

ПРОТИВОВАРЩАЮЩИЙСЯ ГАЗОВЫЙ ДИСК И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ В S0 ГАЛАКТИКЕ NGC 934

© 2023 г. О. К. Сильченко^{1*}, А. В. Моисеев^{2,1},
Д. В. Опарин², Д. В. Злыднева¹, Д. В. Козлова³

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

³Астрофизический институт имени Лейбница, Потсдам, Германия

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 02.06.2023 г.; принята к публикации 02.06.2023 г.

С помощью длиннощелевой и панорамной спектроскопии на 6-метровом телескопе САО РАН, а также путем картирования эмиссионных линий в узкой полосе пропускания 13 Å с прибором MaNGaL на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ, исследована газовая компонента гигантской линзовидной галактики NGC 934. Кинематика газа в галактике оказалась совершенно рассогласована с кинематикой звезд, что свидетельствует о недавней аккреции большого количества холодного газа галактикой. В аккрецированном газе на периферии галактики идет слабое звездообразование, главным образом в кольце радиусом 26 кпк, что может обещать надстройку гигантского звездного диска низкой поверхностной яркости в этой галактике раннего типа. Металличность газа в кольце звездообразования близка к солнечной: источником аккреции, скорее всего, является поглощение массивного спутника, богатого газом.

Ключевые слова: диски галактик, структура галактик, эволюция галактик.

DOI: 10.31857/S0320010823050054, **EDN:** GMST0B

ВВЕДЕНИЕ

Звездообразование в кольцевых структурах линзовидных галактик — слабо исследованный феномен, который, тем не менее, является ключом к происхождению хаббловских морфологических типов галактик. Действительно, спиральные и линзовидные галактики имеют идентичную структуру: они содержат два крупномасштабных компонента, протяженный звездный диск и центрально-концентрированный балдж с весьма разным вкладом в общую звездную массу галактики. И те, и другие также обладают протяженным газовым диском (S0-галактики в четверти всех случаев, Серра и др., 2012, 2014). Тем не менее в дисках спиральных галактик идет весьма заметное звездообразование в спиральных ветвях, и звездные диски спиральных галактик растут ‘inside-out’: более эффективно звездообразование протекает в центральных плотных областях дисков и раньше полностью заканчивается, а со временем “основные события” перемещаются на

периферию дисков, обеспечивая эволюционный рост размеров дисков спиральных галактик. В дисках линзовидных галактик звездообразование, если и встречается, то на один-два порядка слабее, и оно сконцентрировано в кольцевых структурах. Растут ли при этом диски линзовидных галактик на большой временной шкале — вопрос, на который пока нет наблюдательного ответа.

Если галактики имеют одинаковую структуру, массу и находятся в сходном окружении, а большинство как спиральных, так и линзовидных галактик ближней Вселенной принадлежат группам (Макаров, Караченцев, 2011), странно, что они могут испытывать статистически разную эволюцию. В современной парадигме эволюция спиральных галактик сопровождается непрерывным натеканием газа извне (см., например, Таккони и др., 2020), и это натекание питает плавный ход звездообразования в дисках спиральных галактик. Естественно предположить, что на соседнюю линзовидную галактику внешний газ тоже должен натекать; почему же в них подавлено звездообразование? Мы (Сильченко и др., 2019) предположили, что различие может определяться разным направле-

*Электронный адрес: olga@sai.msu.su

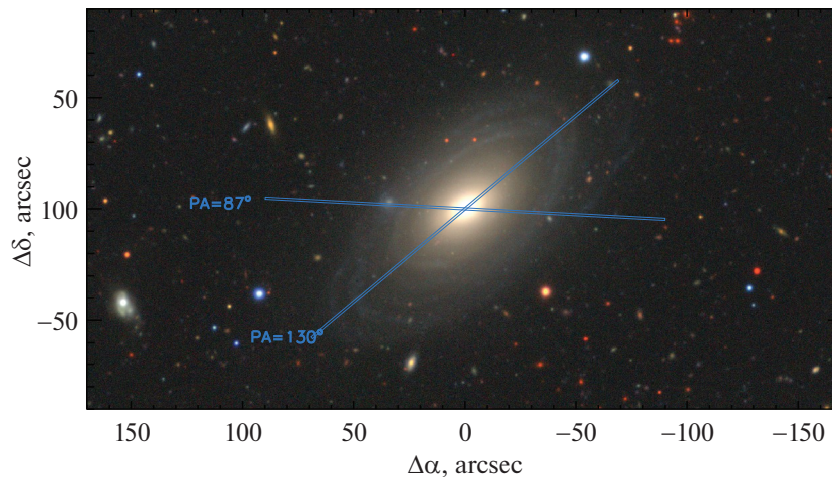


Рис. 1. Изображение NGC 934 в комбинированных цветах из обзора DECaLS. Показано положение щелей спектрографов SCORPIO и SCORPIO-2.

нием втекающих потоков (которые из общих соображений должны быть распределены среди всех галактик изотропно). В линзовидных галактиках часто наблюдается рассогласование в ориентации плоскостей вращения газа и звезд (Кюйкен и др., 1996; Дэвис и др., 2011; Катков и др., 2014; Сильченко и др., 2019); может быть, все дело в том, что в линзовидные галактики внешний газовый поток приходит под значительным углом? Ударные волны, формирующиеся при вхождении наклонного газового потока в потенциальную яму звездного диска, способны нагреть газ и лишить его способности формировать звезды.

Мы продолжаем исследование направления прихода газа в линзовидные галактики. В настоящей работе представлены результаты по галактике NGC 934. Это гигантская ($M_B = -20.7$, LEDA¹, $\log M_* = 10.9$, Эккерт и др., 2015) линзовидная (Бута, 2019) галактика, которая на рис. 1, представляющем ее изображение в оптических лучах в комбинированных цветах, выглядит как классическая галактика раннего типа. И действительно, ее интегральный цвет $u - r = 2.7$ (SDSS²) позволяет отнести галактику к “красной последовательности”. Однако фотометрические наблюдения в ультрафиолете космического телескопа GALEX (Хиль де Пас и др., 2007) обнаружили у галактики заметное в далеком ультрафиолетовом диапазоне FUV однородное кольцо с радиусом около 20 кпк (рис. 2, правый). Его цвет $FUV - r = 4.71$ позволил Лемониас и др. (2011) классифицировать внешние области NGC 934 как XUV-диск, т.е. протяженный диск с текущим звездообразованием, радиус которого существенно превышает радиус

диска старых звезд. Вдобавок, у галактики довольно много газа — масса нейтрального водорода, оцененная по линии 21 см в работе Старк и др. (2016), с учетом расстояния до галактики 96 Мпк (Саулдер и др., 2016), достигает 3–5 млрд солнечных масс. (Линейный масштаб при таком принятом расстоянии составляет 465 пк в угл. сек.) Похоже, эта линзовидная галактика именно сейчас строит свой звездный диск ‘inside-out’ на больших масштабах. Пикантности ситуации добавляет то, что NGC 934 выглядит достаточно изолированной галактикой: до ближайшего соседа 0.226 Мпк (Худ и др., 2018).

НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Спектральные наблюдения галактики NGC 934 на 6-м телескопе САО РАН с длинной щелью осуществлялись дважды. В 2017 г., 13/14 октября, на редукторе светосилы SCORPIO (Афанасьев, Моисеев, 2005) с гризмой VPHG2300G в течение 1.5 ч экспонировался диапазон 4800–5500 Å со спектральным разрешением около 2 Å; качество изображений было умеренным: 2.9 угл. сек. В 2021 г., 9/10 октября, наблюдения были проведены в течение 2 ч с помощью редуктора прямого фокуса SCORPIO-2 (Афанасьев, Моисеев, 2011), с гризмой VPHG1200@540 (диапазон 3700–7100 Å) и спектральным разрешением 5 Å; качество изображений составляло 1.8 угл. сек. В обоих случаях щель шириной 1'' и длиной около 6' позволяла брать фон неба для вычитания с краев щели. Щель в 2017 г. была сориентирована вдоль большой оси изофот галактики в $PA = 130$ deg, а в 2021 г. — через спутник, проецирующийся на кольцо галактики прямо на восток от ядра в $PA = 87$ deg. Спутник

¹<http://leda.univ-lyon1.fr>, Макаров и др., 2014

²<http://skyserver.sdss.org/dr12>

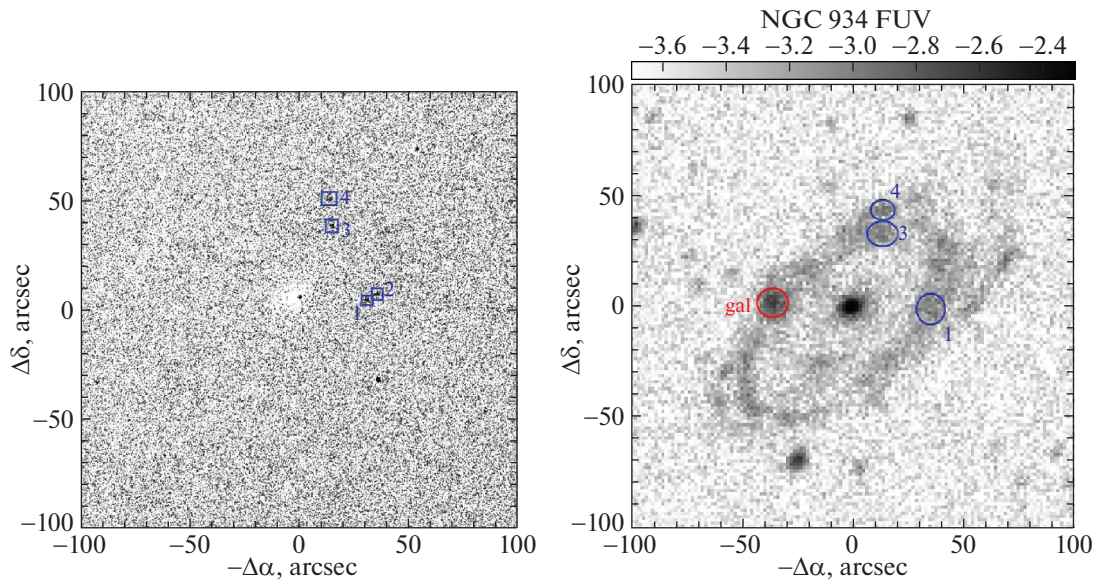


Рис. 2. Звездообразование в кольце: карта в эмиссионной линии $H\alpha$ (слева) и в ультрафиолетовой полосе FUV (справа). На картах синим пронумерованы области звездообразования, для которых рассчитаны отношения потоков сильных эмиссионных линий и оценен механизм возбуждения. Красным кружком обведена галактика заднего фона, проецирующаяся на кольцо.

оказался объектом фона: его красное смещение, $z = 0.04$, в 2 раза больше, чем у NGC 934. Лучевая скорость этой галактики заднего фона, отмеченная красным кружком на рис. 2, измеренная по трем эмиссионным линиям, $H\alpha$, $[\text{OIII}]\lambda 5007$ и $H\beta$, оказалась равна $V_r = 12\,407 \text{ км с}^{-1} \pm 15 \text{ км с}^{-1}$. Измерения лучевых скоростей звездной компоненты проводились с помощью кросс-корреляции поэлементных спектров, взятых вдоль щели на разных расстояниях от центра галактики, либо со спектром звезды спектрального класса поздний G—ранний K, либо со спектром утреннего неба, снятым в ту же ночь с той же аппаратурой. Лучевые скорости газовой компоненты измерялись по эмиссионной линии $[\text{OIII}]\lambda 5007$, наиболее однородно покрывающей центральную область галактики. Интенсивности в линиях для расчета отношений потоков сильных эмиссионных линий вычислялись путем гаусс-анализа бленды эмиссионных линий $H\alpha + [\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6583$ и абсорбционной линии $H\alpha$, а также бленд $[\text{OIII}]\lambda 5007 + \text{TiI} 5000 + 5007 + 5015$ и $H\beta(\text{emis}) + H\beta(\text{abs})$.

