

УДК 524.74-54

## СВОЙСТВА ЗВЁЗДНЫХ НАСЕЛЕНИЙ ИЗОЛИРОВАННЫХ ЛИНЗОВИДНЫХ ГАЛАКТИК

© 2014 И. Ю. Катков<sup>1,2\*</sup>, О. К. Сильченко<sup>1</sup>, В. Л. Афанасьев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва, 119992, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, 119991 Россия

<sup>3</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 12 декабря 2013 года; принята в печать 24 марта 2014 года

Представлены результаты наблюдений на спектрографах SCORPIO и SCORPIO-2 6-метрового телескопа САО РАН в режиме длинной щели выборки изолированных линзовидных галактик. Методом прямой аппроксимации спектров, с помощью моделей эволюционного синтеза измерены радиальные профили скорости вращения, а также дисперсии скоростей, среднего возраста и средней металличности звезд в 12 объектах. Полученные средние возраста звездного населения балджей и дисков заполняют полный диапазон возможных значений, от 1.5 до 15 млрд лет, что свидетельствует об отсутствии в изолированных линзовидных галактиках, в отличие от членов групп и скоплений, выделенной эпохи формирования структурных компонент: они могут сформироваться на красном смещении  $z > 2$ , а могут — всего несколько миллиардов лет назад. В отличие от S0-галактик в более плотном окружении, изолированные галактики, как правило, имеют одинаковый возраст звезд в балджах и в дисках. Линзы и кольца повышенной звездной яркости, выделенные по фотометрии в 7 из 11 галактик, существенно не отличаются от звездных дисков по свойствам звездных населений и дисперсии скоростей звезд. Сделан вывод, что, вероятно, оформление морфологического типа линзовидной галактики в полной изоляции критически зависит от возможных режимов аккреции внешнего холодного газа.

Ключевые слова: *галактики: эллиптические и линзовидные—галактики: звёздное население—галактики: эволюция*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема сценариев формирования и эволюции галактик является ключевым вопросом современной внегалактической астрономии и наблюдательной космологии. Галактики формируются под воздействием огромного количества физических факторов, зачастую недостаточно детально известных теоретикам, и основной проблемой здесь является выделение наиболее важных из них, которые для данного морфологического типа галактик являются определяющими в ходе формирования и эволюции.

Тип линзовидных (S0) галактик был предложен Эдвином Хабблом как гипотетический в 1936 г. [1], чтобы заполнить промежуточную позицию между эллиптическими и спиральными галактиками. Предполагалось, что объекты этого типа обладают крупномасштабными звездными дисками, как спиральные галактики, но не имеют заметных областей звездообразования и спирального узора в

звездных дисках. Их гладкий красноватый вид и, вероятно, старый средний возраст звезд роднит их с эллиптическими галактиками. Промежуточное положение линзовидных галактик между чисто сфероидальными звездными системами и спиральными галактиками, у которых вклад балджа в общую светимость монотонно убывает с переходом от ранних типов к поздним (слева направо вдоль морфологической последовательности Хаббла), дает основание для естественного предположения, что S0-галактики должны обладать большими балджами. Однако детальная поверхностная фотометрия изображений S0-галактик показала, что балджи в них могут быть как очень большими, так и крошечными [2]. Из-за этих результатов становится все более популярной старая идея Ван ден Берга [3] о том, что линзовидные галактики на схеме Хаббла должны составлять последовательность, параллельную спиральным галактикам, и связь между (близким) положением на схеме S0(a,b,c) и спиральными галактик соответствующим

\*E-mail: katkov.ivan@gmail.com

щих подтипов задается отношением светимостей «балдж/диск» [4, 5]. Казалось бы, это изменение понимания эволюционного смысла последовательности Хаббла усиливает общепринятую точку зрения о формировании линзовидных галактик путем прекращения звездообразования в спиральных галактиках: эволюционную стадию трансформации галактики-«прародителя» к результирующей S0-галактике намного проще представить, когда у обеих галактик одинаковые соотношения «балдж/диск». Однако следует заметить, что если вклад балджа в полную светимость у S0 галактики такой же, как у близкой ей на морфологической схеме спиральной галактики, то это оставляет возможность обратного преобразования, превращения S0-галактики в спиральную, что было бы совсем невозможно при наличии у S0-галактики большего балджа.

В литературе обсуждается большое количество физических процессов, которые могли бы прекратить звездообразование в диске спиральной галактики. Перечислим некоторые из них:

- (1) прямые столкновения галактик [6, 7];
- (2) приливные эффекты от темного гало скопления/группы [8];
- (3) «насилие (harassment)» — гравитационное приливное воздействие галактик друг на друга при достаточно быстром пролете [9];
- (4) лобовое давление горячей межгалактической среды (ram pressure) [10, 11];
- (5) «голодание (starvation)» — прекращение звездообразования в результате исчезновения внешних резервуаров с газом, до того обеспечивавших аккрецию газа на диск галактики и питание процессов звездообразования [12].

Все эти процессы тесно связаны с плотным окружением галактик, потому что только скопления и богатые группы галактик с их массивными темными гало могут обеспечить необходимую плотность горячей межгалактической среды для лобового давления и близкое взаимное расположение галактик для возникновения приливных эффектов.

Известно, что линзовидные галактики являются доминирующим населением близких скоплений галактик, где их доля достигает 60% [13]. Однако и среди галактик поля число S0-галактик весьма заметно: по оценкам обзора АРМ [14], в ближней Вселенной доля линзовидных галактик около 15%, и они находятся на втором месте по частоте встречаемости после спиральных. Более того, существуют примеры совершенно изолированных линзовидных галактик [15]. Возникает до сих пор не поднимавшийся вопрос о происхождении таких

галактик. Под действием каких физических механизмов они были сформированы, и насколько эти механизмы отличаются от тех, что работают в плотном окружении?

Несмотря на видимый дефицит механизмов морфологической трансформации изолированных галактик по сравнению с членами скоплений и групп, неправильно считать, что изолированные галактики эволюционируют абсолютно обособленно, как в сценарии «замкнутой системы (closed box)», на это указывают некоторые недавние исследования. В нашей работе [16] было показано, что совершенно изолированная спиральная галактика раннего типа NGC 7217 за последние 5 млрд лет испытала по меньшей мере два события падения спутников. В локально изолированной S0-галактике NGC 4124 мы также обнаружили следы малого мерджинга, который по всей видимости произошел 2–3 млрд лет назад и спровоцировал центральную вспышку звездообразования [17]. Кроме того, в последнее время выяснилось, что нередко в линзовидных галактиках поля присутствует заметное количество газа, при этом именно в разреженном окружении галактика часто демонстрирует различную кинематику газа и звезд, что свидетельствует о внешнем происхождении газа [18]. Таким образом, исследования свойств изолированных линзовидных галактик позволяют сконцентрироваться на эволюционных механизмах, связанных либо с внутренними неустойчивостями дисков, либо только с внешней аккрецией газа и/или спутников. Следует заметить, что аккреция газа и/или события малого мерджинга могут не только остановить звездообразование в диске, но и, наоборот, спровоцировать его [19, 20].

Объектами представленных в настоящей работе исследований являются близкие, сильно изолированные линзовидные галактики, для которых мы провели спектральные наблюдения с целью определения свойств их звездных населений, а также кинематики звезд и газа. Рассмотрению свойств ионизованного газа в исследуемых объектах посвящена отдельная статья [21], в настоящей работе мы концентрируемся только на свойствах звездных населений.

Работа структурирована следующим образом: раздел 2 посвящен описанию выбора исследуемых объектов; описанию деталей спектральных наблюдений, редукации и анализа данных посвящен раздел 3; в разделе 4 представлены результаты по каждой галактике; в разделах 5 и 6 приводятся обсуждения результатов и выводы работы.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ВЫБОРКИ

Мы составили выборку близких изолированных линзовидных галактик, используя подход, который

недавно был разработан в Лаборатории внегалактической астрофизики и космологии САО РАН Караченцевым, Макаровым и их соавторами. Этот подход был предложен и применен к галактикам Местного сверхскопления и его окрестностям с целью их объединения в пары [22], триплеты [23], группы [24], а также для выделения изолированных галактик [25]. Данные о лучевых скоростях, видимых звездных величинах и морфологических типах галактик были взяты из обновленной базы данных HyperLeda<sup>1</sup> и базы данных NED,<sup>2</sup> дополненных измерениями лучевых скоростей из обзоров SDSS, 6dF, HIPASS, ALFALFA. Кластеризация проводилась для галактик с лучевой скоростью относительно Местной группы  $V_{LG} < 4000 \text{ км с}^{-1}$  и галактической широтой  $|b| > 10^\circ$ . Особенность предлагаемого авторами алгоритма кластеризации заключается в учете индивидуальных характеристик галактик, в частности, индикатора массы галактики — светимости в фильтре  $K$ . Попарно объединяя галактики в системы, авторы предполагают, что каждая виртуальная пара должна удовлетворять условию отрицательной полной энергии и условию нахождения ее компонентов внутри «сферы нулевой скорости», т.е. галактики пары не удаляются друг от друга в хаббловском расширении. Алгоритм кластеризации подразумевает итеративный пересмотр всех галактик исходной выборки для последующего объединения в группу/скопление галактик связанных пар, имеющих общие члены. Подробности алгоритма приведены в вышеуказанных работах. Одним из промежуточных продуктов работы алгоритма является список попарных индексов изолированности между двумя любыми галактиками выборки. Индекс изолированности ( $II$ ) двух галактик — это величина, характеризующая взаимное динамическое влияние обоих компонентов друг на друга. В случае несвязанной пары  $\log II$  положителен и равен логарифму числа раз, в которое нужно увеличить массу одного из компонентов, чтобы пара стала удовлетворять принятым критериям объединения. И наоборот, в случае связанной пары  $\log II$  отрицателен и равен логарифму числа раз, в которое нужно уменьшить массу, чтобы пара стала несвязанной. Одно и то же значение индекса изолированности может реализовываться для широкой пары галактик сопоставимой светимости и тесной пары, состоящей из гигантской галактики и близкого, но слабого спутника.

Авторы рассматриваемого подхода любезно предоставили нам информацию о взаимных индексах изолированности для всех галактик Местного сверхскопления и его окрестностей. Используя

<sup>1</sup><http://leda.univ-lyon1.fr/>

<sup>2</sup><http://ned.ipac.caltech.edu/>

эту информацию, мы отобрали для нашего исследования линзовидные галактики, которые имеют  $II > 2.5$  как для галактик большей светимости, так и для галактик меньшей светимости по сравнению с рассматриваемой. Мы провели спектральные наблюдения 12 галактик из полученного списка с целью исследования свойств звездных населений. В таблице 1 для каждой исследуемой галактики приведены пять наиболее влиятельных «соседей» большей и меньшей светимости, а также информация о морфологии, лучевых скоростях и абсолютных величинах. Для галактик NGC 16 и NGC 3098 принятые нами ограничения на изолированность от потенциальных спутников меньшей светимости не выполняются. У обоих галактик есть «сосед» малой светимости с  $II = 1.9$ , однако в виду очень большой разности в светимости,  $\delta M_K \approx 5$  величин (массы различаются примерно в 100 раз), мы считаем, что спутники не могут оказать существенного гравитационного влияния на большие галактики, и поэтому эти галактики не выбиваются из общепринятых критериев отбора изолированных галактик.

