

Спектральные методы исследования структуры и кинематики галактик

Яковлева Валерия Александровна, кандидат физико-математических наук, доцент
 Каратаева Гульнара Мирсатовна, кандидат физико-математических наук, доцент
 Меркулова Ольга Алексеевна, кандидат физико-математических наук, доцент
 Санкт-Петербургский государственный университет

В статье приводятся методы панорамной и щелевой спектроскопии галактик и иллюстрируется их применение на конкретных наблюдениях, полученных авторами на 6-м телескопе Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук (САО РАН).

Ключевые слова: внегалактическая астрономия, пекулярные галактики, панорамная и щелевая спектроскопия.

Для изучения особенностей кинематики звездных и газовых компонентов как в центральных областях галактик, так и на периферии применяются методы панорамной и длиннощелевой спектроскопии. В качестве приемника излучения используются приборы с зарядовой связью (ПЗС). Низкий уровень шума, высокая квантовая эффективность и широкий динамический диапазон ПЗС-приемников крайне важны при наблюдениях протяженных объектов (галактик, туманностей, НП-областей).

Спектральные наблюдения пекулярных галактик, которые использовались в данной работе, были получены в прямом фокусе (F/4) 6-м телескопа Специальной Астрофизической Обсерватории Российской Академии Наук с редуктором светосилы SCORPIO [1] в режиме длиннощелевой спектроскопии и интерферометра Фабри-Перо (ИФП), а также с мультизрачковым волоконным спектрографом (MPFS) ([2])

Щелевая спектроскопия.

Наблюдения в режиме щелевой спектроскопии проводятся для получения данных о кинематике газового и звездного компонентов галактики.

Щель обычно устанавливается вдоль большой, а иногда и малой оси, а в случае галактик с полярными кольцами - вдоль большой оси предполагаемого кольца. Для описанной задачи наблюдения проводятся в "сине-зеленом" спектральном диапазоне, в который попадают эмиссионные линии H β , [OIII] $\lambda\lambda$ 4959,5007Å и др. и абсорбционные линии старого звездного населения MgI5175Å, FeI+Ca5270Å, а также в "красном" диапазоне, в котором наиболее яркими являются эмиссионные линии H α , [NII] $\lambda\lambda$ 6548,6584Å и др. На рис. 1 в качестве примера приведены фрагменты спектра галактики NGC 2748 вдоль большой оси.

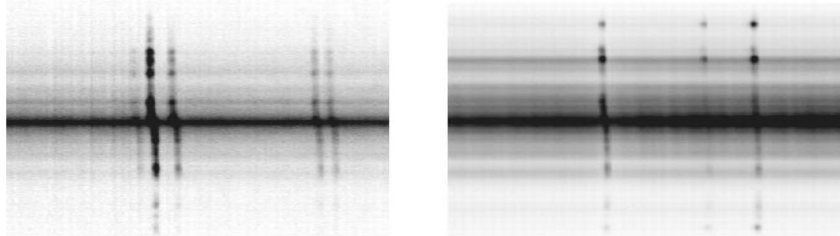


Рис. 1. Спектр галактики NGC 2748. Слева: H α , дублеты [NII] $\lambda\lambda$ 6548,6584Å, [NII] $\lambda\lambda$ 6716,6731Å; справа – H β и дублет [OIII] $\lambda\lambda$ 4959,5007Å. Длина волны увеличивается слева-направо

Обработка спектральных наблюдений, полученных со спектрографом с длинной щелью включала в себя проведение стандартных процедур. Она состояла из следующих шагов: двумерная геометрическая коррекция кадров, исключение спектра фона неба, определение лучевых скоростей по эмиссионным и абсорбционным линиям.

С помощью гаусс-анализа определялось положение центра эмиссионных линий, их ширина на половине интенсивности (FWHM), интенсивность линии, отношение сигнал/шум в исследуемом спектре. Лучевая скорость ионизованного газа находилась по величине красного смещения согласно формуле:

$$v = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, \quad (1)$$

где $\Delta\lambda = \lambda_{\text{obs}} - \lambda$, λ – лабораторная длина волны, λ_{obs} – наблюдаемая длина волны, а c – скорость света.

