

УДК 524.74-54

ЗВЕЗДНОЕ НАСЕЛЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК В ГРУППАХ: ГРУППА NGC 2300

© 2016 В. Л. Афанасьев^{1*}, О. К. Сильченко^{2**}, И. С. Прошина^{2***}¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 29 июля 2016 года; принята в печать 10 октября 2016 года

С помощью панорамной и длиннощелевой спектроскопии на БТА САО РАН исследованы свойства звездного населения и кинематика в пяти дисковых галактиках ранних типов — членах группы NGC 2300. Эволюция галактик группы выглядит абсолютно рассинхронизованной: в то время как средний возраст звезд в центральных областях галактик, расположенных вблизи центра группы, заключен в интервале 2–7 млрд лет, у периферийных спиральных галактик ядра и балджи старые, возрастом 10–15 млрд лет. Ярчайшая галактика группы NGC 2300, которая до сих пор считалась линзовидной, типа SA0, оказалась крайне горячей динамически: ее балдж вращается медленно, $v/\sigma = 0.06$, а внешние части не вращаются вовсе. Мы делаем вывод, что кинематика звездного компонента NGC 2300 свидетельствует о том, что это не дисковая галактика, а триаксиальный сфероид.

Ключевые слова: галактики: ядра — галактики: балджи — галактики: звездное население — галактики: эволюция

1. ВВЕДЕНИЕ

Галактики ближней Вселенной в большинстве своем являются членами групп. Согласно оценкам [1], в пределах расстояния от нас, равного 40 Мпк, более половины всех галактик — 54% — входят в группы. Астрономы сейчас склоняются к тому, что именно в группах галактики проходят «пре-процессинг», то есть в них останавливается звездообразование, и они переходят из голубого облака на красную последовательность. Предполагается, что при этом происходит перестройка структуры — изменение морфологического типа на более ранний. Динамические свойства окружения галактик в группах: обязательное притяжение близких соседних галактик, невысокие, порядка немногих сотен километров в секунду, скорости взаимного прохождения галактик и характерные динамические времена пересечения всего пространства группы, в несколько раз меньшие возраста Вселенной — это благоприятные условия для медленной динамической — так называемой секулярной [2] — эволюции галактик. В структурной и динамической эволюции галактик в группах могут играть доминирующую роль именно внешние

воздействия, причем как гравитационные, приливные воздействия от соседних галактик и от общего темного гало группы, так и газодинамические, связанные с частым присутствием в массивных группах горячей межгалактической среды.

Если в одной группе находятся несколько галактик и если время их «совместной жизни» в группе превышает несколько миллиардов лет (как предсказывают численные модели иерархического развития крупномасштабной структуры Вселенной), то они подвергаются сходным воздействиям со стороны общего гравитационного потенциала группы и общего окружения — горячего межгалактического газа, если он присутствует в группе. Тогда кажется вероятным, что перестройка глобальной структуры, в частности формирование центральных звездных подсистем в галактиках группы, может быть синхронизована, т.е. средний возраст звездного населения в центрах галактик будет один и тот же. Практически все механизмы гравитационного (приливного) взаимодействия, а также целый ряд газодинамических механизмов, таких, как лобовое давление и статическое обжатие дисков галактик горячей межгалактической средой, приводят к концентрации газа диска галактики в ее центре с неизбежной последующей вспышкой звездообразования и формированием вторичного

*E-mail: vafan@sao.ru

**E-mail: olga@sai.msu.su

***E-mail: ii.pro@mail.ru

звездного компонента в ядре и/или балдже. Обнаружение синхронизации эволюции центральных областей галактик в группах могло бы быть существенным аргументом в пользу доминирующей роли внешних воздействий.

Более десяти лет назад мы начали исследования звездных населений в центральных областях галактик групп с Мультизрачковым волоконным спектрографом MPFS/БТА. На данный момент нам удалось изучить по 2–3 галактики в семи близких группах. В Leo I [3] и в группах NGC 5576 [4] и NGC 3169 [5] свойства звездного населения околядерных дисков больших галактик группы оказались одинаковыми: последние звезды там сформировались относительно недавно, 1–3 млрд лет назад, несмотря на ранний тип галактик. В группе Leo I, где имеется общий для всех галактик внешний резервуар нейтрального водорода в виде громадного кольца [6], околядерные звездные диски еще и одинаково ориентированы в пространстве. В Триплете Leo (NGC 3623/NGC 3627/NGC 3628), наоборот, возраст звездного населения и кинематика газа в центрах NGC 3623 и NGC 3627 существенно различаются [7], и мы делаем вывод, что галактики триплета собрались в гравитационно связанную группу менее 1 млрд лет назад. В группе Leo II, для которой в отличие от предыдущих упомянутых групп было известно о присутствии в ней рентгеновского газа, у двух центральных галактик околядерные кинематически выделенные звездные структуры оказались старыми. При этом они имеют несколько разный средний возраст звездного населения — 6 и 10 млрд лет у NGC 3608 и NGC 3607 соответственно [8]. А периферийные линзовидные галактики группы, NGC 3599 и NGC 3626, и вовсе демонстрируют текущее звездообразование в пределах своих центральных звездных подсистем [9]. Асинхронной оказалась и эволюция центральных областей галактик ранних типов в богатой массивной группе NGC 80 [10], также обладающей заметным рентгеновским гало. В этой группе было исследовано семь галактик, и среди них средний возраст звездных населений в ядрах и в центральных сфероидеях варьируется от 1.5–3 млрд лет (в E-галактике NGC 83 и S0-галактике IC 1548) до более чем 10 млрд лет в NGC 79 (эллиптическая) и IC 1541 (линзовидная галактика). И, наконец, в группе NGC 524, у которой рентгеновский газ расположен только в компактном гало вокруг центральной галактики, все галактики группы вне этого гало демонстрируют синхронную эволюцию центральных областей [11].

В данной статье представлены результаты анализа свойств звездного населения в галактиках еще одной массивной группы с рентгеновским газом — NGC 2300.

2. ГРУППА NGC 2300: БАЗОВЫЕ СВЕДЕНИЯ

Группу NGC 2300 отождествили и начали исследовать давно, так как близка к нам и удобно расположена на северном небе. Она фигурировала еще в каталоге [12], но тогда к ней были отнесены только три галактики. Позднее Гарсиа [13] составил список тринадцати членов группы NGC 2300 яркостью до $B_0 = 14^m0$ (при расстоянии до группы 30.3 Мпк согласно EDD [14] это ставит нижний предел на светимость галактик списка Гарсиа $M_B = -18^m4$), причем из этих тринадцати членов большинство — одиннадцать галактик — спиральные и неправильные. В недавней ревизии списка групп ближней Вселенной [1] группа NGC 2300 уже разделена на две части — одиннадцать галактик принадлежат собственно данной группе, а две галактики отнесены к группе NGC 2276 — галактике, второй по яркости после NGC 2300, причем весьма позднего Sc-типа. Разделение было произведено не по положению на небе, а с учетом распределения лучевых системных скоростей галактик, которое действительно похоже на бимодальное. Интересно, что суммарный список из тринадцати, или 11 + 2, галактик наполовину (на шесть объектов) расходится со списком Гарсиа [13], но морфологический состав обеих групп по-прежнему содержит в основном поздние типы. Как линзовидные галактики в группе NGC 2300/NGC 2276 классифицируются только сама NGC 2300 и IC 455, и, возможно, UGC 3654; эллиптических галактик нет вовсе.