Также были проведены наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ (Шатский и др., 2020) с картировщиком узких эмиссионных линий MaNGaL (Mapper of Narrow Galaxy Lines, Моисеев и др., 2020). MaNGaL является фотометром с перестраиваемым фильтром на базе сканирующего интерферометра Фабри—Перо с шириной инструментального контура (FWHM) 13 \AA . Детектор — низкошумящая ПЗС-камера iKon-M934

форматом 1024×1024 пикселя. Масштаб составлял $0.325''/\text{пиксель}$. Во время наблюдений последовательно выполнялись короткие накопления изображений при настройке полосы фильтра на эмиссионные линии $H\alpha$, $[\text{NII}]\lambda 6583$ и $[\text{OIII}]\lambda 5007$ (с учетом средней скорости галактики и гелиоцентрической поправки) и на континуум, смещенный

Таблица 1. Отношения потоков эмиссионных линий по данным SCORPIO-2 в ориентации $PA = 87^\circ$

R''	$\log([\text{NII}]\lambda 6583/H\alpha)$	$\log([\text{OIII}]\lambda 5007/H\beta)$
-39.0	-0.71 ± 0.26	—
-31.0	-0.54 ± 0.04	-0.02 ± 0.18
+18.5	-0.41 ± 0.18	—

Таблица 2. Отношения потоков эмиссионных линий по данным MaNGaL

Номер области	$\log([\text{NII}]\lambda 6583/H\alpha)$	$\log([\text{OIII}]\lambda 5007/H\beta)$
1	-0.58 ± 0.09	$+0.35 \pm 0.17$
2	-0.33 ± 0.07	-0.11 ± 0.25
3	-0.18 ± 0.08	-0.11 ± 0.29
4	-0.42 ± 0.08	$+0.23 \pm 0.19$

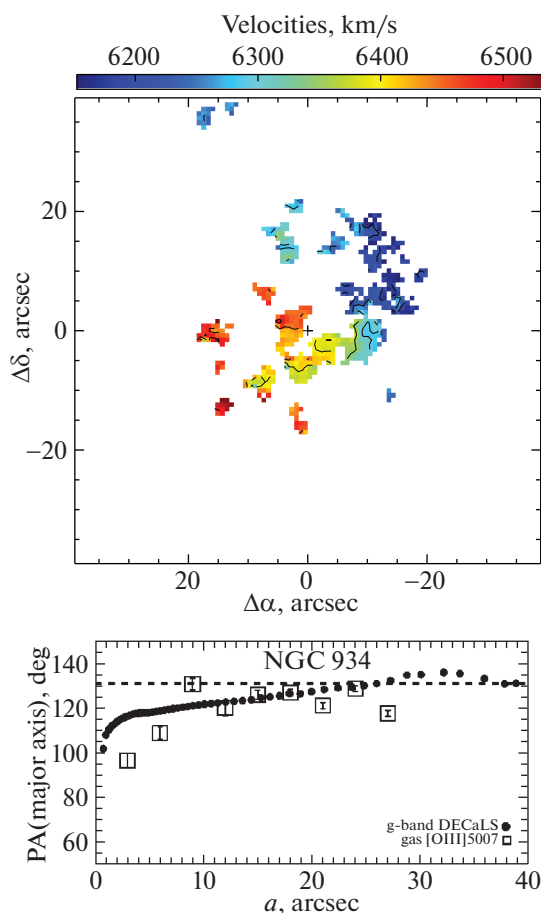


Рис. 3. Поле скоростей ионизованного газа по данным Фабри–Перо (вверху) и сравнение кинематической линии узлов плоскости вращения газа с ориентацией большой оси изофот (линией узлов звездного диска) (внизу). Квадраты на нижнем рисунке показывают результаты анализа поля скоростей газа (линию узлов газового диска), черные точки — результаты фотометрии (ориентацию большой оси изофот звездного населения), в том числе штрихованная линия относится к ориентации большой оси самых внешних изофот, т.е. к линии узлов звездного диска.

в сторону от линии. Такие серии экспозиций позволяют усреднить вклад от вариаций атмосферной прозрачности и качества изображений. Наблюдения выполнялись в две ночи, 7 и 8 ноября 2021 г., с суммарными экспозициями 1500 с в $H\alpha$, 3000 с в $[\text{NII}]\lambda 6583$ и 3600 с в $[\text{OIII}]\lambda 5007$; качество изображений при наблюдениях было $1.2''$. Обработка данных MaNGaL мало отличается от методики работы с обычными прямыми снимками с узкими фильтрами и описана в статье Моисеева и др. (2020). После вычитания континуума мы получили карты полного поля галактики в эмиссионных линиях $H\alpha$, $[\text{NII}]\lambda 6583$ и $[\text{OIII}]\lambda 5007$. Распределение яркости в линии $H\alpha$ показано на рис. 2. Такое картирование позволило не только изучить морфологию ионизованного газа, но и оценить отношения сильных эмиссионных линий в областях звездообразования по всему диску галактики; с помощью этих измерений можно ограничить механизм возбуждения ионизованного газа и определить содержание кислорода в газе там, где он возбуждается

молодыми звездами. Вычисление отношения близких эмиссионных линий $H\alpha$ и $[\text{NII}]\lambda 6583$ корректировалось за вклад крыльев соседней линии по калибровке, описанной Моисеевым и др. (2020).

И, наконец, 12/13 октября 2021 г. для NGC 934 было получено полное двумерное поле скоростей ионизованного газа. Галактика наблюдалась на БТА со сканирующим интерферометром Фабри–Перо в составе редуктора SCORPIO-2. Этот прибор позволяет осуществлять панорамную спектроскопию кинематики ионизованного газа на большом поле зрения — в данном случае 6 угл. мин. Сканируется спектр в узком диапазоне, ограниченный интерференционным фильтром с шириной полосы $FWHM = 15\text{--}30 \text{ \AA}$. Для сканирования NGC 934 была выбрана эмиссионная линия $[\text{OIII}]\lambda 5007$, яркость которой, как было отмечено выше, равномерно распределена в центральной области галактики. Использование эталона Фабри–Перо 186-го порядка обеспечивало спектральное

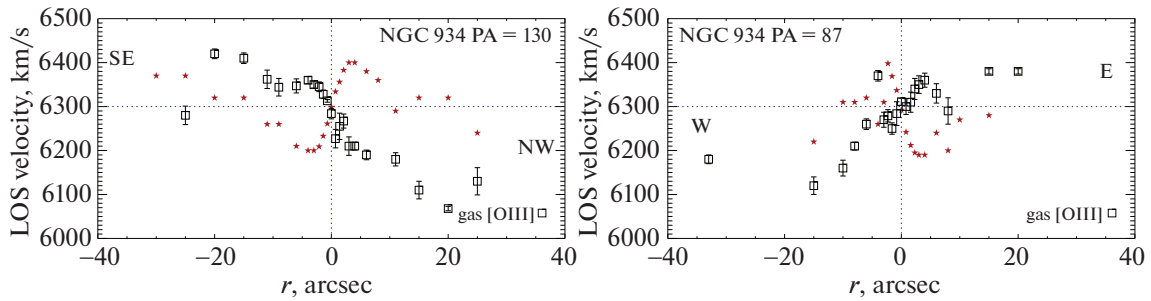


Рис. 4. Профили лучевых скоростей газа и звезд в разрезах с длинной щелью в $PA = 130^\circ$ (слева) и $PA = 87^\circ$ (справа). Красные звездочки характеризуют звездную кинематику, черные квадраты — газовую.