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

#### 3.1. Наблюдения

Наблюдения выборки исследуемых галактик проводились в прямом фокусе 6-м телескопа БТА САО РАН в период 2011–2012 гг. Спектральные данные для всех галактик, за исключением NGC 6615 и NGC 6654, были получены с помощью фокального редуктора SCORPIO-2 [26] в длиннощелевом режиме с щелью размером  $6' \times 1''$ . При наблюдениях использовалась гризма VPHG 1200@540, обеспечивающая спектральное разрешение  $\text{FWHM} \approx 4 \text{ \AA}$  в рабочем диапазоне 3800–7300  $\text{ \AA}$ . В этот спектральный диапазон попадают как сильные абсорбционные линии, такие как Mg, Fe, G-полоса, так и ряд эмиссионных линий ( $\text{H}\alpha$ ,  $\text{H}\beta$ , [O III], [N II] и др.), что позволяет исследовать одновременно кинематику, возраст и химический состав звездного компонента и кинематику ионизованного газа, а вместе с тем проводить диагностику механизмов возбуждения ионизованного газа. В качестве приемника использовалась ПЗС-матрица E2V CCD 42-90 с размером чипа  $2k \times 4k$ , что при считывании в режиме биннинга  $1 \times 2$  обеспечивает пространственный масштаб вдоль щели  $0''.357$  на пиксел и дисперсию  $0.86 \text{ \AA}$  на пиксел. В отличие от остальных галактик, NGC 6615 и NGC 6654 наблюдались в другой инструментальной конфигурации, а именно, с прибором SCORPIO [27] и с гризмой VPHG 2300G, что обеспечило спектральное разрешение  $2.2 \text{ \AA}$

Таблица 1. Таблица окружения исследуемых галактик

Имя	Морф. тип		$V_{\text{sys}}$	$M_K$	Соседи "сверху"				Соседи "снизу"			
	HyperLeda	NED			Имя	$\delta M_K$	$\delta V$	$II$	Имя	$\delta M_K$	$\delta V$	$II$
IC 0875	S0	S0	2913	-22.713	NGC 4814	1.034	278	31.0	PGC 046033	-3.949	-48	4.2
					NGC 5218	1.175	-121	107.9	SDSSJ 1324...	-3.577	-126	10.3
IC 1502	S0-a	S0+	2237	-23.704	NGC 5322	2.242	993	126.9	NGC 4964	-0.851	268	57.3
					NGC 5430	1.491	-224	150.4	NGC 5109	-1.563	660	78.6
					UGC 08237	0.315	-86	179.2	SDSSJ 1259...	-4.268	-83	84.0
					IC 0356	1.793	1131	158.6	UGC 12247	-4.960	298	46.2
NGC 0016	E-S0	SAB0- edge-on	3300	-24.511	NGC 3031	-0.394	2135	280.1	UGC 12504	-4.322	-461	64.6
					NGC 1184	0.925	-264	311.8	UGC 12921	-2.427	-477	73.5
					IC 0342	-0.361	1997	376.8	UGC 12160	-1.135	404	74.2
					NGC 6951	1.074	517	473.3	UGC 12069	-2.052	-405	106.8
NGC 2350	S0-a	S0/a	1774	-22.725	NGC 7817	-0.190	745	214.2	PGC 000446	-5.443	-140	1.9
					NGC 0253	-0.100	3024	1029.7	UGC 12873	-5.043	-212	22.8
					NGC 3031	-1.201	3198	1212.8	PGC 087206	-5.736	-513	191.4
					NGC 7619	1.071	-689	1296.4	PGC 001153	-6.733	-636	312.1
NGC 2350	S0-a	S0/a	1774	-22.725	NGC 7331	0.410	2179	1339.5	UGC 00285	-3.498	872	459.0
					NGC 2339	1.168	-396	135.1	UGC 03775	-4.638	-244	12.1
					NGC 2365	0.681	-429	400.0	UGC 03691	-0.708	-327	81.7
					NGC 3031	0.584	1672	402.6	PGC 097214	-2.601	-298	102.4
NGC 2350	S0-a	S0/a	1774	-22.725	NGC 4472	2.552	901	635.7	PGC 2807004	-5.452	40	172.1
					IC 0342	0.618	1534	1054.5	-	-5.371	-154	470.6

Таблица 1. (Продолжение)

Имя	Морф. тип		$V_{sys}$	$M_K$	Соседи "сверху"			Соседи "снизу"				
	HyperLeda	NED			Имя	$\delta M_K$	$\delta V$	$II$	Имя	$\delta M_K$	$\delta V$	$II$
NGC 3098	S0-a	S0 edge-on	1305	-22.170	NGC 3190	1.456	117	4.1	PGC 2806869	-4.981	58	1.9
					NGC 3245	1.216	29	27.1	IC 2520	-1.545	151	24.1
					NGC 3227	0.955	271	40.4	UGC 05588	-2.090	95	33.0
					NGC 2964	1.033	44	49.0	PGC 029347	-2.527	10	37.5
					NGC 3379	1.618	544	53.3	NGC 3026	-1.433	-109	38.5
NGC 3248	S0	S0	1356	-21.818	NGC 3190	1.808	168	2.5	PGC 166105	-5.029	252	13.2
					NGC 3301	0.782	116	6.3	PGC 2806870	-5.424	-115	16.0
					NGC 3245	1.568	80	15.9	PGC 030270	-3.603	-78	24.1
					NGC 3227	1.307	321	21.4	UGC 05588	-1.738	145	35.6
					NGC 3379	1.970	594	38.5	PGC 031387	-2.524	47	36.9
NGC 6615	S0-a	SB0+?	2868	-23.779	NGC 6574	0.520	396	21.7	UGC 11214	-1.687	34	2.5
					UGC 11057	-0.299	-161	92.4	PGC 061685	-2.895	-198	2.9
					NGC 6548	0.244	498	110.9	PGC 061658	-1.804	-319	13.5
					NGC 6501	0.432	-224	123.7	UGC 11168	-0.981	381	22.4
					NGC 6587	0.390	-429	138.0	PGC 061621	-0.776	-274	29.4
NGC 6654	S0-a	(R')SB0/a(s)	2204	-23.830	NGC 6643	-0.203	459	21.1	PGC 062387	-3.539	101	18.4
					NGC 6340	-0.651	757	189.7	NGC 6654A	-3.756	380	25.6
					NGC 6951	0.948	484	225.3	UGC 10892	-4.568	26	33.3
					NGC 3031	-0.520	2102	273.3	PGC 062173	-3.925	534	51.3
					NGC 6911	0.517	-576	470.4	UGC 11295	-4.629	-427	57.8

Таблица 1. (Продолжение)

Имя	Морф. тип		$V_{sys}$	$M_K$	Соседи "сверху"				Соседи "снизу"			
	HyperLeda	NED			Имя	$\delta M_K$	$\delta V$	$II$	Имя	$\delta M_K$	$\delta V$	$II$
NGC 6798	S0		2741	-23.520	NGC 6764	-0.001	41	31.1	UGC 11457	-4.740	-10	6.1
					NGC 6824	1.934	-1091	232.1	NGC 6757	-0.813	75	36.9
					NGC 6703	1.045	90	344.4	UGC 11502	0.047	-335	112.3
					NGC 6829	0.376	-853	505.2	PGC 063313	0.604	-1241	193.8
NGC 7351	S0	SAB0 <sup>+</sup> 0?	1077	-20.923	NGC 6946	0.083	2389	577.0	NGC 6796	-0.424	263	303.2
					NGC 0253	3.488	801	137.0	PGC 069415	-1.826	61	2.5
					NGC 7727	3.637	-881	899.2	PGC 069224	-1.777	-7	3.4
					NGC 3031	2.387	975	1006.1	PGC 1028063	-3.405	23	11.9
UGC 04551	S0	S0?	1794	-22.633	IC 1459	4.208	-599	1042.6	PGC 982181	-5.031	-37	169.8
					NGC 7507	3.518	-558	1163.6	PGC 069293	0.579	-809	626.0
					NGC 2712	0.334	-50	66.2	UGC 04659	-2.959	17	26.7
					NGC 2768	1.827	328	69.3	PGC 023834	-3.120	-10	27.5
UGC 09519	S0	S0?	1782	-21.710	NGC 2639	2.259	-1458	71.1	UGC 04543	-1.791	-189	58.5
					NGC 3031	0.677	1691	127.7	UGC 04648	-3.851	-138	93.2
					NGC 2681	0.009	1048	159.4	UGC 04922	-1.653	-228	168.9
					NGC 4472	3.567	909	88.7	NGC 5727	-2.425	206	42.1
UGC 09519	S0	S0?	1782	-21.710	NGC 5353	3.466	-457	131.0	PGC 2080256	-3.641	-196	69.1
					NGC 5611	0.804	-243	152.5	PGC 052694	-2.617	132	72.0
					NGC 5582	0.986	247	159.8	UGC 09597	-3.886	-30	123.5
					NGC 5194	2.284	1221	194.7	NGC 5798	-0.596	-88	127.6

Таблица 2. Журнал наблюдений

№	Имя	Дата	Экспозиция, с	Кач-во изобр., arcsec	РА, град.
1	IC 875	23 апреля 2012	2700	2.5	−30
2	IC 1502	19 ноября 2011	2700	2.5	52
3	NGC 16	20 ноября 2011	1800	2.0	16
4	NGC 2350	13 декабря 2012	6000	1.6	−73
5	NGC 3098	18 апреля 2012	5400	1.2	−90
6	NGC 3248	22 апреля 2012	2700	3.0	−45
7	NGC 6615	19 сентября 2012	7200	1.0	−15
8	NGC 6654	20 сентября 2012	6600	1.3	0
9	NGC 6798	20 ноября 2011	5400	2.5	−30
10	NGC 7351	19 ноября 2011	3600	2.0	0
11	UGC 4551	12 декабря 2012	8400	2.0	−67
12	UGC 9519	24 апреля 2012	4500	2.0	−105

диапазоне 4800–5600 Å, а использование приемника EEV CCD 42–40 с размером матрицы 2k×2k дало тот же масштаб вдоль щели при дисперсии 0.37 Å на пиксел. При наблюдениях щель была ориентирована вдоль больших осей галактик. В журнале наблюдений (таблица 2) приведены даты наблюдений, суммарные экспозиции, среднее качество изображения в течение экспозиции каждой галактики и позиционный угол щели.

### 3.2. Первичная редукция данных

Первичная редукция данных была проведена с помощью оригинальных программ, написанных в среде IDL, и заключалась в поэтапном выполнении следующих шагов: учет смещения нуля системы регистрации путем вычитания из всех изображений усредненного кадра нулевой экспозиции (bias); учет неравномерной засветки и неоднородностей чувствительности ПЗС-матрицы по спектрам калибровочной лампы плоского поля (flat-field); удаление следов космических частиц с помощью алгоритма L. A. Cosmic [28], реализующего лапласовский фильтр для детектирования частиц, и сложения спектров; построение двумерного дисперсионного уравнения по спектру калибровочной лампы с гелий-неон-аргоновым наполнением и дальнейшая линейаризация спектров с характерной точностью 0.03–0.06 Å в зависимости от используемой решетки; вычитание фонового спектра ночного неба; пересчет инструментальных потоков

в абсолютные, используя спектры спектрофотометрических звезд-стандартов. При наблюдениях в полутемное время вклад ночного неба достаточно велик и сильно меняется со временем. В таких случаях мы проводили вычитание ночного неба перед сложением спектров, чтобы наилучшим образом подобрать параметры процедуры для каждого отдельного спектра. Конечным результатом выполнения первичной редукции данных были не только спектры объектов, но также изображения уровня ошибок, которые рассчитывались на основе пуассоновской статистики фотонов и шума считывания и вместе с изображениями спектров объектов преобразовывались в ходе каждого этапа редукции.