Наблюдаемые полуширины исправлялись за ширину инструментального профиля согласно стандартному соотношению:

$$(FWHM)^2 = (FWHM)_{\text{obs}}^2 - (FWHM)_{\text{instr}}^2. \quad (2)$$

Найденная по формуле (1) скорость является скоростью объекта относительно наблюдателя. Вводились поправки за движение Земли вокруг Солнца.

Для измерения скорости и дисперсии скоростей по линиям поглощения использовался кросс-корреляционный метод. Методика измерения v и σ с применением техники преобразований Фурье приведена в работе [3].

Наблюдаемую кривую вращения обычно раскладывают на компоненты галактики: балдж, диск, гало. Рис.2 показывает такое разложение для галактики NGC 2748.

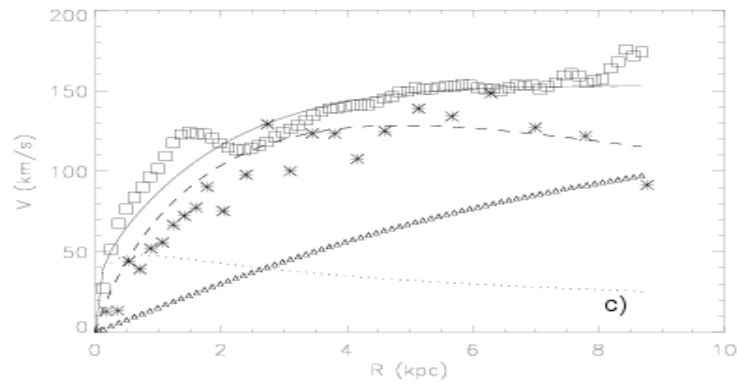


Рис. 2. Результаты, полученные с помощью длиннощелевого спектрографа для галактики NGC 2748: наблюдаемая кривая вращения газового компонента (квадраты) и ее модельное представление (сплошная линия), * – наблюдаемая кривая вращения звездного компонента; разными значками представлены кривые вращения отдельных компонентов: пунктирная линия - балдж, штриховая - диск, треугольники – гало (см.[4])

На рис.3 представлены кривые лучевых скоростей для галактики PGC 60020, полученные при двух положениях щели. Результаты наблюдений показывают, что звездный и газовые компоненты вращаются в почти перпендикулярных плоскостях, что характерно для галактик с полярными кольцами.

