

УДК 524.74-54/75:520.84

СИНХРОННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК В ГРУППАХ: ГРУППА NGC 524

© 2012 О. К. Сильченко^{1*}, В. Л. Афанасьев²

¹Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 16 февраля 2012 года; принята в печать 20 мая 2012 года

С помощью панорамной спектроскопии на БТА САО РАН исследованы свойства звездного населения в центральных областях пяти галактик ранних типов — членов группы NGC 524. Эволюция центральных областей галактик выглядит синхронизованной: средний возраст звезд в балджах всех пяти галактик заключен в интервале 3–6 млрд лет. У четырех галактик из пяти также отмечены синхронные вспышки звездообразования в ядрах 1–2 млрд лет назад. Единственная галактика, у которой возраст звездного населения в ядре совпадает с возрастом звездного населения в балдже (т.е. ядерная вспышка звездообразования не состоялась) — это NGC 502, самая далекая от центра группы из всех исследованных галактик.

Ключевые слова: галактики: ядра—галактики: балджи—галактики: звездное население—галактики: эволюция—галактики: группы: индивидуальные: NGC 524

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство галактик ближней Вселенной являются членами групп: согласно последним оценкам [1], в пределах 40 Мпк от нас 54% всех галактик входит в группы с числом членов четыре и более; а если добавить сюда триплеты и пары, то число галактик в малых коллективах возрастет до 82%. По своим свойствам — обязательное близкое присутствие гравитирующих “соседей”, невысокие, порядка 100 км/с, скорости взаимного прохождения галактик, характерные динамические времена пересечения всего пространства группы в несколько раз меньшие хаббловского времени — группы являются самым лучшим местом для реализации т.н. внешней секулярной эволюции галактик (про классификацию механизмов эволюции галактик — см. обзор Корменди и Кенникат [2]). То есть в эволюции галактик в группах, в построении звездных подсистем этих галактик заведомо играют важную, возможно доминирующую, роль внешние воздействия, как гравитационные, так и газодинамические, которые способны кардинально изменять структуру галактики, вплоть до ее морфологической трансформации.

Галактики, входящие в группу, находятся под воздействием общего гравитационного потенциала

группы, в котором они движутся, и общего окружения (горячий межгалактический газ, если он присутствует в группе). Тогда кажется вероятным, что перестройка глобальной структуры и, в частности, формирование центральных звездных подсистем в них может быть синхронизовано, т.е. средний возраст звездного населения в центрах галактик будет один и тот же. Практически все механизмы гравитационного (приливного) взаимодействия, а также целый ряд механизмов газодинамических (лобовое давление, статическое обжатие горячей средой), приводят к концентрации газа дисковой галактики в ее центре с последующей вспышкой звездообразования и формированием вторичного звездного населения в ядре и балдже галактики. Обнаружение синхронизации эволюции центральных областей галактик в группах могло бы быть существенным аргументом в пользу доминирующей роли внешних воздействий, а отсутствие оной, наоборот, должно привлечь внимание к различиям начальных условий эволюции галактик. Мы более десяти лет назад взялись за исследования звездных населений в центральных областях галактик в группах с использованием MPFS и БТА. Нам удалось исследовать по 2–3 центральные галактики в шести близких группах. В Leo I [3], в группах NGC 5576 [4] и NGC 3169 [5] свойства звездного населения околоядерных дисков больших галактик группы оказались одинаковыми. Последние звезды там сформировались относи-

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

тельно недавно, 1–3 млрд лет назад, несмотря на ранний тип хозяйских галактик, а в группе Leo I 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 [6], и мы делаем вывод, что галактики триплета собрались в единый коллектив недавно, менее 1 млрд лет назад. В группе Leo II, в которой в отличие от предыдущих упомянутых групп присутствует газ, излучающий в рентгеновском диапазоне, у двух центральных галактик наблюдаемые околядерные кинематически выделенные звездные структуры оказались старыми. Они имеют разные возраста формирования — 6 и 10 млрд лет у NGC 3608 и NGC 3607 соответственно [7]. В то же время в периферийных линзовидных галактиках NGC 3599 и NGC 3626 наблюдается формирование (текущее звездообразование) центральных звездных подсистем [8]. Также асинхронной оказалась и эволюция центральных областей галактик ранних типов в богатой массивной группе NGC 80, тоже обладающей заметным рентгеновским гало [9] — как в ядрах, так и в центральных сфероидах, оценки средних возрастов звездных населений дают значения 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).

В данной статье будут представлены результаты анализа свойств звездного населения в галактиках еще одной массивной группы с рентгеновским газом: группы NGC 524. Эта группа была впервые каталогизирована Геллер и Хухра в 1983 году [10]. Тогда в ее составе были перечислены только 8 галактик-членов. Позднее Ян Венник [11] просмотрел Паломарские карты и методом иерархии взаимодействий нашел в составе группы 18 ярких галактик и 13 карликовых. В последних каталогах Броух и др. [12] методом FOF (“друг-моего-друга”) отождествили в группе NGC 524 16 членов, и согласно каталогу близких групп Макарова и Караченцева [1] к группе также приписано 16 галактик-членов. Если использовать в качестве радиуса группы значение из каталога Макарова и Караченцева, $R_h = 391$ кпк, то База внегалактических данных NED обнаруживает в группе 10 галактик ярче $M_B \sim -16$. Большинство ярких членов группы классифицируются как линзовидные галактики. При дисперсии скоростей галактик в группе около 150–190 км/с [1, 12], группа довольно массивна, $1.7 \times 10^{13} M_\odot$ [13]. Спутник ROSAT картографировал рентгеновский газ в группе NGC 524, однако радиус рентгеновского пятна меньше 60 кпк, и по этой причине горячий

газ в некоторых работах считается принадлежащим не гало группы, а лишь центральной галактике NGC 524 [14]. Мы исследовали методом панорамной спектроскопии звездное население и кинематику околядерных областей ярчайших нецентральных галактик группы: NGC 502, NGC 509, NGC 516 (все линзовидные), NGC 518 и NGC 532 (спиральные галактики ранних типов). Глобальные характеристики исследованных галактик, взятые из баз данных NED и HYPERLEDA, приведены в Табл. 1. Для центральной галактики группы, NGC 524, результаты, полученные с MPFS/БТА, были опубликованы нами ранее [15].