Помимо спектров объектов и спектрофотометрических звездных стандартов в процессе редукции данных были проанализированы спектры рассветного или сумеречного неба, которые, по сути, представляют собой солнечный спектр, свернутый с инструментальным профилем спектрографа. Поэтому анализ спектров рассветного или сумеречного неба позволяет определить поведение инструментального профиля спектрографа вдоль щели спектрографа и вдоль направления дисперсии. Первое важно для вычитания вклада ночного неба, а второе — для корректного определения параметров кинематики галактик. Спектры рассветного неба редуцировались таким же образом, как и спектры объектов. Детально о восстановлении инструментального профиля и его использовании при анализе галактик написано в следующем разделе 3.3.

### 3.3. Вычитание вклада ночного неба

При анализе объектов низкой поверхностной яркости особое внимание надо уделять тщательному вычитанию вклада ночного неба, недоучет которого может привести к появлению систематических ошибок в определении параметров звездных населений изучаемых объектов [29]. В настоящей работе мы определяем свойства звездных населений структурных компонентов галактики, в том числе звездных дисков, которые обладают низкой поверхностной яркостью. Поэтому мы считаем необходимым подробнее остановиться на описании процедуры вычитания спектра ночного неба.

Ранее нами была предложена рафинированная методика вычитания спектра ночного неба для длиннощелевой спектроскопии объектов низкой поверхностной яркости в случае сильных вариаций инструментального профиля вдоль щели [29]. В этой методике построение модели неба заключается в пересчете спектра неба с крайних областей на щели на область спектра с объектом на основе применения процедуры деконволюции к опорному спектру. В качестве опорного спектра предполагается использование спектра рассветного/сумеречного неба, который несет в себе информацию о вариациях инструментального профиля. К сожалению, в ходе наблюдений спектры рассветного/сумеречного неба не всегда наблюдались из-за внезапно ухудшившихся погодных условий. Стандартный способ, не требующий использования опорного спектра и учитывающий в нулевом приближении вариации профиля вдоль щели, заключается в аппроксимации спектра неба полиномом низкой степени (2–4) в каждой колонке изображения спектра и его пересчете на область объекта. Такой способ хорошо работает для спектров непротяженных объектов. Однако при длиннощелевых наблюдениях галактик это условие выполняется не всегда.

Поэтому мы предлагаем еще один способ построения спектра ночного неба, который основан на процедуре экстраполяции в частотном домене. Спектр ночного неба в данном положении на щели  $y-S(\lambda, y)$  можно записать в виде свертки «истинного» спектра ночного неба  $S_0(\lambda)$  с инструментальным профилем  $\mathcal{L}(\lambda, y)$ :

$$S(\lambda, y) = S_0(\lambda) \mathcal{L}(\lambda, y). \quad (1)$$

В частотном домене процедура свертки становится процедурой умножения, поэтому если провести одномерное преобразование Фурье вдоль направления дисперсии, тогда

$$\text{FFT}[S(\lambda, y)] = \text{FFT}[S_0(\lambda)] \text{FFT}[\mathcal{L}(\lambda, y)]. \quad (2)$$

Как показал анализ спектров рассветного/сумеречного неба, форма инструментального профиля

спектрографов SCORPIO/SCORPIO-2 меняется достаточно монотонно вдоль щели, поэтому его фурье-образ  $\text{FFT}[\mathcal{L}(\lambda, y)]$  меняется вдоль щели так же монотонно. Первый множитель в фурье-образе спектра ночного неба является постоянной функцией, поэтому в целом фурье-образ ночного неба вдоль щели меняется монотонно. Пользуясь этим фактом и применяя стандартную методику экстраполяции полиномами к спектру ночного неба в частотном домене, то есть к его фурье-образу, и выполняя последующее обратное преобразование Фурье, можно построить модель спектра ночного неба. Фурье-образ изображения спектра является комплексной величиной, поэтому экстраполяцию нужно проводить отдельно для действительной и мнимой части фурье-образа. В таком варианте построения модели ночного неба не требуется опорный спектр рассветного/сумеречного неба, в то же время качество модели сопоставимо с методикой на основе процедуры деконволюции [29].

### 3.4. Анализ данных

Перед проведением анализа спектров галактик мы анализировали спектр рассветного неба для того, чтобы определить вариации параметров инструментального профиля спектрографа (LSF — Line Spread Function) вдоль и поперек направления дисперсии, что требуется для корректного определения внутренней кинематики звезд и газа в галактиках. Для этого мы разбили изображение спектра рассветного неба на много участков: 32 интервала вдоль щели и 7 отрезков вдоль дисперсии; в каждом участке спектр рассветного неба суммировался для достижения типичного отношения «сигнал/шум»  $S/N = 100$  на пиксел. Далее мы аппроксимировали спектры от каждого участка солнечным спектром высокого разрешения, взятым из библиотеки звездных спектров ELODIE 3.1 [30], используя методику попиксельной аппроксимации спектров `prxf` [31]. В ходе аппроксимации спектра рассветного неба инструментальный профиль был параметризован функцией Гаусса-Эрмита [32]. В результате аппроксимации мы получили параметры инструментального профиля для разных участков спектра. Среднее характерное значение ширины инструментального профиля (в терминах дисперсии скоростей) для режима наблюдений с решеткой VPHG 2300G  $\sigma_{\text{instr}} = 65 \text{ км с}^{-1}$ , а для решетки VPHG 1200@540  $\sigma_{\text{instr}} = 90 \text{ км с}^{-1}$ .

Дальнейший анализ заключался в аппроксимации наблюдаемых абсорбционных спектров галактик моделями звездного населения высокого разрешения. Для этого мы использовали программный пакет `NBursts` [33, 34], который является расширением методики попиксельной аппроксимации

спектров `ppxf` [31]. Используемый подход позволяет извлекать информацию о звездном компоненте одновременно из всех доступных участков спектра, в отличие от анализа Ликских индексов отдельных линий — индикаторов свойств звездных населений. Подход попиксельной аппроксимации спектров галактик позволяет легко исключать из анализа области вокруг сильных эмиссионных линий ионизованного газа, это позволяет избежать их систематического влияния на оценки параметров звездных населения, что невозможно при анализе Ликских индексов. В работах [33, 34] показано, что метод попиксельной аппроксимации спектров дает в 1.5–2 раза более высокую точность определения параметров звездных населений по сравнению с подходом Ликских индексов.

Процедура определения параметров звездного населения заключается в нелинейной минимизации квадратичной разницы ( $\chi^2$ ) между наблюдаемым спектром и модельным. В качестве модельных спектров мы использовали синтетические спектры звездного населения, посчитанные эволюционным кодом `Pegase.HR` [35] на основе звездной библиотеки высокого разрешения `ELODIE 3.1` [30] для простой истории звездообразования в виде одной короткой вспышки (*SSP* — Simple Stellar Population). *SSP*-модель звездного населения задается возрастом вспышки звездообразования  $T$  (Гуг) и металличностью  $[Z/H]$  (dex), при этом начальная функция масс Солпитера [36] считается в модели фиксированной. Для определения звездной кинематики галактики в модельный спектр закладывается распределение скоростей звезд по скоростям вдоль луча зрения (*LOSVD*), которое задается в виде Гаусс-Эрмитовой функции [32]. Кроме того, в модель входит мультипликативный континуум, который позволяет учесть влияние межзвездного поглощения на форму спектра галактики, а также ошибки абсолютной калибровки потоков как в наблюдательных данных, так и в звездной библиотеке, на основе которой считались модели звездных населений. Для учета влияния спектрографа на спектр галактики мы сворачивали сетку моделей звездных населений с определенным ранее инструментальным профилем перед аппроксимацией наблюдаемых спектров. Наличие даже слабых эмиссионных линий и/или остатки от вычитания наиболее сильных линий ночного неба может смещать оценки параметров звездного населения, поэтому чтобы исключить этот эффект, мы маскировали области размером 10–15 Å вокруг них. В результате  $\chi^2$ -минимизации определяются следующие параметры: лучевая скорость  $v$  (км с<sup>-1</sup>), дисперсия скоростей звезд на луче зрения  $\sigma$  (км с<sup>-1</sup>), оценки возраста  $T$  (млрд лет) и металличности  $[Z/H]$  (dex) звездного населения.

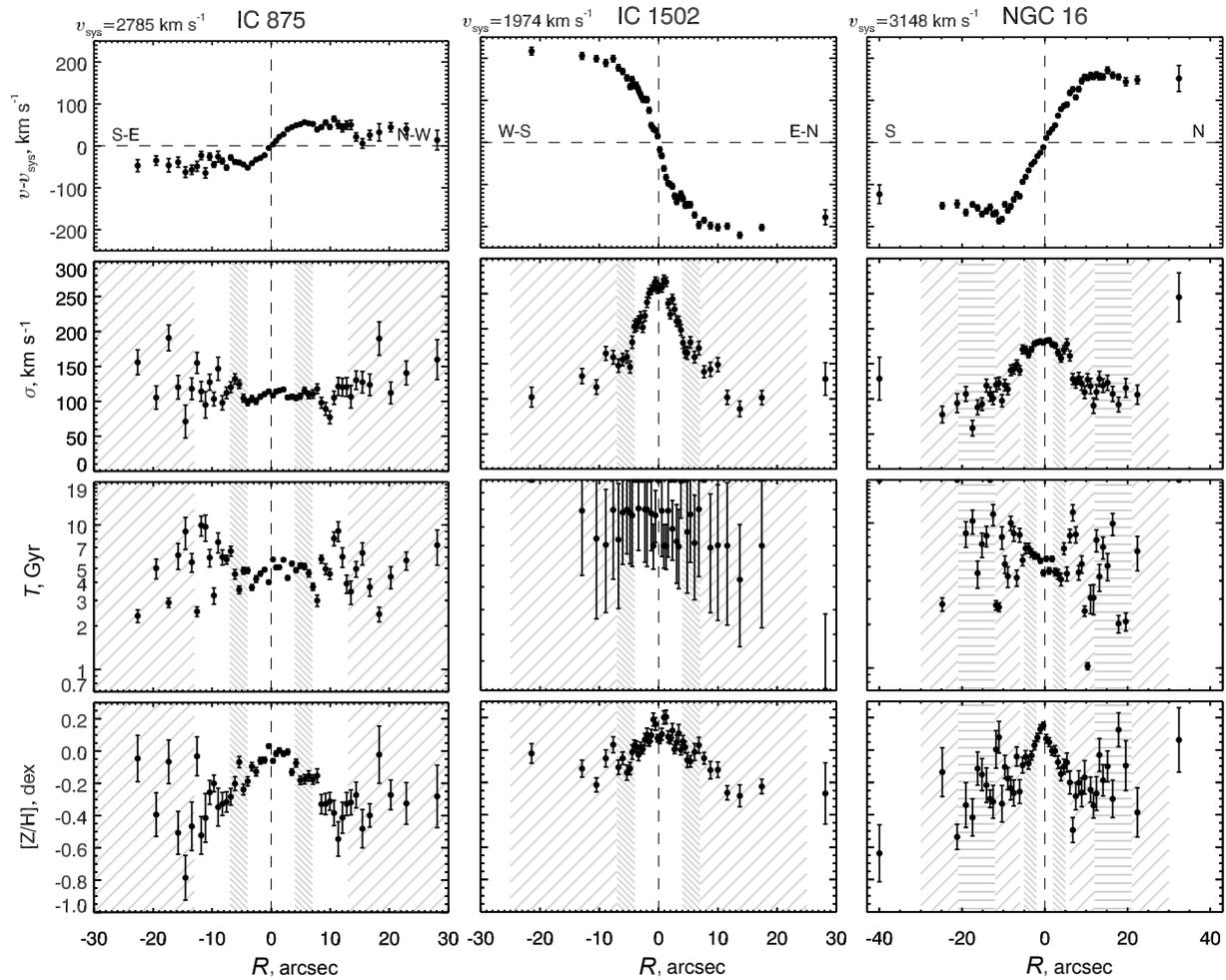
Спектральные наблюдения проводились с длинной щелью, которая была ориентирована вдоль большой оси исследуемых галактик. Поскольку поверхностная яркость галактик очень сильно падает с расстоянием от центра, то спектры внешних областей галактики имеют низкое отношение  $S/N$ . Для его увеличения мы использовали процедуру адаптивного биннинга, которая заключается в суммировании спектра в интервалах вдоль щели переменного размера, который задается таким образом, чтобы отношение  $S/N$  было не менее наперед заданного значения (обычно около 20–30) в каждом интервале.

