обнаружен околядерный полярный диск радиусом около 1 кпк. Каталог и характерные параметры таких структур, родственных ГПК, приводятся в работе Moiseev (2012). В некоторых случаях анализ полей скоростей газа и звезд приводил к исключению галактики из списка кандидатов в ГПК (Yakovleva et al. 2016).

В случае сплюснутого или трехосного гравитационного потенциала в полярной плоскости существуют устойчивые орбиты, поэтому захваченное вещество будет вращаться здесь достаточно долго. Если же плоскость орбиты заметно отличается от полярной, то формирующееся кольцо должно прецессировать к плоскости галактики. Так, наблюдения галактики Agr 212 с ИФП в $H\alpha$ показали, что здесь сосуществуют сразу две вращающиеся подсистемы ионизованного газа: внутренний диск, совпадающий со звездным, и внешние области H II, орбиты которых сильно наклонены (Moiseev 2008). Учитывая опубликованные данные о распределении H I, мы пришли к выводу, что большая часть газа в галактике собрана в широком кольце радиусом около 20 кпк. Внешние части кольца вращаются в плоскости, ортогональной к звездному диску. Орбиты газовых облаков прецессируют с уменьшением радиуса и приближаются к плоскости диска. В диапазоне радиусов 2–3.5 кпк наблюдается столкновение между газом полярного кольца и внутренним диском, сопровождаемое вспышкой звездообразования.

Подробнее вопрос о некомпланарных, в том числе сталкивающихся газовых подсистемах в га-

лактиках поздних типов, рассматривался в работах Moiseev (2011; 2014a). Анализ карт ИФП для 25 близких карликовых галактик, представленный в статье Moiseev (2014b), показал, что доля объектов с наклонными газовыми структурами составляет более 10%, т.е. более чем на порядок превосходит имеющиеся оценки частоты встречаемости «классических» ГПК. Это указывает на важную роль аккреции внешнего вещества в современной эволюции галактик.

Новые цифровые обзоры неба привели к увеличению списка надежных кандидатов в ГПК, доступных для детального изучения (например, каталог SPRC Moiseev et al. 2011). Наблюдение вращения газа и звезд в двух взаимно перпендикулярных плоскостях дает возможность изучить трехмерное распределение массы в галактике, в том числе определить форму темного гало: сплюснутость, вытянутость, отклонения от осевой симметрии. Khoperskov et al. (2014) смогли восстановить форму темного гало галактики SPRC-7 на основании наблюдений Brosch et al. (2010) со SCORPIO, в том числе в режиме ИФП. Эта галактика обладает одним из самых больших полярных колец, диаметром около 50 кпк. Темное гало оказалось здесь заметно сплюснутым к плоскости кольца (рис. 7). Аналогичный анализ на основе наблюдений с ИФП выполнен для SPRC-260 (Khoperskov et al. 2013). Подробнее с результатами наблюдений объектов SPRC разными методами можно ознакомиться в работе Moiseev et al. (2015a). В последние годы на БТА с ИФП проведено картирование ионизованного газа еще в нескольких галактиках этого каталога. Данные готовятся к публикации.

Спектральное исследование на БТА известной кольцевой галактики Объект Хога (рис. 6) показало, что, хотя здесь центральная галактика и внешнее кольцо вращаются в одной плоскости, механизм формирования системы близок к тому, что предлагается для некоторых ГПК. Наблюдаемые характеристики Объекта Хога удается объяснить в предположении, что кольцо образовалось в результате «холодной» аккреции газа из филаментов межгалактической среды на прародительницу — эллиптическую галактику (Finkelman et al. 2011). С этой гипотезой согласуются и последующие наблюдения в линии 21 см (Brosch et al. 2013).

4.5. Взаимодействующие и пекулярные системы

Исследование полей скоростей столкновительных кольцевых галактик, в том числе с привлечением результатов численного моделирования, дает возможность определить скорость расширения кольцевой волны плотности. Интересным примером является Agr 10 с двумя кольцами звездообразования (Vizyaev et al. 2007). Анализ поля

скоростей показал, что во внутреннем кольце имеют место значительные (более 30 км с^{-1}) вертикальные колебания газового диска. В то же время внешнее кольцо расширяется неравномерно, с $V_r = 30\text{--}110 \text{ км с}^{-1}$, что и объясняет его эллиптическую форму. Показано, что кольцевая структура сформировалась в результате нецентрального столкновения с массивным спутником 85 млн. лет назад. Примеры полей скоростей других кольцевых столкновительных галактик, построенных с помощью ИФП на БТА, приведены в статье Moiseev and Vizyaev (2009).

Интересный и пока малоизученный аспект взаимодействия галактик был обнаружен в результате наблюдений на БТА Mrk 334 (Smirnova and Moiseev 2010), испытавшей недавнее слияние с массивным компаньоном. В диске галактики найдена каверна, заполненная ионизованным газом низкой плотности со значительными (до 70 км с^{-1} по картам ИФП) отклонениями от кругового вращения. Мы интерпретировали эту область как места недавнего (примерно 12 млн. лет назад) пролета остатков разрушенного спутника через газовый диск основной галактики. Не менее интересны результаты совместного анализа фотометрических и спектральных данных для галактики Mrk 315 (Cigoi et al. 2005), которую мы застали в момент взаимодействия сразу с двумя спутниками, что привело к появлению нескольких кинематических компонент в кубе данных ИФП. При этом один из спутников, испытывающий быстрый пролет через газовое гало галактики, теряет собственный газ, формируя структуру, подобную инверсионному следу самолета.

Значительное внимание в исследованиях на БТА отводится изучению кинематики карликовых галактик и их взаимодействию с окружением. Moiseev et al. (2010) провели наблюдения с ИФП выборки из девяти галактик с экстремально низкой металличностью газа (от 1/35 до 1/10 от солнечного значения $[O/H]$). В большинстве галактик поля скоростей не могут быть описаны моделью одного вращающегося диска: наблюдаемые некруговые скорости указывают на различные стадии взаимодействия или слияния с компаньоном, в двух случаях удалось выделить по две независимо вращающиеся подсистемы. Все это указывает на то, что текущая вспышка звездообразования в этих галактиках индуцирована недавним взаимодействием. Характерным примером является DDO 68, отличающаяся рекордно низкой металличностью среди близких галактик и демонстрирующая признаки еще не закончившегося взаимодействия (см. Pustilnik et al. 2017, и ссылки там).