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для центральных частей пяти крупнейших галактик группы NGC 524 были получены данные методом панорамной спектроскопии с Мультизрачковым волоконным спектрографом (MPFS) в первичном фокусе 6-метрового телескопа САО РАН (описание прибора см. [19]). Для исследования звездных населений и звездной кинематики регистрировался сине-зеленый диапазон спектра 4150–5650 Å с обратной дисперсией 0.75 Å на пиксель (спектральное разрешение около 3 Å). Для галактики с богатым эмиссионным спектром (с большим количеством ионизованного газа в центре) NGC 532 был также получен спектр в красном диапазоне 5800–7200 Å, чтобы исследовать кинематику газового компонента в центре галактики, а также чтобы по эквивалентной ширине эмиссионной линии $H\alpha$ рассчитать поправку Ликского индекса $H\beta$ за искажение абсорбционной линии эмиссии. Приемником служила ПЗС-матрица EEV 42-40 форматом 2048 × 2048 элементов. При наблюдениях на MPFS массив квадратных микролинз, собранных в квадратное поле зрения размером 16 × 16 элементов, строит матрицу микрозрачков, которая с помощью световодов реформируется в псевдощель и подается на вход спектрографа. Такая конфигурация позволяет одновременно регистрировать 256 спектров, каждый из которых характеризует пространственный элемент изображения галактики размером примерно 1''0 × 1''0. Для калибровки шкалы длин волн каждый раз до и после объекта экспонировался спектр сравнения гелий-неон-аргоновой лампы, для исправления за виньетирование и разное пропускание микролинз использовалась внутренняя лампа спектрографа и спектр рассветного неба. Первичная обработка данных, включающая в себя вычитание bias (электронного нуля), удаление следов космических частиц, экстракцию одномерных спектров для каждого элемента изображения, линейаризацию выделенных спектров, выполнялась

Таблица 1. Глобальные параметры исследуемых галактик

Галактика	NGC 502	NGC 509	NGC 516	NGC 518	NGC 532
Морфологический тип (NED)	SA0 ⁰ (r)	S0?	S0	Sa:	Sab?
R_{25} , arcsec (RC3) [16]	34	43	39	52	75
B_T^0 (RC3) [16]	13.57	14.20	13.97	13.56	12.91
M_B (RC3+NED)	-18.3	-17.7	-17.9	-18.3	-19.0
V_r , км/с (NED)	2489	2274	2451	2725	2361
Удаление от центра группы, кпк [16],[17]	282	151	68	101	126
Расстояние до группы, Мпк [18]	24				
Фотометрические параметры балджей, по данным [23]					
r_{eff} , arcsec	3.5	2.9	2.9	7.4	5.4
n_{Sersic}	1.5	1.5	1.85	2	2
Кинематические параметры балджей, по данным настоящей работы					
$V_{\text{rot}}(r_{\text{eff}})$, км/с	62 ± 11	18 ± 15	26 ± 9	68 ± 20	27 ± 15
$\sigma_*(r_{\text{eff}})$, км/с	94 ± 3	77 ± 13	65 ± 6	100 ± 12	110 ± 8

с помощью комплекса программ, написанных в программной среде IDL.

Для расчета кинематических параметров звездного компонента — лучевой скорости и дисперсии скоростей звезд в данной точке — спектр каждого пространственного элемента после вычитания континуума и перевода в шкалу скоростей подвергался кросс-корреляции со спектрами звезд-гигантов класса G8–K2. Они наблюдались в ту же ночь на той же аппаратуре, что и галактика. Для молодых звездных населений для кросс-корреляции в качестве опорного использовался спектр рассветного неба (класс G2). Точность шкалы длин волн и нуль-пункт измеряемых скоростей контролировались по линии ночного неба [O I] λ 5577 Å. Мы оцениваем точность индивидуальных измерений лучевых скоростей звездного компонента как 5–7 км/с. После получения кинематических параметров, для анализа свойств звездных населений — возраста, общей металличности и отношения обилий магния (элемента α -процесса) и железа — мы рассчитывали Ликские индексы $H\beta$, Mgb , $Fe5270$ и $Fe5335$ для каждого индивидуального спектра. Определение Ликской системы бралось из работ Уорси и др. [20, 21]. Полученные карты Ликских индексов — Mgb и $\langle Fe \rangle \equiv (Fe5270 + Fe5335)/2$ для всех галактик и $H\beta$ для линзовидных галактик без заметного эмиссионного компонента в спектрах представлены на Рис. 1–5. Для этих сильных линий поглощения существуют детальные модельные расчеты в рамках моделей синтеза звездных

населений, которые связывают индексы (эквивалентные ширины линий поглощения) со средними (взвешенными со светимостью звезд) свойствами звездных населений, т.н. SSP-equivalent (SSP — “Simple Stellar Population”) возрастными и металличностями. Среди разнообразия доступных модельных расчетов мы предпочли сравнивать с нашими результатами модели Томаса и др. [22], так как эти модели рассчитаны для нескольких значений отношения обилий магния к железу и, следовательно, позволяют кроме возраста и общей металличности определить и этот третий параметр звездного населения.

Детальный дневник наблюдений галактик группы NGC 524 представлен в Табл. 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Двумерные распределения Ликских индексов

Морфология панорамного распределения свойств звездного населения в центральных областях галактик может быть качественно оценена по распределениям Ликских индексов металлов и водорода. Эти распределения представлены на Рис. 1–5. Рассмотрим индивидуальные особенности этих распределений для каждой галактики.

NGC 502, Рис. 1. На картах Ликских индексов NGC 502 можно отметить увеличение эквивалентных ширин линий магния и железа в ядре с одновременным ослаблением $H\beta$, что можно интерпретировать как повышенную металличность

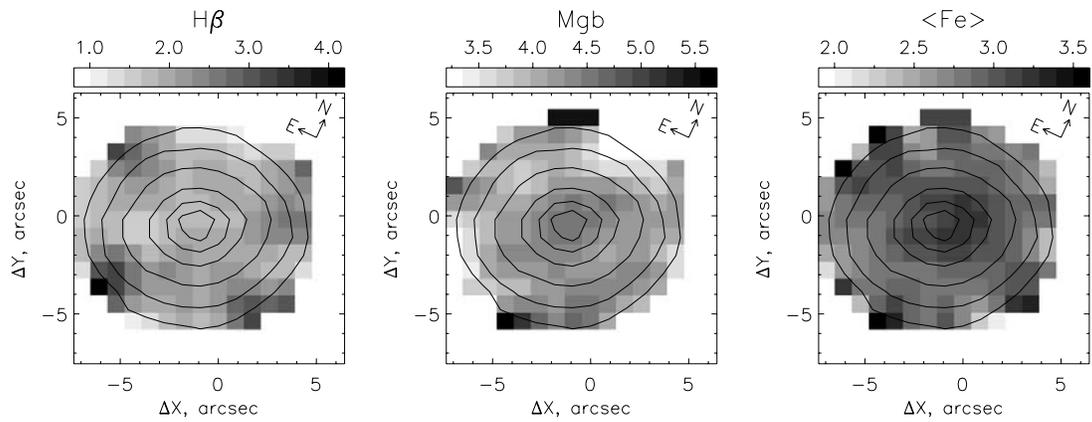


Рис. 1. Карты Ликских индексов $H\beta$, Mgb , $\langle Fe \rangle \equiv (Fe5270 + Fe5335)/2$ для центральной области NGC 502. Изофотами изображено распределение поверхностной яркости в зеленом ($\lambda 5000 \text{ \AA}$) континууме.