После вычитания модели звездного компонента из наблюдаемого спектра галактики мы получили чисто эмиссионный спектр галактики. Отдельные линии аппроксимировались гауссианами для получения потоков в линиях, скоростей и дисперсии скоростей ионизованного газа. В данной работе мы рассматриваем свойства только звездных населений, исследованию свойств ионизованного газа в галактиках выборка посвящена работа [21].

Используемые нами модели звездного населения `Pegase.HR` рассчитаны на основе библиотеки звезд солнечной окрестности, обладающих солнечным обилием  $\alpha$ -элементов, поэтому результирующие модели рассчитаны только для солнечного обилия. В настоящее время развиваются методы для построения моделей звездного населения с учетом несолнечного содержания  $\alpha$ -элементов (см., например, работы [37] и [38]), однако получаемые модели рассчитываются на достаточно редкую и ограниченную сетку параметров и поэтому пока уступают по качеству моделям с солнечным обилием  $\alpha$ -элементов. Обилие  $\alpha$ -элементов несет в себе информацию о длительности вспышки звездообразования, которая породила основную массу звезд. Если вспышка была очень короткой, короче 1 млрд лет, тогда в звездном населении будет наблюдаться избыток  $\alpha$ -элементов по отношению к железу в сравнении с солнечным химическим составом. При длительной истории звездообразования отношение обилий железа и  $\alpha$ -элементов, в частности магния, становится солнечным [39, 40]. Чтобы оценить обилие  $\alpha$ -элементов в звездном населении исследуемых галактик, мы применили к спектрам, помимо метода попиксельной аппроксимации, более классический подход Ликских индексов, который позволяет оценить величину обилия магния (элемента  $\alpha$ -процесса). Для спектров галактик мы получали Ликские индексы  $H\beta$ ,  $Mgb$ ,  $Fe\ 5270$ ,  $Fe\ 5335$ , определения которых брались из работ [41, 42]. Сравнение полученных индексов с модельными значениями, рассчитанными в рамках моделей синтеза звездных населений [43], позволило оценить отношение  $Mg/Fe$ .

Таблица 3. Таблица усредненных параметров балджей, дисков, линз/колец

Галактика	Радиус усреднения, arcsec	Число измерений	T, Гуг	[Z/H], dex	[Mg/Fe], dex	$\sigma$ , км с <sup>-1</sup>
Балдж						
IC 875	4–7	10	4.3 $\pm$ 0.7	-0.16 $\pm$ 0.05	0.20 $\pm$ 0.04	110 $\pm$ 9
IC 1502	4–7	11	17.6 $\pm$ 0.9	-0.04 $\pm$ 0.06	0.3 $\pm$ 0.1	168 $\pm$ 16
NGC 16	2–5	10	5.4 $\pm$ 0.8	-0.04 $\pm$ 0.05	0.19 $\pm$ 0.04	172 $\pm$ 6
NGC 2350	4–7	8	1.6 $\pm$ 0.3	-0.13 $\pm$ 0.08	–	103 $\pm$ 15
NGC 3098	4–7	8	5.4 $\pm$ 0.4	-0.10 $\pm$ 0.02	0.00 $\pm$ 0.02	73 $\pm$ 6
NGC 3248	4–7	10	4.8 $\pm$ 0.6	-0.11 $\pm$ 0.05	0.00 $\pm$ 0.05	77 $\pm$ 5
NGC 6615	4–7	8	10.8 $\pm$ 1.5	-0.26 $\pm$ 0.05	0.24 $\pm$ 0.03	129 $\pm$ 5
NGC 6654	2–5	9	12.2 $\pm$ 1.4	-0.19 $\pm$ 0.07	0.23 $\pm$ 0.04	158 $\pm$ 5
NGC 6798	4–7	6	8.0 $\pm$ 1.9	-0.20 $\pm$ 0.05	0.13 $\pm$ 0.04	115 $\pm$ 7
NGC 7351	4–7	10	2.2 $\pm$ 0.5	-0.37 $\pm$ 0.08	-0.03 $\pm$ 0.06	29 $\pm$ 11
UGC 4551	4–7	8	10.0 $\pm$ 1.9	-0.28 $\pm$ 0.08	0.15 $\pm$ 0.03	158 $\pm$ 11
UGC 9519	4–7	9	2.5 $\pm$ 0.1	-0.12 $\pm$ 0.06	0.04 $\pm$ 0.03	76 $\pm$ 3
Диск						
IC 875	13–45	16	2.9 $\pm$ 0.9	-0.32 $\pm$ 0.18	0.26 $\pm$ 0.07	134 $\pm$ 27
IC 1502	7–25	11	16.7 $\pm$ 1.6	-0.13 $\pm$ 0.10	0.42 $\pm$ 0.01	130 $\pm$ 25
NGC 16	6–30	18	1.6 $\pm$ 1.2	-0.19 $\pm$ 0.15	0.16 $\pm$ 0.02	127 $\pm$ 18
NGC 2350	10–40	15	1.3 $\pm$ 0.2	-0.00 $\pm$ 0.07	0.06 $\pm$ 0.07	86 $\pm$ 14
NGC 3098	25–60	18	5.1 $\pm$ 1.5	-0.22 $\pm$ 0.06	0.08 $\pm$ 0.02	57 $\pm$ 26
NGC 3248	10–39	31	3.9 $\pm$ 1.4	-0.21 $\pm$ 0.09	-0.04 $\pm$ 0.03	65 $\pm$ 17
NGC 6615	40–60	0	–	–	–	–
NGC 6654	35–60	3	5.8 $\pm$ 0.6	-0.06 $\pm$ 0.14	0.40 $\pm$ 0.20	44 $\pm$ 5
NGC 6798	8–55	18	7.3 $\pm$ 4.3	-0.27 $\pm$ 0.15	0.11 $\pm$ 0.12	119 $\pm$ 17
NGC 7351	17–45	7	4.4 $\pm$ 2.3	-0.57 $\pm$ 0.19	-0.02 $\pm$ 0.15	72 $\pm$ 40
UGC 4551	38–80	3	10.9 $\pm$ 4.3	-0.74 $\pm$ 0.39	0.25 $\pm$ 0.25	107 $\pm$ 20
UGC 9519	16–30	4	2.9 $\pm$ 0.9	-0.32 $\pm$ 0.17	0.15 $\pm$ 0.20	98 $\pm$ 15
Линза/Кольцо						
IC 875	–	0	–	–	–	–
IC 1502	–	0	–	–	–	–
NGC 16	12–21	16	3.3 $\pm$ 2.9	-0.25 $\pm$ 0.16	–	104 $\pm$ 16
NGC 2350	20–26	1	4.9 $\pm$ 0.0	-0.33 $\pm$ 0.00	–	97 $\pm$ 0
NGC 3098	15–20	14	4.8 $\pm$ 1.3	-0.13 $\pm$ 0.05	0.05 $\pm$ 0.01	57 $\pm$ 12
NGC 3248	–	0	–	–	–	–
NGC 6615	20–40	3	12.8 $\pm$ 2.4	-0.52 $\pm$ 0.16	0.21 $\pm$ 0.06	56 $\pm$ 5
NGC 6654	–	0	–	–	–	–
NGC 6798	14–22	10	5.2 $\pm$ 2.1	-0.30 $\pm$ 0.14	0.13 $\pm$ 0.04	97 $\pm$ 15
NGC 7351	–	0	–	–	–	–
UGC 4551	17–35	12	3.3 $\pm$ 2.2	-0.47 $\pm$ 0.23	0.23 $\pm$ 0.03	117 $\pm$ 25
UGC 9519	7–15	22	2.7 $\pm$ 0.5	-0.22 $\pm$ 0.07	0.05 $\pm$ 0.02	77 $\pm$ 9



**Рис. 1.** Результаты анализа длиннощелевых спектров исследуемых галактик. Каждая колонка соответствует одной галактике. Сверху вниз расположены панели с радиальными профилями лучевой скорости звезд за вычетом систематической скорости, дисперсии скоростей звезд, возраста и металличности. По оси абсцисс отложено расстояние от центра галактики в угловых секундах. Серыми наклонными чертами обозначены области усреднения параметров балджа (\) и экспоненциального диска (/), горизонтальными линиями (—) — области линзы или кольца, в случае их присутствия. Систематическая скорость соответствует измеренной нами лучевой скорости центра галактики, т.е. наиболее яркой части, за исключением IC 875, где это центр симметрии центральной части профиля скорости.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате анализа спектров мы получили для каждой изучаемой галактики профиль лучевой скорости звезд  $v$ , дисперсию скоростей звезд  $\sigma$  и свойства звездных населений: возраста  $T$  и металличности  $[Z/H]$  (рис. 1). Кроме того, мы провели анализ доступных фотометрических данных для рассматриваемых галактик и определили области, где начинает доминировать диск, где присутствуют более сложные морфологические структуры, такие как кольца и линзы, и где в центре галактики находится область доминирования балджа (с исключенной областью ядра). Для этого мы использовали данные из публичного архива обзора SDSS, DR9, фильтр  $r$  (для большинства галактик), или же,

если галактики не наблюдались в обзоре SDSS, использовались данные обзора 2MASS, фильтры  $J, H, K$  (для NGC 2350, NGC 6798, IC 1502) и снимки в белом свете, полученные на SCORPIO-2 в режиме картирования перед началом спектральных наблюдений (NGC 6798, IC 1502). Для галактик NGC 6798 и IC 1502 результаты анализа изображений в ближнем инфракрасном диапазоне и в белом свете совпали. Для каждой галактики мы проводили изофотный анализ и далее рассматривали профили азимутально осредненной яркости. Внешние области, хорошо описываемые экспоненциальным законом спадающей поверхностной яркости, где заметна постоянная эллиптичность изофот, считались областями доминирования диска. В них