разрешение $FWHM = 2.0 \text{ \AA}$ ($\sim 120 \text{ км с}^{-1}$) в спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 20 \text{ \AA}$ вокруг линии. Всего было получено 30 интерферограмм с меняющимся зазором между пластинами эталона Фабри–Перо; экспозиция каждой интерферограммы была 3 мин. Наихудшее пространственное разрешение во время наблюдений, к которому были приведены все интерферограммы, составляло 2.8 сек. дуги. Обработка данных наблюдений выполнялась стандартным образом, как это описано в обзоре Моисеева (2021). В результате подгонки спектров эмиссионной линии профилем Фойхта были получены полные карты галактики в зеленом континууме и в эмиссионной линии $[\text{OIII}]\lambda 5007$, поле лучевых скоростей ионизованного газа и распределение дисперсии лучевых скоростей по телу галактики. Поле скоростей представлено на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ориентация осей вращения газа и звезд

Имея двумерное поле лучевых скоростей, которые являются проекциями полных скоростей газовых облаков на наш луч зрения, в предположении, что газ вращается по круговым орбитам, восстановить ориентацию в пространстве плоскости его вращения — или направление спина, перпендикулярного этой плоскости. Мы используем для этого метод наклонных колец со скользящим радиусом, реализованный в программе DETKA (Моисеев и др., 2004). Беглый взгляд на поле скоростей ионизованного газа, построенного по измерениям линии $[\text{OIII}]\lambda 5007$ с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо (рис. 3), обнаруживает разворот кинематической большой оси — линии узлов плоскости вращения. И действительно, результаты анализа поля скоростей с программой DETKA показывают скачок позиционного угла линии узлов (рис. 3): в центре $PA_0 < 100^\circ$, а на радиусах больше $10''$ — $PA_0 = 128^\circ \pm 5^\circ$. На этом рис. 3 мы также нанесли ориентацию фотометрической большой оси по результатам изофотного анализа изображения NGC 934 в полосе g из обзора DECaLS

(Дей и др., 2019). В случае круглой формы диска галактики, если мы наблюдаем его под некоторым углом к плоскости, большая ось эллиптических изофот проекции диска на картинную плоскость будет совпадать с линией узлов. Также с линией узлов будет совпадать и направление максимального наблюдаемого градиента лучевой скорости в случае вращения по круговым орбитам. Мы видим на рис. 3, что плоскость вращения газа может совпадать с плоскостью звездного диска, начиная с радиуса примерно $12''$. Околоядерная же часть газового диска, если мы предполагаем его плоское круговое вращение, наклонена к экваториальной плоскости галактики.

На рис. 4 показаны профили лучевых скоростей газа и звезд в двух позиционных углах, $PA = 130^\circ$ (слева) и $PA = 87^\circ$ (справа), полученные в результате спектральных наблюдений с длинной щелью. Мы видим, что кинематика газа и звезд совершенно не совпадает. В то время как на внутреннем краю диска, $R = 12''$ – $15''$, газ и звезды вероятно лежат в одной плоскости, учитывая одинаковую ориентацию их линий узлов (рис. 3), хотя и вращаются навстречу друг другу, около центра газ и звезды скорее вращаются примерно в полярных или в сильно наклоненных плоскостях по отношению к ориентации внешнего галактического диска, если мы предполагаем их круговое вращение. Что касается радиусов $R > 15''$, то здесь мы видим нулевую проекцию скорости звезд на луч зрения; это может быть связано с наличием двух звездных подсистем: одной, связанной с газом, а другой, являющейся продолжением центрального звездного компонента и противовращающейся по отношению к газу. Однако это предположение требует дальнейшего исследования со спектрами более высокого разрешения.

Положение кинематической оси внутренних областей звездного диска мы определили по измерениям центральных градиентов лучевых скоростей в двух разрезах:

$$\frac{dv_r}{dr_{\text{proj}}} = \frac{dV_{\text{rot}}}{dR} \sin i \cos(PA - PA_0),$$

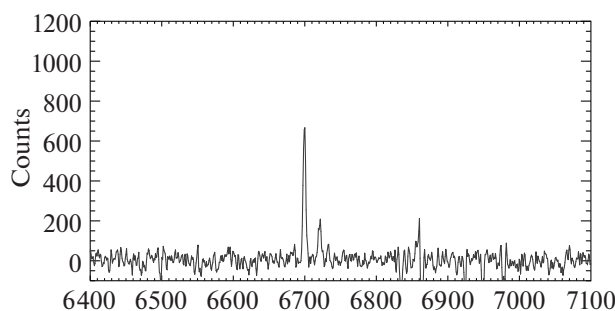


Рис. 5. Красная часть длиннощелевого спектра SCORPIO-2/БТА эмиссионной области 1, в центре — эмиссионные линии $H\alpha$ и $[NII]\lambda 6583$.

где в левой части формулы стоят измеряемые по наблюдаемому профилю лучевых скоростей величины, а в правой — центральный градиент скорости твердотельного вращения и тригонометрические функции от угла наклона плоскости вращения к лучу зрения и от разницы между ориентацией разреза и линией узлов. Считая на $R < 2''$ вращение твердотельным и измерив наблюдаемые вдоль двух разных PA градиенты dv_r/dr_{proj} (43.6 ± 1.3 км s^{-1} на угловую секунду в позиционном угле 130° и -50 ± 2 км s^{-1} на угловую секунду в позиционном угле 87°), мы получили, что в центре галактики кинематическая ось вращения звездного компонента соответствует $PA_0 = 99^\circ \pm 5^\circ$, т.е. сильно наклонена относительно линии узлов внешнего звездного диска.

