

УДК 524.78

Л. С. Пилюгин<sup>1</sup>, И. Ю. Изотова<sup>2</sup>, Ю. С. Шолудченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины  
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного, 27

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
03022 Киев, пр. Глушкова 6

### Содержание кислорода в близких галактиках на основе спектров областей H II из цифрового обзора неба Sloan II. Взаимодействующие галактики NGC 4631 и NGC 4656

*Определено содержание кислорода во взаимодействующих галактиках NGC 4631 и NGC 4656. В базе данных цифрового обзора неба SDSS II (the Sloan Digital Sky Survey II) найдены спектры семи областей H II (четыре в галактике NGC 4631 и три в галактике NGC 4656), в которых наблюдается авроральная линия кислорода [O III]  $\lambda$  436.3 нм. Измерены интенсивности спектральных линий и определено содержание кислорода в областях H II. Оценены содержание кислорода в центре диска и радиальный градиент его распределения в дисках этих галактик. Рассмотрено положение галактик на диаграмме светимость — металличность.*

*ВМІСТ КИСНЮ У БЛИЗЬКИХ ГАЛАКТИКАХ НА ОСНОВІ СПЕКТРІВ ОБЛАСТЕЙ H II З ЦИФРОВОГО ОГЛЯДУ НЕБА SLOAN II. ВЗАЄМОДІЮЧІ ГАЛАКТИКИ NGC 4631 ТА NGC 4656, ПІЛЮГІН Л. С., ІЗОТОВА І. Ю., ШОЛУДЧЕНКО Ю. С. — Визначено вміст кисню у взаємодіючих галактиках NGC 4631 та NGC 4656. У базі даних цифрового огляду неба SDSS II (the Sloan Digital Sky Survey II) виявлено сім областей H II (чотири у галактиці NGC 4631 та три у галактиці NGC 4656), у яких спостерігається авроральна лінія кисню [O III]  $\lambda$  436.3 нм. Виміряно інтенсивності спектральних ліній та визначено вміст кисню в областях H II. Оцінено вміст кисню в центрі диска та радіальний градієнт його розподілу в дисках цих галактик. Проаналізовано положення галактик на діаграмі світність — металічність.*

*THE OXYGEN ABUNDANCE IN NEARBY GALAXIES BASED ON THE H II REGION SPECTRA FROM THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY II. INTERACTING GALAXIES NGC 4631 AND NGC 4656, by Pilyugin L. S., Izotova I. Yu., Sholudchenko Yu. S. — Oxygen abundances in the interacting galaxies NGC 4631 and NGC 4656 were derived. The spectra of seven H II regions (four H II regions in the NGC 4631 galaxy and three H II regions in the NGC 4656 galaxy) which contain auroral oxygen line [O III]  $\lambda$  436.3 nm were revealed in the database of the digital sky survey Sloan II (SDSS II —*

*the Sloan Digital Sky Survey). The intensities of the spectral lines were measured. The oxygen abundances in the H II regions were derived using these measurements. The parameters of the radial oxygen abundance distribution (the central oxygen abundance and slope of the radial gradient) in the discs of these galaxies were estimated. The position of these galaxies on the luminosity — metallicity diagram is examined.*

## ВВЕДЕНИЕ

Элементный состав межзвездной среды галактик определяется историей звездообразования в галактиках и обменом веществом между галактиками и окружающей средой. Влияние обмена веществом между галактиками и окружающей средой (галактический ветер, приток газа в галактику, слияние галактик) на химическую эволюцию галактик исследовалось во многих теоретических работах. В той или иной степени обмен веществом между галактикой и окружающей средой имеет место в процессе эволюции каждой галактики. В частности, для решения парадокса G-карликов рассматриваются различные варианты моделей химической эволюции с притоком газа в Галактику [29]. Рассматривается два типа моделей химической эволюции галактик с притоком газа. В моделях первого типа приток газа в галактику происходит непрерывно, темп притока газа монотонно (экспоненциально) понижается со временем. В моделях второго типа приток газа в галактику происходит эпизодически (порциями). Приток порции газа в галактику приводит к уменьшению содержания тяжелых элементов в межзвездной среде, и следовательно, к немонотонному увеличению содержания тяжелых элементов в межзвездной среде галактики со временем [25, 30].

Повышенная интенсивность обмена веществом между галактикой и окружающей средой (обмен газом между галактиками, слияние, инициированный приток газа из межгалактической среды) может происходить во взаимодействующих галактиках. Наиболее часто слияния и/или повышенный темп обмена газом во взаимодействующих галактиках имели место на ранних этапах эволюции Вселенной. Приток газа в галактику на ранних этапах ее эволюции очень слабо влияет на химический состав межзвездной среды галактики в современную эпоху [31]. Поэтому в современную эпоху химический состав межзвездной среды во взаимодействующих галактиках будет практически таким же, как и в изолированных галактиках, если обмен газом имел место в далеком прошлом и будет пониженным, если приток порции газа в галактику произошел в недалеком прошлом. В работах [33, 36] мы определили содержание кислорода в нескольких десятках галактик поздних типов (спиральных и неправильных) и построили диаграмму светимость — металличность. Было найдено, что содержание кислорода в межзвездной среде взаимодействующих галактик NGC 5194 (=M51, Whirlpool galaxy = галактика Водоворот) и NGC 5457 (= M101) такое же как в изолированных галактиках данной светимости. В то же время содержание кислорода в межзвездной среде взаимодействующей галактики NGC 4490 ниже, чем в других галактиках такой же светимости. Является ли галактика NGC 4490 исключительным случаем? Является ли пониженное содержание кислорода в межзвездной среде галактики NGC 4490 следствием притока порции газа в галактику в современную эпоху? Ситуацию можно прояснить путем определения химического состава в других взаимодействующих галактиках, в которых непосредственно наблюдается обмен газом.