Такой поздний морфологический состав массивной группы не очень традиционен, если принять во внимание, что в группе присутствует также и весьма заметная межгалактическая горячая среда — рентгеновский газ. Группа NGC 2300 была первым широко обсуждавшимся примером относительно бедной группы галактик, для которой в данных ROSAT был обнаружен уверенный рентгеновский сигнал от диффузной горячей среды [18]. Интересно, что центр тяжести распределения рентгеновского излучения, показанный в [18], не совпал с NGC 2300 — он находился в пустоте между NGC 2300 и NGC 2276. Обе галактики имеют одинаковую голубую светимость, но существенно разную светимость на 2 мкм [1], то есть NGC 2300 намного массивнее NGC 2276. Их лучевые скорости различаются на 500 км с^{-1} . Поскольку особенностью морфологии NGC 2276 в радио- [20] и оптическом диапазонах [19] является ее кометарная форма, считается, что именно эта галактика, скорее всего, быстро движется относительно горячего газа группы, «поджимающего» одну из сторон ее диска лобовым давлением. В этом случае центральной галактикой группы следует, несомненно,

Таблица 1. Глобальные параметры исследуемых галактик

Галактика	NGC 2300	IC 455	IC 469	IC 499	UGC 3654
Морфологический тип (NED ¹ , LEDA ²)	SA 0 ⁰	S0	SAB(rs)ab:	Sa	compact, S0
R_{25} (RC3 ³ , LEDA), arcsec	85	33	66	63	32
B_T^0 (RC3, LEDA)	11.77	14.01	12.87	12.91	14.61
M_B (RC3 + EDD ⁴)	-20.6	-18.4	-19.5	-19.5	-17.8
V_r (NED), км с ⁻¹	1905	2050	2080	1882	2303
Удаление от центра группы (NED), кпк	0	95	383	716	144
Расстояние до группы ⁵ , Мпк			30.3		
Фотометрические параметры балджей по данным Ильиной и Сильченко [15]					
r_{eff} , arcsec	5.8 ⁶	1.8	—	4.8	2.0
n_{Sersic}	1.3 ⁶	2.5	—	2.2	2.6
Кинематические параметры балджей по данным этой работы					
$V_{\text{rot}}(r_{\text{eff}})$, км с ⁻¹	14	36	—	67	27
$\sigma_*(r_{\text{eff}})$, км с ⁻¹	223	104	—	82	92

¹NASA/IPAC Extragalactic Database²Lyon–Meudon Extragalactic Database³Third Reference Catalogue of Bright Galaxies, [16]⁴The Extragalactic Distance Database, <http://edd.ifa.hawaii.edu>⁵Cosmicflow-1[14]⁶метрические параметры балджа NGC 2300 даны согласно [17]

считать NGC 2300, несмотря на то, что она сдвинута относительно центра распределения температуры газа. Хотя горячая газовая компонента группы NGC 2300 весьма протяженная — авторы [18] видят ее как минимум до расстояния от центра группы 300 кпк, — галактики группы распределены на еще большей площади, и многие из них попадают вне регистрируемого рентгеновского пятна.

Список ярких галактик, исследованных в данной работе, и их характеристики по сведениям из литературы приводятся в таблице 1. Результаты проведенного нами недавно фотометрического анализа этих пяти галактик, основанного также на данных SCORPIO/БТА [15], далее использованы для выделения интервалов расстояний от центра, где доминируют балджи и крупномасштабные диски.

3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Мы получили для центральных областей пяти крупнейших дисковых галактик раннего типа группы NGC 2300 данные панорамной спектроскопии с Мультизрчковым волоконным спектрографом (MPFS) в первичном фокусе 6-метрового

телескопа САО РАН [21]. В качестве детектора использовалась ПЗС-матрица EEV42-40 форматом 2048 × 2048 элементов. При наблюдениях на MPFS массив квадратных микролинз, сформированных в квадратное же поле зрения размером 16 × 16 элементов, строил матрицу зрчков, которая с помощью световодов подавалась на щель дифракционного спектрографа. Такая конфигурация позволяла одновременно регистрировать 256 спектров, каждый из которых характеризовал пространственный элемент изображения галактики размером примерно 1"0 × 1"0. С целью исследования звездных населений и звездной кинематики мы наблюдали сине-зеленый диапазон спектра 4150–5650 Å с обратной дисперсией 0.75 Å на пиксель (спектральное разрешение около 3 Å). Для галактики с эмиссионными линиями IC 469 был также получен спектр в красном диапазоне 5800–7200 Å, чтобы по линии [NII]λ6583 исследовать кинематику газового компонента в центре галактики. Мы калибровали шкалу длин волн, снимая каждый раз до и после объекта спектр сравнения гелий-неон-аргоновой лампы; для исправления за виньетирование и разное пропуска-

Таблица 2. Спектральные наблюдения группы NGC 2300 на БТА

Галактика	Дата	T_{exp} , мин.	Диапазон, Å	$FWHM_*$, arcsec	PA (top), deg
MPFS					
NGC 2300	24.09.2001	60	4150–5650	1.9	174
IC 455	17.09.2006	60	4150–5650	2.0	123
IC 469	02.10.2005	45	6100–7100	1.5	88.5
IC 469	02.10.2005	60	4150–5650	1.5	88.5
IC 499	18.10.2006	60	4150–5650	1.5	178
UGC 3654	21.08.2007	120	4150–5650	1.5	178.5
SCORPIO и SCORPIO-2					
NGC 2300	24.02.2014	60	3700–7200	1.3	310
NGC 2300	20.11.2014	60	3700–7200	1.7	21
NGC 2300	27.03.2015	60	3700–7200	2.3	74
NGC 2300	09.10.2015	120	4800–5500	4.5	170
IC 455	19.12.2014	60	3700–7200	2.3	82
IC 499	19.12.2014	60	3700–7200	2.3	78
IC 499	18.03.2013	60	4800–5500	4.0	76

ние микролинз использовалась внутренняя лампа спектрографа и спектр сумеречного неба. Первичная обработка данных — вычитание электронного нуля, удаление следов космических частиц, вырезание из формата ПЗС одномерных спектров элементов изображения, приведение выделенных спектров к шкале длин волн, — выполнялась с помощью оригинального комплекса программ [21] в среде IDL.

Спектральные наблюдения с длинной щелью проводились на 6-метровом телескопе САО РАН с многорежимными редукторами светосилы SCORPIO [22] и SCORPIO-2 [23]. Всего было получено четыре разреза в разных позиционных углах для NGC 2300 и несколько разрезов вдоль большой оси для IC 455 и IC 499. Полный журнал экспозиций представлен в таблице 2. Использовалась преимущественно ширина щели 1 секунда дуги, что обеспечивало спектральное разрешение 2.2 \AA для наблюдений с гризмой VPHG2300G (SCORPIO) и около 5 \AA — для наблюдений с гризмой VPHG1200@540 (SCORPIO-2). Достаточно глубокие полученные данные позволили исследовать кинематику звезд и свойства звездного населения в дисках вплоть до оптических границ галактик.

При расчете кинематических параметров звездного компонента — лучевой скорости и дисперсии

скоростей звезд — из спектра каждой точки галактики вычитался континуум. Затем, после перевода в логарифмическую шкалу, он подвергался кросс-корреляции со спектрами звезд-гигантов класса G8–K2 с известными лучевыми скоростями, наблюдававшимися в ту же ночь на той же аппаратуре, что и галактика; также для кросс-корреляции иногда использовался спектр рассветного неба (класс G2). Точность шкалы длин волн и нуль-пункт измеряемых скоростей контролировались по линии ночного неба [O I] $\lambda 5577 \text{ \AA}$. После получения кинематических параметров для анализа свойств звездных населений — возраста, общей металличности и отношения обилий магния (представителя альфа-элементов) и железа — мы рассчитывали Ликские индексы $H\beta$, Mgb , $Fe 5270$ и $Fe 5335$ для каждого индивидуального спектра. Определение Ликской системы индексов линий поглощения бралось из работ Уорси и др. [24, 25]. Далее параметры, рассчитанные по индивидуальным спектрам, полученным с MPFS, «собирались» в карты центральных областей галактик. Полученные карты Ликских индексов — $H\beta$, Mgb и $\langle Fe \rangle \equiv (Fe 5270 + Fe 5335)/2$ — представлены на рис. 1–5. Для этих линий поглощения существуют разнообразные детальные модельные расчеты в рамках эволюционного синтеза звездных населений, которые связывают индексы (эквива-

лентные ширины линий поглощения) со средними (взвешенными со светимостью звезд) свойствами звездных населений — т.н. SSP-equivalent (SSP ≡ «Simple Stellar Population»), возрастами и металличностями. Среди доступных модельных расчетов мы предпочли модели Томаса и др. [26], так как они рассчитаны для нескольких значений отношения обилий магния и железа и, следовательно, позволяют кроме возраста и общей металличности определить еще и этот, третий, параметр звездного населения.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ: ЗВЕЗДНОЕ НАСЕЛЕНИЕ