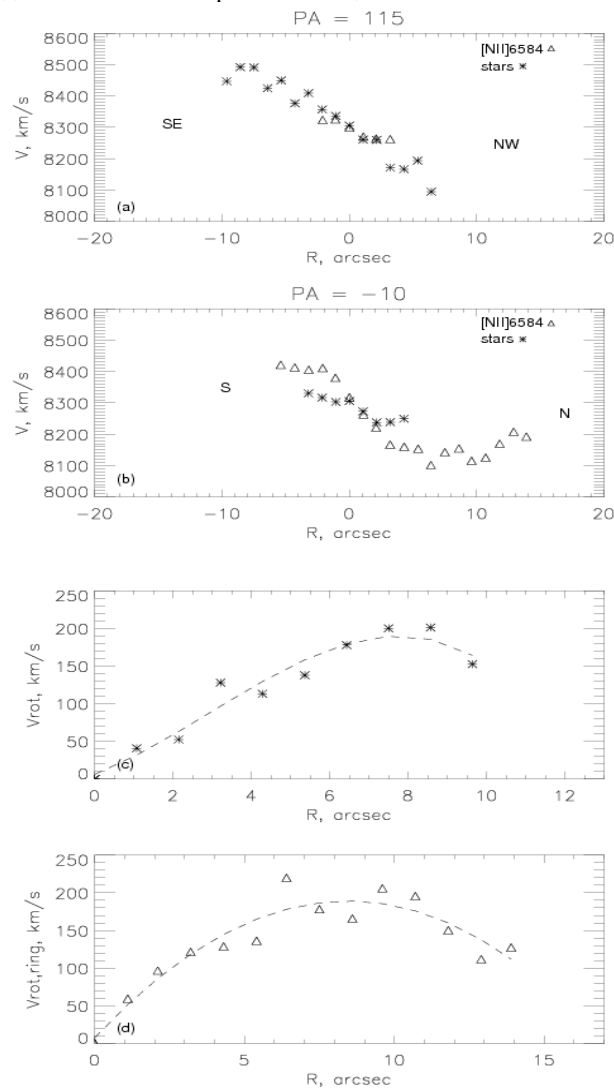


Рис. 3. Результаты, полученные с помощью длиннощелевого спектрографа для галактики PGC 60020: кривые лучевых скоростей ионизованного газа и звезд вдоль больших осей главного тела (а) и предполагаемого кольца (b); кривые вращения звездного компонента главного тела (с) и ионизованного газа кольца (d). Значками (звездочки и треугольники соответственно) показаны наблюдаемые кривые вращения, штриховыми линиями — средние сглаженные кривые вращения (см. [5])

Панорамная спектроскопия

С помощью *Мультизрачкового волоконного спектрографа* можно детально изучать структуру и кинематику как ионизованного газа, так и звездной составляющей в центральной части галактики. Наблюдения представлялись в виде кубов данных, в которых каждому элементу изображения соответствует спектр. На рис. 4 приведен пример таких спектров для центральной части галактики NGC 4586.

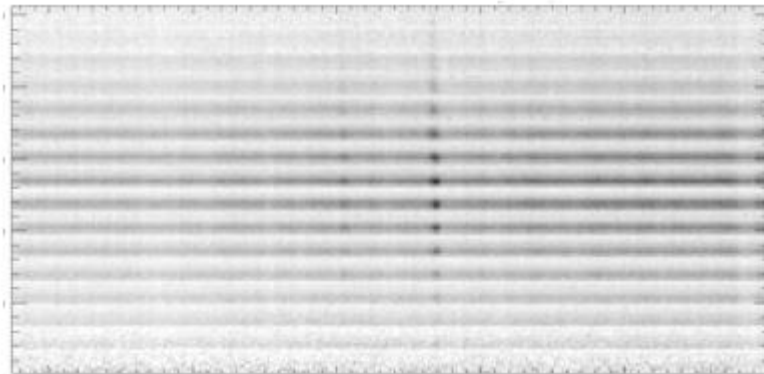


Рис. 4. Спектр галактики NGC 4586 в области дублета [OIII] $\lambda\lambda 4959, 5007\text{\AA}$. Длина волны увеличивается слева направо; строки соответствуют различным пространственным элементам изображения

Карты распределения яркости и лучевых скоростей (поля скоростей) строились по ярким эмиссионным линиям, при этом положение, полуширина и интенсивность эмиссионных линий определялись, как и при обработке длиннощелевых данных, путем аппроксимации профилей спектральных линий гауссианой. На примере рис.5 мы видим, что характер полей лучевых скоростей газового компонента галактики IC 883 типичен для дисковых галактик. Ход линий равных лучевых скоростей (изовел) четко указывает на вращение вокруг малой оси галактики, причем южная сторона приближается к нам, а северная удаляется от нас.