Взаимодействие между галактиками NGC 4631 и NGC 4656 было обнаружено Робертсом [39], который построил карту излучения этих галактик в радиолинии водорода на длине волны 21 см. Было обнаружено, что эти галактики соединены «мостом» нейтрального водорода. Параметры моста нейтрального газа между галактиками NGC 4631 и NGC 4656 близки к параметрам Магелланова Потока между Галактикой и Магеллановыми Облаками [38, 46].

В базе данных цифрового обзора неба Sloan II (SDSS II, the Sloan Digital Sky Survey II) найдены спектры семи областей H II в галактиках NGC 4631 и NGC 4656. Однако при определении химического состава областей H II в близких галактиках на основе спектральных данных SDSS II возникает следующая проблема. Спектры SDSS II покрывают интервал длин волн от 380 до 920 нм. Поэтому спектры близких объектов (с красным смещением  $z \leq 0.02$ ) не содержат небулярной линии кислорода [O II]  $\lambda$  372.7 нм, которая используется для определения содержания иона O<sup>+</sup> в области H II. В работе [2] мы показали, что спектральные данные из SDSS, дополненные информацией о небулярной линии кислорода [O II]  $\lambda$  372.7 нм, найденной при помощи недавно обнаруженной зависимости между интенсивностями кислородных линий в спектрах областей H II (ff relation), позволяют определить содержания кислорода, которые сравнимы по точности с содержаниями, определенными при помощи стандартного  $T_e$ -метода.

Данная работа посвящена определению химического состава областей H II во взаимодействующих галактиках NGC 4631 и NGC 4656 на основе спектров из цифрового обзора неба Sloan II. Будет использована методология определения химического состава областей H II, описанная нами в работах [2, 33].

Далее мы будем использовать следующие обозначения:  $R_2 = I_{\text{OIII}\lambda 372.7 + \lambda 372.9} / I_{\text{H}\beta}$ ,  $R_3 = I_{\text{OIII}\lambda 495.9 + \lambda 500.7} / I_{\text{H}\beta}$ ,  $R = I_{\text{OIII}\lambda 436.3} / I_{\text{H}\beta}$ ,  $R_{23} = R_2 + R_3$ . С учетом этих обозначений параметр возбуждения  $P$  определяется как  $P = R_3 / (R_2 + R_3)$ .

#### ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГАЛАКТИК NGC 4631 И NGC 4656

**Фотометрические характеристики.** В табл. 1 приведены фотометрические характеристики галактики NGC 4656 согласно работам [7, 42, 43] и галактики NGC 4631 согласно [6, 7]. Эти данные будут использоваться в нашей работе.

**Расстояния.** Оценки расстояний до галактик NGC 4631 и NGC 4656 показывают большой разброс. Так, в разных работах приведены следующие значения расстояния до галактики NGC 4631:  $d = 4.4$  Мпк [6], 7.5 Мпк [12], 7.9 Мпк [43]. Все оценки расстояния до галактики NGC 4631 основываются на законе Хаббла, связывающем лучевую скорость галактики с расстоянием. Лучевая гелиоцентрическая скорость галактики NGC 4631 измерена достаточно надежно:  $V_{\text{HC}} = 630$  км/с [6] (по наблюдениям эмиссионных линий в оптическом диапазоне спектра),  $V_{\text{HC}} = 610$  км/с [38, 46] (по наблюдениям линии водорода 21 см). Расхождения в оценках расстояния до галактики NGC 4631 обусловлены двумя причинами. Во-первых, в разных работах принимались разные значения постоянной Хаббла  $H_0$ . Во-вторых, соотношение между расстоянием и лучевой скоростью галактики существенно зависит от принимаемой структуры поля скоростей во Вселенной. Так, согласно данным NED при фиксированном значении

Таблица 1. Основные характеристики галактик NGC 4631 и NGC 4656

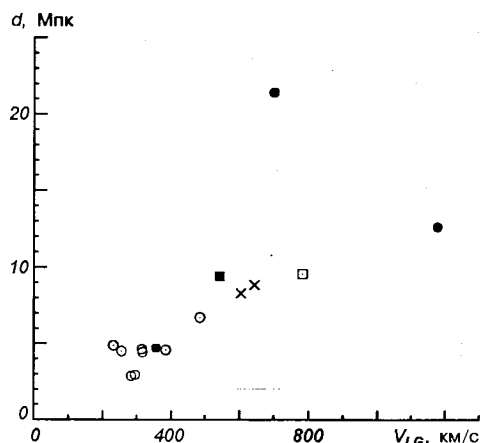
Характеристика	NGC 4631	NGC 4656
Координаты центра		
$\alpha_{2000}$	$12^h 42^m 08.01^s$	$12^h 43^m 57.73^s$
$\delta_{2000}$	$32^\circ 32' 29.4''$	$32^\circ 10' 05.3''$
Позиционный угол большой оси (PA)	$86^\circ$	$33^\circ$
Наклон $i$	$80^\circ$	$82^\circ$
Угловой изофотный радиус	$7.74'$	$7.57'$
Морфологический тип	SBcd	SBm pec
Морфологический T-код	$6.6 \pm 0.7$	$9.0 \pm 0.8$
$V_{rot}$	140 км/с	60 км/с
$m_B$	8.61	10.10
Принятое расстояние	8.3 Мпк	8.8 Мпк
$M_B$	-20.98	-19.62
$\lg(L_B/L_\odot)$	10.58	10.04
$\lg(L_{FIR}/L_\odot)$	9.83	8.56
Линейный изофотный радиус $R_{25}$	18.6 кпк	19.4 кпк

постоянной Хаббла  $H_0 = 73 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{Мпк}^{-1}$  и фиксированном значении  $V_{LG} = 604 \text{ км/с}$  лучевой скорости галактики NGC 4631 относительно местной группы галактик расстояние до галактики NGC 4631 составляет  $d = 8.28 \pm 0.58 \text{ Мпк}$  в рамках модели глобально однородного расширения Вселенной и  $11.9 \pm 0.87 \text{ Мпк}$  в системе отсчета относительно микроволнового (3 К) фонового излучения. Таким образом, оценки расстояния до галактики лежат в интервале от 4.4 Мпк до 12.0 Мпк.