Сейчас на БТА завершается программа по картированию с ИФП выборки карликовых галактик низкой металличности, находящихся в близких

войдах. Принципы селекции объектов и анализ кинематики наиболее яркой из галактик выборки — NGC 428 (рис. 5) — приводятся в работе Egorova et al. (2019). Здесь, как и в рассмотренном выше примере, наблюдаются следы современного взаимодействия со спутниками или аккреции внешнего газа, несмотря на относительно бедное окружение. Так, оказалось, что сложная структура галактики Ark 18 является результатом двух последовательных слияний со спутниками, одно из которых, с отношением масс 1/5, сформировало внешний диск низкой поверхностной яркости (Egorova et al. 2021).

4.6. Активные галактические ядра

Исследование ионизованного газа в галактиках с активными ядрами является давним интересом нашей группы в САО РАН. Первые наблюдения выполнялись с помощью длиннощелевого спектрографа (см., например, Afanasiev et al. 1979, Afanasiev and Sil'chenko 1991). Но уже первые созданные приборы для 3D-спектроскопии показали высокую эффективность этих методов для исследования эмиссионных структур со сложной морфологией, возмущенной кинематикой и неоднозначным состоянием ионизации. При исследовании сейфертовской галактики Mrk 573 Afanasiev et al. (1996) применили одновременно оба типа 3D-спектрографов БТА: MPFS для спектроскопии центральной области в широком спектральном диапазоне и сканирующий ИФП для картирования кинематики ионизованного газа без ограничения по полю зрения. Этот подход был в дальнейшем применен в серии работ, исследующих как процессы поступления газа в центральные области галактик (Smirnova et al. 2006), так и воздействие активного ядра на межзвездную среду, связанное с радиоджетами Mrk 533 (Smirnova et al. 2007), истечениями типа галактического ветра (Smirnova and Moiseev 2010, см. также работу Афанасьев и др. 2020) или конусами ионизации (Kozlova et al. 2020, Smirnova et al. 2018). Во многих случаях речь идет о так называемых протяженных областях формирования узких эмиссионных линий (extended emission-line regions, EELR) размером от нескольких до десятков килопарсек.

В САО РАН в сотрудничестве с Волгоградским государственным университетом был разработан оригинальный сценарий, объясняющий формирование конусов ионизованного вещества в окрестностях ядер сейфертовских галактик, включая Z-образные структуры, наблюдаемые в ряде EELR.

Здесь предполагалось, что регулярные ионизованные структуры связаны с ударными волнами, порождаемые неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца при вторжении джета активного ядра

в окружающую среду (Afanasiev et al. 2007a). Были выполнены соответствующие численные расчеты (Afanasiev et al. 2007b), воспроизводящие морфологию EELR в NGC 5252. Но в большинстве случаев наблюдения указывают на то, что ионизация конусов обусловлена в первую очередь жестким ультрафиолетовым излучением ядра, коллимированного пылевым тором. Причем луч такого «ионизационного маяка» может освещать газ вдали от галактики. Так, в Mrk 6 эмиссионные филаменты наблюдаются на расстояниях до 40 кпк от ядра, а их поле скоростей показывает, что это не выброс газа из ядра, а аккреция внешнего вещества (Smirnova et al. 2018).

В случае удачного расположения относительно наблюдателя EELR являются своеобразным удаленным экраном, отражающим быструю ионизационную активность ядра, как в случае прототипа «затухающих» активных ядер — Hanny's Voorwerp (IC 2497 Lintott et al. 2009). Совместные наблюдения на БТА и HST выборки кандидатов в галактики с затухающими ядрами (fading AGN) доказали справедливость предложенного объяснения существования природы EELR, удаленных более чем на 10 кпк (Keel et al. 2015). Кинематические карты, построенные с ИФП, продемонстрировали, что ионизованный газ имеет низкую дисперсию скоростей и в целом следует круговому вращению. То есть имеет место ионизация межгалактического газа, часто связанного с приливными структурами, а не выброс материи из ядра. На рис. 6 показана галактика UGC 7342, в которой газ на больших расстояниях от центра вращается регулярно, и только в области центрального килопарсека наблюдаются возмущения, связанные с ядерным истечением (Keel et al. 2017).

5. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ: ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ НА ОКРУЖАЮЩИЙ ГАЗ

5.1. Галактический ветер

Наиболее глобальным воздействием текущего звездообразования на межзвездную среду является галактический ветер (сверхветер) — конические выбросы газа из плоскости галактики под действием коллективных взрывов сверхновых в околоядерной области. Лучшее всего ветровые структуры видны при большом угле наклона диска галактики к лучу зрения, но при этом в наблюдаемых лучевых скоростях доминирует круговое вращение, как в поле скоростей NGC 4460 на рис. 6. Геометрическая модель ветра в этой галактике, рассмотренная Orpin and Moiseev (2015), дает диапазон скоростей истечения $30\text{--}80\text{ км с}^{-1}$, что меньше скорости убегания из галактики. Поэтому выметенное вещество, охладившись, вновь упадет на диск. Этот