Мы использовали карты Ликских индексов для центральных областей исследуемых галактик (рис. 1–5), чтобы оценить средние параметры звездного населения в ядрах и в балджах, сравнивая наши измерения с SSP-моделями Томаса и др. [26]. Звездные ядра галактик идентифицировались как спаксель (пространственный элемент) с наивысшей яркостью. Для локализации балджей было необходимо найти компромисс между эффективным радиусом балджей галактик (таблица 1) и пространственным разрешением наших данных (таблица 2), которое при наблюдениях с MPFS составляло $1''.5-2''$. Для того чтобы учесть вклад от «загрязнения» ярким ядром при оценке параметров балджей мы использовали средние значения индексов в кольцевых зонах с внутренним радиусом $3''$. Внешний радиус кольцевой зоны ограничивался полем зрения MPFS, но для галактик с компактными балджами — IC 455, UGC 3654 — брался равным не более $5''.5$. Точность Ликских индексов для ядер галактик — около 0.1 \AA , для балджей, благодаря осреднению по большому количеству спакселей, чуть лучше — $0.05-0.07 \text{ \AA}$. Это позволяет определять металличность звездного населения с внутренней точностью $0.05-0.1 \text{ dex}$, а возраст — с точностью 0.5 млрд лет для $T < 5$ млрд лет, 1 млрд лет — для T от 5 до 9 млрд лет, и с точностью 3 млрд лет для старых населений, $T \geq 10$ млрд лет.

Параметры звездного населения исследуемых галактик приводятся в таблицах 3 и 4 для ядер и для балджей соответственно. Видно, что для данной группы галактик никакой синхронности эволюции центральных областей нет: как для ядер, так и для балджей разброс средних возрастов звездных населений — от 2 до 15 млрд лет. В этом группа NGC 2300 оказалась похожа на другие группы галактик с заметным присутствием горячей межгалактической среды. Более всего она напоминает группу NGC 80, где также самое старое звездное население — у дисковых галактик периферии, а центральная галактика группы содержит в ядре звездный компонент промежуточного

Таблица 3. Ликские индексы и параметры звездного населения в ядрах по данным MPFS

Галактика	H β	Mgb	$\langle \text{Fe} \rangle$	T , млрд лет	[Z/H]	[Mg/Fe]
NGC 2300	1.64	5.19	2.87	7	+0.4	+0.35
UGC 3654	1.88	4.31	3.155	4	+0.5	+0.14
IC 455	2.23	4.34	3.25	2	+0.8	+0.13
IC 469	1.00	4.70	2.88	15	+0.2	+0.23
IC 499	1.60	4.46	2.97	10	+0.3	+0.17

Таблица 4. Ликские индексы и параметры звездного населения в балджах по данным MPFS

Галактика	H β	Mgb	$\langle \text{Fe} \rangle$	T , млрд лет	[Z/H]	[Mg/Fe]
NGC 2300	1.52	4.83	2.87	11	+0.3	+0.26
UGC 3654	2.18	3.84	2.97	2	+0.55	+0.13
IC 455	1.90	3.93	2.68	6	+0.2	+0.19
IC 469	1.47	3.91	2.56	15	-0.1	+0.20
IC 499	1.87	4.19	2.76	5	+0.3	+0.21

возраста [10]. Вероятно, такая схожесть связана с подобной динамической эволюцией групп: если в случае группы NGC 80 мы наблюдаем недавнее слияние подгрупп NGC 80 и NGC 83 [10], то в случае, рассматриваемом в данной работе, можно предполагать развивающееся на глазах падение группы NGC 2276 на основную группу NGC 2300. Отметим, что самое молодое звездное население и самое близкое к солнечному отношение обилий магния и железа в балдже — у линзовидной галактики UGC 3654, принадлежащей группе NGC 2276 и, вероятно, влетающей сейчас вместе с NGC 2276 в гравитационное поле и рентгеновское гало группы NGC 2300. Именно динамическое взаимодействие UGC 3654 с группой NGC 2300 и могло вызвать недавнее звездообразование в ее центре, а, может быть, и трансформацию структуры, включая развитие бара и укручение индекса Серсика в балдже [15].

Для трех галактик группы мы имеем также глубокие спектральные данные, полученные с длинной щелью. Это позволяет оценить параметры звездного населения во внешних крупномасштабных дисках галактик. На рис. 6 представлены диагностические диаграммы, по которым мы прослеживаем изменение средней металличности и среднего воз-

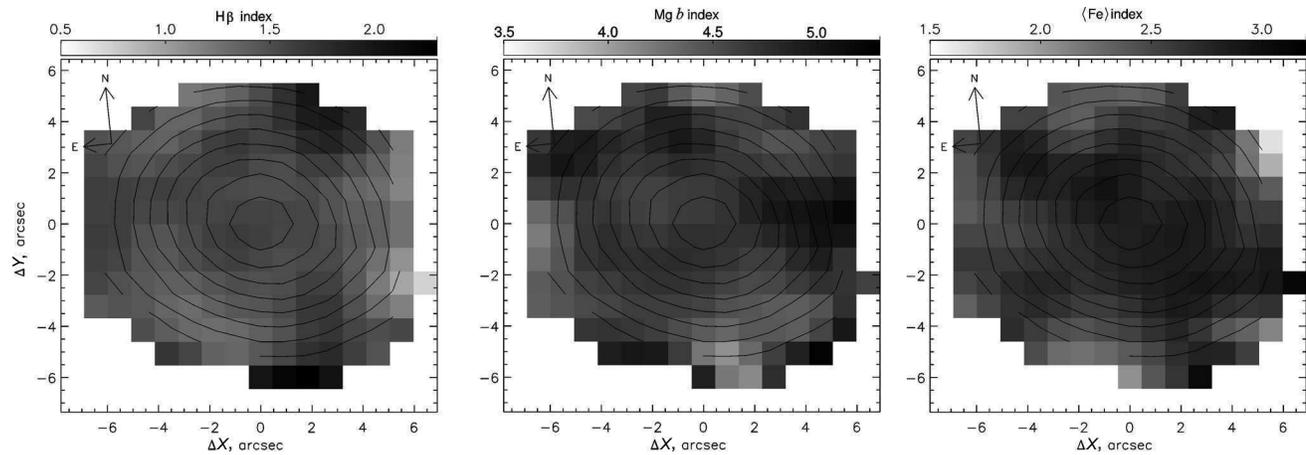


Рис. 1. Карты Ликских индексов $H\beta$, $Mg\ b$, $\langle Fe \rangle \equiv (Fe\ 5270 + Fe\ 5335)/2$ для центральной области NGC 2300 по данным MPFS. Изофотами наложено распределение поверхностной яркости в континууме на длине волны $5000\ \text{\AA}$.

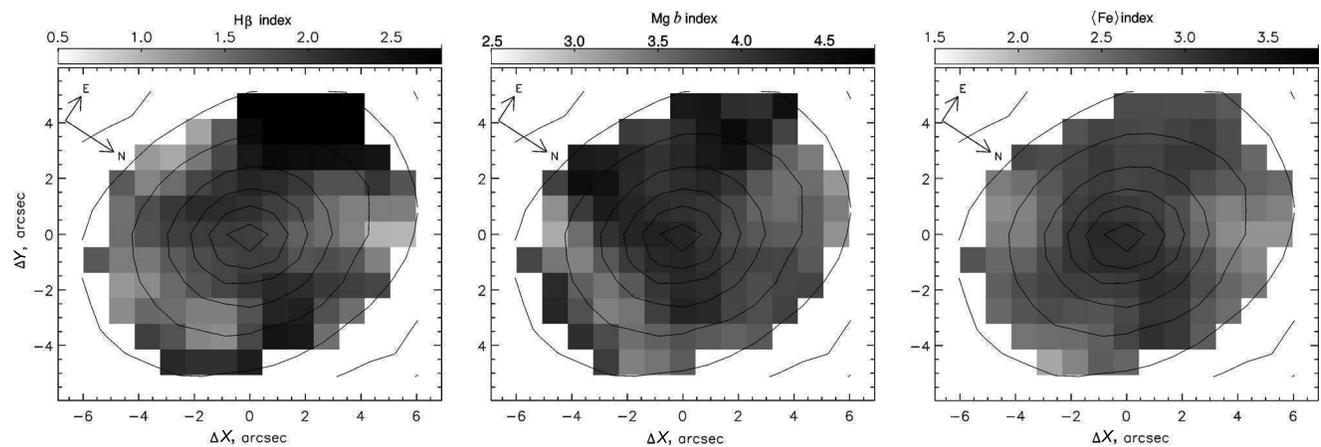


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для IC 455.