Если галактика является членом группы галактик и если определены расстояния до других членов группы, то это позволяет оценить расстояние до данной галактики, так как расстояния до всех членов группы галактик должны быть близкими по определению. В первом каталоге групп галактик Вокулера [5] галактики NGC 4631 и NGC 4656 являются членами группы галактик G10 (Canes Venatici II Cloud). В более поздних каталогах групп галактик галактики NGC 4631 и NGC 4656 также являются членами группы галактик. Однако есть значительные разногласия относительно состава группы галактик NGC 4631. Согласно каталогу [5] достоверными членами группы NGC 4631 являются галактики NGC 4490, NGC 3675 и NGC 4051. Согласно каталогу [8] галактики NGC 4631 и NGC 4656 являются членами группы галактик, в состав которой входят также галактики NGC 4136, NGC 4278, NGC 4338, NGC 4393, NGC 4414, NGC 4448, NGC 4534, NGC 4559, NGC 4627 и UGC 7916. Согласно каталогу [9] галактики NGC 4631 и NGC 4656 являются членами группы галактик LGG 291, достоверными членами которой являются также галактики NGC 4214, NGC 4244, NGC 4395, UGC 7698, а вероятными членами — галактики NGC 4308, NGC 4150, NGC 4163, UGCA 276, IC 779, UGC 7605, MCG6-28-0, NGC 4190. Сравнение списков членов группы NGC 4631 из каталогов [5, 8, 9] показывает, что галактики NGC 4631 и NGC 4656 не имеют ни одного общего «достоверного» соседа в этих списках.

Таким образом, оценка расстояния до галактик NGC 4631 и NGC 4656 путем сравнения с расстояниями до других членов группы представляется весьма сомнительной. Можно полагать, что более надежная оценка рассто-

Рис. 1. Диаграмма «лучевая скорость — расстояние» для выборки галактик с измеренными расстояниями в направлении на галактики NGC 4631 и NGC 4656 (расстояния до галактик определены разными методами: точки — по цефеидам, темные квадратики — по флуктуации поверхностной яркости, светлые квадратики — при помощи метода «sosie», кружки — по светимости вершины ветви красных гигантов). Крестиками отмечены положения галактик NGC 4631 и NGC 4656 для случая изотропного расширения Вселенной



яния до галактик NGC 4631 и NGC 4656 может быть получена следующим образом. Диаграмма «лучевая скорость — расстояние» для выборки близких ( $d \leq 8$  Мпк) галактик в большой площадке неба в созвездии Гончих Псов построена И. Д. Караченцевым и др. [19]. Согласно найденной ими зависимости скорости галактики  $V_{LG} = 600$  км/с соответствует расстояние порядка 8 Мпк. Угловое расстояние от галактики NGC 4631 до наиболее удаленных членов группы в каталогах [8] и [9] составляет около  $8^\circ$ . Мы составили выборку галактик, угловые расстояния которых от галактики NGC 4631 не превышают  $8^\circ$ , и расстояния до которых измерены более или менее надежным методом. Выборка включает: 1) три галактики NGC 4725 [11], NGC 4414 [41], IC 4182 [41], расстояния до которых измерены при помощи цефеид; 2) галактику NGC 4627, расстояние до которой определено при помощи метода флуктуаций поверхностной яркости [45]; 3) галактику NGC 4490, расстояние до которой определено при помощи метода «sosie» [44]; 4) галактики NGC 4214, NGC 4244, NGC 4395, DDO 113, DDO 126, DDO 141, UGC 7605 и Arp 211, расстояния до которых определены по светимости вершины ветви красных гигантов [18]. Диаграмма «лучевая скорость — расстояние» для этой выборки галактик приведена на рис. 1. Здесь разными значками показаны галактики, расстояния до которых определены разными методами. Эта диаграмма, построенная нами для галактик из малой площадки неба, и диаграмма, построенная И. Д. Караченцевым и др. для галактик из значительно большей площадки неба, находятся в согласии до расстояний 10—15 Мпк. Положения галактик NGC 4631 и NGC 4656 на рис. 1 показаны крестиками для случая изотропного расширения Вселенной.

Рис. 1 можно интерпретировать как своего рода локальную калибровку соотношения «лучевая скорость — расстояние» для галактик в направлении на галактики NGC 4631 и NGC 4656. Он показывает, что значения расстояний до галактик NGC 4631 и NGC 4656, определенные для случая изотропного расширения (крестики), не противоречат зависимости «лучевая скорость — расстояние» для галактик с измеренными расстояниями. Эти расстояния (8.28 Мпк для NGC 4631 и 8.82 Мпк для NGC 4656) будут использованы в данной работе.

**Светимость.** При принятых значениях расстояния и видимой звездной величины галактика NGC 4631 имеет абсолютную звездную величину  $M_B = -20.98^m$  и светимость  $\lg(L_B/L_\odot) = 10.58$ , а галактика NGC 4656 —

абсолютную звездную величину  $M_B = -19.62^m$  и светимость  $\lg(L_B/L_\odot) = 10.04$ . Если модель, в которой учитываются отклонения от глобально однородного расширения Вселенной из-за скопления галактик в Деве и Великого Аттрактора дает более реалистичные расстояния до галактик NGC 4631 и NGC 4656, то наши значения абсолютной яркости для этих галактик завышены примерно на  $0.2^m$ .