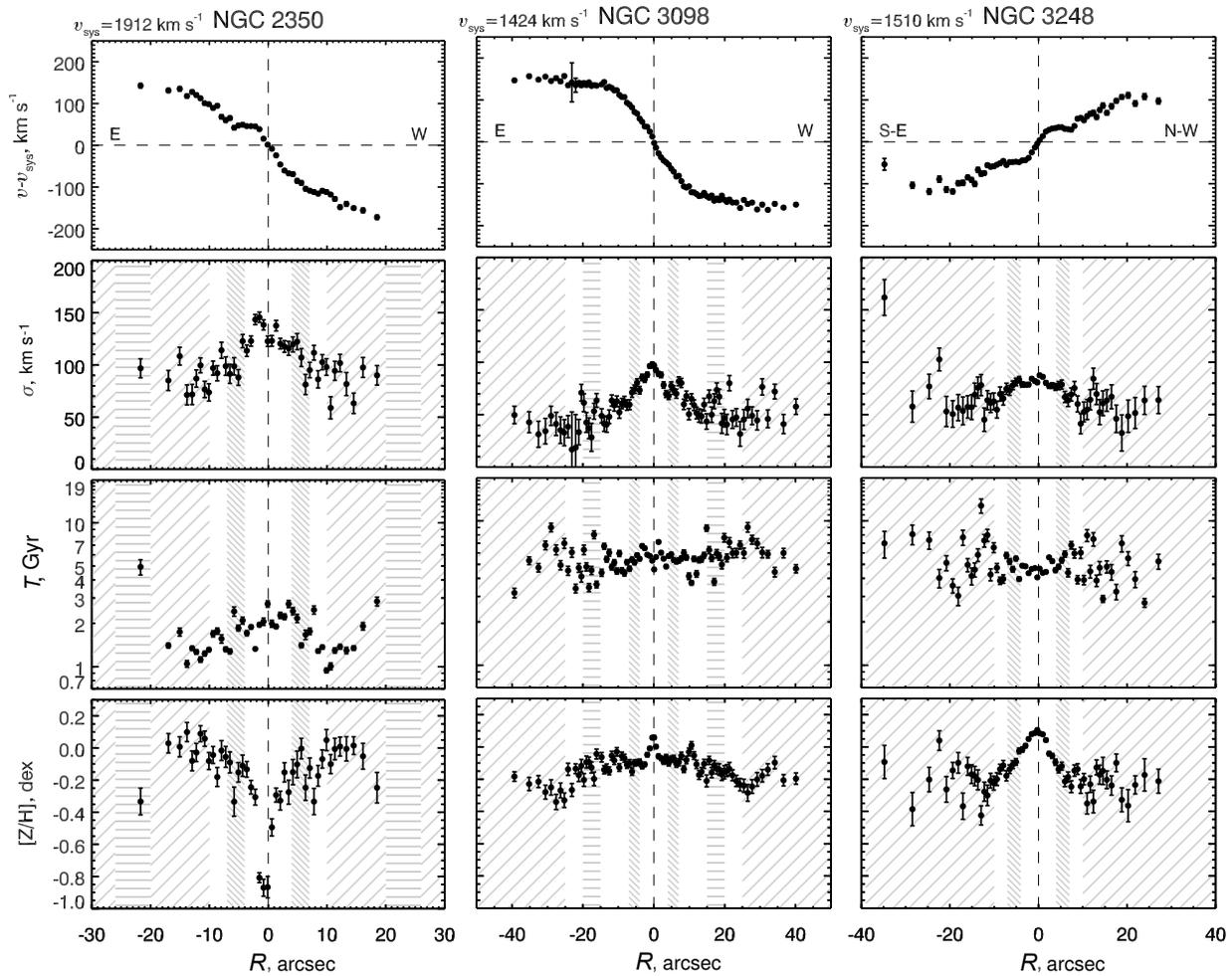


Рис. 1. (Продолжение)

иногда были заметны локальные избытки яркости, которые мы считаем кольцами или линзами. Для оценки параметров балджей использовался фиксированный диапазон радиусов,  $4''$ – $7''$ . По выделенным таким образом областям мы провели усреднение параметров звездного населения с весами, обратно пропорциональными квадратам ошибок индивидуальных оценок,  $w_i = 1/\delta p_i^2$ . Усредненные значения параметров для балджей, дисков и колец или линз приведены в таблице 3. Графическое сопоставление полученных параметров показано на рис. 2, 3 и 4.

#### 4.1. IC 875

Эта галактика в базах данных HyperLeda и NED классифицируется как линзовидная S0, поэтому она попала в нашу выборку. Однако, как оказалось, она обладает достаточно низкой скоростью вращения. Если принять наклонение  $i = 50^\circ$  по NED, тогда  $V_{\text{rot}} = \Delta V_{\text{LOS}}/\sin i \approx 65$  км с<sup>-1</sup> при

дисперсии скоростей  $\sigma \approx 110$  км с<sup>-1</sup>, это дает отношение скорости вращения к дисперсии скоростей  $V_{\text{max}}/\sigma \approx 0.6$ . Отношение большой и малой осей, взятое из NED, дает оценку эллиптичности  $\epsilon = 0.25$ . Эти значения попадают на диаграмме Корменди ( $V_{\text{max}}/\sigma - \epsilon$ ) на линию изотропных сфероидов, поддерживаемых вращением, на которую также ложатся эллиптические галактики малой светимости [44]. Вероятно, IC 875 является эллиптической галактикой, поэтому мы исключили ее из рассмотрения, и в построении диаграмм и распределений по параметрам для изолированных S0-галактик она не вошла.

#### 4.2. IC 1502

По NED эта галактика классифицируется как S0<sup>+</sup>. Она имеет достаточно большое наклонение —  $i = 64^\circ$  согласно HyperLeda. Кривая лучевых скоростей свидетельствует о регулярном вращении. Основной особенностью этой галактики является

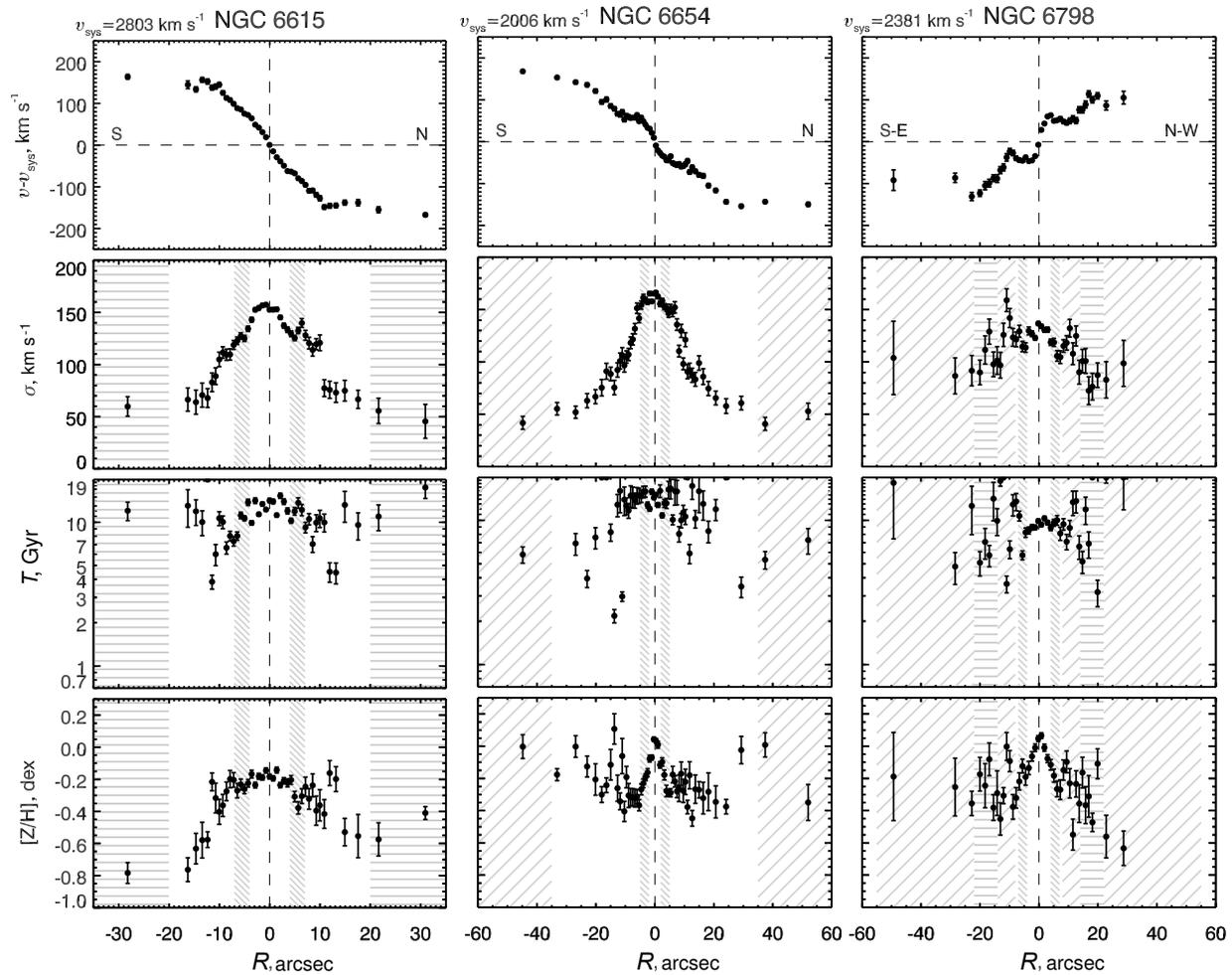


Рис. 1. (Продолжение)

то, что при солнечной металличности звезд средний возраст звезд составляет около 15–17 млрд лет на всем измеренном протяжении галактики. То, что этот возраст больше космологического возраста Вселенной, не должно смущать. Основные составляющие моделей — это изохроны звезд, которые являются результатом теории звездной эволюции, и эмпирическая библиотека спектров звезд. Надо иметь в виду, что используемые модели звездных населений не содержат в себе информации о космологии Вселенной и дают совершенно независимый канал информации о возрасте доминирующего звездного населения в галактиках. На радиальных профилях параметров видна центральная кинематически обособленная область, которая проявляется как слабое увеличение градиента скорости и небольшое понижение дисперсии скорости звезд. На профиле металличности заметен небольшой провал. Вероятно, это свидетельства эволюционной обособленности ядерного звездного скопления,

хотя по возрасту звездного населения оно не выделяется в пределах ошибок измерений.

#### 4.3. NGC 16

У этой галактики имеется небольшой бар, ориентированный перпендикулярно большой оси галактики, и слабый,  $\Delta m_B = 4^m$ , позднего типа компаньон [45] в 500 кпк от нее. Индекс изолированности между ним и галактикой  $II = 1.9$ , но поскольку разница в массе около двух порядков, мы рассматриваем NGC 16 как изолированную от внешних приливных влияний. У галактики наблюдается очень примечательный твердотельный рост кривой вращения вплоть до  $10''$  от центра, где скорость вращения выходит на плато, и достаточно горячий динамический диск,  $\sigma > 100 \text{ km s}^{-1}$ . Звездный компонент обладает промежуточным возрастом, при этом балдж и диск в среднем не сильно отличаются друг от друга, хотя индивидуальные оценки возраста в бинах имеют достаточно большой разброс.