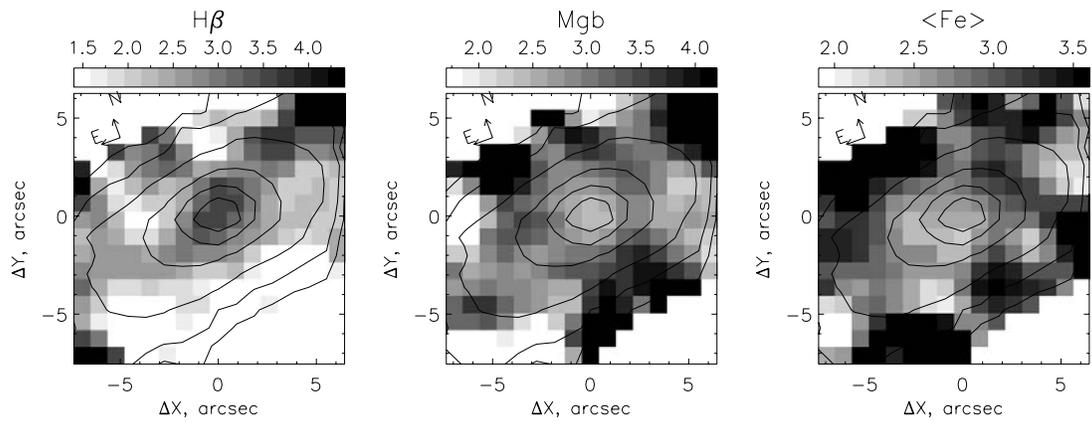


Рис. 2. Карты Ликских индексов $H\beta$, Mgb , $\langle Fe \rangle \equiv (Fe5270 + Fe5335)/2$ для центральной области NGC 509. Изофотами изображено распределение поверхностной яркости в зеленом ($\lambda 5000 \text{ \AA}$) континууме.

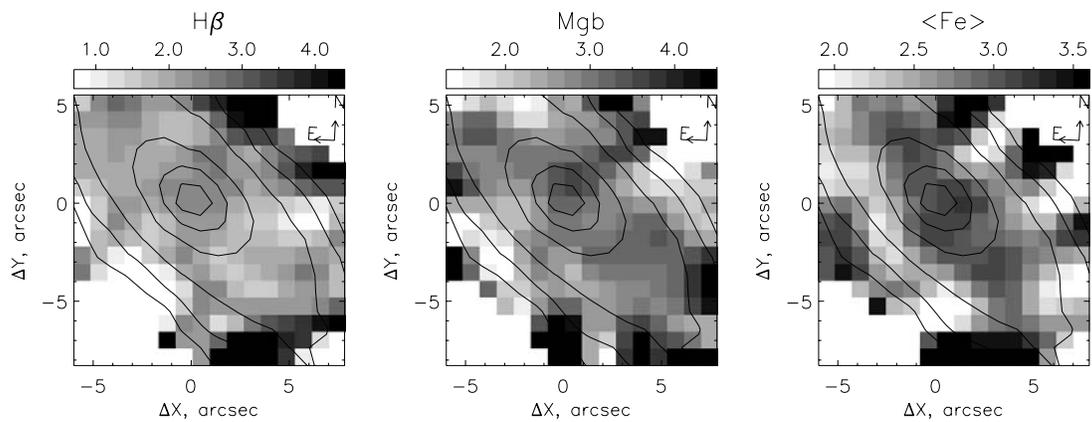


Рис. 3. Карты Ликских индексов $H\beta$, Mgb , $\langle Fe \rangle \equiv (Fe5270 + Fe5335)/2$ для центральной области NGC 516. Изофотами изображено распределение поверхностной яркости в зеленом ($\lambda 5000 \text{ \AA}$) континууме.

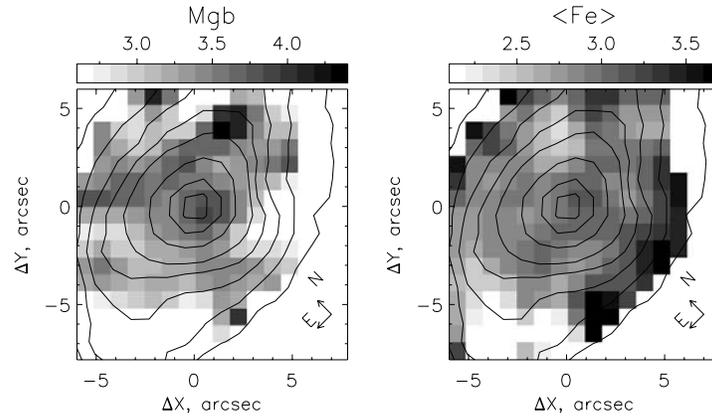


Рис. 4. Карты Ликских индексов Mgb и $\langle \text{Fe} \rangle \equiv (\text{Fe}5270 + \text{Fe}5335)/2$ для центральной области NGC 518. Изофотами изображено распределение поверхностной яркости в зеленом ($\lambda 5000 \text{ \AA}$) континууме.