Для определения светимости галактик NGC 4631 и NGC 4656 в дальнем ИК-диапазоне были использованы потоки излучения галактик на длине волны 60 и 100 мкм, приведенные в каталоге IRAS Point Source Catalog. Расчеты светимостей, проведенные согласно [14], хорошо представляют излучение галактик в диапазоне  $\lambda\lambda = 42.5...122.5$  мкм. С учетом расстояний до галактик, приведенных в табл. 1, получены значения светимости галактик в дальнем ИК-диапазоне  $\lg(L_{FIR}/L_\odot) = 9.83$  для NGC 4631 и  $\lg(L_{FIR}/L_\odot) = 8.56$  для NGC 4656.

Линейные размеры галактик весьма велики. Радиус галактики NGC 4631 составляет  $R_{25} = 18.6$  кпк, радиус галактики NGC 4656 составляет  $R_{25} = 19.4$  кпк.

#### СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА

**Спектральные данные.** В базе спектральных данных SDSS II мы нашли пять областей H II в диске галактики NGC 4631 и три области H II в диске галактики NGC 4656, в спектрах которых есть авроральная линия кислорода [O III]  $\lambda$  436.3 нм. Однако в спектре 1975-53734-421 области SDSS124201.17 + 323216.5 в галактике NGC 4631 небулярные линии кислорода [O III]  $\lambda$  495.9 нм и [O III]  $\lambda$  500.7 нм имеют дефект (отсутствует вершина линии), поэтому этот спектр был исключен. Список исследованных областей H II в галактиках NGC 4631 и NGC 4656 приведен в табл. 2. Для удобства каждой области H II мы присвоили краткий номер (2-я графа). В последней графе приведены галактоцентрические расстояния  $R_G$  областей H II, которые были вычислены с использованием координат областей H II (3-я графа). Координаты центра галактики, позиционный угол большой оси и наклон (угол между плоскостью галактики и картинной плоскостью) приведены в табл. 1.

В спектрах областей H II измерены и исправлены за покраснение интенсивности эмиссионных линий [O III]  $\lambda$  436.3 нм, [O III]  $\lambda$  495.9 нм, [O III]  $\lambda$  500.7 нм, [S III]  $\lambda$  631.2 нм, [S II]  $\lambda$  671.7 нм, [S II]  $\lambda$  673.1 нм, [O II]  $\lambda$  732.0 нм, [O II]  $\lambda$  733.0 нм, [S III]  $\lambda$  906.8 нм, [S III]  $\lambda$  953.2 нм.

Таблица 2. Список исследованных областей H II в галактиках NGC 4631 и NGC 4656

Галактика	Номер области H II	Координаты области H II	Номер спектра в SDSS	$R_G$
NGC 4631	1a	$12^h41^m55.70^s$ $32^\circ32'08.3''$	1975 53734 424	0.36
	2a	$12^h41^m45.76^s$ $32^\circ32'00.5''$	1975 53734 422	0.62
	3a	$12^h42^m20.60^s$ $32^\circ31'48.8''$	1975 53734 432	0.72
	4a	$12^h41^m40.24^s$ $32^\circ31'54.7''$	1975 53734 398	0.77
NGC 4656	1b	$12^h43^m56.69^s$ $32^\circ10'14.6''$	1975 53734 498	0.25
	2b	$12^h44^m05.97^s$ $32^\circ12'32.3''$	1975 53734 494	0.41
	3b	$12^h43^m48.71^s$ $32^\circ08'13.7''$	1975 53734 467	0.65

Таблица 3. Интенсивности\* линий в спектрах областей Н II в галактиках NGC 4631 и NGC 4656

Номер области Н II	[O III] λ 436.3	[O III] λ 495.9+500.7	[S III] λ 631.2	[S II] λ 671.7	[S II] λ 673.1	[O II] λ 732.0+733.0	[S III] λ 906.8+953.2
1a	0.0271 ±0.0109	2.807 ±0.027	0.0127 ±0.0063	0.453 ±0.005	0.332 ±0.005	0.0537 ±0.0121	0.662 ±0.030
2a	0.0184 0.0035	4.007 0.046	0.0140 0.0038	0.241 0.003	0.176 0.003	0.0418 0.0069	0.828 0.012
3a	0.0305 0.0092	5.053 0.058	0.0126 0.0070	0.193 0.010	0.132 0.006	0.0400 0.0240	0.555 0.043
4a	0.0339 0.0027	4.856 0.045	0.0172 0.0043	0.342 0.002	0.240 0.002	0.0719 0.0068	0.814 0.018
1b	0.0836 0.0024	9.148 0.124	0.0176 0.0043	0.114 0.003	0.080 0.002	0.0295 0.0043	0.676 0.008
2b	0.0600 0.0026	4.616 0.035	0.0123 0.0038	0.138 0.002	0.100 0.002	0.0454 0.0062	0.308 0.008
3b	0.0961 0.0021	7.030 0.055	0.0179 0.0018	0.124 0.002	0.082 0.002	0.0351 0.0059	0.473 0.014

\* Интенсивности линий исправлены за покраснение и нормированы на интенсивность линии  $H_{\beta}$

Таблица 4. Электронная температура  $t_3$  и содержание кислорода ( $Z = 12 + \lg(O/H)$ ) в областях Н II в галактиках NGC 4631 и NGC 4656 (1D — величины, определенные с использованием одномерного соотношения  $t_2 - t_3$ , 2D — с использованием двумерного (параметрического) соотношения  $t_2 - t_3$ )

Номер области Н II	$t_3(O)$	$t_3(S)$	$t_2$ 2D	$t_2$ 1D	$Z_{732.5}$ 2D	$Z_{732.5}$ 1D	$Z_{ff}$ 2D	$Z_{ff}$ 1D
1a	1.268±0.423	1.104±0.195	0.945	1.011	8.392*	8.266*	8.417*	8.325*
2a	0.989±0.068	1.048±0.099	0.996	0.972	8.331	8.363	8.308	8.328
2a	1.077±0.160	1.190±0.252	1.048	1.035	8.253	8.266	8.257	8.266
4a	1.129±0.033	1.150±0.110	1.046	1.073	8.338	8.300	8.256	8.233
1b	1.243±0.014	1.266±0.128	1.179	1.155	8.183	8.192	8.195	8.202
2b	1.431±0.027	1.588±0.236	...	1.290	...	7.838	...	...
3b	1.462±0.014	1.537±0.079	...	1.313	...	7.905	...	...