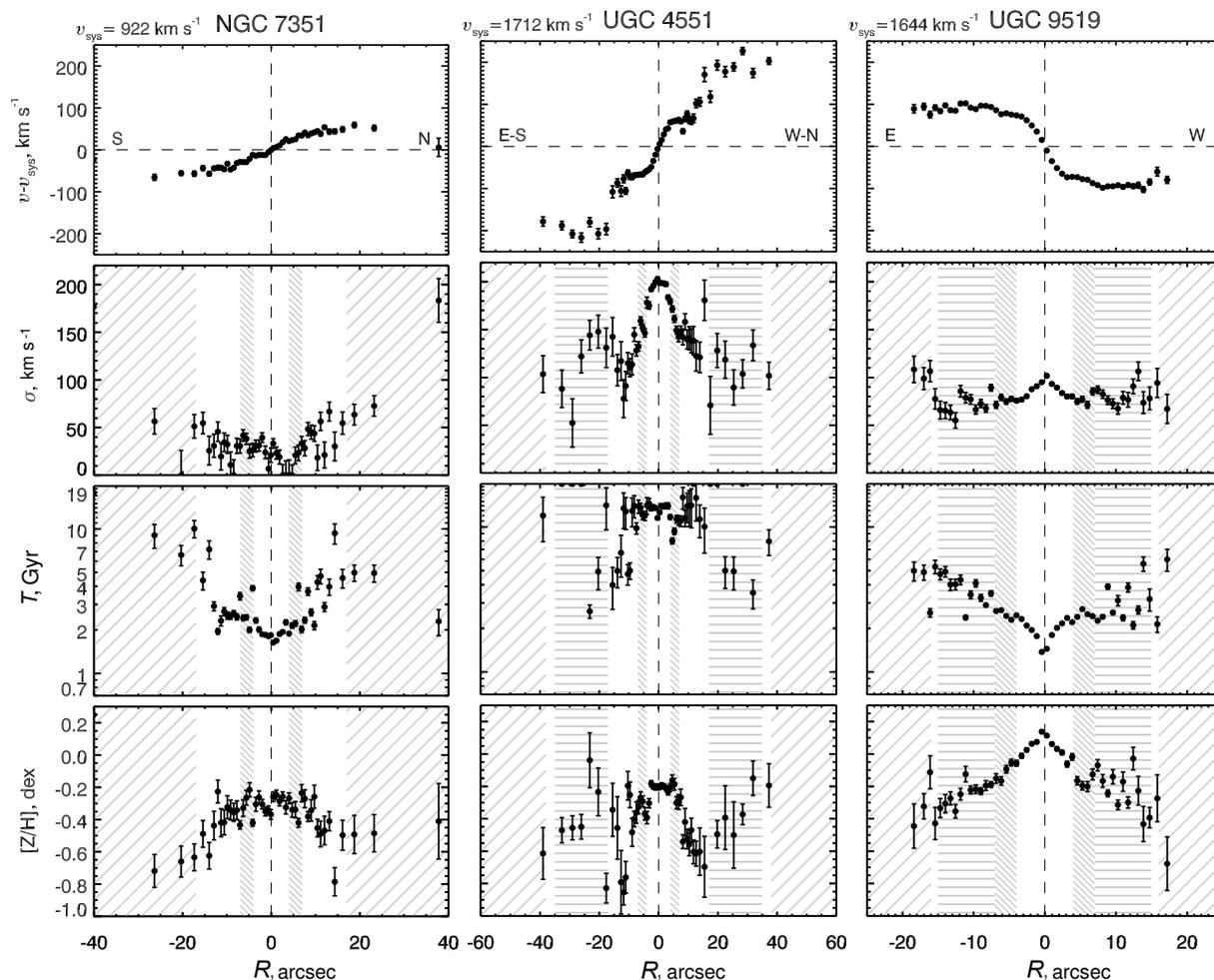


Рис. 1. (Продолжение)

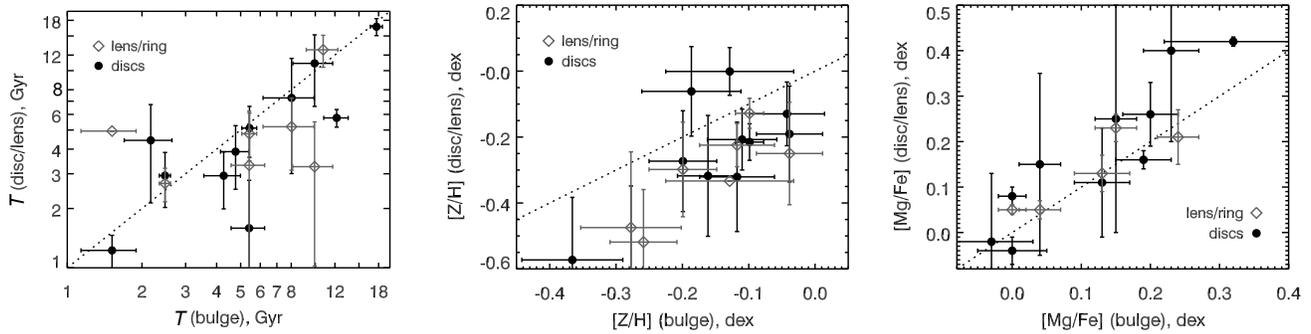
#### 4.4. NGC 2350

Это очень мало изученная галактика, не попавшая, к сожалению, в поле обзора SDSS. Согласно HyperLeda и NED, классифицируется как S0/a. На прямом изображении, полученном на SCORPIO-2, видно сложное распределение звездной яркости в виде ярких пятен на краях бара, так называемое явление «ansae». Кроме того, как мы выяснили, анализируя эмиссионный компонент спектра, эта галактика обладает протяженным диском ионизованного газа, который, согласно расположению отношений эмиссионных линий на диагностических диаграммах, возбужден в основном излучением молодых звезд [21], то есть в этой линзовидной галактике в настоящее время идет звездообразование по всему диску. Соответственно, средний возраст звезд в пределах области, ограниченной «ansae», довольно молодой: индивидуальные оценки в бинах колеблются между 1 и 2 млрд лет. В центральной части

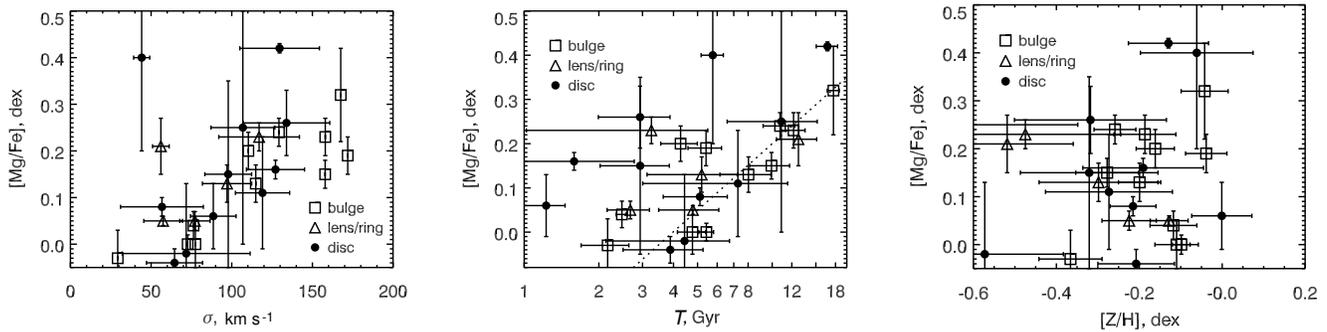
галактики очень низкая металличность звезд. Возможно, это связано с прошлым падением на галактику низкометаллического спутника. К тому же эта область немного выделяется на кривой вращения и распределении дисперсии скоростей, но, к нашему удивлению, не выделяется на профиле возраста. По нашим оценкам, металличность газа слабо субсолнечная, даже в области очень низкой звездной металличности. Поэтому газ в этой галактике своим происхождением вероятнее всего не связан с потенциально возможным мерджингом, следы которого запечатлены в ядерном звездном компоненте.

#### 4.5. NGC 3098

Весьма известная изолированная линзовидная галактика, ориентированная ребром диска к наблюдателю. Ее фотометрическая структура исследовалась в [46]. Было отмечено, что балдж в галактике небольшой и компактный, а между балджем



**Рис. 2.** Сравнение параметров звездного населения в балджах со свойствами в дисках и дисковых компонентах — линзах/кольцах. Пунктирной линией обозначена линия равных значений.



**Рис. 3.** Сопоставление дисперсии скоростей, возраста и металличности с обогащением  $\alpha$ -элементами ( $[Mg/Fe]$ ) для разных структурных компонентов галактики.

и диском, примерно на радиусе  $15''$ , наблюдается кольцо повышенной звездной яркости. Наши результаты (рис. 1) подтверждают небольшую массу балджа — скорость вращения растет в центре галактики весьма полого — и демонстрируют однородный возраст звездного населения 5–8 млрд лет по всей галактике, а также резкое падение металличности звезд при переходе от центральной части галактики в область доминирования крупномасштабного звездного диска. Диск при этом выглядит динамически холодным,  $\sigma < 60 \text{ km s}^{-1}$ .

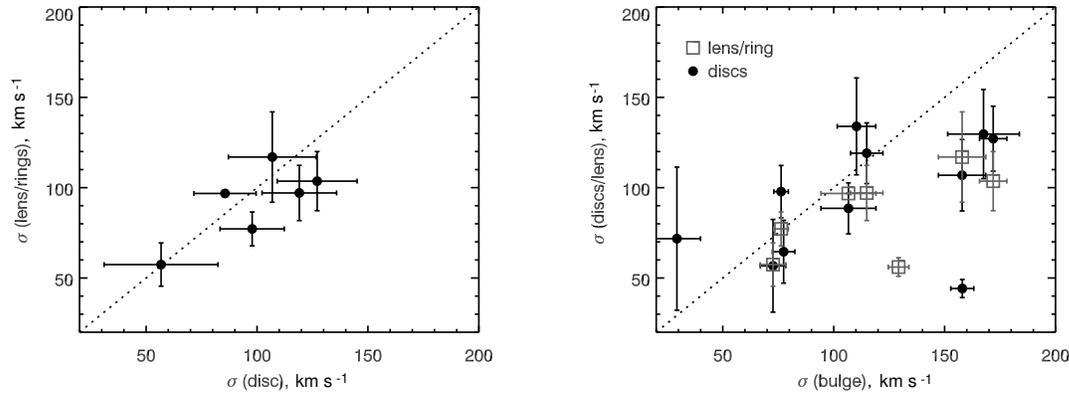
#### 4.6. NGC 3248

Начиная с расстояния от нее 100 кпк, галактика окружена десятком слабых спутников, самый яркий из которых всего на  $3^m$  слабее хозяйской галактики. Центральная область галактики,  $R < 15''$ , подробно исследована методом панорамной спектроскопии на спектрографе SAURON в рамках обзора ATLAS-3D [5, 18]. В галактике оказалось много газа, как ионизованного, так и молекулярного, и этот газ противовращается по отношению к звездному компоненту. Мы протянули

кинематические профили до расстояния от центра  $30''$  и подтвердили противовращение газа, сосредоточенного в центральной области галактики. Возбуждение газа — ударное, не видно никаких признаков текущего звездообразования. Возраст звездного населения как в центре, так и в диске галактики — средний, но зато центральные области заметно богаче металлами, чем диск.

#### 4.7. NGC 6615

В базах данных галактика классифицируется как имеющая бар. Визуальный анализ картинки из SDSS подтверждает, что компактный бар присутствует и ориентирован почти перпендикулярно большой оси галактики. На профиле поверхностной яркости заметна весьма протяженная линза с плоским распределением яркости, собственно экспоненциальный диск начинается на радиусах больше  $40''$ . Чувствительности нашей спектроскопии с гризмой высокого разрешения VPHG2300 не хватило, чтобы дотянуться до диска, мы определили характеристики звездного населения только в балдже и в линзе. Возраст звездного населения — однородно старый на всем протяжении измеренной части галактики. Возможно, между балджем/баром и линзой присутствует относительно



**Рис. 4.** Слева: сравнение дисперсии скоростей звезд в диске и обособленных структурах — кольцах/линзах. Справа: сравнение дисперсии скоростей звезд в балдже и в дисковых структурах.

более молодое узкое кольцо. Металличность везде ниже солнечной, а в линзе — значительно ниже солнечной, по крайней мере в 3–4 раза. Газа в галактике не обнаружено, но линза относительно холодна динамически.

#### 4.8. NGC 6654

Довольно большая галактика с крупномасштабным баром и диском невысокой поверхностной яркости. База данных NED классифицирует ее как (R')SB(s)0/a. Анализ фотометрической структуры галактики мы позаимствовали из [2]. На внешнем краю диска наблюдается эмиссионное газовое кольцо звездообразования. Кроме этого внешнего кольца, газ есть еще только в центральной области галактики, где он демонстрирует ударное возбуждение и вращается слишком быстро для плоскости симметрии галактики, наклоненной под углом  $45^\circ$  к лучу зрения (база HyperLeda). В нашей работе [21] мы предположили, что центральный газ вращается в плоскости, наклоненной к основной плоскости симметрии галактики. Характеристики звездного населения (рис. 1) указывают, что диск моложе и богаче металлами, чем балдж. Имея в виду остаточное звездообразование на периферии диска, мы можем констатировать, что NGC 6654 представляет редкий тип линзовидных галактик, у которых омоложение (вторичное звездообразование) прошло в диске, а не в центральной области. Причем учитывая заметное переобогащение магнием по отношению к железу именно в диске (таблица 3), это омоложение носило характер очень краткой вспышки в проходящей волне звездообразования.