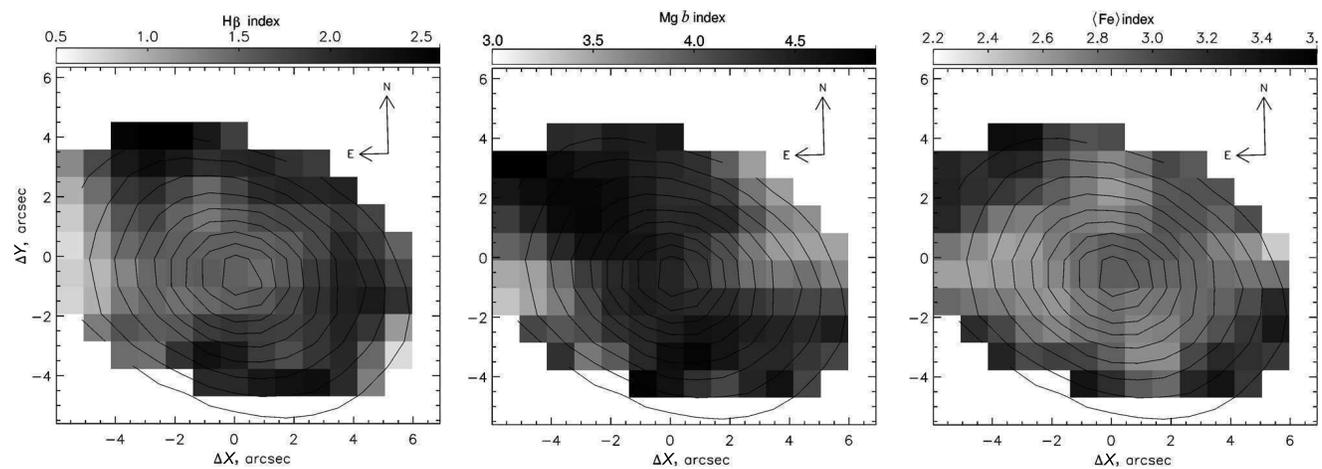


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для IC 499.

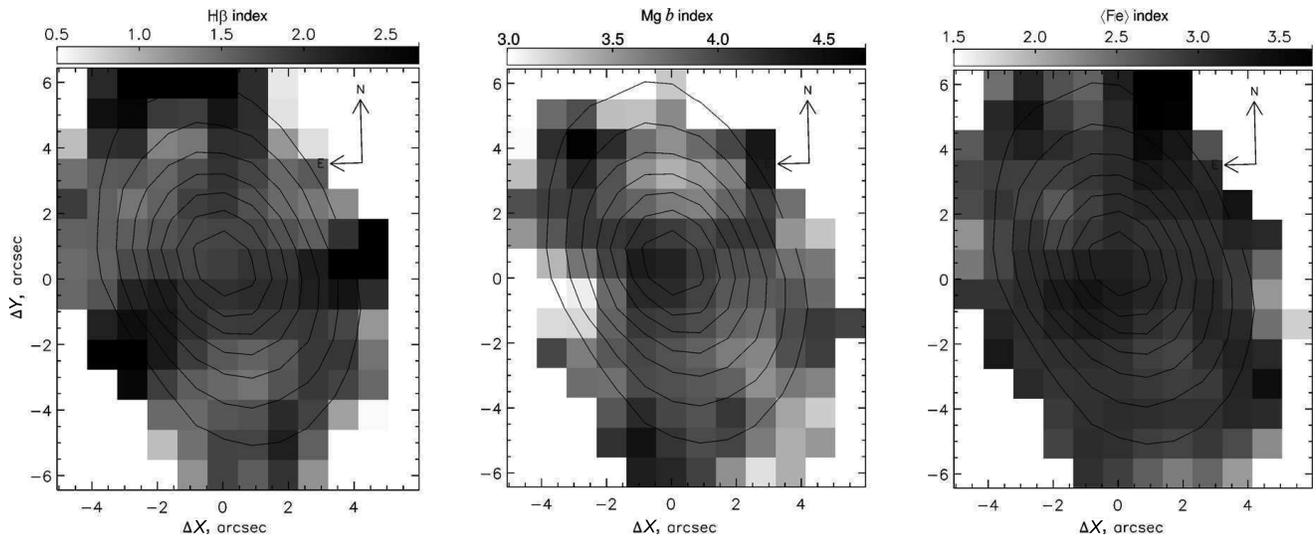


Рис. 4. То же, что и на рис. 1, для UGC 3654.

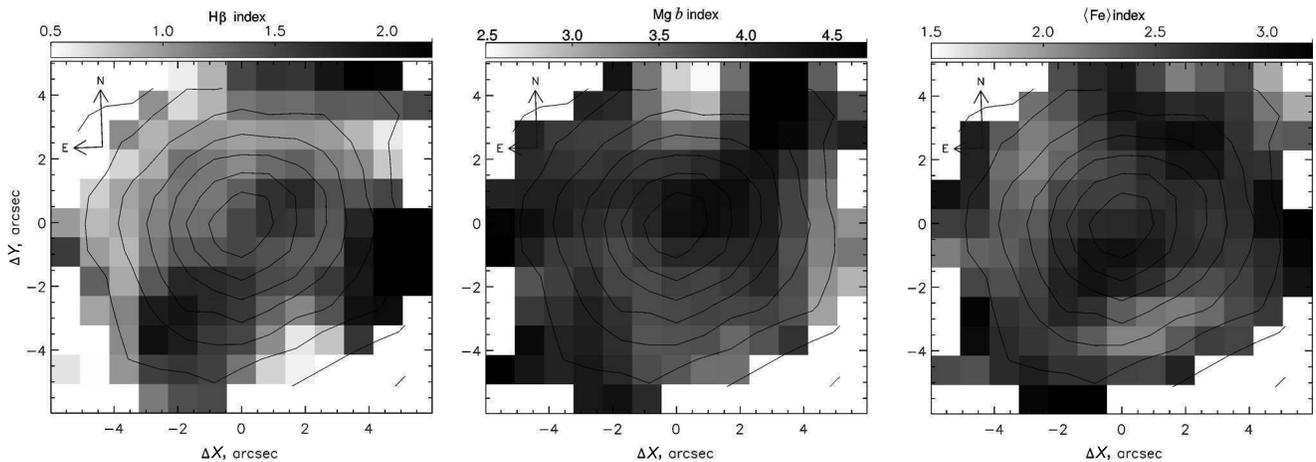


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, для IC 469.

раста звездного населения вдоль щели с удалением от центра галактик в IC 455, IC 499 и NGC 2300. Все три внешних диска оказались старыми, старше 8 млрд лет, с металличностью ниже солнечной, как мы и ожидали увидеть в дисковых галактиках ранних типов в окружении массивной группы [28]. Интересно, что старым, $T = 10 \pm 2$ млрд лет, оказалось и внутреннее звездное кольцо на радиусе $18''\text{--}30''$ в галактике IC 499.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ: КИНЕМАТИКА ЗВЕЗД И ГАЗОВЫЙ КОМПОНЕНТ

Панорамная спектроскопия с MPFS, позволяющая строить двумерные поля лучевых скоростей звездного компонента центральных областей, дает возможность судить о характере вращения и

о динамическом статусе балджей исследованных галактик. В таблице 1 приведены усредненные скорости вращения в проекции на луч зрения и дисперсии скоростей звезд на эффективном радиусе для четырех галактик выборки, кроме IC 469, у которой при фотометрическом анализе мы балдж вовсе не обнаружили [15]. Диаграмма Бинни–Корменди, сопоставляющая отношение скорости упорядоченного вращения звездного компонента к дисперсии скоростей звезд в проекции на луч зрения (то есть с учетом наклона оси вращения к лучу зрения) и видимую эллиптичность изофот, позволяет судить о динамическом статусе звездной системы. Когда мы видим проекцию сфероидального тела галактики на плоскость неба, эллиптичность изофот представляет собой комбинацию