Примечание. Содержание  $Z$  кислорода для области 1a определялось с использованием  $t_3(S)$  (отмечено звездочками), а для других областей — с использованием  $t_3(O)$

Методика измерения линий и редукиции за покраснение описана в работе [33]. Исправленные за покраснение интенсивности линий приведены в табл. 3. Интенсивности нормированы на интенсивность линии  $H_{\beta}$ .

**Электронная температура.** Электронная температура  $t_3(O)$  в зоне свечения  $O^{++}$  определялась по отношению интенсивностей авроральных [O III] λ 436.3 нм и небулярных [O III] λ 495.9 + 500.7 нм линий иона кислорода  $O^{++}$ . Соответствующее уравнение взято из работы [16]. Электронная концентрация находилась по отношению интенсивностей линий серы [S II] λ 671.7 нм и [S II] λ 673.1 нм. Найденные значения  $t_3(O)$  приведены в табл. 4 (графа 2). Была также определена электронная температура  $t_3(S)$  в зоне свечения  $S^{++}$  по отношению интенсивностей авроральных [S III]

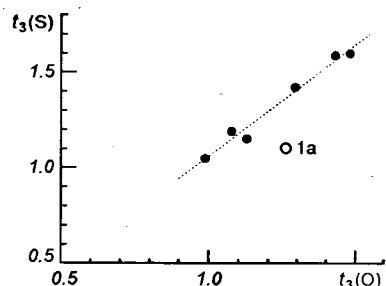


Рис. 2. Соотношение между электронными температурами  $t_3(O)$  и  $t_3(S)$ , определенными по отношению интенсивностей авроральных и небулярных линий  $O^{++}$  и  $S^{++}$  соответственно в областях Н II в галактиках NGC 4631 и NGC 4656. Область 1a показана кружком, остальные области — точками. Линия — МНК-аппроксимация (область 1a исключена)

$\lambda$  631.2 нм и небулярных  $[S III] \lambda$  906.8 + 953.2 нм линий иона серы  $S^{++}$ . Соответствующее уравнение получено на основе соотношений, взятых из работы [23]. Соотношение между электронной температурой  $t_3(O)$  и электронной температурой  $t_3(S)$  в областях Н II в галактиках NGC 4631 и NGC 4656 представлено на рис. 2. Следует подчеркнуть, что атомные параметры ионов кислорода установлены достаточно надежно. Соотношения между электронной температурой и интенсивностями линий кислорода  $t_3 = f([O III] \lambda$  463.3 нм,  $\lambda$  495.9 + 500.7 нм), полученные с использованием атомных параметров из разных работ, дают близкие значения электронной температуры  $t_3(O)$  (см. [32]). В то же время значения атомных параметров ионов серы известны плохо. Соотношения между электронной температурой и интенсивностями линий серы  $t_3 = f([S III] \lambda$  631.2 нм,  $[S III] \lambda$  906.8 + 953.2 нм), полученные с использованием атомных параметров из разных работ, существенно различаются [13, 24]. Поэтому наши значения  $t_3(S)$  могут содержать значительную систематическую ошибку. Здесь мы используем диаграмму  $t_3(S) - t_3(O)$  только для оценки случайных ошибок  $t_3(S)$  и/или  $t_3(O)$ , поэтому возможная систематическая ошибка значений  $t_3(S)$  не играет роли.

Рис. 2 показывает, что значения  $t_3(S)$  и  $t_3(O)$  для шести областей Н II тесно коррелируют. Прямая линия получена МНК-аппроксимацией зависимости  $t_3(O) - t_3(S)$ . Видно, что положение области 1a существенно отклоняется от общей зависимости. Анализ табл. 3 (см. также табл. 4) позволяет предположить, что отклонение положения области 1a от общей зависимости  $t_3(S)$  от  $t_3(O)$  обусловлено большой ошибкой в измерении авроральной линии кислорода  $[O III] \lambda$  436.3 нм, т.е. значение электронной температуры  $t_3(S)$  в области 1a представляется более надежным, чем значение электронной температуры  $t_3(O)$ . Итак, с одной стороны, авроральная линия серы измерена в области 1a более надежно, чем авроральная линия кислорода. С другой стороны, значения  $t_3(S)$  могут содержать значительную систематическую ошибку. Поэтому мы не будем использовать значение  $t_3(S)$  непосредственно для определения химического состава области 1a, а используем измерения линий серы для определения электронной температуры  $t_3(O)$  (для оценки интенсивности авроральной линии кислорода  $[O III] \lambda$  436.3 нм). Значение электронной температуры  $t_3(O)$  можно оценить, исходя из найденного значения электронной температуры  $t_3(S)$  и зависимости  $t_3(S)$  от  $t_3(O)$ . Затем можно найти интенсивность авроральной линии кислорода  $[O III] \lambda$  436.3 нм по значению электронной температуры  $t_3(O)$  и соотношению между электронной температурой и интенсивностями линий кислорода  $t_3 = f([O III] \lambda$  436.3 нм,  $[O III] \lambda$  495.9 + 500.7 нм). Полученное таким способом значение  $I_{[O III] \lambda 436.3} / I_{H\beta} = 0.0153$  будет использо-



вано для определения содержания кислорода в области 1a в галактике NGC 4631.