#### 4.9. NGC 6798

Еще одна галактика, вслед за NGC 3248, которая была исследована в рамках обзора

ATLAS-3D [5, 18] и у которой обнаружен крупномасштабный противовращающийся газовый диск, причем нейтральный водород в этой галактике продолжает противовращаться далеко за пределами звездного диска. Анализируя фотометрическую структуру галактики по изображению в белом свете, полученном на SCORPIO-2, мы отмечаем присутствие кольца на радиусе  $15''$ – $20''$ . Это кольцо имеет возраст  $5 \pm 2$  млрд лет, что при учете бара ошибок практически совпадает с возрастом диска  $7 \pm 4$  млрд лет. Также оно является слегка более холодным динамически, что согласуется с его возможно более молодым возрастом. При этом металличность звезд на всем протяжении галактики однородна и составляет половину солнечной.

#### 4.10. NGC 7351

Карликовая линзовидная галактика с низкой дисперсией скоростей звезд как в центре, так и в диске и с низкой скоростью вращения. Ее кинематика ранее исследовалась в [47]. В соответствии с низкой светимостью галактики, металличность ее звезд ниже солнечной, но если в центре она ниже солнечной в 2.5 раза, то в диске — в 4 раза. Возраст звездного населения монотонно растет от центра к краю галактики, от 1.5 млрд лет в ядре до 5–8 млрд лет в диске. Сопоставление с особенностями газовой компоненты галактики, исследованной нами в [21], показало что в центре газ вращается вместе со звездами и возбуждается текущим звездообразованием, а за пределами центральной области газ выходит из плоскости диска галактики, и его кинематика резко рассогласуется со звездной кинематикой. Очевидно в данном случае аккреция внешнего газа происходила с сильно наклоненной орбиты, и стационарные условия для звездообразования (омоложения) возникли только в центре галактики, где газ скопился и уплотнился.

## 4.11. UGC 4551

Еще одна галактика с противовращающимся газовым компонентом, который возможно вращается навстречу звездам прямо в плоскости диска галактики [21]. Тем не менее, и центр галактики, и ее внешний диск содержат однородно старое,  $T > 10$  млрд лет, звездное население (рис. 1). Между балджем и диском наблюдается линза с плоским профилем яркости. Здесь, в линзе, звездное население значимо моложе, чем в диске и балдже. С динамической точки зрения и линза, и диск выглядят достаточно «горячими»,  $\sigma > 100 \text{ км с}^{-1}$ .

## 4.12. UGC 9519

Галактика, хотя и ориентирована к лучу зрения почти плашмя ( $i = 23^\circ$ , HyperLeda), очень быстро вращается (рис. 1). Мы [21] отметили видимое рассогласование кинематики газа и звезд при наблюдениях с длинной щелью. Данные панорамной спектроскопии обзора ATLAS-3D [5, 18] свидетельствуют скорее в пользу внутреннего полярного газового диска в этой галактике. Как и в NGC 7351, средний возраст звезд монотонно возрастает вдоль радиуса галактики, от 1.5 млрд лет в ядре до примерно 5 млрд лет в диске. Диск, будучи самым старым компонентом галактики, является также и наиболее динамически горячим,  $\sigma \approx 100 \text{ км с}^{-1}$ . Он же наиболее беден металлами — примерно в два раза беднее солнечного химического состава. В центре галактики на фоне недавнего дополнительного звездообразования наблюдается металличность слегка выше солнечной.

## 5. ДИСКУССИЯ

Далее необходимо сравнить параметры звездного населения различных компонент галактик — соотношение средних возрастов звездных населений поможет выстроить последовательность основных эволюционных этапов в жизни галактики, а отношение обилия магния к обилию железа позволит ограничить длительность основных событий звездообразования. Главная на сегодняшний день теоретическая парадигма —  $\Lambda$ CDM-модель эволюции Вселенной — предсказывает, что классические балджи дисковых галактик ранних типов должны формироваться первыми в событиях большого мерджинга, а уже потом вокруг них плавной аккрецией холодного газа должны собираться крупномасштабные диски. Однако есть наблюдательные факты, противоречащие этим предсказаниям: из обзора в обзор работы по поверхностной фотометрии галактик стабильно демонстрируют корреляцию между характерными масштабами балджей и дисков, причем наличие этой корреляции не зависит от того, классические или

псевдобалджи доминируют в конкретных выборках галактик [2, 48, 49]. Таким образом, формирование структуры балджей и дисков, похоже, синхронизовано в галактиках.

Именно это можно наблюдать на рис. 2. Сравнение средних возрастов звездных населений балджей и плоских компонент — дисков и линз — показывает, что наши объекты группируются к биссектрисе, то есть в среднем возраста звездного населения в балджах и дисках одинаковые. Однако есть два объекта, в которых возраст диска оказывается уверенно моложе возраста балджа. В этом существенное отличие свойств эволюции наших *изолированных* линзовидных галактик: на аналогичном графике для галактик из более плотного окружения, построенном в работе [50], объекты группируются в левом верхнем углу, над биссектрисой, то есть возраста дисков оказываются либо равными, либо более старыми по сравнению с возрастом балджей. Этого физического различия между галактиками в группах и изолированными галактиками вполне естественно было ожидать: все механизмы внешнего воздействия на галактику, связанные с плотным окружением, как гравитационные, так и газодинамические, приводят к «стеканию» газа в центр галактики и таким образом провоцируют вторичные вспышки звездообразования именно в центральных областях, в районе доминирования балджа [51, 52]. Интересно, что одинаковыми у балджей и дисков оказываются и отношения магния к железу: или звездообразование заканчивается быстро в обоих структурах, или уж продолжается в течение миллиардов лет и там, и там. Этот результат — равенство и средних возрастов, и отношения  $\text{Mg}/\text{Fe}$  — позволяет нам усилить тезис о синхронном формировании балджей и дисков: звездообразование и там, и там и начинается, и заканчивается квазисовременно. При этом средняя металличность звезд в дисках ниже, чем в балджах. Значит ли это, что аккреция низкометаллического газа происходит в основном в области диска, а «топливо» для звездообразования в балдже попадает туда уже после его обогащения тяжелыми элементами в диске?

На рис. 3 сопоставляется отношение  $\text{Mg}/\text{Fe}$ , характеризующее длительность последнего события звездообразования, с другими характеристиками звездного населения для всех трех типов структурных компонент. И снова мы видим впечатляющую синхронность эволюции балджей и дисков: на всех зависимостях точки для разных структурных компонент равномерно перемешаны на графиках. Корреляция отношения магния к железу с дисперсией скоростей звезд, характеризующей локальную плотность гравитирующей массы, давно известна для эллиптических галактик и балджей [53] и считается доказательством связи эффективности

звздообразования с глубиной потенциальной ямы, однако на левой панели рис. 3 мы впервые видим, что эта корреляция есть и для дисков изолированных галактик, и она чуть ли не лучше, чем для балджей. По аналогии, можно предположить, что темпы аккреции внешнего газа тем выше, чем глубже локальная потенциальная яма в плоскости галактики, а более высокий темп аккреции обеспечивает более эффективное звездообразование. На средней панели рис. 3 сопоставлены отношение  $Mg/Fe$  и возраст звездной системы. Мы видим линейную огибающую справа (пунктирная линия), куда концентрируется большинство наших галактик. Вероятно, это звездные системы, начавшие свое формирование одновременно в ранней Вселенной, на  $z = 2-3$ , и закончившие его по-разному: те, что закончили его быстро, имеют высокий средний возраст звездного населения и высокое отношение  $Mg/Fe$ , а те, где звездообразование продолжалось много миллиардов лет, проэволюционировали до солнечного отношения  $Mg/Fe$ . Однако в распределении на средней панели рис. 3 есть и широкий диффузный «хвост» налево от пунктирной линии основной последовательности, причем в этом «хвосте» присутствуют как диски, так и балджи. Это звездные системы, в которых последнее событие звездообразования состоялось *позже*, чем у основного населения галактик. Действительно, чтобы одновременно иметь и  $[Mg/Fe] = +0.2$ , и средний возраст звездного населения 1.5–3 млрд лет, нужно «пережить» свои 1.0–1.5 млрд лет активного звездообразования существенно позже красного смещения  $z = 0.5$ . Таким образом, получается, что события звездообразования в изолированных линзовидных галактиках могут случаться с ними в разное время и иметь разную длительность.

Ну, и, наконец, несколько слов о линзах в S0-галактиках, которые считаются генетически связанными с прошлыми кольцами звездообразования. До сих пор преобладало мнение, что звездное население в линзах старое, и динамически они горячи [54, 55]; впрочем, эта точка зрения основана на изучении единичных объектов. В нашей небольшой выборке мы смогли определить свойства звездного населения в семи линзах/кольцах. Мы можем уверенно констатировать, что исследованные нами линзы — это структуры диска. В среднем у них та же дисперсия скоростей, что и у дисков (левая панель рис. 4). При детальном рассмотрении профилей дисперсии скоростей можно найти локальные пики в областях доминирования линзы в фотометрическом профиле, например в NGC 3098, NGC 6798 и UGC 4551, однако при усреднении по всей области линзы пики не дают существенного вклада в результирующую усредненную дисперсию скоростей, а по величине пики не отличаются более чем на

20–30 км с<sup>-1</sup> от дисперсии скоростей в диске, что сопоставимо с характерной ошибкой измерения дисперсии скоростей. Характеристики звездного населения в линзах/кольцах как правило те же, что и в дисках — мы нашли только одну линзу, заметно более молодую, чем окружающий диск, в UGC 4551, в то время как линзы с промежуточным возрастом, 3–5 млрд лет, согласующиеся по параметрам звездного населения с дисками, найдены в пяти галактиках. Что касается динамического статуса балджей, то в нашей небольшой выборке изолированных линзовидных галактик оказалось практически поровну псевдобалджей с дисперсией скоростей звезд, как у дисков, и классических, динамически горячих балджей (правая панель рис. 4). Это лишний раз подтверждает, что балджи в линзовидных галактиках бывают очень разные — как по светимости и вкладу в общую массу галактики, так и по происхождению и эволюции. И этот тезис справедлив, даже если мы рассматриваем выборку *изолированных* линзовидных галактик, у которых влияние окружения на эволюцию вроде бы сведено к минимуму.

Представленные в данной статье результаты, полученные для звездных компонентов выборки изолированных линзовидных галактик, подтвердили наши давние подозрения относительно влияния плотности окружения на эволюцию галактик: для изолированных линзовидных галактик, в отличие от членов групп и скоплений, не существует выделенной эпохи формирования структурных компонент, они могут сформировать их на красном смещении  $z > 2$ , а могут — всего миллиард лет назад. Разброс средних возрастов звезд дисков S0-галактик действительно возрастает с убыванием плотности окружения галактик [50] и достигает максимума среди изолированных галактик.