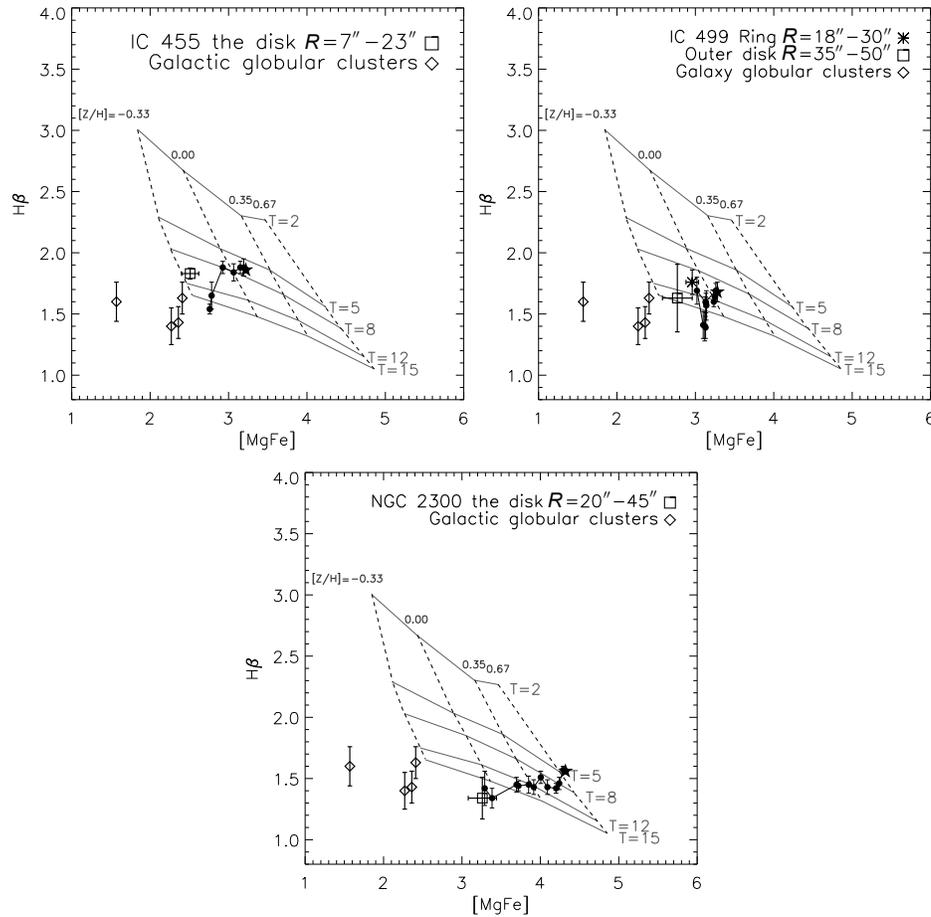


Рис. 6. Диагностические диаграммы «индекс, индекс» для измерений возрастов и металличностей звездных населений вдоль радиуса трех галактик группы NGC 2300 по данным спектроскопии с длинной щелью (черные точки с барами ошибок). Отдельными значками показаны: пятиконечной заполненной звездой — индексы для ядер галактик, квадратами — индексы для внешних звездных дисков галактик, и восьмилучевой «ежик» — звездное кольцо в IC 499. Сплошные линии — модели звездных населений одного возраста [26]; возраст моделей указан в млрд лет; около модельных реперов, соединенных штриховыми линиями, указана общая металличность моделей. Ромбами нанесены для сравнения нескольких шаровых скоплениях балджа Галактики с возрастaми около 10 млрд лет и металличностью $[Z/H] = -0.4 \dots -0.7$ dex из работы [27].

внутренней сплюснутости сфероидa и наклона его осей симметрии к лучу зрения. Сравнивая на этой диаграмме наши измерения с динамическими моделями сфероидов различных форм, мы можем сделать вывод, представляет ли собой галактика осесимметричное тело, вращающееся вокруг своей самой короткой оси (oblate), либо вокруг своей самой длинной оси (prolate), или же это триаксиальный сфероид, форма которого поддерживается анизотропным распределением хаотических движений звезд (дисперсией скоростей звезд). На рис. 7 приведены диаграммы Бинни–Корменди с нанесенными кинематическими данными из таблицы 1 в сопоставлении с эллиптичностью изофот по нашим фотометрическим данным [15]. На левом графике можно увидеть, что балджи трех галактик, IC 499, IC 455 и UGC 3654, ничем не отличаются от типичных балджей линзовидных галактик (выборка

сравнения — линзовидные галактики поля из [29]), а на правом — что они вполне могут быть описаны как oblate-сфероиды, сплюснутость которых соответствует отношению их скорости вращения к дисперсии скоростей звезд. Отметим, что у IC 499 доминирование вращения в кинематике звездного компонента выражено чуть более заметно, чем у модельных oblate-сфероидов. Можно сказать, что балдж IC 499 скорее относится к псевдобалджам — балджам, образовавшимся из материала диска в ходе секулярной эволюции галактики. Этому не противоречит и пониженный по сравнению с другими галактиками индекс Серсика, характеризующий форму профиля поверхностной яркости балджа (таблица 1). А вот главная галактика группы NGC 2300 резко отличается по своей центральной динамике как от других галактик группы, так и от линзовидных галактик как класса: она

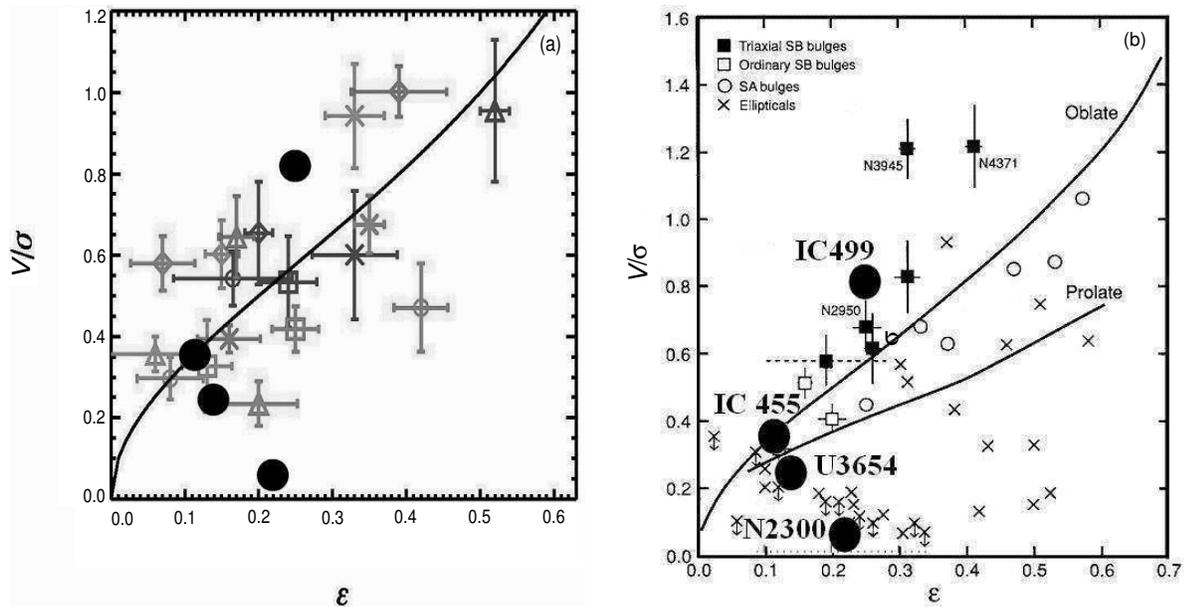


Рис. 7. Диаграммы Бинни–Корменди для оценки динамической температуры балджей галактик группы NGC 2300 (большие черные овалы). Верхний рисунок — сравнение балджей галактик группы NGC 2300 с балджами изолированных S0-галактик, адаптация рис. 5 из [29]; все галактики, кроме NGC 2300, демонстрируют нормальные сплюснутые сфероиды, форма которых поддерживается вращением. Нижний рисунок — сравнение балджей галактик группы NGC 2300 с различными типами сфероидов, адаптация рис. 17 из работы [2]; видно, что NGC 2300 относится к разряду невращающихся сфероидов с анизотропным распределением дисперсии скоростей звезд, а IC 499 — к разряду псевдобалджей, которые часто встречаются в дисковых галактиках с барами.