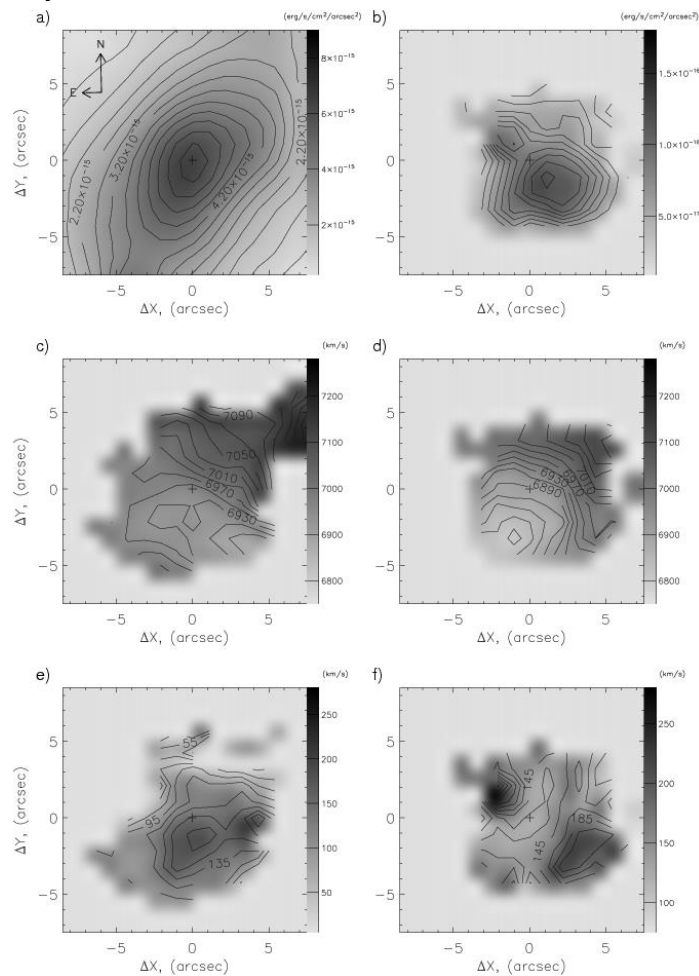


Рис. 5. Результаты, полученные с помощью MPFS для галактики IC 883: (a) – распределение яркости в узком континууме вблизи линии H β ; (b) – распределение яркости в линии [OIII] $\lambda 5007\text{\AA}$; (c) – поле лучевых скоростей звезд; (d) – поле лучевых скоростей в линии [OIII] $\lambda 5007\text{\AA}$; (e) – распределение дисперсии скоростей звезд; (f) – распределение дисперсии скоростей в линии [OIII] $\lambda 5007\text{\AA}$ (см. [6])

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо позволяет строить крупномасштабные поля скоростей, карты распределения яркости и дисперсии скоростей в отдельных эмиссионных линиях

Наши наблюдения проводились в районе линий H α и [NII] λ 6584Å.

Методика обработки данных подробно описана в работе [7].

Наблюдения с ИФП состоят из последовательного получения нескольких десятков изображений интерференционных колец от изучаемого объекта и калибровочной лампы при изменении оптического пути между плоскопараллельными пластинками ИФП. После обработки изображения представляют собой куб данных (рис. 6), где x, y - пространственные координаты, а z - длины волн (или доплеровские скорости в определенной спектральной линии).

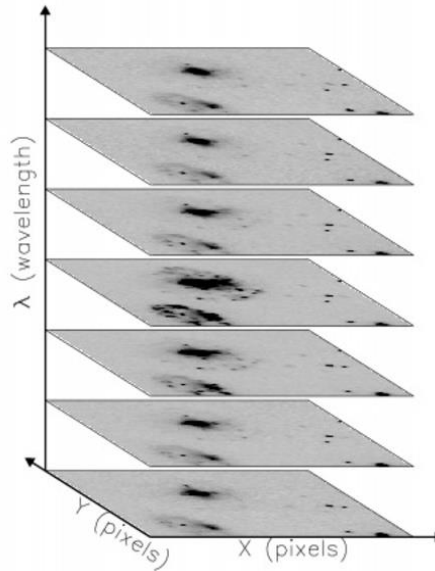


Рис. 6. Куб данных пары галактик VV 330 (приведена каждая 8-ая интерферограмма)

На следующем этапе осуществляется перевод куба данных объекта в шкалу длин волн на основе построенной карты фазового сдвига.