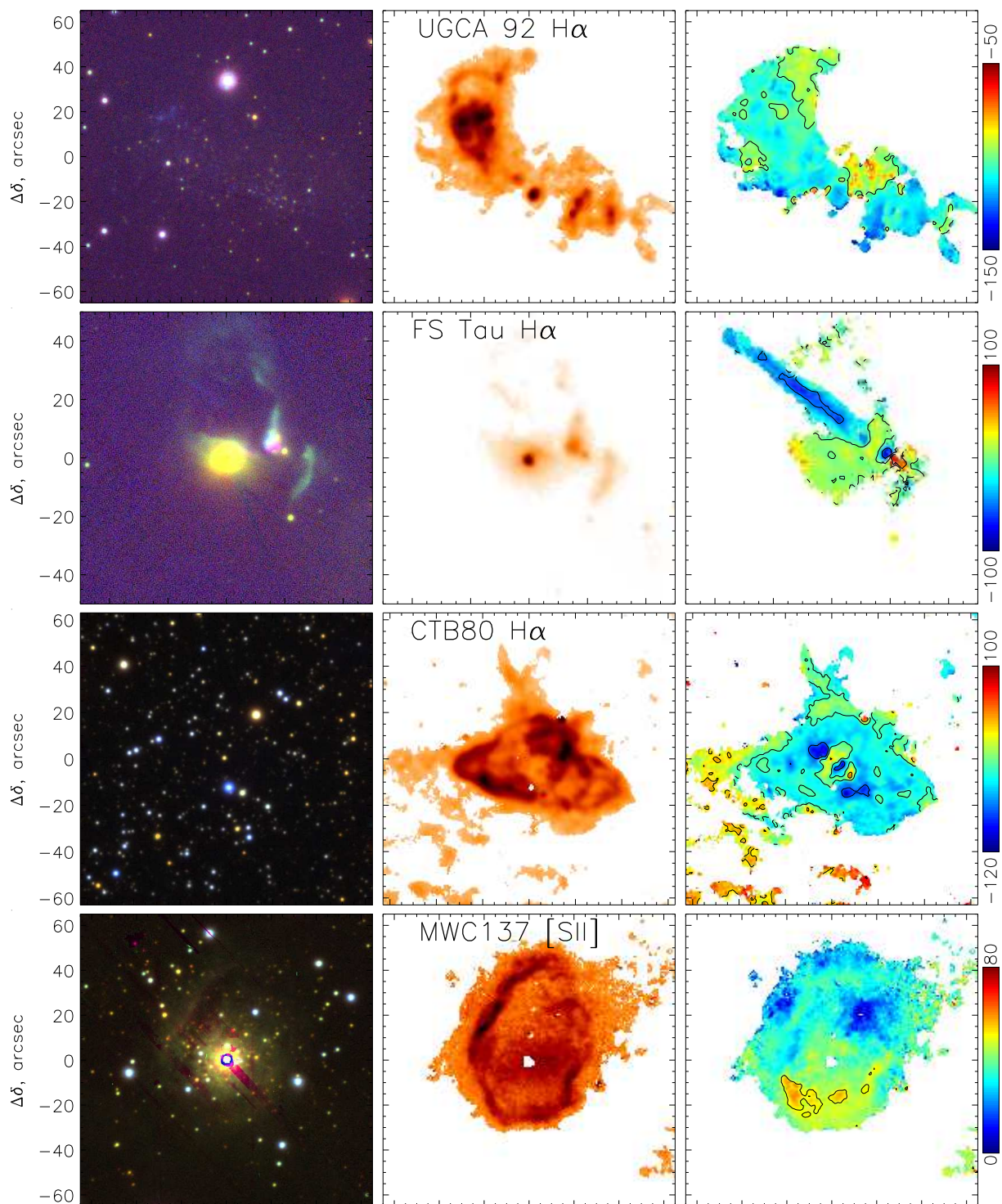


Рис. 8. Объекты с заметным воздействием звезд на газовую среду. Слева направо: изображение из Pan-STARRS DR1, распределения яркости в указанной эмиссионной линии и поле скоростей ионизованного газа, построенные из наблюдений с ИФП на БТА. Сверху вниз: карликовая галактика UGC 92 (Moiseev et al. 2015b), джет вблизи молодой звезды FS Tau (Movsessian et al. 2019), пульсарная туманность CTB 80 (Lozinskaya et al. 2005), туманность вокруг Be-звезды MWC 137 (Kraus et al. 2021).

же подход по анализу данных ИФП был применен для исследования ветра в UGC 10043 совместно со спектрофотометрическими данными IFS PPAK из обзора CALIFA (López-Cobá et al. 2017). Наша оценка скорости истечения ($100\text{--}250\text{ км с}^{-1}$) согласуется с тем, что следует из фотоионизационных моделей по отношению эмиссионных линий на ВРТ-диаграммах (Baldwin et al. 1981). Важной особенностью галактического ветра является высокая турбулентность газа, что проявляется в виде роста дисперсии скоростей вдоль луча зрения (σ). Спектральное разрешение наших ИФП достаточно высоко, чтобы проследить рост σ с удалением от плоскости диска. Это видно в том числе в архивных наблюдениях галактики NGC 6286, свехветер в которой был обнаружен впервые Shalyapina et al. (2004b) и недавно подтвержден данными CALIFA (López-Cobá et al. 2019).

Ударные волны в случае галактического ветра и менее мощных «галактических фонтанов» приводят как к росту σ , так и к увеличению наблюдаемой светимости в запрещенных линиях. Поэтому одновременное использование данных о кинематике газа, полученных с ИФП высокого разрешения, и данных длиннощелевой или интегрально-полевой спектроскопии о потоках в эмиссионных линиях позволяет выполнять диагностику межзвездной среды галактик, однозначно выделяя области ударной ионизации. Эта методика, названная нами «ВРТ- σ » успешно опробована при анализе кубов данных галактик, наблюдавшихся с ИФП с приборами MPFS и PPAK (Опарин и Моисеев 2018).

5.2. Газ в областях звездообразования

С помощью сканирующего ИФП на БТА Moiseev et al. (2015b) построили карты распределения дисперсии лучевых скоростей ионизованного газа в большой выборке близких карликовых галактик (см. пример UGCA 92 на рис. 8). Было продемонстрировано существование глобального соотношения между текущим темпом звездообразования (SFR) и средневзвешенной по яркости дисперсии скоростей. Соотношение выполняется в широчайшем диапазоне SFR (5.5 порядков) и верно как для дисков, форма которых поддерживается вращением, так и для отдельных гигантских областей Н II. Авторы интерпретировали это как аргумент в пользу того, что σ в карликовых галактиках не отражает вириальные движения, а в основном определяется энергией, впрыскиваемой в межзвездную среду в процессе звездообразования. Полученные данные о турбулентных движениях газа в близких галактиках сейчас используются для построения унифицированных моделей галактических дисков (Krumholz et al. 2018).