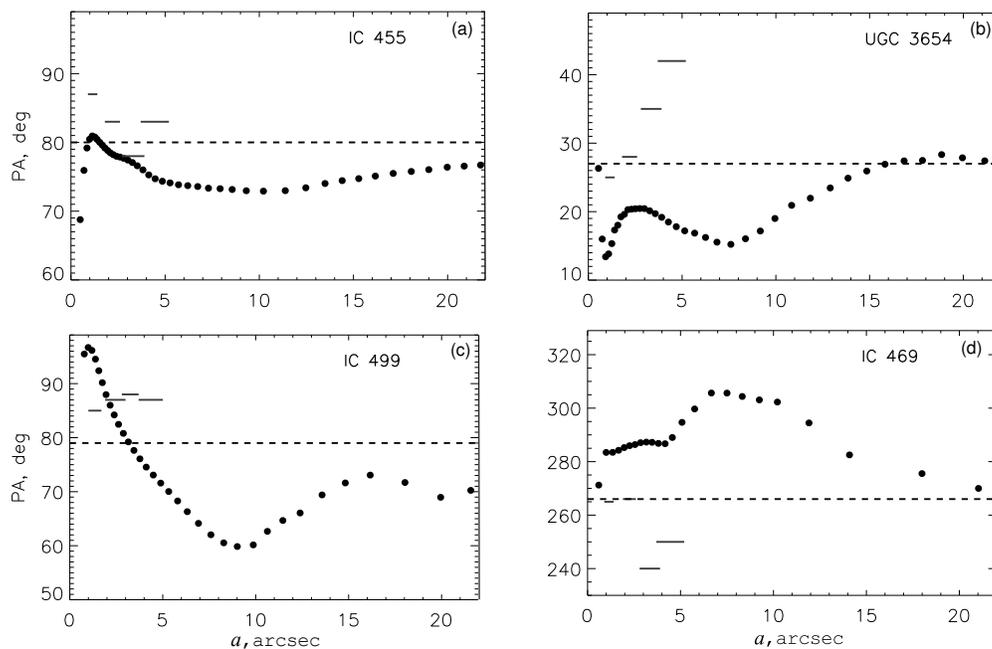


Рис. 8. Сравнение ориентации большой оси изопот (черные точки) с кинематической большой осью звездного компонента (горизонтальные черточки). Штриховой линией обозначена ориентация линии узлов внешнего звездного диска.

демонстрирует аномально низкую скорость вращения на эффективном радиусе балджа и попадает в разряд триаксиальных сфероидов вместе с целым классом гигантских эллиптических галактик. Ниже мы увидим, что и кинематика «диска» NGC 2300 совершенно не свойственна дисковым галактикам как классу.

На рис. 8 мы сравниваем ориентацию кинематических (по данным наблюдений с MPFS) и фотометрических (по данным [15]) больших осей центрального звездного компонента во всех галактиках, где есть заметное вращение в центре. Кинематическая большая ось — направление максимального градиента лучевой скорости звезд на двумерном распределении скоростей, фотометрическая большая ось — большая ось изофот. И то и другое направление для случая кругового вращения и осесимметричного распределения плотности совпадает с линией узлов плоскости вращения, то есть в случае кругового вращения мы должны наблюдать совпадение кинематической и фотометрической больших осей. Если же распределение массы неосесимметрично и вращение из-за этого некруговое, то кинематическая и фотометрическая большие оси не будут совпадать с линией узлов плоскости вращения, причем в проекции на картинную плоскость они будут отклоняться от линии узлов в разные стороны (см., например, модели в [30]). На рис. 8 такое поведение кинематической и фотометрической больших осей можно увидеть в случае UGC 3654 и IC 469, это типичное проявление присутствия бара. В IC 455 бар тоже есть, однако он компактен и «тонет» в балдже, поэтому отклонение кинематической большой оси от линии узлов слабое. Что касается фотометрии, то бар виден только на карте остаточных поверхностных яркостей после вычитания модели балджа и на карте цвета [15]. Интересен случай IC 499. В центре галактики наблюдается сильный разворот изофот, однако кинематическая большая ось звездного компонента разворачивается *вместе* с большой осью изофот. В этой галактике можно заподозрить не бар, но наклонный околоядерный звездный диск или балдж с осью вращения, наклоненной по отношению к оси вращения внешнего диска.

Спектры, полученные в моде длинной щели, были использованы для изучения крупномасштабной кинематики звездного компонента галактик группы.

IC 455. В спектре галактики вплоть до оптических границ диска отсутствуют эмиссионные линии. Таким образом, в этой линзовидной галактике нет ионизованного газа. Звездный компонент регулярно вращается, при этом кривая вращения не плоская, как обычно у дисковых галактик, а с падением скорости вращения вблизи границ звездного

диска (рис. 9, левый). Если учесть, что экспоненциальный радиальный масштаб звездного диска IC 455 равен $7''6$ [15], а максимум кривой вращения достигается на $R \approx 15''$, то есть примерно на радиусе двойного экспоненциального радиального масштаба, то можно заключить, что в пределах оптического радиуса вращение галактики определяется ее звездным диском, а темная материя в динамике не чувствуется.

NGC 2300. Эта галактика, классифицируемая фотометристами как дисковая, по нашим данным вовсе не вращается. На рис. 7 мы видели, что ее балдж, несмотря на довольно вытянутую форму изофот, показывает весьма низкую видимую скорость вращения по отношению к дисперсии скоростей звезд. На рис. 10 можно увидеть, что за пределами области доминирования балджа скорость вращения и вовсе падает до нуля. Мы получили четыре спектра галактики при различной ориентации длинной щели; позиционные углы разрезов менялись с шагом $30\text{--}55^\circ$. Ни в одной из ориентаций щели внешние области NGC 2300 не показали вращения. Дисперсия скоростей звезд остается высокой, порядка 150 км с^{-1} , вплоть до оптических границ галактики (рис. 11, правый). Мы делаем заключение, что и по кинематическим признакам NGC 2300 является не дисковой, а эллиптической галактикой, вероятно, триаксиальной формы. Ранее такой же вывод мы сделали по результатам фотометрического анализа распределения поверхностной яркости в NGC 2300 [15].

IC 499. В этой галактике ионизованный газ есть, и усиление эмиссионных линий на расстоянии $20''\text{--}30''$ и порядка $55''$ от центра обозначает присутствие серии колец. Кривая вращения звездного компонента плоская вплоть до оптических границ диска (рис. 9, правый); газ и звезды вращаются сходным образом, некоторое отставание звезд можно объяснить асимметричным дрейфом. На рис. 11, левом, показан профиль дисперсии скоростей звездного компонента в проекции на луч зрения по данным спектра с разрешением около 2 \AA (см. таблицу 2). Видно, что начиная с радиуса $20''$ в динамике доминирует относительно холодный звездный компонент — диск с дисперсией скоростей $40\text{--}70 \text{ км с}^{-1}$. Возможна некоторая асимметрия в распределении дисперсии скоростей звезд в диске: восточная сторона диска более холодная динамически, чем западная. Это полностью согласуется с признаками текущего звездообразования именно к востоку от центра (см. ниже).

Ионизованный газ в протяженном диске IC 499, заметный по эмиссионным линиям в спектре, может быть возбужден различным способом: молодыми массивными звездами, то есть текущим звездообразованием, или ударными волнами, которые

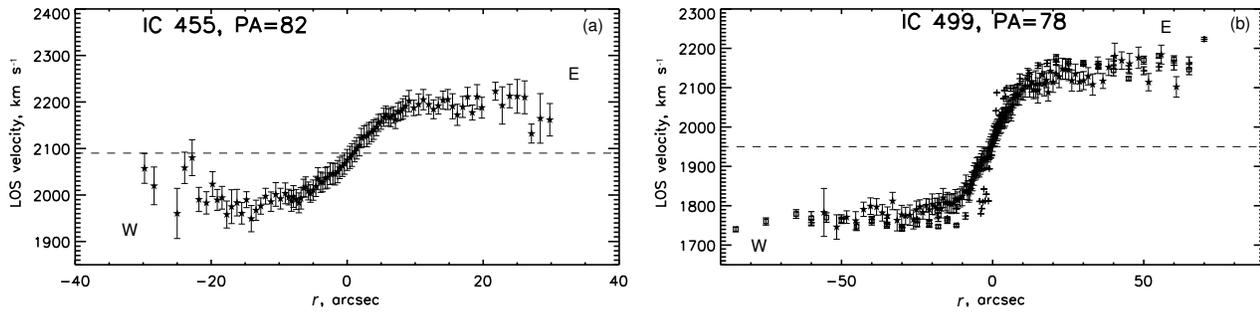


Рис. 9. Профили лучевой скорости звезд вдоль большой оси для IC 455 и IC 499 (звездочки). Для IC 499 также указаны измерения лучевых скоростей газа по эмиссионным линиям $[N II] \lambda 6583$ (крестики) и $H\alpha$ (квадраты).