После этого проводится оптимальная фильтрация данных – гауссовское сглаживание по спектральной координате с FWHM, равной 1.5 канала, и сглаживание двумерной гауссианой по пространственным координатам с FWHM \approx 1.5 - 3 пикселя (в зависимости от качества изображений). Далее для построения полей скоростей и монохроматических изображений использовалась гаусс-аппроксимация профилей эмиссионных линий.

Рис.7 показывает результаты обработки наблюдений NGC 2748. Наряду с диффузным излучением на изображениях галактики в эмиссионных линиях наблюдаются многочисленные яркие конденсации (вероятно, HII-области), которые концентрируются к плоскости галактики, а также образуют цепочки вдоль спиральных рукавов.

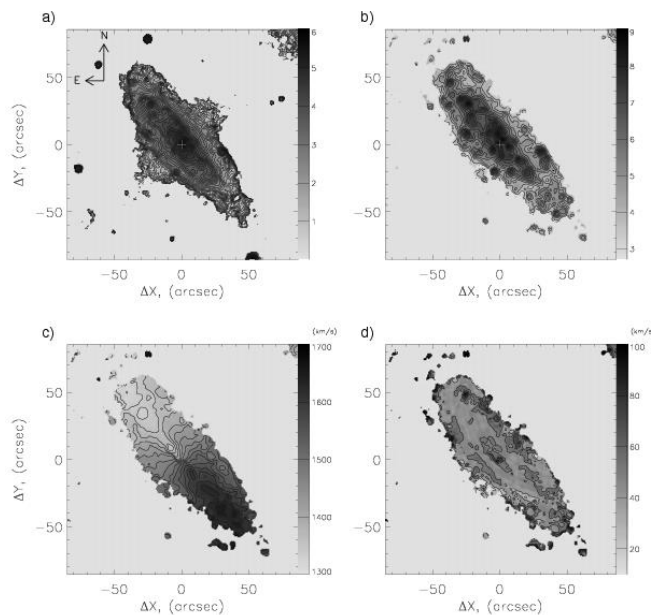


Рис. 7. Результаты, полученные с помощью ИФП для галактики NGC 2748. а) – распределение яркости в узком континууме вблизи линии H α , полученное с ИФП; б) - распределение яркости в линии H α , полученное с ИФП; в) - поле лучевых скоростей в линии H α (шаг между изовелами 20 км/с); д) -распределение дисперсии скоростей в линии H α (см. [8])

Рассмотренные нами спектральные приборы обладают разной проникающей силой и отличаются по размерам исследуемых областей. Совместное рассмотрение наблюдательных данных позволяет получить более полную информацию об объекте. Так, из рис. 8, можно сказать, что восточная часть газового диска галактики NGC 7465 удаляется от нас, а западная приближается, при этом динамическая ось постепенно поворачивается. В то же время изучение кинематики звезд позволяет установить, что в центральной области NGC 7465 выделяется звездная дискообразная структура, ось вращения которой находится под значительным углом к оси вращения основного звездного диска.