Возбуждение и химический состав газа в кольце

На рис. 2 (слева) отмечены четыре компактные эмиссионные области, хорошо видимые на карте эмиссии $H\alpha$. Самая яркая из этих областей, номер 1, попала также на цель спектрографа при наблюдениях с длинной щелью в ориентации $PA = 87^\circ$ (спектр в красной области представлен на рис. 5). На картах NGC 934 в эмиссионных линиях, построенных с MaNGaL, мы установили круглые апертуры радиусом $3''$, центрированные на эмиссионные линии, детектированные на карте $H\alpha$, и измерили потоки в каждой линии. Поток в линии $H\beta$ был определен по потоку в $H\alpha$ делением на бальмеровский декремент. Напрямую бальмеровский декремент в кольце звездообразования мы смогли измерить только в области 1, для которой получен спектр с длинной щелью, а интенсивности эмиссионных линий измерены гаусс-анализом, с учетом подлежащих абсорбционных линий. Он оказался равен $H\alpha/H\beta = 4.47 \pm 1.03$. Именно это значение мы использовали для расчета потоков в эмиссионной линии $H\beta$ для данных MaNGaL. Надо отметить, что для потоков по данным MaNGaL поправки за подлежащие абсорбционные линии звездного компонента не вводились.

Отношения потоков высоковозбужденной линии $[OIII]\lambda 5007$ к $H\beta$ и низковозбужденной линии $[NII]\lambda 6583$ к $H\alpha$ мы нанесли на классическую ВРТ-диаграмму (Болдуин и др., 1981) для определения характера возбуждения ионизованного газа (рис. 6). Компактное расположение измеренных по данным MaNGaL эмиссионных областей на ВРТ-диаграмме говорит о смешанном типе возбуждения: к возбуждению ультрафиолетовым излучением молодых звезд примешивается эффект ударных волн, очевидно связанных со сложной кинематикой газа. Пожалуй, только самая яркая область номер 1 может с натяжкой считаться стандартной NII-областью, поскольку отношения потоков в линиях, рассчитанные для нее по спектру с длинной щелью, уверенно попадают в область возбуждения газа молодыми звездами. Для всей совокупности эмиссионных областей в кольце NGC 934 можно определить металличность газа, используя индикатор $O3N2 \equiv \log([OIII]\lambda 5007/H\beta) - \log([NII]\lambda 6583/H\alpha)$, который, согласно Кумари и др. (2019), корректно отражает обилие кислорода в ионизованном газе даже в присутствии смешанного типа возбуждения. По оценкам индикаторов $N2 \equiv \log([NII]\lambda 6583/H\alpha)$ и $O3N2$ для области номер 1, сделанным по спектру с длинной щелью, согласно Петтини и Пэйджелу (2004), получается обилие кислорода $12 + \log(O/H) = 8.58$, а калибровка Марино и др. (2013) дает $12 + \log(O/H) = 8.46 \pm 0.08$. Если взять индикатор $O3N2$, средний по всем четырем областям, по данным MaNGaL, 0.47 ± 0.20 , то получится по калибровке Петтини и Пэйджел (2004) $12 + \log(O/H) = 8.58 \pm 0.06$, а по калибровке Марино и др. (2013) — $12 + \log(O/H) = 8.40 \pm 0.05$ (это статистическая точность, не учитывающая возможной систематики калибровок). В целом мы приходим к металличности примерно $[Z/H] = -0.2$, если ориентироваться на солнечное обилие кислорода 8.69 (Асплунд и др., 2009), что полностью согласуется со средней металличностью ионизованного газа во внешних кольцах

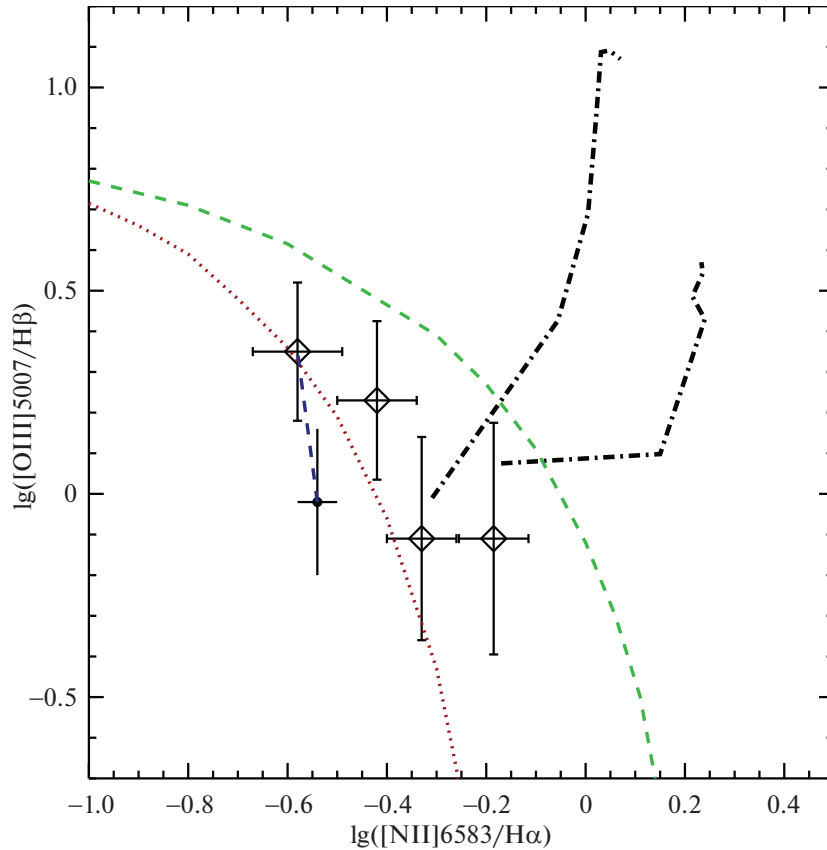


Рис. 6. Диагностическая BPT-диаграмма для определения характера возбуждения ионизованного газа в четырех областях звездообразования NGC 934, измеренных в данных MaNGaL (ромбы), и одной из них, области номер 1, — с длинной щелью (черный кружок). Измерения с длинной щелью поправлены за покраснение приведением измеренного бальмеровского декремента, 4.47, к стандартному для NII-областей, 2.85, по методике Изотова и др. (1994), и соединены штриховой синей линией с измерениями MaNGaL для той же области. Красная пунктирная и зеленая штриховая линии разграничивают положения эмиссионных областей, возбужденных молодыми звездами (слева и снизу от линии), от других механизмов возбуждения, согласно Кауффманн и др. (2003) и Кьюли и др. (2001) соответственно. Штрихпунктирными линиями показаны модели возбуждения газа ударной волной — газа с солнечной металличностью и стандартной электронной плотностью $n = 1 \text{ см}^{-3}$ — из работы Аллен и др. (2008). Вдоль каждой ломаной снизу вверх растет скорость ударной волны, от 200 до 1000 км с^{-1} ; из двух ломаных правая соответствует ударной волне, распространяющейся в окружении низкой плотности, а левая — в уже возбужденном плотном газе (модель ударной волны вместе с прекурсором).