Электронная температура  $t_2$  в зоне свечения  $O^+$  обычно находится из соотношений, связывающих  $t_2$  и  $t_3$ . Эти соотношения получены в ряде работ [3, 4, 10, 17, 22, 23] на основе численных моделей областей Н II. Модельно-независимое соотношение

$$t_2 = 0.72t_3 + 0.26 \quad (1)$$

получено в работе [37]. В недавней работе [28] показано, что нет однозначного соответствия между  $t_2$  и  $t_3$ , соотношение между  $t_2$  и  $t_3$  зависит от параметра возбуждения  $P$  области Н II, т. е. является параметрическим (двумерным):

$$\frac{1}{t_2} = 0.41 \frac{1}{t_3} - 0.34P + 0.81. \quad (2)$$

Мы определили химический состав исследуемых областей Н II с использованием как одномерного, так и двухмерного соотношений (табл. 4).

**Содержание кислорода.** При определении химического состава областей Н II в близких галактиках на основе спектральных данных SDSS возникает следующая проблема. Спектры SDSS покрывают интервал длин волн от  $\lambda = 380$  нм до  $\lambda = 920$  нм. Поэтому спектры близких объектов (с красным смещением  $z \leq 0.02$ ) не содержат небулярной линии кислорода [O II]  $\lambda$  372.7 нм, которая используется для определения содержания иона  $O^+$  в области Н II. В работах [16, 20] для определения содержания иона  $O^+$  в области Н II использовались авроральные линии кислорода [O II]  $\lambda$  732 и 733 нм вместо небулярной линии кислорода [O II]  $\lambda$  372.7 нм. В принципе использование авроральных линий кислорода [O II]  $\lambda$  732 и 733 нм для определения содержания иона  $O^+$  в области Н II представляется оправданным в той же степени, как и использование небулярной линии кислорода [O II]  $\lambda$  372.7 нм. Значения содержания кислорода, найденные с использованием авроральных линий кислорода [O II]  $\lambda$  732, 733 нм для определения содержания иона  $O^+$ , мы будем обозначать  $(O/H)_{732.5}$ . Однако в спектрах SDSS интенсивности слабых авроральных линий кислорода [O II]  $\lambda$  732 + 733 нм часто измеряются с низкой точностью [16], и содержания  $(O/H)_{732.5}$  могут иметь заметную ошибку. Поэтому содержания кислорода определялись также при помощи другого метода.

В типичном случае при определении химического состава областей Н II в спиральных галактиках исследователь сталкивается с ситуацией, когда измерены интенсивности  $R_2$  и  $R_3$  сильных небулярных линий кислорода, а интенсивность  $R$  слабой авроральной линии кислорода не превышает порог обнаружения. Это препятствует применению классического  $T_e$ -метода для определения химического состава области Н II. Эта проблема была исследована в наших работах [27, 33]. Было показано, что есть однозначное соответствие между интенсивностями небулярных и авроральных линий в спектрах областей Н II (ff relation). Другими словами, было показано, что интенсивность  $R$  слабой авроральной линии кислорода может быть вычислена по измеренным интенсивностям  $R_2$  и  $R_3$  сильных небулярных линий кислорода.

В случае нашей выборки областей Н II мы измерили интенсивности  $R_3$  и  $R$ , но в спектрах SDSS линия  $R_2$  лежит за пределами исследованного спектрального диапазона. Если интенсивность  $R$  может быть вычислена по

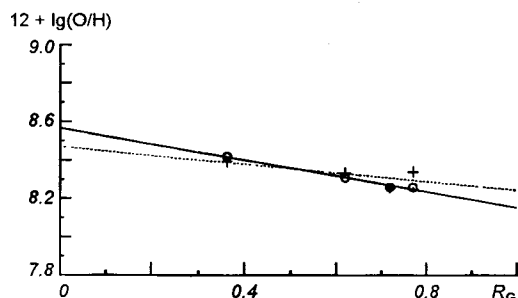


Рис. 3. Радиальное распределение содержания кислорода в диске галактики NGC 4631: кружки — значения  $(O/H)_{ff}$ , крестики — значения  $(O/H)_{732.5}$  в областях H II, сплошная и пунктирная линии — соответствующие МНК-аппроксимации (4) и (5)

измеренным интенсивностям  $R_2$  и  $R_3$ , то мы вправе ожидать, что и интенсивность  $R_2$  также может быть вычислена по измеренным интенсивностям  $R_3$  и  $R$ . В работе [2] получено соотношение

$$\lg R_2 = 3.55 - 1.11 \lg R_3 - 0.93 (\lg R_3)^2 + 1.46 \lg R + 0.119 (\lg R)^2. \quad (3)$$

Используя это уравнение, мы вычислили интенсивность  $R_2$  для областей H II из нашей выборки, в которых  $12 + \lg(O/H)_{732.5} > 8.20$ . Значения  $R_2$  для областей H II с низким содержанием кислорода нельзя определить таким способом по следующей причине. Уравнение (3) получено для областей H II с высоким содержанием кислорода ( $12 + \lg(O/H) > 8.20$ ). Применение уравнения (3) к областям H II с низким содержанием кислорода привело бы к неправильным значениям содержания кислорода и к появлению ложного изгиба в наклоне радиального распределения кислорода [26]. Содержания кислорода, найденные таким способом, мы будем обозначать  $(O/H)_{ff}$ . Так как значение  $R_2$  (и параметра возбуждения  $P$ ) может быть вычислено только для областей H II с содержанием кислорода  $12 + \lg(O/H) > 8.20$ , то и значение электронной температуры  $t_2$  с использованием параметрического (двумерного) соотношения  $t_2$  и  $t_3$  может быть получено только для областей H II с содержанием кислорода  $12 + \lg(O/H) > 8.20$ . Поэтому для областей 2b и 3b в табл. 4 приведено только одно значение электронной температуры  $t_2$ , найденное с использованием одномерного соотношения  $t_2 - t_3$ , и только одно значение содержания кислорода.