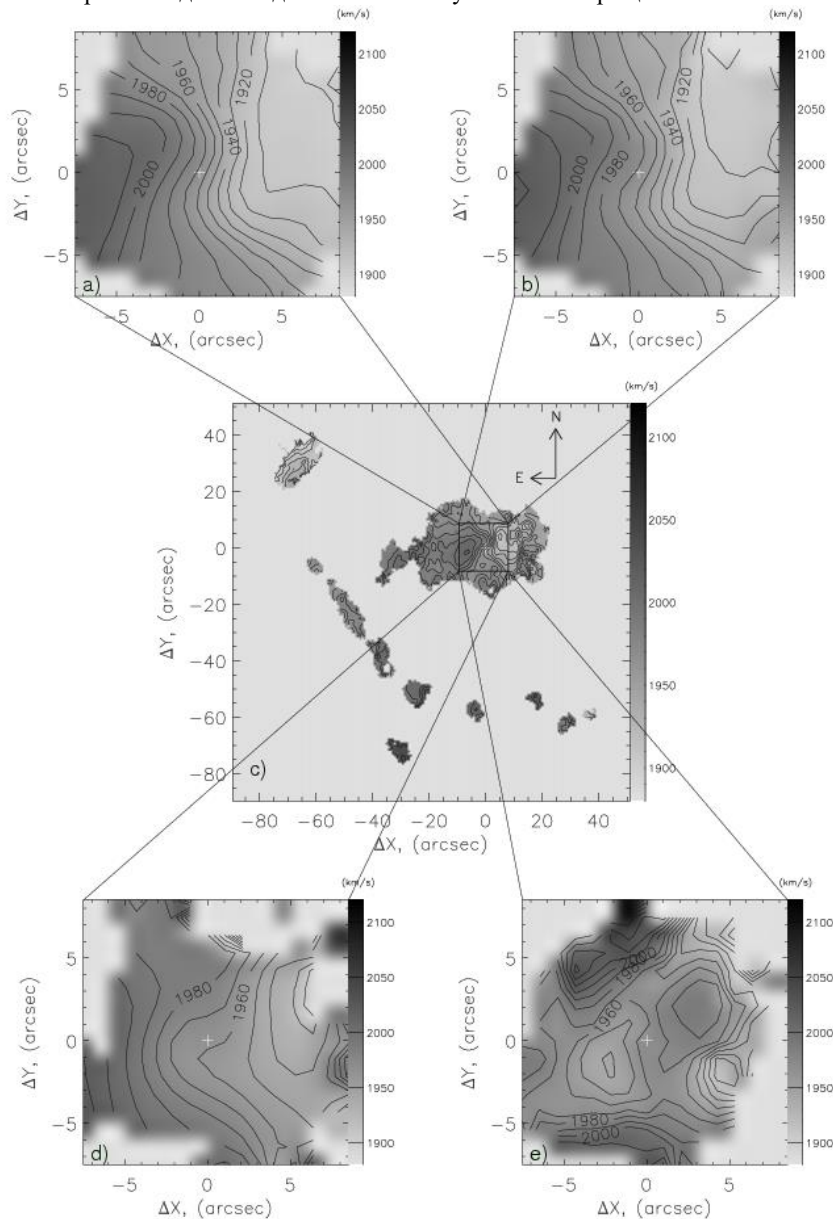


Рис. 8. Результаты, полученные с помощью ИФП и MPFS для галактики NGC 7465. Поля лучевых скоростей ионизованного газа в линиях: H α (MPFS) – а); [NII] λ 6584Å (MPFS) – б); H α (ИФП) – в); [OIII] λ 5007Å (MPFS) – д); и звездного компонента (MPFS) – е) (см. [9])

Литература:

1. В. Л. Афанасьев и А. В. Моисеев, Письма в “Астрон. журн.”. 31, 214, 2005
2. http://www.sao.ru/hq/lsvfo/devices/mpfs/mpfs_main.html
3. J. Tonry and M. Davis, Astron. Astrophys. 84, 1511, 1979
4. Меркулова О.А., Шаляпина Л.В., Яковлева В.А., Письма в Астрон. журн., т. 35, стр. 652, 2009
5. Merkulova, O.A.; Karataeva, G.M.; Yakovleva, V.A.; Burenkov, A.N.; Astrophysical Bulletin, v.67, p. 374, 2012
6. Яковлева В.А., Меркулова О.А., Каратаева Г.М., Шаляпина Л.В., Яблокова Н.В., Буренков А.Н., Письма в Астрон. журн., т. 42, №4, стр. 246-259, 2016
7. Moiseev A.V., Bull. Spec. Astrophys. Obs., 54, 74, 2002
8. Меркулова О.А., Шаляпина Л.В., Яковлева В.А., Письма в Астрон. журн., т. 35, стр. 652, 2009
9. Меркулова О.А., Каратаева Г.М., Яковлева В.А., Буренков А.Н., Письма в Астрон. журн., т. 38, стр. 333-347, 2012