линзовидных галактик $[Z/H] = -0.15$, найденной нами ранее (Сильченко и др., 2019) для выборки внешних колец звездообразования в линзовидных галактиках с протяженными газовыми дисками.

ОБСУЖДЕНИЕ: СТРУКТУРА NGC 934 И ПРИРОДА ЕЕ КОЛЬЦА

Структура NGC 934 не совсем обычна для линзовидных галактик. Если ориентироваться на профиль поверхностной яркости, осредненной по азимуту (рис. 8, в центре), то экспоненциальный диск начинает доминировать в поверхностной яркости примерно на $R = 20''$, т.е. в 8 кпк в от центра. Это говорит об очень крупном балдже, возможно — триаксиальном, о чем свидетельствует разворот ориентации большой оси изофот в

центре галактики, заметный на рис. 3. Экспоненциальный диск, который описывается формулой $\mu_g = 22.6 + 1.086R''/20''$, имеет anomalously большой, по сравнению со средними характеристиками звездных дисков галактик ближней Вселенной (Фати, 2010), экспоненциальный масштаб, 8 кпк, и довольно низкую центральную поверхностную яркость: если ориентироваться на характеристики диска, то это гигантская галактика низкой поверхностной яркости. Если привлечь еще и кинематические характеристики — профиль звездной дисперсии скоростей вдоль большой оси (рис. 8, верхний), то звездный диск NGC 934, возможно, начинает быть заметным в измерениях чуть ближе к центру, на радиусах от $12'' - 15''$, т.е. примерно с 5–6 кпк; и он является довольно горячим динамически, с дисперсией скоростей звезд около 100 км с^{-1} .

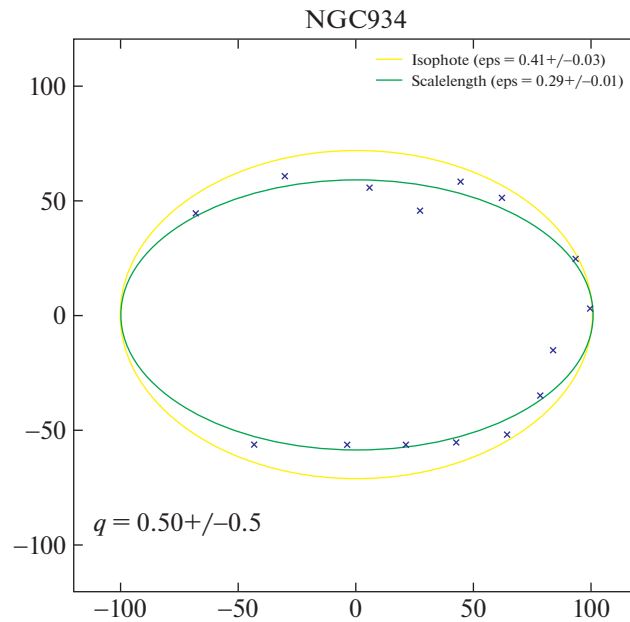


Рис. 7. Сравнение эллиптичности изофоты и углового распределения экспоненциального масштаба диска в ходе определения толщины внутреннего звездного диска.

По методике Чудаковой и Сильченко (2014), которая использует экспоненциальный масштаб профиля поверхностной яркости звездного диска, измеренный в разных позиционных углах (т.е. в разных проекциях), как стандартную линейку (рис. 7), мы рассчитали относительную толщину звездного диска на внутреннем участке экспоненциального сегмента профиля поверхностной яркости. Она оказалась равной $q_0 = 0.50 \pm 0.05$; толщина диска в данном случае определяется в терминах Хаббла (1926), т.е. является отношением характерных масштабов распределения поверхностной яркости по вертикали и вдоль радиуса — например, отношением вертикального и радиального экспоненциальных масштабов. Таким образом, диск NGC 934 действительно очень толстый, как мы и ожидали, исходя из его кинематических характеристик.

Основываясь на результатах изофотного анализа, конкретно, измерениях эллиптичности изофот $e \equiv 1 - b/a$ (рис. 8, нижний), в рамках нашей методики оценки толщины звездного диска, для внутреннего звездного диска получается его наклон к лучу зрения по известной формуле $\sin i = \sqrt{(2e - e^2)/(1 - q_0^2)}$ (Найстейн и др., 1999), равным $i_* = 54.5^\circ$. Очевидно, ультрафиолетовое кольцо, отражающее распределение недавно образованных из газа звезд, должно быть как-то связано с газовым диском. Его эллиптичность, $e_{uv} = 0.47$, намекает на наклон к лучу зрения (в случае круглой внутренней формы кольца) 62° . Таким образом, *больше* наклона старого внутреннего звездного диска. Возможно, внешний диск слегка наклонен к

экваториальной плоскости галактики протяженного газового диска, т.е. испытывает так называемый вагр.

Поскольку кинематика газа не согласуется с кинематикой звезд NGC 934, особенно в центре галактики, очевидно, что газ натек на галактику со стороны, с направления, лежащего вне экваториальной плоскости старого звездного диска. Получился протяженный аккрецированный газовый диск, и во внешних областях галактики этот газ недавно участвовал в звездообразовании. Согласно Лемониас и др. (2011), внешний звездный диск низкой поверхностной яркости в NGC 934 является еще и XUV-диск (протяженным диском, ярким в ультрафиолете); т.е. можно констатировать, что звездный диск NGC 934 формируется прямо сейчас и, поскольку он имеет низкую поверхностную яркость, возможно, он начал формироваться совсем недавно вокруг массивного сфероида. Логично связать начало формирования внешнего диска с моментом аккреции большого объема холодного газа. Кольцо на радиусе около 22 кпк обозначает место самого интенсивного недавнего звездообразования. Причем характерное время звездообразования на этом радиусе было коротким. На это намекает клочковатость эмиссии $H\alpha$ в кольце — индикатора звездообразования на временной шкале 10^7 лет — по сравнению с довольно гладким распределением ультрафиолетового излучения в фильтре FUV — индикатора звездообразования на временной шкале 10^8 лет. Если измерить поверхностную яркость ультрафиолетового излучения в фильтре FUV вдоль кольца, то она