**Радиальный градиент содержания кислорода в дисках галактик NGC 4631 и NGC 4656.** Значения содержаний кислорода  $(O/H)_{ff}$  и  $(O/H)_{732.5}$  были получены с использованием двумерного параметрического соотношения (2) между температурами  $t_2$  и  $t_3$  в зонах свечения  $O^+$  и  $O^{++}$  соответственно. Радиальное распределение содержания кислорода  $(O/H)_{ff}$  в диске галактики NGC 4631 показано на рис. 3 кружками. Сплошной линией показана линейная аппроксимация

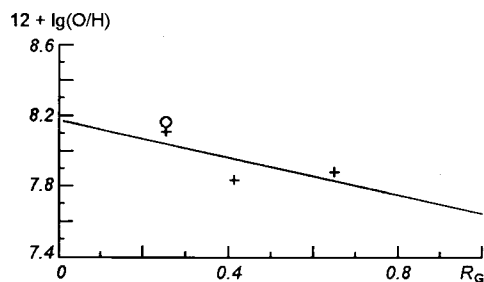
$$12 + \lg(O/H)_{ff} = 8.56 \pm 0.02 - (0.41 \pm 0.03)R_G, \quad (4)$$

полученная методом наименьших квадратов. Радиальное распределение содержания кислорода  $(O/H)_{732.5}$  в диске галактики NGC 4631 показано на рис. 3 крестиками, а соответствующая аппроксимация имеет вид

$$12 + \lg(O/H)_{732.5} = 8.46 \pm 0.10 - (0.23 \pm 0.15)R_G, \quad (5)$$

(пунктирная линия). Сравнение уравнений (4) и (5) показывает, что параметры радиального распределения  $(O/H)_{ff}$  и  $(O/H)_{732.5}$  (содержание кислорода в центре диска и радиальный градиент) согласуются в пределах ошибок. Стандартное отклонение содержаний  $(O/H)_{ff}$  в индивидуальных

Рис. 4. Радиальное распределение содержания кислорода в диске галактики NGC 4656: крестики — значения  $(O/H)_{732.5}$  (1D), линия — их МНК-аппроксимация, кружок — значение  $(O/H)_{ff}$  (2D) в области 1b (см. текст)



областях Н II от полученной зависимости составляет 0.007 dex, а содержащий  $(O/H)_{732.5}$  — 0.034 dex. Это подтверждает вывод [33] о том, что наиболее надежными являются значения содержаний кислорода  $(O/H)_{ff}$ , полученные с использованием двумерного соотношения  $t_2 - t_3$ .

Несмотря на то, что формальная точность параметров радиального распределения  $(O/H)_{ff} - R_G$  весьма высокая, и радиальные распределения содержаний кислорода, определенные двумя методами, удовлетворительно согласуются друг с другом, найденные нами значения параметров радиального распределения содержания кислорода в диске галактики NGC 4631 не являются бесспорными. Во-первых, количество областей Н II, в которых определено содержание кислорода, мало. Во-вторых, интервал галактоцентрических расстояний, в котором расположены эти области Н II, покрывает меньше половины изофотного радиуса диска галактики. Более того, надежность определения галактоцентрических расстояний областей Н II в диске галактики NGC 4631 сравнительно низка, поскольку угол наклона плоскости галактики к картинной плоскости велик (табл. 1).

Радиальное распределение содержания кислорода в диске галактики NGC 4656 показано на рис. 4. Содержание кислорода  $(O/H)_{732.5}$  рассчитано для одномерного соотношения  $t_2 - t_3$  (уравнение (1)) в областях Н II (крестики). Соответствующая МНК-аппроксимация имеет вид

$$12 + \lg(O/H)_{732.5} = 8.18 \pm 0.24 - (0.53 \pm 0.51)R_G \quad (6)$$

(пунктирная линия). Стандартное отклонение содержаний кислорода в индивидуальных областях Н II от полученной зависимости составляет 0.083 dex. Полученное содержание кислорода  $(O/H)_{732.5}$  в области 1b в галактике NGC 4656 близко к значению  $12 + \lg(O/H)_{732.5} = 8.20$ . В этом случае можно использовать уравнение (3) для определения значения  $R_2$ . Следовательно, для области 1b можно найти как значение электронной температуры  $t_2$  с использованием параметрического соотношения (2), так и содержание кислорода  $(O/H)_{ff}$  (на рис. 4 показано кружком). Поскольку область 1b является областью Н II высокого возбуждения, то содержания кислорода  $(O/H)_{732.5}$  (1D) и  $(O/H)_{ff}$  (2D) в области 1b согласуются между собой.

В работе [21] приведено содержание кислорода в галактике NGC 4656 (неопубликованные измерения Талента), равное  $12 + \lg(O/H) = 7.93$ . К сожалению, нам неизвестно, к какой области Н II относятся измерения Талента. Поэтому мы можем только отметить, что это значение близко к найденным нами значениям содержания кислорода в областях 2b ( $12 + \lg(O/H) = 7.84$ ) и 3b ( $12 + \lg(O/H) = 7.91$ ) и ниже, чем значение содержания кислорода в области 1b ( $12 + \lg(O/H) = 8.19$ ).

## ОБСУЖДЕНИЕ

**Диаграмма светимость — металличность.** Диаграмма «светимость — металличность (содержание кислорода)» для спиральных и неправильных галактик представлена на рис. 5. Для спиральных галактик показано содержание кислорода в центре диска. Светимость галактики NGC 4490  $M_B = -20.09^m$  найдена с использованием значения видимой звездной величины в полосе  $B$ , исправленной за поглощение и наклон галактики,  $m_B = 9.81^m$  [6] и значения расстояния  $d = 9.55$  Мпк, определенного при помощи метода «sosie» [44]. Рис. 5 показывает, что взаимодействующие галактики NGC 4631, NGC 4656 и NGC 4490 лежат на нижней границе (или ниже) полосы, занимаемой спиральными и неправильными галактиками на диаграмме светимость — металличность.