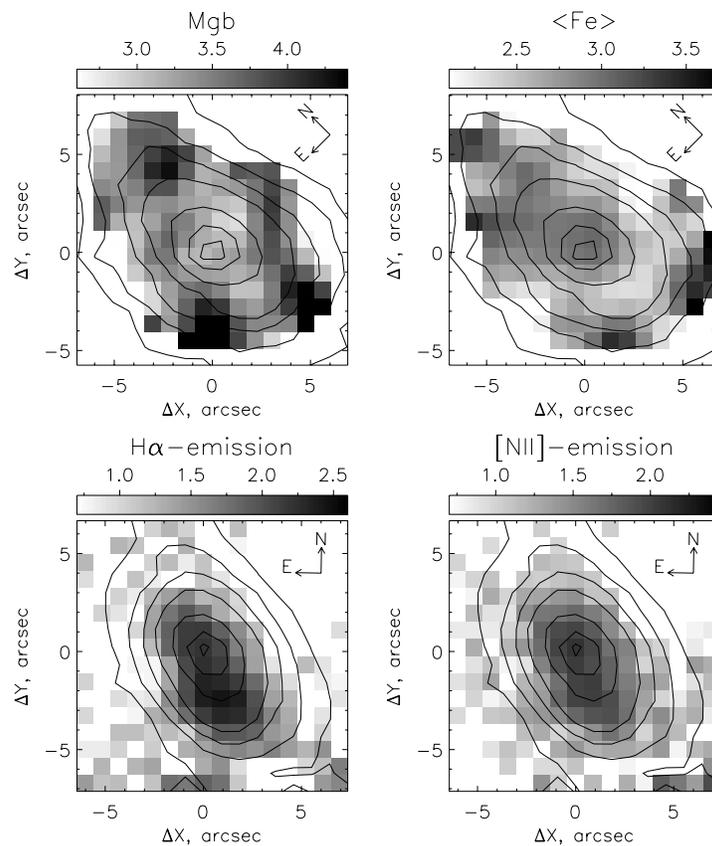


Рис. 5. Карты Ликских индексов Mgb и $\langle \text{Fe} \rangle \equiv (\text{Fe}5270 + \text{Fe}5335)/2$ (вверху), а также логарифмов потоков в эмиссионных линиях $\text{H}\alpha$ и $[\text{NII}] \lambda 6583 \text{ \AA}$ в произвольных единицах (внизу) для центральной области NGC 532. Изофотами изображено распределение поверхностной яркости в зеленом ($\lambda 5000 \text{ \AA}$) (верхний ряд) и красном ($\lambda 6500 \text{ \AA}$) (нижний ряд) континууме.

Таблица 2. Спектральные наблюдения с MPFS

Галактика	Дата	$T(\text{exp})$, мин.	Диапазон, Å	Изображения, arcsec
NGC 502	17.09.2006	60	4150–5650	2.0
NGC 509	18.09.2006	120	4150–5650	1.5
NGC 516	17.09.2006	60	4150–5650	2.0
NGC 518	19.08.2007	150	4150–5650	1.3
NGC 532	08.10.2004	120	4150–5650	1.2
NGC 532	06.09.2008	40	5800–7300	1.5

звезд в геометрическом центре галактики: в галактике обнаружено химически выделенное ядро. В остальном заметных деталей или анизотропии распределений не наблюдается: NGC 502 видна практически плашмя, свойства звездного населения центрально-симметричны, в том числе и в центре галактики.

NGC 509, Рис. 2. У этой линзовидной галактики, видимой с ребра, наблюдается прямо противоположная особенность распределения Ликских индексов: можно отметить резкий максимум $H\beta$ в ядре, менее выраженное усиление водородного индекса вблизи экваториальной плоскости галактики, а также компактные минимумы индексов магния и железа вблизи центра изофот. Ниже мы увидим, что это отражает главным образом эффект возраста: звездное население в ядре намного моложе, чем вокруг ядра. Интересно, что минимум Mgb окружает правильное круглое колечко увеличенных значений индекса, хотя изофоты вытянуты значительно сильнее. Это оправдывает усреднение индексов в круглых кольцах при оценке параметров звездного населения в балдже.

NGC 516, Рис. 3. NGC 516 — такая же небольшая линзовидная галактика, как и NGC 509, и тоже видимая с ребра. Она находится очень близко к центру группы, всего около 70 кпк в проекции на картинную плоскость от центральной галактики NGC 524, и лучевые скорости у них близки. На Рис. 3 мы, как и в NGC 509, видим усиление индекса $H\beta$ в ядре, однако на этот раз индексы магния и железа демонстрируют в этом месте не минимумы, а максимумы. Более того, усиление индексов металлов имеет явно дисковую морфологию: это не компактные пятна, а узкие полоски через все поле зрения. Если усиление $H\beta$ — это эффект возраста (как мы увидим ниже), то можно допустить, что вспышка звездообразования в NGC 516 продолжалась дольше, чем в центре NGC 509, что звездообразование шло не в ядре,

а в диске, и звездный диск успел в течение этой вспышки обогатиться тяжелыми элементами.

NGC 518, Рис. 4. Спиральная галактика NGC 518 видна под большим углом к лучу зрения, но не точно с ребра [23]. В спектрах центральной области внутри профиля абсорбционной линии $H\beta$ видна умеренная эмиссия, поэтому в данном случае на Рис. 4 мы не приводим карту распределения Ликского индекса $H\beta$. Прежде чем использовать его для анализа свойств звездного населения, его нужно исправить за вклад эмиссии. На распределениях индексов магния и железа можно отметить химически выделенное ядро галактики; оно, возможно, компактно только в Mgb , а в индексе железа имеет протяженную форму. Такая особенность уже не раз встречалась нам в центрах галактик ранних типов (например, в S0-галактике NGC 1023 [24]). Ее можно интерпретировать как быстрое завершение вспышки звездообразования в ядре и последующий продолжительный процесс звездообразования в околоядерном кольце.

NGC 532, Рис. 5. В центральной области этой галактики эмиссионные линии ионизованного газа очень сильны. Чтобы учесть их должным образом, мы сняли панорамный спектр в красном диапазоне, и на Рис. 5, кроме карт Ликских индексов магния и железа (эквивалентных ширин линий поглощения), приводим еще карты распределения потоков в эмиссионных линиях $H\alpha$ и $[N II] \lambda 6583$ (в произвольных отсчетах). Все распределения выглядят сложными и асимметричными, даже карты распределения потоков в эмиссионных линиях. Максимум эмиссии запрещенной линии азота идет из ядра, тогда как максимум эмиссии $H\alpha$ — из компактной области примерно в $4''$ к югу от ядра. По отношению потоков в этих линиях ($H\alpha/[N II] = 1.66$ в ядре, $H\alpha/[N II] \approx 2$ вне ядра), мы, используя диагностику Вейо и Остерброка [25], можем сказать, что ядро NGC 532 — LINER, а основное текущее звездообразование локализовано в околоядерном диске, причем именно на юг от ядра. Измеренные

интенсивности эмиссионных линий и определенный нами характер возбуждения ионизованного газа мы используем далее для исправления Ликского индекса $H\beta$ за искажение эмиссией.

3.2. Возраст и химический состав звездного населения в ядрах и балджах галактик

Используя преимущества панорамной спектроскопии, мы просуммировали спектры в кольцах, центрированных на ядра галактик, двигаясь вдоль радиуса с шагом $1''$. Это позволило получить для балджей галактик суммарные спектры с таким же отношением сигнал/шум, как и в ядре. При наших экспозициях и при суммировании спектров в кольцах точность измеренных индексов составляет около 0.1 \AA , что было определено нами при обзоре линзовидных галактик с MPFS путем неоднократного наблюдения некоторых галактик [26]. Далее мы обсудим характеристики звездных населений в ядрах и в кольцевых зонах балджей, полученные по Ликским индексам.