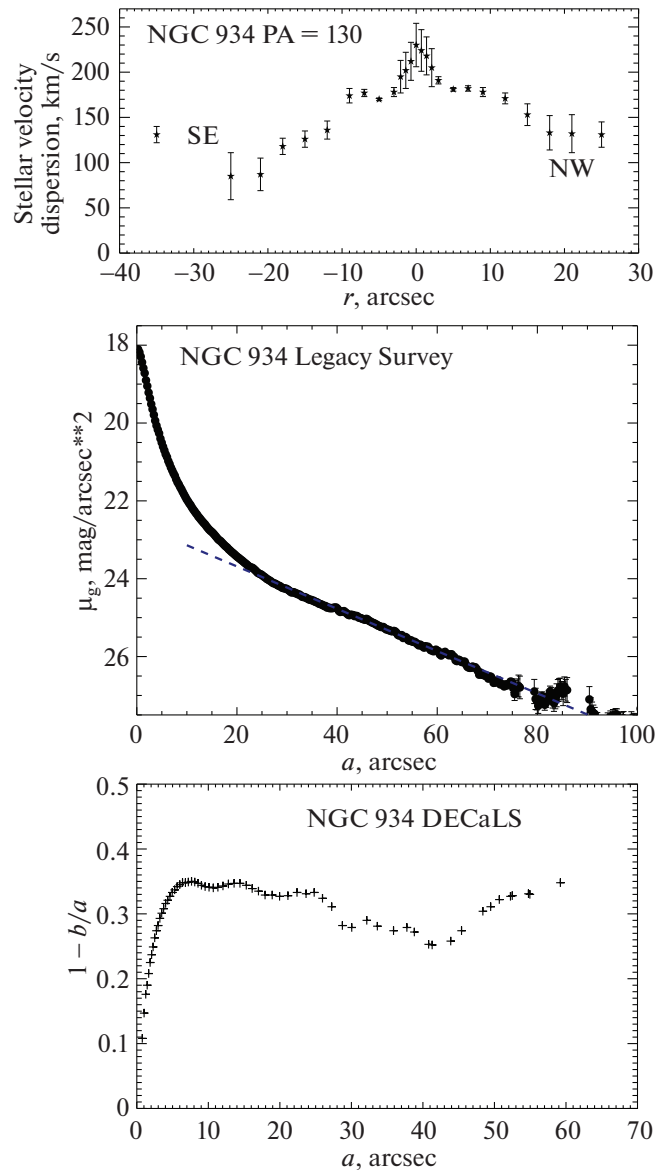


Рис. 8. Радиальная структура диска, сверху вниз: профиль дисперсии скоростей звезд в разрезе вдоль большой оси, в $PA = 130^\circ$, азимутально усредненный профиль поверхностной яркости с вписанным экспоненциальным законом $\mu_g = 22.6 + 1.086R''/20''$ и радиальная зависимость эллиптичности изофот по данным DECaLS.

меняется в пределах 10–20%, тогда как излучение в эмиссии $H\alpha$ на южной оконечности кольца, в $PA = 130^\circ$, вдоль которого был сделан спектральный разрез с длинной щелью, отсутствует полностью. Имея в виду разные временные шкалы темпов звездообразования, определяемых по ультрафиолету и по эмиссии $H\alpha$, мы можем заключить, что скорее всего событие аккреции газа произошло порядка 100 млн лет назад и привело к вспышке звездообразования в кольце. Постепенное превращение кольца звездообразования в звездный диск низкой поверхностной яркости путем динамической радиальной диффузии молодых звезд действительно

реально, такая эволюция рассмотрена в динамических моделях Мапелли и др. (2008).

Кинематическая конфигурация, когда газ вращается в центре в наклонной плоскости, а на больших расстояниях от центра ложится в плоскость галактики, причем так, что противовращается звездам, уже встречалась в нашей практике. В частности, такое поведение газа зафиксировано нами у линзовидной галактики с небольшим баром NGC 7280 (Афанасьев, Сильченко, 2000; Сильченко, 2005). Динамическое моделирование галактик также может давать такие конфигурации. Так, Ван Альбада и др. (1982) исследовали поведение газа, натекающего на вращающуюся триаксиль-

ную фигуру перпендикулярно ее самой длинной оси; образующийся при такой аккреции газовый диск искривляется во внешних областях и приходит в равновесие перпендикулярно самой короткой оси фигуры, причем в этих внешних областях противоращивается звездам триаксиальной фигуры. С другой стороны, Фридли и Бенц (1993) прослеживали эволюцию газового диска спиральной галактики, который изначально противоращивался звездам в плоскости галактики, а потом начинал стекать к центру вдоль бара, отнимающего момент у газа; финальная стадия эволюции этой модели тоже показала центральный полярный газовый диск внутри бара. Поэтому, рассматривая только кинематику сегодняшнего дня, мы не можем отождествить направление прихода газа в галактику — на периферию близко к плоскости или в центр под большим углом к плоскости.

ВЫВОДЫ

В работе представлены комплексные спектральные данные и данные узкополосной фотометрии в эмиссионных линиях для линзовидной галактики с ультрафиолетовым кольцом NGC 934. Показано, что кинематика ионизованного газа совершенно не согласуется с кинематикой звезд, и, следовательно, газ был недавно аккрецирован извне. Металличность ионизованного газа в областях звездообразования лишь немного ниже солнечной, и это позволяет ограничить предположения об источнике внешнего газа: скорее всего, это поглощение богатого газом спутника. Во внешних областях аккрецированного газового диска наблюдается вялое звездообразование, и мы делаем вывод, что в NGC 934 продолжается надстройка внешнего звездного диска низкой поверхностной яркости.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00080. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта “Наука и университеты”. Мы благодарим Е.А. Малыгина и Е.С. Шабловинскую, выполнивших спектральные наблюдения со SCORPIO-2. В работе мы пользовались данными Базы внегалактических данных NED (NASA/IPAC), которая управляется Лабораторией реактивного движения и Калифорнийским технологическим институтом, по контракту с НАСА, и данными Лион-Медонской базы HyperLEDA (Макаров и др., 2014). Для анализа структуры NGC 934 использовались фотометрические данные обзора DECaLS (Дей и др., 2019), предоставленные ресурсом legacysurvey.org. Также мы привлекли для нашего анализа данные космического