От чего может зависеть морфологическая «судьба» дисковой галактики, пребывающей в разреженном окружении, почему она может оказаться в нашу эпоху линзовидной или спиральной? Все сходится на режиме аккреции внешнего холодного газа, которая обычно подпитывает звездообразование в дисках спиральных галактик на протяжении многих миллиардов лет, а режим этот, вполне вероятно, стохастичен. Недавняя работа по поиску слабых спутников у изолированных галактик [56] выявила любопытную статистическую черту: у изолированных линзовидных галактик спутники имеют с хозяйской галактикой систематически бóльшую разницу лучевых скоростей, чем у изолированных спиральных галактик, и у изолированных линзовидных галактик вообще нет спутников с разницей лучевых скоростей меньше 50 км с<sup>-1</sup>. Значит ли эта динамическая особенность, что спутники линзовидных галактик *не могут* упасть на своих хозяев в ближайшее время, тогда как динамического

трения для спутников спиральных галактик вполне достаточно, чтобы обеспечить своевременную их аккрецию? Перевернем тезис: возможно, орбитальный состав группировки слабых спутников стохастичен, и те дисковые галактики, у которых система спутников динамически холодна, смогут обеспечить себя топливом для звездообразования в диске и станут спиральными, а те, кому досталась динамически горячая система спутников (или они к настоящему моменту уже давно «уронили» на себя все спутники, какие было возможно уронить), останутся линзовидными. Аналогичный намек содержит в себе и исследование вращения газовых систем в дисковых галактиках. Практически во всех изолированных линзовидных галактиках, где содержится газ, его вращение расогласовано с вращением звезд [21], то есть этот газ был аккрецирован с орбит, наклоненных к плоскости основного звездного диска, тогда как в спиральных галактиках газ с «внешней» кинематикой куда более редок. Возможно это означает, что спокойный режим аккреции в плоскости диска обеспечивает стабильное накопление холодного газа с возможностью непрерывного звездообразования, тогда как при наклонном режиме падения газа могут возникать динамические эффекты, приводящие к его турбулизации и предотвращению звездообразования, например, генерация ударных волн при прохождении потенциальной ямы галактического диска [57] или при столкновении внешнего газа с уже имеющимся в диске первичным газом галактики. Этот эффект, связанный с геометрией аккреции внешнего газа, тоже может влиять на формирование морфологического типа галактики.

## 6. ВЫВОДЫ

В данной работе мы представили результаты спектральных наблюдений выборки изолированных линзовидных галактик: в результате наблюдений на спектрографах SCORPIO-2 и SCORPIO 6-метрового телескопа САО РАН в режиме длинной щели измерены радиальные профили скорости вращения, дисперсии скоростей, среднего возраста и средней металличности звезд в 12 объектах. Один из них, IC 875, оказался эллиптической галактикой невысокой светимости, по оставшимся 11 галактикам мы проанализировали статистику полученных характеристик звездного населения. Средние возраста звездного населения в нашей выборке изолированных линзовидных галактик заполняют полный диапазон значений от 1.5 до 15 млрд лет, и, в отличие от S0-галактик в более плотном окружении, изолированные галактики как правило имеют одинаковый возраст звезд в балджах и в дисках, то есть возможности отдельного омоложения балджа у них отсутствуют. Линзы и кольца повышенной

звездной яркости, обнаруженные в 7 из 11 галактик, имеют звездные населения и дисперсию скоростей звезд, как правило, неотличимые от звездных населения дисков. Сделан вывод, что, вероятно, оформление морфологического типа линзовидной галактики в полной изоляции критически зависит от возможных режимов аккреции внешнего холодного газа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Дмитрию Макарову за помощь в работе с базой данных галактик Местного Объема и построении выборки изолированных линзовидных галактик, а также Николаю Борисову за поддержку наблюдений со SCORPIO-2 на БТА. При анализе галактик выборки мы использовали Лион—Медонскую базу внегалактических данных (HyperLeda), поддерживаемую командой LEDA в Лионской обсерватории CRAL (Франция), и Базу внегалактических данных NASA/IPAC (NED), управляемую Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением авиации и космических исследований (NASA, США). В качестве источника фотометрических данных использовались публичные архивы проекта SDSS-III (<http://www.sdss3.org>), поддержанного Фондом Альфреда П. Слоана, институтами-участниками коллаборации SDSS, Национальным научным фондом (NSF) и Министерством энергетики США, а также данные Двухмикронного обзора неба (2MASS), который совместно осуществлялся Университетом Массачусетса и Центром анализа инфракрасных данных Калифорнийского технологического института при финансовой поддержке NASA и NSF. Наше изучение изолированных линзовидных галактик поддержано грантами РФФИ 13-02-00059а, РФФИ 12-02-00685а. И. Катков выражает благодарность некоммерческому фонду «Династия» за поддержку его исследований. Наблюдения на 6-метровом телескопе БТА проводятся при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 14.518.11.7070, 16.518.11.7073).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. P. Hubble, *Realm of the Nebulae* (1936).
2. E. Laurikainen, H. Salo, R. Buta, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **405**, 1089 (2010).
3. S. van den Bergh, *Astrophys. J.* **206**, 883 (1976).
4. J. Kormendy and R. Bender, *Astrophys. J. Suppl.* **198**, 2 (2012).

5. M. Cappellari, E. Emsellem, D. Krajnović, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **416**, 1680 (2011).
6. L. Spitzer Jr. and W. Baade, *Astrophys. J.* **113**, 413 (1951).
7. V. Icke, *Astronom. and Astrophys.* **144**, 115 (1985).
8. G. Byrd and M. Valtonen, *Astrophys. J.* **350**, 89 (1990).
9. B. Moore, N. Katz, G. Lake, et al., *Nature* **379**, 613 (1996).
10. J. E. Gunn and J. R. Gott III, *Astrophys. J.* **176**, 1 (1972).
11. V. Quilis, B. Moore, and R. Bower, *Science* **288**, 1617 (2000).
12. R. B. Larson, B. M. Tinsley, and C. N. Caldwell, *Astrophys. J.* **237**, 692 (1980).
13. A. Dressler, *Astrophys. J.* **236**, 351 (1980).
14. A. Naim, O. Lahav, R. J. Buta, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **274**, 1107 (1995).
15. J. W. Sulentic, L. Verdes-Montenegro, G. Bergond, et al., *Astronom. and Astrophys.* **449**, 937 (2006).
16. O. K. Sil'chenko, I. V. Chilingarian, N. Y. Sotnikova, and V. L. Afanasiev, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **414**, 3645 (2011).
17. A. V. Zasov, O. K. Sil'chenko, I. Y. Katkov, and S. N. Dodonov, *Astronomy Letters* **39**, 17 (2013).
18. T. A. Davis, K. Alatalo, M. Sarzi, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **417**, 882 (2011).
19. Y. Birnboim, A. Dekel, and E. Neistein, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **380**, 339 (2007).
20. R. Sancisi, F. Fraternali, T. Oosterloo, and T. van der Hulst, *Astronom. Astrophys. Rev.* **15**, 189 (2008).
21. I. Y. Katkov, O. K. Sil'chenko, and V. L. Afanasiev, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **438**, 2798 (2014).
22. I. D. Karachentsev and D. I. Makarov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 299 (2008).
23. D. I. Makarov and I. D. Karachentsev, *Astrophysical Bulletin* **64**, 24 (2009).
24. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **412**, 2498 (2011).
25. I. D. Karachentsev, D. I. Makarov, V. E. Karachentseva, and O. V. Melnyk, *Astrophysical Bulletin* **66**, 1 (2011).
26. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
27. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
28. P. G. van Dokkum, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **113**, 1420 (2001).
29. I. Y. Katkov and I. V. Chilingarian, *ASP Conf. Ser.*, No. 442, 143 (2011).
30. P. Prugniel, C. Soubiran, M. Koleva, and D. Le Borgne, arXiv:astro-ph/0703658 (2007).
31. M. Cappellari and E. Emsellem, *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **116**, 138 (2004).
32. R. P. van der Marel and M. Franx, *Astrophys. J.* **407**, 525 (1993).
33. I. Chilingarian, P. Prugniel, O. Sil'chenko, and M. Koleva, *IAU Symp.*, No. 241, 175 (2007).
34. I. V. Chilingarian, P. Prugniel, O. K. Sil'chenko, and V. L. Afanasiev, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **376**, 1033 (2007).
35. D. Le Borgne, B. Rocca-Volmerange, P. Prugniel, et al., *Astronom. and Astrophys.* **425**, 881 (2004).
36. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **121**, 161 (1955).
37. C. J. Walcher, P. Coelho, A. Gallazzi, and S. Charlot, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **398**, L44 (2009).
38. P. Prugniel and M. Koleva, *IAU Symp.*, No. 284, 16 (2012).
39. B. M. Tinsley, *Astrophys. J.* **229**, 1046 (1979).
40. F. Matteucci and L. Greggio, *Astronom. and Astrophys.* **154**, 279 (1986).
41. G. Worthey, S. M. Faber, J. J. Gonzalez, and D. Burstein, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 687 (1994).
42. L. A. Jones and G. Worthey, *Astrophys. J. Letters* **446**, L31 (1995).
43. D. Thomas, C. Maraston, and R. Bender, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **339**, 897 (2003).
44. R. L. Davies, G. Efstathiou, S. M. Fall, et al., *Astrophys. J.* **266**, 41 (1983).
45. S. Barway, Y. D. Mayya, A. K. Kembhavi, and S. K. Pandey, *Astronom. J.* **129**, 630 (2005).
46. W. Seifert and C. Scorza, *Astronom. and Astrophys.* **310**, 75 (1996).
47. F. Simien and P. Prugniel, *Astronom. and Astrophys.* **384**, 371 (2002).
48. L. A. MacArthur, S. Courteau, and J. A. Holtzman, *Astrophys. J.* **582**, 689 (2003).
49. J. Méndez-Abreu, J. A. L. Aguerri, E. M. Corsini, and E. Simonneau, *Astronom. and Astrophys.* **478**, 353 (2008).
50. O. K. Sil'chenko, I. S. Proshina, A. P. Shulga, and S. E. Kuposov, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **427**, 790 (2012).
51. K. Bekki and W. J. Couch, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **415**, 1783 (2011).
52. T. Kronberger, W. Kapferer, C. Ferrari, et al., *Astronom. and Astrophys.* **481**, 337 (2008).
53. S. C. Trager, S. M. Faber, G. Worthey, and J. J. González, *Astronom. J.* **120**, 165 (2000).
54. J. Kormendy, *Astrophys. J.* **286**, 116 (1984).
55. E. Laurikainen, H. Salo, E. Athanassoula, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **430**, 3489 (2013).
56. V. E. Karachentseva, I. D. Karachentsev, and O. V. Melnyk, *Astrophysical Bulletin* **66**, 389 (2011).
57. K.-I. Wakamatsu, *Astronom. J.* **105**, 1745 (1993).

## Properties of Stellar Populations in Isolated Lenticular Galaxies

I. Yu. Katkov, O. K. Sil'chenko, and V. L. Afanasiev

We present the results of observations of a sample of isolated lenticular galaxies, performed at the SCORPIO and SCORPIO-2 spectrographs of the 6-meter BTA telescope of the SAO RAS in the long-slit mode. By direct spectra approximation, using the evolutionary synthesis models, we have measured the radial profiles of the rotation velocity as well as the dispersions of velocities, average age, and average metallicity of stars in 12 objects. The resulting average ages of the stellar population in bulges and discs fill an entire range of possible values from 1.5 to 15 Gyr which indicates the absence in the isolated lenticular galaxies, unlike in the members of groups and clusters, of a certain epoch when the structural components are formed: they could have been formed at a redshift of  $z > 2$  as well as only several billion years ago. Unlike the S0 galaxies in a more dense environment, isolated galaxies typically have the same age of stars in the bulges and discs. The lenses and rings of increased stellar brightness, identified from the photometry of 7 of 11 galaxies, do not significantly differ from the stellar discs by the properties of stellar populations and velocity dispersion of stars. We draw a conclusion that the final arrangement of the morphological type of a lenticular galaxy in complete isolation is critically dependent on the possible modes of accretion of the cold external gas.

Keywords: *galaxies: elliptical and lenticular—galaxies: stellar population—galaxies: evolution*