Yang et al. (1996) предложили использовать карты ИФП для построения диаграмм «интенсивность—дисперсия скоростей» ($I - \sigma$). Это позволяет не только изучать расширяющиеся оболочки, связанные с областями звездообразования (Martínez-Delgado et al. 2007), но и выделять уникальные объекты: остатки сверхновых, эмиссионные звезды и т.д. Подробно данная методика описана Moiseev and Lozinskaya (2012), которые обнаружили кандидат в звезду LBV в UGC 8508.

В случае dIrr-галактик Местной Вселенной угловой масштаб составляет $3\text{--}20\text{ пк}''$, поэтому с помощью ИФП можно в деталях рассмотреть динамику процессов, приводящих к росту дисперсии скоростей газа: остатки сверхновых, оболочки, связанные с ветром из областей звездообразования. Отсутствие спиральных волн плотности и большая толщина газовых дисков делают dIrr-галактики оптимальными полигонами для изучения взаимодействия звезд и межзвездной среды. Такие работы начались на БТА по инициативе Т. А. Лозинской (ГАИШ МГУ) с исследования галактики IC 1613, где оболочки ионизованного газа связаны с крупномасштабными структурами нейтрального водорода (Lozinskaya et al. 2003). Здесь одними из первых в практике анализа данных ИФП мы использовали технику PV-диаграмм (раздел 3.2) с одновременным анализом кубов данных Н I в линии 21 см. Это дало возможность определить динамические возрасты оболочек и сравнить их с возрастными центральными звездными скоплениями. Дальнейшее развитие данное направление получило в связи с изучением гигантских (до 1 кпк диаметром) сверхоболочек Н I в ряде карликовых галактик, для создания которых явно не хватало энергии центральных звездных скоплений. Сейчас этот феномен объясняется индуцированием звездообразования в плотных стенках сверхоболочек. Наблюдения с ИФП позволяют в деталях изучить этот процесс. Подробное обсуждение приведено в обзоре Egorov et al. (2015) и недавних работах, посвященных галактикам Holmberg I и II (Egorov et al. 2017b; 2018).

5.3. Эмиссионные звезды, уникальные объекты

Переходя к исследованию туманностей, созданных отдельными звездами, прежде всего отметим измерения динамических возрастов гигантской (более 200 пк размером) биполярной оболочки вокруг уникальной звезды WO (Afanasyev et al. 2000) в IC 1613 и возможного остатка гиперновой в виде синхротронной сверхоболочки в галактике IC 10 (Lozinskaya and Moiseev 2007). В центре кандидата в остатки гиперновой находится рентгеновский источник IC10 X-1, состоящий из звезды WR в паре с массивной ($23\text{--}24 M_{\odot}$) черной дырой. В

последние годы интерес к таким объектам вырос в связи с детектированием гравитационных волн от сливающихся черных дыр (см. обсуждение у Bogomazov et al. 2018).

Интересные результаты были получены при изучении с ИФП туманностей, связанных с ультраяркими рентгеновскими источниками (ULX) в галактиках Holmberg IX (Abolmasov and Moiseev 2008) и Holmberg II (Egorov et al. 2017a). В последнем случае анализ полей скоростей в линиях [O III], [S II] и H α выявил структуру, интерпретируемую как проявление головной ударной волны (bow shock), вызванной быстрым полетом ULX через межзвездную среду и воздействием его горячего ветра на туманность. Наилучшее согласие с наблюдениями получается в предположении, что ULX вылетел из центральной части близлежащего скопления со скоростью около 70 км с⁻¹. Это подтверждает точку зрения о том, что многие ULX являются аккрецирующими черными дырами звездных масс (Poutanen et al. 2013). Отметим также картирование сверхзвуковых течений газа в туманности, связанной с объектом SS433 (Abolmasov et al. 2010).

Аналогично случаю Holmberg II ULX данные о лучевых скоростях и распределении яркости в пульсарной туманности CTB 80 (рис. 8) послужили основой для оценки пространственной скорости пульсара (Lozinskaya et al. 2005).

Многолетние наблюдения истечений типа Хербига–Аро, связанных с молодыми звездными объектами, дают возможность измерять собственные движения отдельных деталей в кубе данных ИФП. Так, первые наблюдения со сканирующим ИФП выявили сложную кинематику в истечении от HL Tau (Movsessian et al. 2007): компактные сгустки с высокой лучевой скоростью (~ 150 км с⁻¹) и дугообразные структуры впереди них со сравнительно низкой скоростью (~ 50 км с⁻¹). Для измерения собственных движений структур с разными лучевыми скоростями использовались две эпохи наблюдений с ИФП (2001 и 2007 гг.). Тангенциальные скорости обеих структур одинаковы и составили около 160 км с⁻¹. Этот результат свидетельствует о том, что структуры в истечении от HL Tau образуются вследствие эпизодических выбросов материи, при которых мы видим свечение сгустка высокоскоростного газа и дугообразной ударной волны перед ним (Movsessian et al. 2012). На рис. 8 показан пример аналогичного исследования FS Tau (Movsessian et al. 2019).

Наблюдения с ИФП на БТА туманностей нашей Галактики, связанных с массивными звездами, имеют лишь эпизодический характер. В качестве примера можно привести Ве-звезду Хербига S 235B (Boley et al. 2009) и туманность вокруг

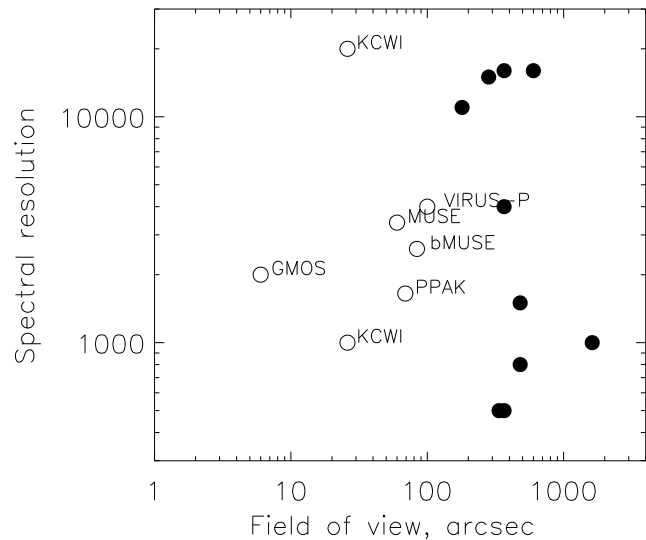


Рис. 9. Параметры приборов для 3D-спектроскопии на базе сканирующих ИФП (черные точки) и интегрально-полевых спектрографов (незаполненные кружки) на плоскости «FOV– \mathcal{R} ». Для KCWI показаны режимы высокого и низкого спектрального разрешения.