Чтобы определить средние (взвешенные со светимостью звезд) характеристики звездного населения — возраст, общую металличность, отношение обилий магния и железа, — мы сопоставим измеренные нами в галактиках Ликские индексы с расчетами [22], сделанными в рамках модели SSP (“Simple Stellar Population”), то есть в предположении одного возраста и одного химического состава у всех звезд, дающих вклад в интегральный спектр (одного пространственного элемента галактики в нашем случае). Для определения отношения обилий магния и железа будем использовать диаграмму, сопоставляющую индексы Mgb и $\langle Fe \rangle$. Для определения возраста и общей металличности будем сопоставлять водородный индекс $H\beta$ и комбинированный индекс металлов $[MgFe] \equiv (Mgb \langle Fe \rangle)^{1/2}$: на данной диаграмме удастся разделить эффекты возраста и металличности (снять вырождение), так как семейства линий равной металличности и равного возраста имеют разный наклон и образуют своеобразную криволинейную координатную сетку, позволяющую по положению наблюдательной точки на диаграмме определить одновременно и возраст, и металличность звездного населения. Индекс $H\beta$, который используется для определения возраста звездного населения, должен быть исправлен за вклад эмиссионного компонента. В случае NGC 532, для которой у нас имеется спектр в красном диапазоне, это делалось через эквивалентную ширину эмиссионной линии $H\alpha$. В ядре мы использовали среднее соотношение эквивалентных ширин эмиссионных бальмеровских линий $EW(H\beta) = 0.25 EW(H\alpha)$, найденное по большой смешанной выборке спиральных галактик Стасинской и Содре [27]. На

Таблица 3. Ликские индексы и параметры звездного населения в ядрах

Галактика	$H\beta$	Mgb	$\langle Fe \rangle$	T , млрд лет	$[Z/H]$	$[Mg/Fe]$
NGC 502	1.83	4.60	3.29	3.5	+0.6	+0.13
NGC 509	3.99	1.85	2.00	1	0.0	0.0
NGC 516	2.49	3.08	3.00	1.5	+0.4	0.0
NGC 518	2.36	3.86	2.84	2	+0.6	+0.17
NGC 532	3.07	3.19	2.99	1	> +0.7	0.0

расстоянии $4-6''$ от ядра, где доминирует текущее звездообразование, мы использовали вместо 0.25 коэффициент связи 0.35 , свойственный возбуждению газа молодыми звездами [28]. Если для балджа использовать соотношение Стасинской и Содре [27], то оценка возраста балджа уменьшится на 0.5 млрд лет — с 4 до 3.5 млрд лет. Для NGC 518, где эмиссионные линии слабее, чем в NGC 532, и отсутствуют данные в красном диапазоне спектра, использовалось среднее статистическое (для галактик ранних типов) соотношение $EW(H\beta) = 0.6 EW([O III] \lambda 5007 +)$ [29]. Рассчитанная таким образом эквивалентная ширина эмиссионной линии $H\beta$ — это та поправка, которую нужно добавить к измеренному индексу $H\beta$, чтобы исправить его за эмиссию (по самому определению Ликских индексов как эквивалентных ширин).

В Табл. 3 даны Ликские индексы и определенные по ним параметры звездных населений для ядер исследованных галактик, а на Рис. 6 показано сравнение наблюдаемых индексов с моделями [22]. Первое, что бросается в глаза — в четырех галактиках из пяти звездные ядра очень молодые, со средним возрастом звездного населения $1-2$ млрд лет. Второе, в четырех галактиках из пяти (правда, не тех же самых) металличность звездного населения ядер очень высока, с общим содержанием металлов в $3-5$ раз выше солнечного. Очевидно, мы видим последствия очень эффективных недавних вспышек звездообразования в ядре и порожденные ими химически выделенные ядра галактик. Отношение магния к железу в трех из четырех молодых ядер — солнечное, и только в NGC 518, где мы отмечали большую компактность максимума индекса магния по сравнению с максимумом индекса железа на картах Ликских индексов (Рис. 4), это отношение в полтора раза выше солнечного. Это означает, что в этих 3 ядрах вспышка звездообразования была достаточно продолжительной, не менее $2-3$ млрд лет. В ядре NGC 518 она была

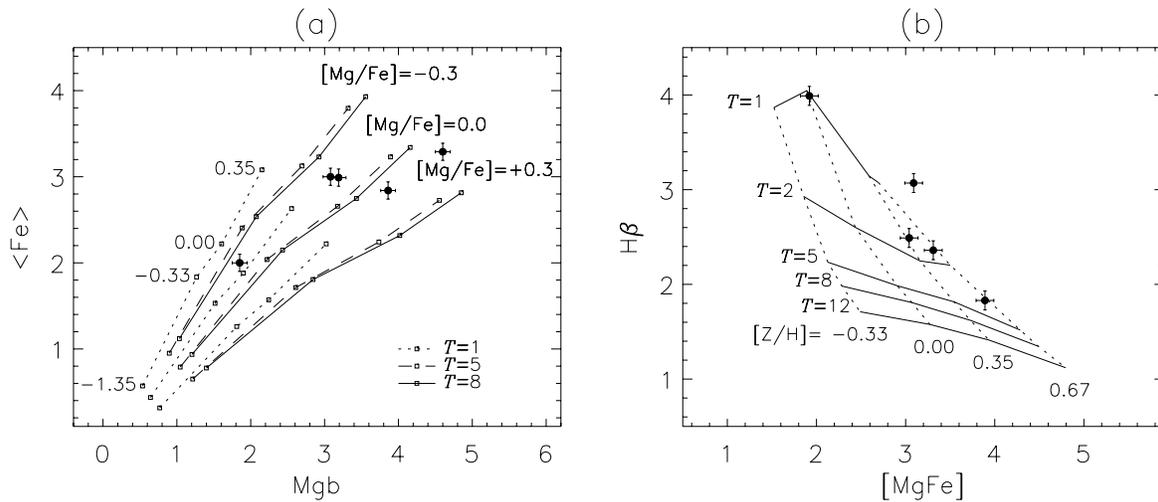


Рис. 6. Диагностические диаграммы “индекс–индекс” для измерений ядер пяти “нецентральных” галактик группы NGC 524 (черные точки с барами ошибок). Мелкие значки, соединенные различными линиями на левом рисунке и сплошные линии на правом, — расчет по модели звездных населений одного возраста [22]; возраст моделей указан в млрд лет; общая металличность моделей указана на левом рисунке рядом с модельными реперами для $[Mg/Fe] = -0.3$, обозначенными мелкими значками, и указана внизу и проведена штриховыми линиями на правом.