телескопа GALEX. Данные миссии NASA GALEX были взяты из Архива Микульски для космических телескопов (MAST).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен и др. (M.G. Allen, B.A. Groves, M.A. Dopita, R.S. Sutherland, and L.J. Kewley), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **178**, 20 (2008).
2. Асплунд и др. (M. Asplund, N. Grevesse, A.J. Sauval, and P. Scott), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 481 (2009).
3. Афанасьев, Сильченко (V.L. Afanasiev and O.K. Sil'chenko), *Astron. J.* **119**, 126 (2000).
4. Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005) [V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev, *Astron. Lett.* **31**, 194 (2005)].
5. Афанасьев, Моисеев (V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev), *Baltic Astron.* **20**, 363 (2011).
6. Болдуин и др. (J.A. Baldwin, M.M. Phillips, and R. Terlevich), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
7. Бута (R.J. Buta), *MNRAS* **488**, 590 (2019).
8. Ван Альбада и др. (T.S. Van Albada, C.G. Kotanyi, and M. Schwarzschild), *MNRAS* **198**, 303 (1982).
9. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, J.R. Findlay, D. Finkbeiner, et al.), *Astron. J.* **157**, A168 (2019).
10. Дэвис и др. (T.A. Davis, K. Alatalo, M. Sarzi, M. Bureau, L.M. Young, L. Blitz, P. Serra, A.F. Crocker, et al.), *MNRAS* **417**, 882 (2011).
11. Изотов и др. (Yu.I. Izotov, T.X. Thuan, and V.A. Lipovetsky), *Astrophys. J.* **435**, 647 (1994).
12. Катков и др. (I.Yu. Katkov, O.K. Sil'chenko, and V.L. Afanasiev), *MNRAS* **438**, 2798 (2014).
13. Кауффман и др. (G. Kauffmann, T.M. Heckman, Ch. Tremonti, J. Brinchmann, S. Charlot, S.D.M. White, S.E. Ridgway, J. Brinkmann, et al.), *MNRAS* **346**, 1055 (2003).
14. Кьюли и др. (L.J. Kewley, M.A. Dopita, R.S. Sutherland, C.A. Heisler, and J. Trevena), *Astrophys. J.* **556**, 121 (2001).
15. Кюйкен и др. (K. Kuijken, D. Fisher, and M.R. Merrifield), *MNRAS* **283**, 543 (1996).
16. Лемониас и др. (J.J. Lemnias, D. Schiminovich, D. Thilker, T.K. Wyder, D.Ch. Martin, M. Seibert, M.A. Treyer, L. Bianchi, et al.), *Astrophys. J.* **733**, 74 (2011).
17. Макаров, Караченцев (D. Makarov and I. Karachentsev), *MNRAS* **412**, 2498 (2011).
18. Макаров и др. (D. Makarov, Ph. Prugniel, N. Terekhova, H. Courtois, and I. Vauglin), *Astron. Astrophys.* **570**, A13 (2014).
19. Мапелли и др. (M. Mapelli, B. Moore, E. Ripamonti, L. Mayer, M. Colpi, and L. Giordano), *MNRAS* **383**, 1223 (2008).
20. Марино и др. (R.A. Marino, F.F. Rosales-Ortega, S.F. Sánchez, A. Gil de Paz, J. Vilchez, D. Miralles-Caballero, C. Kehrig, E. Pérez-Montero, et al.), *Astron. Astrophys.* **559**, A114 (2013).
21. Моисеев (A.V. Moiseev), *Bull. Special Astrophys. Observ.* **76**, 316 (2021).

22. Моисеев и др. (A.V. Moiseev, J.R. Valdés, and V.H. Chavushyan), *Astron. Astrophys.* **421**, 433 (2004).
23. Моисеев и др. (A. Moiseev, A. Perepelitsyn, and D. Orarin), *Experiment. Astron.* **50**, 199 (2020).
24. Найстейн и др. (E. Neistein, D. Maoz, H.-W. Rix, and J.L. Tonry), *Astron. J.* **117**, 2666 (1999).
25. Петтини, Пэйджел (M. Pettini and B.E.J. Pagel), *MNRAS* **348**, L59 (2004).
26. Саулдер и др. (Ch. Saulder, E. van Kampen, I.V. Chilingarian, S. Mieske, and W.W. Zeilinger), *Astron. Astrophys.* **596**, A14 (2016).
27. Серра и др. (P. Serra, T. Oosterloo, R. Morganti, K. Alatalo, L. Blitz, M. Bois, F. Bournaud, M. Bureau, et al.), *MNRAS* **422**, 1835 (2012).
28. Серра и др. (P. Serra, L. Oser, D. Krajnovic, Th. Naab, T. Oosterloo, R. Morganti, M. Cappellari, E. Emsellem, et al.), *MNRAS* **444**, 3388 (2014).
29. Сильченко О.К., *Письма в Астрон. журн.* **31**, 250 (2005) [O.K. Sil'chenko, *Astron. Lett.* **31**, 227 (2005)].
30. Сильченко и др. (O.K. Sil'chenko, A.V. Moiseev, and O.V. Egorov), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **244**, Aid. 6 (2019).
31. Старк и др. (D.V. Stark, S.J. Kannappan, K.D. Eckert, J. Florez, K.R. Hall, L.C. Watson, E.A. Hoversten, J.N. Burchett, et al.), *Astrophys. J.* **832**, A126 (2016).
32. Таккони и др. (L.J. Tacconi, R. Genzel, and A. Sternberg), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **58**, 157 (2020).
33. Фати (K. Fathi), *Astrophys. J.* **722**, L120 (2010).
34. Фридли, Бенц (D. Friedli and W. Benz), *Astron. Astrophys.* **268**, 65 (1993).
35. Хаббл (E.P. Hubble), *Astrophys. J.* **64**, 321 (1926).
36. Хиль де Пас и др. (A. Gil de Paz, S. Boissier, B.F. Madore, M. Seibert, Y.H. Joe, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **173**, 185 (2007).
37. Худ и др. (C.E. Hood, S. Kannappan, D.V. Stark, I.P. Dell'Antonio, A.J. Moffett, K.D. Eckert, M.A. Norris, and D. Hendel), *Astrophys. J.* **857**, A144 (2018).
38. Чудакова, Сильченко (E.M. Chudakova and O.K. Sil'chenko), *Astron. Rep.* **58**, 281 (2014).
39. Шатский и др. (N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, S. Zheltoukhov, V. Kornilov, K. Postnov, S. Potanin, B. Safonov, A. Tatarnikov, and A. Cherepashchuk), In: *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, p. 127 (2020).
40. Эккерт и др. (K.D. Eckert, S. Kannappan, D.V. Stark, A.J. Moffett, M.A. Norris, E.M. Snyder, and E.A. Hoversten), *Astrophys. J.* **810**, A166 (2015).