супергиганта MWC 137 (рис. 8). В последнем случае обнаружены структуры, связанные с ударными волнами, находящиеся вне поля, ранее исследованного с MUSE на VLT (Kraus et al. 2021). Аналогичные наблюдения продолжаются, авторы надеются на интересные результаты.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Boulesteix (2002) сравнивал приборы для панорамной спектроскопии на плоскости «поле зрения–спектральное разрешение». На рис. 9 приводится такая диаграмма, где показаны \mathcal{R} и FOV для всех систем со сканирующим ИФП из таблицы 1. Для сравнения показан ряд интегрально-полевых спектрографов 3.6–10 м телескопов: MUSE (Bacon et al. 2014) и проект blueMUSE (Jeanneau et al. 2020), PPAK (Kelz et al. 2006), GMOS (Allington-Smith et al. 2002) и KCWI (Morrissey et al. 2018) в двух конфигурациях.

На приведенной диаграмме видно, что даже сейчас, в эпоху бурного развития методов 3D-спектроскопии, системы на базе сканирующего ИФП остаются непревзойденными⁶ по сочетанию большого поля зрения ($FOV > 100''$) и высокого углового разрешения ($\mathcal{R} > 10\,000$). Это определяет

⁶Пример прибора, сочетающего протяженный спектральный диапазон, высокое разрешение и большое поле зрения дает фурье-спектрограф SITELLE на CFHT (Drissen et al. 2019). Но эта техника тоже имеет свои ограничения и пока не очень распространена на телескопах.

как минимум одну важную область исследований, в том числе и на 6-м телескопе САО РАН — исследование движений ионизованного газа в больших полях (туманности Млечного Пути и близкие галактики). Определенную проблему представляет вычитание фона неба в случаях, когда все поле зрения занято эмиссионным объектом, но здесь должны помочь новые алгоритмы анализа данных. В частности, уже имеется положительный опыт построения ИФП-мозаик, например, при исследовании эмиссионных оболочек в звездной ассоциации Cyg OB1 (Sitnik et al. 2019).

Опыт автора и его коллег по исследованию различных галактических и внегалактических объектов с помощью сканирующего ИФП показывает, что наиболее эффективной эта техника оказывается при сочетании ее с другими методами 3D-спектроскопии и данными интерферометрии в радиодиапазоне. Наблюдения на 6-м телескопе с ИФП в составе SCORPIO-2 показывают, что эти данные могут дополнить принципиально новой и важной информацией кубы, полученные с такими IFS, как MUSE, PPAK и MaNGA. Наша группа в САО РАН открыта для обсуждения любых новых проектов совместных исследований со сканирующими ИФП.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит за помощь коллег из лаборатории СФВО САО РАН, своих соавторов, учителей и учеников, вместе с которыми были написаны статьи, упомянутые в данном обзоре. Отдельное спасибо С. Н. Додонову и А. А. Смирновой за замечания, позволившие улучшить рукопись. Статья посвящается памяти В. Л. Афанасьева, благодаря энтузиазму и труду которого были созданы приборы SCORPIO и SCORPIO-2.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Наблюдения на 6-м телескопе САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение № 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Abolmasov, O. Maryeva, and A. N. Burenkov, *Astronomische Nachrichten* **331** (4), 412 (2010).
2. P. Abolmasov and A. V. Moiseev, *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **44**, 301 (2008).
3. V. L. Afanasiev, Y. Y. Balega, M. A. Grudzinsky, et al., *Tehnika sredstv svyazi, Ser. Tehnika televidenia* **5** 13 (1987).
4. V. L. Afanasiev, J. Boulesteix, F. Bonnarel, et al., in *Proc. of Int. Conf. Dynamics and Interactions of Galaxies*, ed. by R. Wielen, pp. 354–355 (1990a).
5. V. L. Afanasiev, A. N. Burenkov, A. I. Shapovalova, and V. V. Vlasyuk, *ASP Conf. Ser.* **91**, 218 (1996).
6. V. L. Afanasiev, A. N. Burenkov, A. V. Zasov, and O. K. Sil'chenko, *Astrofizika* **28**, 243 (1988).
7. V. L. Afanasiev, A. N. Burenkov, A. V. Zasov, and O. K. Silchenko, *Astron. Zh.* **69**, 19 (1992).
8. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, S. S. Khrapov, et al., *Astrophysical Bulletin* **62** (1), 1 (2007a).
9. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, S. S. Khrapov, et al., *Astrophysical Bulletin* **62** (1), 15 (2007b).
10. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and A. V. Moiseev, in *Stellar Dynamics: From Classic to Modern, Proc. Int. Conf. held in Saint Petersburg, August 21–27, 2000*, ed. by L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov., p. 103 (2001).
11. V. L. Afanasiev and A. M. Fridman, *Astronomy Letters* **19** (5), 319 (1993).
12. V. L. Afanasiev and A. I. Shapovalova, *Astrofizika* **17**, 403 (1981).
13. V. L. Afanasiev, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and E. Blanton, *Astronomy Letters* **26**, 153 (2000).
14. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
15. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
16. V. L. Afanasiev and A. I. Shapovalova, in *Mass-Transfer Induced Activity in Galaxies, Proc. Conf. held at the University of Kentucky, Lexington, April 26–30, 1993*, ed. by Isaac Shlosman, p. 95 (1994).
17. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astrofiz. Issled.: Izvestiya Spets. Astrofiz. Obs.* **33**, 88 (1991).
18. V. L. Afanasiev, V. V. Vlasyuk, S. N. Dodonov, and O. K. Sil'chenko, Preprint No. **54**, (SAO RAS, Nizhnii Arkhyz, 1990b).
19. J. Allington-Smith, G. Murray, R. Content, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114** (798), 892 (2002).
20. P. Amram, M. Marcelin, F. Bonnarel, et al., *Astron. and Astrophys.* **263**, 69 (1992).
21. V. I. Ardilanov, V. A. Murzin, I. V. Afanasieva, et al., in *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Proc. Conf. held in Nizhny Arkhyz September, 21–25, 2020*, ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 115–118 (2020).
22. S. Arribas, E. Mediavilla, and J. L. Rasilla, *Astrophys. J.* **369**, 260 (1991).
23. P. D. Atherton, *ASP Conf. Ser.* **71**, 50 (1995).
24. R. Bacon, G. Adam, A. Baranne, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **113**, 347 (1995).