короче, но зато продолжалась те же 2–3 млрд лет в непосредственных окрестностях ядра, уже начиная с радиуса 2'' (300 пк).

В Табл. 4 даны Ликские индексы и определенные по ним параметры звездных населений балджей исследованных галактик, взятых как интеграл в кольцах радиусом 4''–6'' (0.65–1.0 кпк); а на Рис. 7 эти данные сравнены с моделями [22]. Разброс отношения обилий магния и железа в звездных населенных балджах значителен: оно может быть как выше солнечного (в балдже NGC 502), так и значимо ниже солнечного, как в балджах NGC 509 и NGC 516. Если $[Mg/Fe] > 0$ типично для сфероидов достаточно большой массы [30, 31], то $[Mg/Fe] < 0$ встречается среди галактик очень редко, и в основном в карликовых галактиках. Специалисты по химической эволюции трактуют переобогащение железом по отношению к магнию как признак вспышечной истории звездообразования с небольшим числом вспышек, разделенных большими интервалами времени, — не менее 2–3 млрд лет [32]. Между тем, средний возраст звезд всех пяти балджей галактик группы NGC 524 оказывается заключен в довольно узком интервале значений, практически 3–5 млрд лет, если для NGC 509 и NGC 516 мы воспользуемся моделями [22] с недостатком магния по отношению к железу (Рис. 7b). Точность определения возрастов звездных населений для балджей пяти исследованных галактик — около 1 млрд лет при возрасте 3–4 млрд лет и около 2 млрд лет — при возрасте 5–6 млрд лет. Это означает, что балджи всех пяти

исследованных галактик имеют примерно один и тот же средний возраст звездного населения в пределах точности измерений.

3.3. Реликтовые околоядерные кольца звездообразования

Кроме балджей и неразрешенных ядер — двух отдельных звездных подсистем, имеющих, как выяснилось, существенно разную историю звездообразования в большинстве исследованных галактик, — мы можем отметить еще такие структуры как околоядерные реликтовые кольца прошлого ранее звездообразования. Как мы уже отмечали, в NGC 518 в 300 пк от центра скачком возрастает индекс железа при монотонном падении индекса магния — отношение Mg/Fe в

Таблица 4. Ликские индексы и параметры звездного населения в балджах

Галактика	Hβ	Mgb	⟨Fe⟩	T, млрд лет	[Z/H]	[Mg/Fe]
NGC 502	1.95	4.13	2.82	4	+0.3	+0.19
NGC 509	1.90	3.06	3.02	5	+0.1	-0.13
NGC 516	1.96	2.65	2.84	6	-0.1	-0.19
NGC 518	2.23	3.12	2.78	3	+0.1	0.0
NGC 532	2.06	3.42	2.68	4	+0.1	+0.10

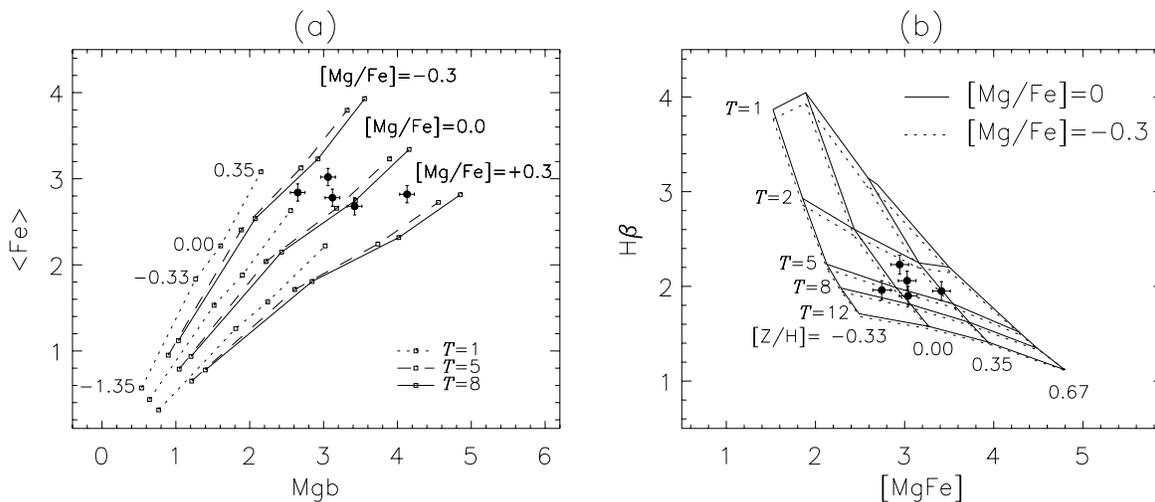


Рис. 7. Диагностические диаграммы “индекс–индекс” для измерений в балджах (кольцах радиусом 4–6″) для пяти “нецентральных” галактик группы NGC 524 (черные точки с барами ошибок). Модельные последовательности аналогичны показанным на Рис. 6. На диагностических диаграммах $H\beta$ – $[MgFe]$ использованы модели с разным отношением магния к железу: сплошная линия — $[Mg/Fe] = 0.0$, а пунктирная линия — $[Mg/Fe] = -0.3$.

ядре и его окрестностях различается примерно в полтора раза. Это можно интерпретировать как более длительное звездообразование в кольце по сравнению с короткой вспышкой в геометрическом центре галактики. Однако в NGC 518 эта разница в длительности звездообразования видна только в химическом составе звезд и не чувствуется в оценках среднего возраста звездных населений. Средний возраст звезд в NGC 518 плавно растет от 2 до 3 млрд лет вдоль радиуса. В NGC 532 окооядерное кольцо недавнего звездообразования видно “глазом”. На Рис. 8а представлена диаграмма $H\beta$ – $[MgFe]$ для NGC 532: азимутально осредненные измерения Ликских индексов вдоль радиуса галактики, начиная от ядра, далее в кольце $R = 2''$ и далее через одну секунду дуги. Видно, как с удалением от ядра возраст звездного населения сначала падает на несколько сотен миллионов лет, а потом скачком возрастает, и в балдже на расстояниях от центра 0.6–1.0 кпк практически не меняется. Мы видим, что самое молодое звездное население в центре NGC 532 сосредоточено в кольце радиусом $R = 2''$. Самое любопытное, что это кольцо выделено и фотометрически, и кинематически. На Рис. 8b показано изменение ориентации большой оси изофот вдоль радиуса в фильтре V (рассчитано и опубликовано нами [23]) в сравнении с центральными кинематическими большими осями, определенными по полям скоростей звезд и ионизованного газа; снизу показано изменение вдоль радиуса эллиптичности изофот. Радиус $R = 2''$ является выделенным фотометрически: на этом радиусе эллиптичность изофот максимальна,

а большие оси звездного компонента, как фотометрическая, так и кинематическая, синхронно разворачиваются в сторону больших позиционных углов. Поскольку кинематическая большая ось звездного компонента разворачиваются в ту же сторону, что и фотометрическая большая ось, мы можем интерпретировать вытянутую структуру в центре NGC 532 как наклонный околядерный звездный диск, который сформировался, судя по Ликским индексам, совсем недавно, в пределах 1 млрд лет от нашей эпохи.

4. ВЫВОДЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Методом панорамной спектроскопии, с использованием мультизрочкового спектрографа, установленного в первичном фокусе БТА, мы исследовали свойства звездных населений в центральных областях пяти самых крупных галактик группы NGC 524. Самая центральная галактика группы, гигантская S0 NGC 524, была исследована нами на той же аппаратуре ранее. У нее мы диагностировали однородно старое ($T > 10$ млрд лет) звездное население во всех структурных компонентах — в ядре, в балдже и в многоярусном крупномасштабном диске [15, 33]. В отличие от центральной галактики, другие галактики группы, как выяснилось, имеют население промежуточного возраста в балджах и молодое звездное население в химически выделенных звездных ядрах. Интересно, что средние возраста звездных населений балджей примерно одинаковы у всех пяти галактик, это $T_{SSP} \approx 3$ –5 млрд лет, а средний возраст звездных

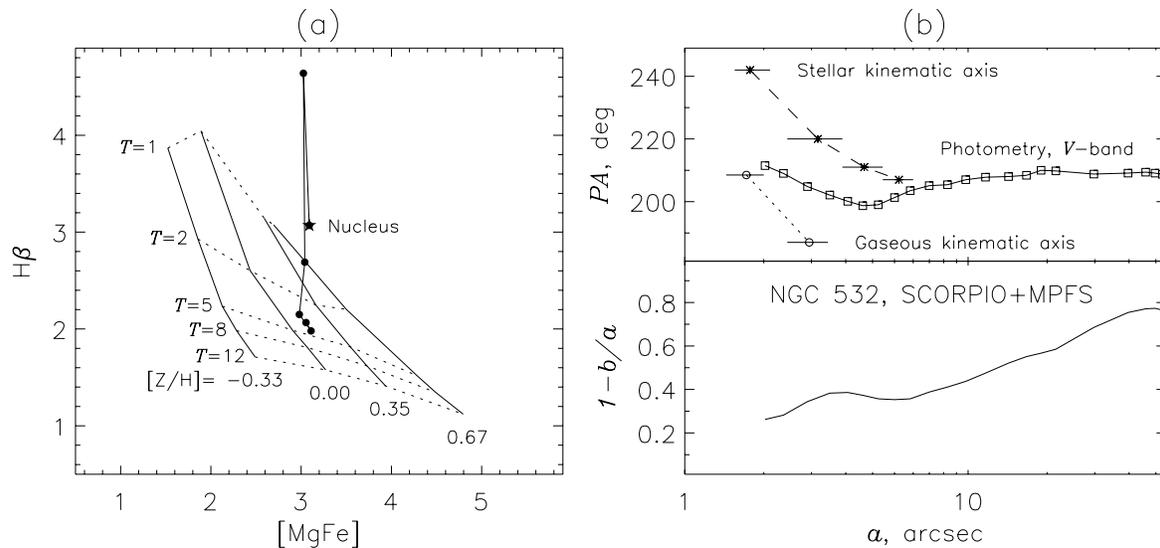


Рис. 8. Околоядерное кольцо в NGC 532: (а) Диагностическая диаграмма $H\beta$ – $[Mg/Fe]$ для измерений в ядре (звезда) и в кольцах, начиная с $R = 2''$, далее с шагом $1''$ (черные точки), модельные последовательности — как на Рис. 6b и 7b; (b) Результаты изофотного анализа изображения NGC 532 в фильтре V [23]; вверху сравнивается ориентация большой оси изофот и направления кинематических больших осей (направления максимального градиента лучевой скорости) для ионизованного газа и звезд по данным панорамной спектроскопии с MPFS, а внизу показано изменение эллиптичности изофот.

ядер примерно одинаков у четырех из пяти исследованных галактик: $T_{SSP} \approx 1\text{--}2$ млрд лет. Только у самой далекой от центра группы S0-галактики NGC 502 не было отдельной вспышки звездообразования в ядре: у нее ядро и балдж имеют одинаковый возраст — 4 млрд лет.

Такая синхронная эволюция галактик в группе указывает на определяющую роль окружения в стимулировании внутренних событий в жизни галактик, в первую очередь, вспышек звездообразования в центре. В группе NGC 524 отсутствует горячая газовая среда по всему объему группы, но имеется компактное рентгеновское гало, зарегистрированное только вокруг самой NGC 524. Поэтому очевидно, что определяющую роль играют гравитационные взаимодействия. Временные масштабы надстройки центральных областей галактик, которые мы определили для группы NGC 524, укладываются в рамки современных космологических расчетов иерархического сгущивания материи во Вселенной. Действительно, массивные группы галактик, $M > 10^{13} M_{\odot}$, в современных космологических моделях становятся гравитационно связанными около красного смещения $z = 1$. Например, в недавней работе [34] первые “спутники” (нецентральные галактики группы) пересекают вириальный радиус на красном смещении $z = 1.5$ (9 млрд лет назад), а более поздние из крупных — около $z = 0.7$ (6 млрд лет назад). Падая внутрь

объема вириального радиуса, галактики испытывают гравитационное влияние как потенциала всей группы в целом [35], так и приливные воздействия от других галактик группы при тесных сближениях [36]. Эти гравитационные взаимодействия нарушают осевую симметрию дисков галактик, аккрецированных группой, приводя к образованию баров, а бары в свою очередь перераспределяют газ в дисках, заставляя его скапливаться в центрах галактик. Далее бары могут рассасываться под гравитационным воздействием центральной концентрации массы. В результате ожидаются массовые вспышки звездообразования именно в центральном килопарсеке, которые должны приводить к увеличению балджей (и уменьшению среднего возраста звезд балджей), а в галактиках ранее не имевших балджей просто к формированию центральных сфероидальных компонент — псевдобалджей. Действительно, на $z = 0.4\text{--}0.7$ в плотном окружении скоплений и групп доминируют голубые дисковые галактики [37, 38], которые многими принимаются за спиральные галактики, только собирающиеся превратиться в S0s. На самом деле это могут быть дисковые галактики, в том числе S0s, находящиеся в процессе бурного наращивания балджей непосредственно после аккреции в плотное окружение [39]. Этот процесс прекращается на $z < 0.4$, то есть 3–4 млрд лет назад, что согласуется с найденными нами возрастными балджей в дисковых галактиках группы