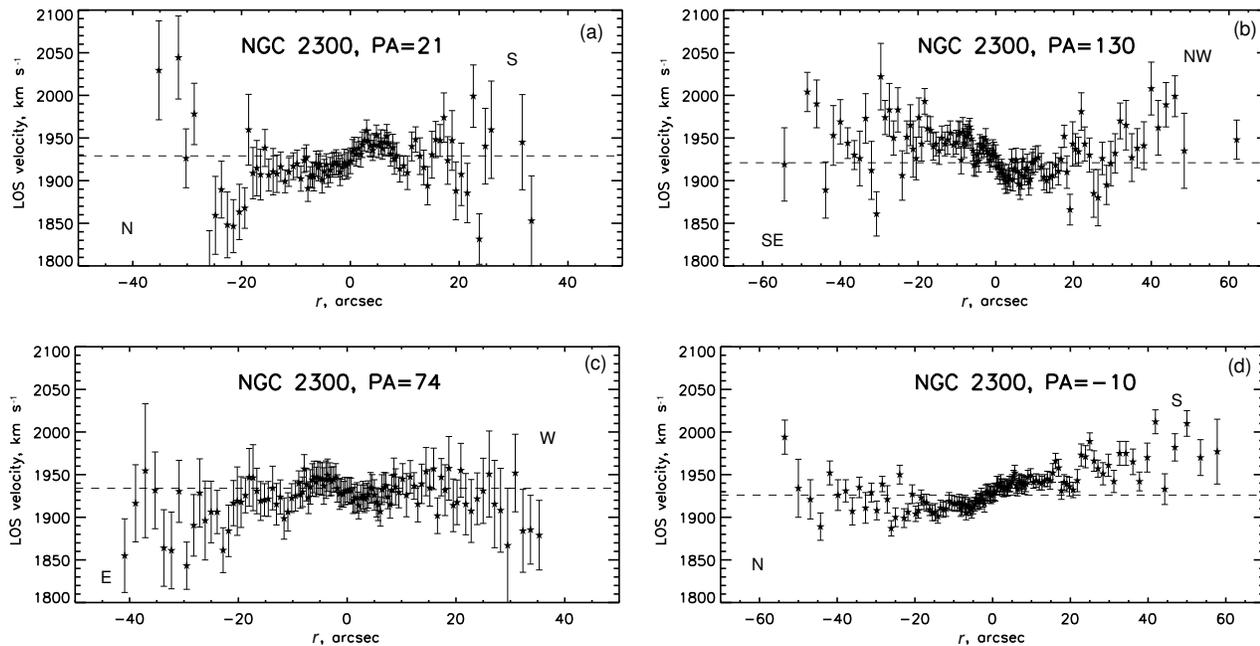


Рис. 10. Кинематические разрезы — профили лучевой скорости звезд NGC 2300 в различных позиционных углах.

могут возникать при некруговых движениях газа, то есть при неосесимметричном распределении масс в галактике, или при падении на диск галактики объекта извне. Существует методика сопоставления отношений потоков высоко- и низковозбужденных эмиссионных линий для диагностики источника возбуждения газа — так называемые ВРТ-диаграммы [31–33]. На рис. 12 приведены ВРТ-диаграммы для эмиссионного спектра IC 499 на разных расстояниях от центра в сравнении с моделями [34] и данными для нескольких тысяч ядер близких галактик из обзора SDSS. Положительные значения радиуса относятся к восточной части щели, отрицательные — к западной. В области слева от пунктирной линии оказываются галактики, где газ возбуждается молодыми массивными звездами, справа от сплошной — ударными вол-

нами, промежуточное положение характеризуется эмиссионными спектрами газа с переходным типом возбуждения. В диске IC 499 заметна сильная асимметрия запад–восток: на восток от ядра кольца ионизованного газа могут быть возбуждены — по крайней мере, частично — молодыми звездами, на запад от ядра — только ударными волнами. Интересно, что такая же асимметрия заметна и на карте цвета IC 499 [15]: на восток от ядра на расстояниях порядка $25''$ и $50''$ от центра на большой оси видны голубые дуги, и особенно синей выглядит внешняя дуга, встроенная в голубое кольцо молодого звездного населения, тогда как на запад от центра звездный диск выглядит однородно красным. В целом IC 499 при ближайшем рассмотрении выглядит не спиральной (таблица 1), а линзовидной галактикой с системой колец звездообразования.

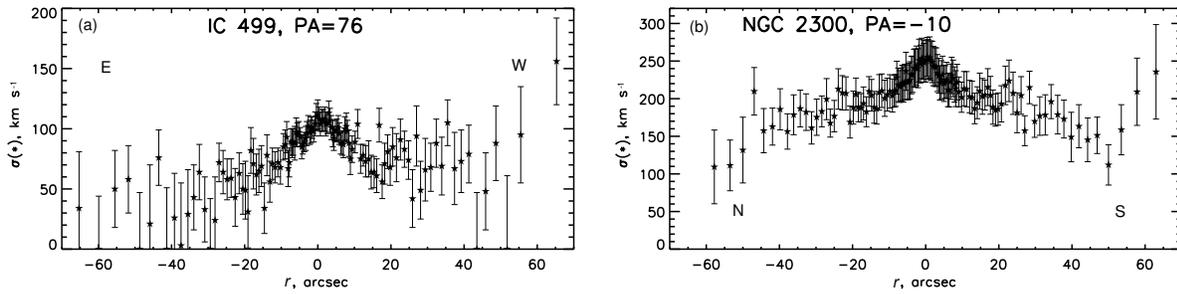


Рис. 11. Профили дисперсии скоростей звезд для IC 499 и NGC 2300.

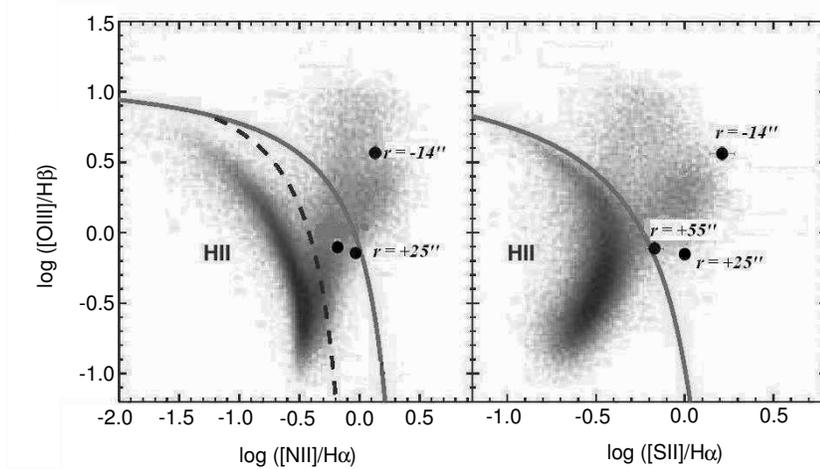


Рис. 12. Диагностические диаграммы для определения механизма возбуждения ионизованного газа в диске IC 499. Кривые разграничивают области возбуждения молодыми звездами (слева) и ударными волнами (справа) — адаптированная схема рис. 1 из работы [34]. Серое облако точек — несколько тысяч ядер галактик из обзора SDSS. Точки, помеченные значениями радиуса, — наши измерения отношений эмиссионных линий IC 499 на указанных расстояниях от центра.

Причем наблюдаемая *вдоль* большой оси асимметрия в распределении цвета и отношений эмиссионных линий похожа на волнообразные искривления газового диска по отношению к звездному. Этот вывод согласуется и с наклонным вращением звезд в центре галактики. Скорее всего, газ с наклонным моментом вращения был аккрецирован извне, но довольно давно, и он успел осесть в главную плоскость симметрии галактики, сохранив только остаточную прецессию.

6. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В статье представлены результаты спектрального исследования звездных населений и кинематики пяти галактик группы NGC 2300. Группа является достаточно массивной, порядка 10^{13} масс Солнца, согласно [1], и содержит горячую межгалактическую среду [18]. В результате наших исследований выяснилось, что, как и в других группах с рентгеновским газом, галактики группы NGC 2300

не показывают синхронной эволюции своих центральных областей: средний возраст звездных населений ядер и балджей в разных галактиках — от 2 до 15 млрд лет. Это можно понять в рамках иерархической картины «сбора» крупных агломератов галактик: если происходит слияние двух групп, каждая из которых уже обладает горячим рентгеновским гало (как мы отметили в случае группы NGC 2300/2276 и ранее в случае группы NGC 80/83 [10]), то у галактик-членов группы, погруженных в горячую межгалактическую среду, уже не должно быть внешних резервуаров холодного газа. Если же общее рентгеновское гало отсутствует, то такие резервуары должны быть у каждой дисковой галактики, и в процессе их сближения при сборе группы гравитационные приливы стимулируют «сброс» холодного газа из внешних резервуаров во внутренние области галактик, последующие вспышки звездообразования и «омоложение» центральных областей, что мы и наблюдаем как синхронную эволюцию, например, в группах NGC 524 [11], NGC 3169 [5], NGC 5576 [4]

и NGC 3379 [3]. Отдельный вопрос — почему у половины групп галактик рентгеновские гало есть, а у половины нет при сходных динамических масштабах [35] — все еще требует ответа.

Детальное исследование центральной галактики группы NGC 2300 подтвердило наши подозрения [15], что, несмотря на протяженное разреженное звездное гало и классификацию во всех недавних каталогах как SA0, галактика на самом деле не является дисковой. Уже анализ кинематики звезд в центре NGC 2300 позволяет отнести ее к так называемым «медленным ротаторам» — триаксиальным звездным сфероидом, вытянутая форма которых поддерживается анизотропным распределением дисперсии скоростей звезд. А наши глубокие спектры с длинной щелью, позволившие исследовать звездную кинематику в области предполагаемого доминирования звездного диска (выделенной яркости в [15]), показали, что во внешних областях галактики вращение звездного компонента еще менее упорядочено, чем во внутренних. Более того, в рамках точности наших измерений вращение обнаружить не удалось, а это значит, что внешние области NGC 2300 — не диск. Вероятно, NGC 2300 является уменьшенным аналогом центральных галактик скоплений — cD-галактик, у которых также отмечаются более пологие по сравнению с законом Вокулера профили поверхностной яркости во внешних частях [36]. Находясь в центре потенциальной ямы массивных темных гало, cD-галактики за свою жизнь поглощают множество других галактик, оказавшихся слишком близко от центра в процессе «сбора» скопления или группы. Такие продукты множественных малых мерджингов являются динамически горячими [37].

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение No. 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004). Мы благодарим за поддержку наших наблюдений на БТА сотрудников САО РАН А. В. Моисеева, А. Н. Буренкова, Р. И. Уклеина, А. А. Смирнову, Д. И. Макарова. При анализе данных мы использовали возможности Лион—Медонской базы внегалактических данных (LEDA), работа которой поддерживается командой LEDA в Лионской обсерватории CRAL (Франция), и Базу внегалактических данных НАСА/ИПАК (NED), созданную Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением аэронавтики и космических исследований (США). Анализ спектров галактик

группы NGC 2300 был поддержан грантом РФФ 14-22-00041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 2498 (2011).
2. J. Kormendy and R. C. Kennicutt, Jr., *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **42**, 603 (2004).
3. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, V. L. Afanasiev, et al., *Astrophys. J.* **591**, 185 (2003).
4. O. K. Sil'chenko, V. L. Afanasiev, V. H. Chavushyan, and J. R. Valdes, *Astrophys. J.* **577**, 668 (2002).
5. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astronomy Letters* **32**, 534 (2006).
6. S. Schneider, *Astrophys. J.* **288**, L33 (1985).
7. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astron. and Astrophys.* **429**, 825 (2005).
8. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astron. Astrophys. Trans.* **26**, 311 (2007).
9. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and A. P. Shulga, *Astron. J.* **140**, 1462 (2010).
10. O. K. Silchenko and V. L. Afanasiev, *Astronomy Reports* **52**, 875 (2008).
11. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astrophysical Bulletin* **67**, 253 (2012).
12. J. P. Huchra and M. J. Geller, *Astrophys. J.* **257**, 423 (1982).
13. A. M. Garcia, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **100**, 47 (1993).
14. R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, et al., *Astron. J.* **138**, 323 (2009).
15. M. A. Il'ina and O. K. Sil'chenko, *Astronomy Reports* **60**, 894 (2016).
16. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H.G. Corwin, Jr., et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*, Vol. 1: *Explanations and References* (Springer, New York, 1991).
17. E. Laurikainen, H. Salo, R. Buta, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **405**, 1089 (2010).
18. J. S. Mulchaey, D. S. Davis, R. F. Mushotzky, and D. Burstein, *Astrophys. J.* **404**, L9 (1993).
19. H. C. Arp, *Astrophys. J. Suppl.* **14**, 1 (1966).
20. J. J. Condon, *Astrophys. J. Suppl.* **54**, 459 (1983).
21. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and A. V. Moiseev, in *Proc. Conf. on Stellar Dynamics: from Classic to Modern, St. Petersburg, Russia, 2001*, Ed. by L. P. Osipkov and I. I. Nikiforov, (Saint Petersburg, Univ. Press, 2001), p.103.
22. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
23. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
24. G. Worthey, S. M. Faber, J. J. González, and D. Burstein, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 687 (1994).
25. L. A. Jones and G. Worthey, *Astrophys. J.* **446**, L31 (1995).
26. D. Thomas, C. Maraston, and R. Bender, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **339**, 897 (2003).
27. M. A. Beasley, J. P. Brodie, J. Strader, et al., *Astron. J.* **128**, 1623 (2004).

28. O. K. Sil'chenko, I. S. Proshina, A. P. Shulga, and S. E. Kuposov, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **427**, 790 (2012).
29. I. Yu. Katkov, A. Yu. Kniازهv, and O. K. Sil'chenko, *Astron. J.* **150**, id. 24 (2015).
30. A. V. Moisseev and V. V. Mustsevoi, *Astronomy Letters* **26**, 565 (2000).
31. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
32. S. Veilleux and D. E. Osterbrock, *Astrophys. J. Suppl.* **63**, 295 (1987).
33. D. E. Osterbrock, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* (Univ. Science Books, Mill Valley, 1989).
34. L. J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, and T. Heckman, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **372**, 961 (2006).
35. J. S. Mulchaey, D. S. Davis, R. F. Mushotzky, and D. Burstein, *Astrophys. J. Suppl.* **145**, 39 (2003).
36. A. Oemler, Jr., *Astrophys. J.* **209**, 693 (1976).
37. A. Garijo, E. Athanassoula, and C. Garcia-Gomez, *Astron. and Astrophys.* **327**, 930 (1997).

Stellar Population and Evolution of Galaxies in Groups: the NGC 2300 Group

V. L. Afanasiev, O. K. Silchenko, and I. S. Proshina

Using panoramic and long-slit spectroscopy at the 6-m telescope of SAO RAS, we studied the stellar population and kinematics of five early-type disc galaxies—members of the NGC 2300 group. The evolution of galaxies appears to be absolutely out of synch: while the average age of the stars in the central regions of the galaxies located close to the center of the group ranges from 2 to 7 Gyr, the peripheral spiral galaxies have old nuclei and bulges, with the ages of 10–15 Gyr. The brightest galaxy of the NGC 2300 group, which up to now has been considered to be lenticular, of the SA0 type, turned out to be extremely hot dynamically: its bulge rotates slowly, $v/\sigma = 0.06$, and the outer parts do not rotate at all. We conclude that the kinematics of the stellar component of NGC 2300 indicates that it is not a disc galaxy, but a triaxial spheroid.

Keywords: *galaxies: nuclei—galaxies: bulges—galaxies: stellar content—galaxies: evolution*