25. R. Bacon, J. Vernet, E. Borisova, et al., *The Messenger* **157**, 13 (2014).
26. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
27. K. G. Begeman, *Astron. and Astrophys.* **223**, 47 (1989).
28. G. Bekiaris, K. Glazebrook, C. J. Fluke, and R. Abraham, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455** (1), 754 (2016).
29. D. V. Bizyaev, A. V. Moiseev, and E. I. Vorobyov, *Astrophys. J.* **662** (1), 304 (2007).
30. J. Bland and R. B. Tully, *Astron. J.* **98**, 723 (1989).
31. A. I. Bogomazov, A. M. Cherepashchuk, V. M. Lipunov, and A. V. Tutukov, *New Astronomy* **58**, 33 (2018).
32. P. A. Boley, A. M. Sobolev, V. V. Krushinsky, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399** (2), 778 (2009).
33. N. Bouché, H. Carfantan, I. Schroetter, et al., *Astron. J.* **150** (3), 92 (2015).
34. J. Boulesteix, *ASP Conf. Ser.* **282**, 374 (2002).
35. J. Boulesteix, Y. Georgelin, M. Marcelin, and J. A. Fort, *Astroph. Space Science Library* **92**, 223 (1982).
36. J. Boulesteix, Y. Georgelin, M. Marcelin, and G. Monnet, *SPIE Conf. Ser.* **445**, 37 (1984).
37. J. Boulesteix, Y. P. Georgelin, E. Lecoarer, et al., *Astron. and Astrophys.* **178**, 91 (1987).
38. N. Brosch, I. Finkelman, T. Oosterloo, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **435** (1), 475 (2013).
39. N. Brosch, A. Y. Kniazev, A. Moiseev, and S. A. Pustilnik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401** (3), 2067 (2010).
40. H. Buisson, C. Fabry, and H. Bourget, *Astrophys. J.* **40** (1914).
41. D. A. Ciampa, K. A. Barger, N. Lehner, et al., *Astrophys. J.* **908** (1), 62 (2021).
42. S. Ciroi, V. L. Afanasiev, A. V. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **360** (1), 253 (2005).
43. L. Coccato, E. M. Corsini, A. Pizzella, and F. Bertola, *Astron. and Astrophys.* **465** (3), 777 (2007).
44. G. Courtès, *Annales d'Astrophysique* **23**, 115 (1960).
45. G. Courtes, *Astroph. Space Science Library* **92**, 123 (1982).
46. O. Daigle, C. Carignan, O. Hernandez, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **368** (3), 1016 (2006).
47. G. de Vaucouleurs and W. D. Pence, *Astrophys. J.* **242**, 18 (1980).
48. V. P. Debattista and T. B. Williams, *Astrophys. J.* **605** (2), 714 (2004).
49. E. M. Di Teodoro and F. Fraternali, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **451** (3), 3021 (2015).
50. S. N. Dodonov, V. V. Vlasyuk, and S. V. Drabek, *Fabry–Perot interferometer. User Manual* (SAO RAS, Nizhnij Arkhyz, 1995).
51. L. Drissen, T. Martin, L. Rousseau-Nepton, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (3), 3930 (2019).
52. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, and A. V. Moiseev, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **29** (1), 17 (2015).
53. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, and A. V. Moiseev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467** (1), L1 (2017a).
54. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and Y. A. Shchekinov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (2), 1833 (2017b).
55. O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and G. V. Smirnov-Pinchukov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **478** (3), 3386 (2018).
56. E. S. Egorova, O. V. Egorov, A. V. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **504** (4), 6719 (2021).
57. E. S. Egorova, A. V. Moiseev, and O. V. Egorov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (3), 3403 (2019).
58. B. Epinat, P. Amram, and M. Marcelin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **390**, 466 (2008).
59. C. Fabry and A. Perot, *Astrophys. J.* **13**, 265 (1901).
60. K. Fathi, T. Storchi-Bergmann, R. A. Riffel, et al., *Astrophys. J.* **641** (1), L25 (2006).
61. K. Fathi, G. van de Ven, R. F. Peletier, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **364** (3), 773 (2005).
62. I. Finkelman, A. Moiseev, N. Brosch, and I. Katkov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418** (3), 1834 (2011).
63. M. Franx, J. H. van Gorkom, and T. de Zeeuw, *Astrophys. J.* **436**, 642 (1994).
64. A. M. Fridman, V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, et al., *Astron. and Astrophys.* **430**, 67 (2005).
65. A. M. Fridman, O. V. Khoruzhii, V. V. Lyakhovich, et al., *Astron. and Astrophys.* **371**, 538 (2001a).
66. A. M. Fridman, O. V. Khoruzhii, E. V. Polyachenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **323** (3), 651 (2001b).
67. A. M. Fridman, O. V. Koruzhii, A. V. Zasov, et al., *Astronomy Letters* **24** (6), 764 (1998).
68. A. M. Fridman, A. G. Morozov, M. V. Nezhlin, and E. N. Snezhkin, *Physics Letters A* **109** (5), 228 (1985).
69. K. Gebhardt, C. Pryor, R. D. O'Connell, et al., *Astron. J.* **119** (3), 1268 (2000).
70. K. Gebhardt, C. Pryor, T. B. Williams, and J. E. Hesser, *Astron. J.* **110**, 1699 (1995).
71. J. J. González, J. Cepa, J. I. González-Serrano, and M. Sánchez-Portal, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **443** (4), 3289 (2014).
72. S. Gordon, B. Koribalski, S. Houghton, and K. Jones, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **315**, 248 (2000).
73. L. M. Haffner, R. J. Reynolds, S. L. Tufte, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **149** (2), 405 (2003).
74. V. A. Hagen-Thorn, L. V. Shalyapina, G. M. Karataeva, et al., *Astronomy Reports* **49** (12), 958 (2005).
75. O. Hernandez, K. Fathi, C. Carignan, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **120**, 665 (2008).
76. A. Jeanneau, J. Kosmalski, E. Muslimov, et al., *SPIE Conf. Ser.* **11447**, 114475M (2020).
77. G. I. G. Józsa, F. Kenn, U. Klein, and T. A. Oosterloo, *Astron. and Astrophys.* **468** (2), 731 (2007).
78. W. C. Keel, C. J. Lintott, W. P. Maksym, et al., *Astrophys. J.* **835** (2), 256 (2017).