NGC 524. Позднее, 1–2 млрд лет назад, в ядрах галактик группы происходят вторичные вспышки звездообразования, более компактные и очевидно более скромные по последствиям, чем те, которые надстраивали балджи. Интересно, что они тоже синхронны. Их, вероятно, надо связать с динамической эволюцией группы, время пересечения которой около 2–3 млрд лет. Мы обнаружили вокруг крупных галактик группы NGC 524 значительное количество карликовых голубых галактик, очевидно богатых газом [23]. Возможно, прохождение большой галактики через центр группы провоцирует массовое выпадение на нее ее карликовых спутников, а это оставляет материал для ядерной вспышки звездообразования, который сжигается быстро и эффективно (в небольших линзовидных галактиках NGC 516 и NGC 509, где мы обнаружили молодые звездные ядра, в данный момент совсем нет газа, согласно [17]).

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракты 16.552.11.7028 и 16.518.11.7073). Мы благодарим А. В. Моисеева и А. А. Смирнову за поддержку наблюдений с MPFS. Мы использовали Лион-Медонскую базу внегалактических данных (LEDA), обеспеченную командой ЛЕДА в Лионской обсерватории CRAL (Франция), и Базу внегалактических данных НАСА/ИПАК (NED), управляемую Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным управлением аэронавтики и космических исследований (США). Работа была поддержана грантом РФФИ 10-02-00062а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Makarov and I. Karachentsev, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **412**, 2498 (2011).
2. J. Kormendy and R. C. Kennicutt Jr., *Annu. Rev. Astronom. 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, *Astron. Lett.* **32**, 534 (2006).
6. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astronom. and Astrophys.* **429**, 825 (2005).
7. V. L. Afanasiev and O. K. Sil'chenko, *Astron. and Astrophys. Trans.* **26**, 311 (2007).
8. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and A. P. Shulga, *Astronom. J.* **140**, 1462 (2010).
9. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astron. Rep.* **52**, 875 (2008).
10. M. J. Geller and J. P. Huchra, *Astrophys. J. Suppl.* **52**, 61 (1983).
11. J. Vennik, *Baltic Astronomy* **1**, 415 (1992).
12. S. Brough, D. A. Forbes, V. A. Kilborn, and W. Couch, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **370**, 1223 (2006).
13. D. A. Forbes, T. Ponman, F. Pearce, et al., *Publ. of the Astron. Soc. of Australia* **23**, 38 (2006).
14. J. Osmond and T. Ponman, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **350**, 1511 (2004).
15. O. K. Sil'chenko, *Astronom. J.* **120**, 741 (2000).
16. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin Jr., et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume 1: Explanations and References* (New York, Springer, 1991).
17. Ch. Sengupta and R. Balasubramanyam, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **369**, 360 (2006).
18. J. L. Tonry, A. Dressler, J. P. Blakeslee, et al., *Astrophys. J.* **546**, 681 (2001).
19. V. L. Afanasiev, S. N. Dodonov, and A. V. Moiseev, in *Proc. Conf. Stellar dynamics: from classic to modern, St. Petersburg, Russia, 2001*, Ed. by L. P. Osipkov and I. I. Nikiforov (St. Petersburg Univ. press, 2001), p. 103.
20. G. Worthey, S. M. Faber, J. J. González, and D. Burstein, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 687 (1994).
21. L. A. Jones and G. Worthey, *Astrophys. J.* **446**, L31 (1995).
22. D. Thomas, C. Maraston, and R. Bender, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **339**, 897 (2003).
23. M. A. Ilyina and O. K. Sil'chenko, *Astron. Rep.* (in press).
24. O. K. Sil'chenko, *Astronom. J.* **117**, 2725 (1999).
25. S. Veilleux and D. E. Osterbrock, *Astrophys. J. Suppl.* **63**, 295 (1987).
26. O. K. Sil'chenko, *Astrophys. J.* **641**, 229 (2006).
27. G. Stasinska and I. Sodre Jr., *Astronom. and Astrophys.* **374**, 919 (2001).
28. D. E. Osterbrock, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* (Mill Valley, CA: Univ. Science Books, 1989).
29. S. C. Trager, S. M. Faber, G. Worthey, and J. J. González, *Astronom. J.* **119**, 1645 (2000).
30. G. Worthey, S. M. Faber, and J. J. González, *Astrophys. J.* **398**, 69 (1992).
31. S. C. Trager, S. M. Faber, G. Worthey, and J. J. González, *Astronom. J.* **120**, 165 (2000).
32. G. Gilmore and R. F. G. Wyse, *Astrophys. J.* **367**, L55 (1991).
33. O. K. Sil'chenko, I. S. Proshina, A. P. Shulga, and S. E. Kuposov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* submitted (2012).
34. T. Kaufmann, L. Mayer, M. Carollo, and R. Feldmann, submitted to *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.*; arXiv:1201.6605 (2012).
35. A. Villalobos, G. De Lucia, S. Borgani, and G. Murante, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* (in press); arXiv:1202.0550 (2012).
36. K. Bekki and W. J. Couch, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **415**, 1783 (2011).
37. D. J. Wilman, A. Oemler, Jr., J. S. Mulchaey, et al., *Astrophys. J.* **692**, 298 (2009).

38. D. W. Just, D. Zaritsky, D. J. Sand, et al., *Astrophys. J.* **621**, 246 (2005).
J. **711**, 192 (2010).
39. D. Burstein, L. C. Ho, J. P. Huchra, and L. M. Macri,

Synchronous Evolution of Galaxies in Groups: NGC 524 Group

О.К. Sil'chenko, V.L. Afanasiev

With the means of panoramic spectroscopy at the SAO RAS BTA telescope, we investigated the properties of stellar populations in the central regions of five early-type galaxies—the NGC 524 group members. The evolution of the central regions of galaxies looks synchronized: the average age of stars in the bulges of all the five galaxies lies in the range of 3–6 Gyr. Four of the five galaxies revealed synchronized bursts of star formation in the nuclei 1–2 Gyr ago. The only galaxy, in which the ages of stellar population in the nucleus and in the bulge coincide (i.e. the nuclear burst of star formation did not take place) is NGC 502, the farthest from the center of the group of all the galaxies studied.

Keywords: *galaxies: nuclei—galaxies: bulges—galaxies: stellar content—galaxies: evolution—galaxies: groups: individual: NGC 524*