79. W. C. Keel, W. P. Maksym, V. N. Bennert, et al., *Astron. J.* **149** (5), 155 (2015).
80. A. Kelz, M. A. W. Verheijen, M. M. Roth, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118** (839), 129 (2006).
81. T. J. Kentischer, W. Schmidt, M. Sigwarth, and M. V. Uexkuell, *Astron. and Astrophys.* **340**, 569 (1998).
82. S. Khoperskov, A. Moiseev, and A. Khoperskov, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi* **25**, 51 (2013).
83. S. A. Khoperskov, A. V. Moiseev, A. V. Khoperskov, and A. S. Saburova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441** (3), 2650 (2014).
84. D. V. Kozlova, A. V. Moiseev, and A. A. Smirnova, *Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **50** (1), 309 (2020).
85. D. Krajnović, M. Cappellari, P. T. de Zeeuw, and Y. Copin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **366** (3), 787 (2006).
86. M. Kraus, T. Liimets, A. Moiseev, J. P. Sanchez Arias, et al., arxiv:2106.15981 (2021).
87. M. R. Krumholz, B. Burkhardt, J. C. Forbes, and R. M. Crocker, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **477** (2), 2716 (2018).
88. C. J. Lintott, K. Schawinski, W. Keel, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399** (1), 129 (2009).
89. C. López-Cobá, S. F. Sánchez, J. Bland-Hawthorn, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (3), 4032 (2019).
90. C. López-Cobá, S. F. Sánchez, A. V. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467** (4), 4951 (2017).
91. T. A. Lozinskaya, *Sov. Astron.* **13**, 192 (1969).
92. T. A. Lozinskaya, *Sov. Astron.* **16**, 945 (1973).
93. T. A. Lozinskaya, V. N. Komarova, A. V. Moiseev, and S. I. Blinnikov, *Astronomy Letters* **31** (4), 245 (2005).
94. T. A. Lozinskaya and A. V. Moiseev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **381** (1), L26 (2007).
95. T. A. Lozinskaya, A. V. Moiseev, and N. Y. Podorvanyuk, *Astronomy Letters* **29**, 77 (2003).
96. V. V. Lyakhovich, A. M. Fridman, O. V. Khoruzhii, and A. I. Pavlov, *Astronomy Reports* **41** (4), 447 (1997).
97. M. Marcelin, P. Amram, P. Balard, et al., *SPIE Conf. Ser.* **7014**, 701455 (2008).
98. M. Marcelin, J. Boulesteix, and G. Courtes, *Astron. and Astrophys.* **108** (1), 134 (1982).
99. M. Marcelin, J. Boulesteix, and Y. Georgelin, *Astron. and Astrophys.* **128**, 140 (1983).
100. D. Martínez-Delgado, R. J. Gabany, K. Crawford, et al., *Astron. J.* **140** (4), 962 (2010).
101. I. Martínez-Delgado, G. Tenorio-Tagle, C. Muñoz-Tuñón, et al., *Astron. J.* **133** (6), 2892 (2007).
102. J. Melnick, M. Moles, R. Terlevich, and J.-M. Garcia-Pelayo, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **226**, 849 (1987).
103. C. Mendes de Oliveira, P. Amram, B. C. Quint, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **469** (3), 3424 (2017).
104. O. A. Merkulova, G. M. Karataeva, V. A. Yakovleva, and A. N. Burenkov, *Astronomy Letters* **38** (5), 290 (2012).
105. O. A. Merkulova, L. V. Shalyapina, and V. A. Yakovleva, *Astronomy Letters* **35** (9), 587 (2009).
106. C. J. Mitchell, T. B. Williams, K. Spekkens, et al., *Astron. J.* **149**, 116 (2015).
107. A. V. Moiseev, *Astron. and Astrophys.* **363**, 843 (2000).
108. A. V. Moiseev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 74 (2002).
109. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **63**, 201 (2008).
110. A. Moiseev, *EAS Publications Series* **48**, 115 (2011).
111. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **67** (2), 147 (2012).
112. A. Moiseev, *ASP Conf. Ser.* **486**, 61 (2014a).
113. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **69**, 1 (2014b).
114. A. Moiseev, S. Khoperskov, A. Khoperskov, et al., *Baltic Astronomy* **24**, 76 (2015a).
115. A. Moiseev, A. Perepelitsyn, and D. Oparin, *Experimental Astronomy* **50** (2-3), 199 (2020).
116. A. V. Moiseev and D. V. Bizyaev, *New Astronomy Reviews* **53** (7-10), 169 (2009).
117. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 181 (2008).
118. A. V. Moiseev and T. A. Lozinskaya, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423**, 1831 (2012).
119. A. V. Moiseev and V. V. Mustsevoi, *Astronomy Letters* **26**, 565 (2000).
120. A. V. Moiseev, S. A. Pustilnik, and A. Y. Kniazev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 2453 (2010).
121. A. V. Moiseev, K. I. Smirnova, A. A. Smirnova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **418** (1), 244 (2011).
122. A. V. Moiseev, A. V. Tikhonov, and A. Klypin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449**, 3568 (2015b).
123. A. V. Moiseev, J. R. Valdés, and V. H. Chavushyan, *Astron. and Astrophys.* **421**, 433 (2004).
124. G. Monnet, *ASP Conf. Ser.* **71**, 12 (1995).
125. J. P. Morgenthaler, W. M. Harris, F. Scherb, et al., *Astrophys. J.* **563** (1), 451 (2001).
126. A. G. Morozov, *Astron. Zh.* **56**, 498 (1979).
127. P. Morrissey, M. Matuszewski, D. C. Martin, et al., *Astrophys. J.* **864** (1), 93 (2018).
128. T. A. Movsessian, T. Y. Magakian, J. Bally, et al., *Astron. and Astrophys.* **470** (2), 605 (2007).
129. T. A. Movsessian, T. Y. Magakian, and A. N. Burenkov, *Astron. and Astrophys.* **627**, A94 (2019).
130. T. A. Movsessian, T. Y. Magakian, and A. V. Moiseev, *Astron. and Astrophys.* **541**, A16 (2012).
131. D. V. Oparin and A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **70** (4), 392 (2015).
132. H. Plana and J. Boulesteix, *Astron. and Astrophys.* **307**, 391 (1996).
133. H. Plana, J. Boulesteix, P. Amram, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **128**, 75 (1998).
134. J. Poutanen, S. Fabrika, A. F. Valeev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **432** (1), 506 (2013).
135. D. Punzo, J. M. van der Hulst, J. B. T. M. Roerdink, et al., *Astronomy and Computing* **12**, 86 (2015).

136. S. A. Pustilnik, L. N. Makarova, Y. A. Perepelitsyna, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (4), 4985 (2017).
137. S. Ramya, D. K. Sahu, and T. P. Prabhu, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **381** (2), 511 (2007).
138. N. Rangwala, T. B. Williams, C. Pietraszewski, and C. L. Joseph, *Astron. J.* **135**, 1825 (2008).
139. N. Rangwala, T. B. Williams, and K. Z. Stanek, *Astrophys. J.* **691** (2), 1387 (2009).
140. D. H. Rogstad, I. A. Lockhart, and M. C. H. Wright, *Astrophys. J.* **193**, 309 (1974).
141. M. Rosado, R. Langarica, A. Bernal, et al., *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conf. Ser.* **3**, 263 (1995).
142. J. R. Roy, R. Arsenault, and G. Joncas, *Astrophys. J.* **300**, 624 (1986).
143. S. D. Ryder, A. V. Zasov, V. J. McIntyre, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **293** (4), 411 (1998).
144. F. K. Sakhilov and M. A. Smirnov, *Sov. Astron.* **33**, 476 (1989).
145. L. V. Shalyapina, O. A. Merkulova, V. A. Yakovleva, and E. V. Volkov, *Astronomy Letters* **33** (8), 520 (2007).
146. L. V. Shalyapina, A. V. Moiseev, V. A. Yakovleva, et al., *Astronomy Letters* **30**, 583 (2004a).
147. L. V. Shalyapina, A. V. Moiseev, V. A. Yakovleva, et al., *Astronomy Letters* **30**, 1 (2004b).
148. P. V. Sheglov, *Nature* **199** (4897), 990 (1963).
149. O. K. Sil'chenko and A. V. Moiseev, *Astron. J.* **131** (3), 1336 (2006).
150. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and O. V. Egorov, *Astrophys. J. Suppl.* **244** (1), 6 (2019).
151. T. G. Sitnik, O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **486** (2), 2449 (2019).
152. A. Smirnova and A. Moiseev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **401** (1), 307 (2010).
153. A. A. Smirnova, N. Gavrilović, A. V. Moiseev, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **377** (2), 480 (2007).
154. A. A. Smirnova, A. V. Moiseev, and V. L. Afanasiev, *Astronomy Letters* **32** (8), 520 (2006).
155. A. A. Smirnova, A. V. Moiseev, and S. N. Dodonov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **481** (4), 4542 (2018).
156. K. T. Soto, S. J. Lilly, R. Bacon, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **458** (3), 3210 (2016).
157. O. Streicher, P. M. Weibacher, R. Bacon, and A. Jarno, *ASP Conf. Ser.* **442**, 257 (2011).
158. K. Taylor and P. D. Atherton, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **191**, 675 (1980).
159. P. J. Teuben, *ASP Conf. Ser.* **275**, 217 (2002).
160. R. B. Tully, *Astrophys. J. Suppl.* **27**, 415 (1974).
161. S. Veilleux, B. J. Weiner, D. S. N. Rupke, et al., *Astron. J.* **139**, 145 (2010).
162. L. Weitzel, A. Krabbe, H. Kroker, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **119**, 531 (1996).
163. B. C. Whitmore, R. A. Lucas, D. B. McElroy, et al., *Astron. J.* **100**, 1489 (1990).
164. V. A. Yakovleva, O. A. Merkulova, G. M. Karataeva, et al., *Astronomy Letters* **42** (4), 215 (2016).
165. H. Yang, Y.-H. Chu, E. D. Skillman, and R. Terlevich, *Astron. J.* **112**, 146 (1996).
166. A. V. Zasov and A. V. Moiseev, *Proc. IAU Symposium* **194**, 279 (1999).
167. A. V. Zasov and O. K. Sil'chenko, *ASP Conf. Ser.* **91**, 207 (1996).

Scanning Fabry–Perot Interferometer of the 6-m SAO RAS Telescope**A. V. Moiseev¹**¹ Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The scanning Fabry–Perot interferometer (FPI)—is the oldest method of optical 3D spectroscopy. It is still in use because of the high spectral resolution it provides over a large field of view. The history of the application of this method for the study of extended objects (nebulae and galaxies) and the technique of data reduction and analysis are discussed. The paper focuses on the performing observations with the scanning FPI on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences. The instrument is currently used as a part of the SCORPIO-2 multimode focal reducer. The results of studies of various galactic and extragalactic objects with the scanning FPI on the 6-m telescope—star-forming regions and young stellar objects, spiral, ring, dwarf and interacting galaxies, gas subsystems associated with the ionization cones of active galactic nuclei, galactic winds, etc. are briefly discussed. Further prospects for research with the scanning FPI of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences are discussed.

Keywords: techniques: interferometric—techniques: image processing—techniques: imaging spectroscopy—instrumentation: interferometers