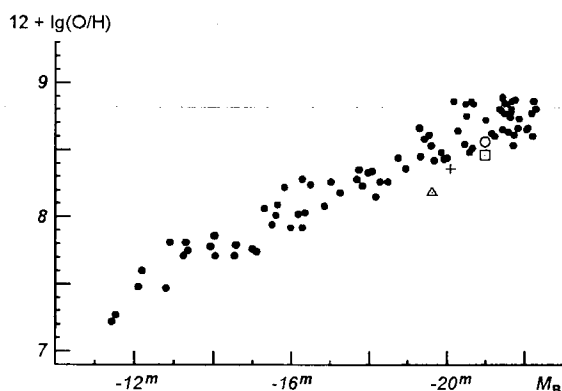


Рис. 5. Диаграмма «светимость — металличность (содержание кислорода)» для спиральных и неправильных галактик. Для спиральных галактик показано содержание кислорода в центре диска: точки — галактики из [33, 35, 36]; кружок — NGC 4631 ( $(O/H)_{ff}$  (2D)), квадрат — NGC 4631 ( $(O/H)_{732.5}$  (2D)), треугольник — NGC 4656 ( $(O/H)_{732.5}$  (1D)), крестик — NGC 4490 ( $(O/H)_{ff}$  (2D)) [33]

Смещение взаимодействующих галактик на диаграмме светимость — металличность может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, содержание кислорода во взаимодействующих галактиках может быть ниже содержания кислорода в «изолированных» галактиках такой же светимости из-за притока в галактику межгалактического газа с низким содержанием тяжелых элементов (смещение в сторону низких металличностей). Во-вторых, светимость взаимодействующих галактик может быть временно повышена, если взаимодействие приводит к повышению темпа звездообразования в современную эпоху (смещение в сторону высоких светимостей). Следует отметить, что галактика NGC 4631 классифицируется как галактика с умеренной вспышкой звездообразования [12].

Чтобы выяснить причину смещения взаимодействующих галактик на диаграмме светимость — металличность, мы оценили темп звездообразования в современную эпоху в галактиках NGC 4631 и NGC 4656 и сравнили с темпом звездообразования в изолированных галактиках и галактиках Маркаряна. Скорости текущего звездообразования  $SFR_{FIR}$  (усреднены за период около 3 млн лет) исследуемых галактик были определены согласно [15] по светимости галактик в дальнем ИК-диапазоне. При вычислении  $SFR_{FIR}$  принята начальная функция масс звезд Солпитера с диапазоном масс звезд  $(0.1...100)M_{\odot}$ . Получено, что  $SFR_{FIR} = 4.4 M_{\odot}/\text{год}$  для NGC 4631 и  $0.23 M_{\odot}/\text{год}$  для NGC 4656. В то же время медианы скоростей текущего звездообразования изолированных галактик и галактик Н II из Первого Бюраканского обзора с излучением в дальнем ИК-диапазоне равны соответ-

ственно  $SFR_{FIR} = 3.5 M_{\odot}/\text{год}$  [1] и  $16.1 M_{\odot}/\text{год}$  [15] (при значении постоянной Хаббла  $H_0 = 75 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}\text{Мпк}^{-1}$ ). Таким образом, галактики NGC 4631 и NGC 4656 не показывают высокого темпа звездообразования в современную эпоху. Смещение этих галактик на диаграмме светимость — металличность обусловлено пониженным содержанием кислорода в межзвездной среде.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В базе данных цифрового обзора неба Sloan II найдены спектры семи областей H II (четыре области H II в галактике NGC 4631 и три области H II в галактике NGC 4656), в которых есть авроральная линия кислорода [O III]  $\lambda$  436.3 нм. Проведены измерения интенсивностей спектральных линий. Эти данные использованы для определения содержания кислорода в областях H II.

Определено содержание кислорода в областях H II во взаимодействующих галактиках NGC 4631 и NGC 4656. Оценены параметры радиального распределения содержания кислорода (содержание кислорода в центре диска и радиальный градиент) в дисках этих галактик.

Взаимодействующие галактики NGC 4631 и NGC 4656 лежат на нижней границе (или ниже) полосы, занимаемой спиральными и неправильными галактиками на диаграмме светимость — металличность. Смещение этих галактик на диаграмме светимость — металличность обусловлено пониженным содержанием кислорода в межзвездной среде.

Авторы благодарны Ю. И. Изотову за полезные обсуждения.

Авторы благодарят международный коллектив ученых за их огромный труд по созданию базы данных SDSS, которая была использована при выполнении данного исследования.

Данная работа была частично финансирована в рамках программы «Космомикрофизика» Национальной академии наук и Национального космического агентства Украины.

1. Изотова И. Ю., Парновский С. Л., Тютюнник А. А. Изолированные галактики: излучение в дальнем инфракрасном диапазоне, скорость и эффективность текущего звездообразования // *Кинематика и физика небес. тел.*—2006.—22, № 3.—Р. 187—203.
2. Шолудченко Ю. С., Изотова И. Ю., Пилюгин Л. С. Содержание кислорода в областях H II спиральной галактики M101 на основе спектров из цифрового обзора неба Sloan // *Кинематика и физика небес. тел.*—2007.—23, № 4.—Р. 230—240.
3. Campbell A., Terlevich R., Melnick J. The stellar populations and evolution of H II galaxies. I. High signal-to-noise optical spectroscopy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1986.—223, N 4.—Р. 811—825.
4. Deharveng L., Peña M., Caplan J., Costero R. Oxygen and helium abundances in Galactic H II regions—II. Abundance gradients // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2000.—311, N 2.—Р. 329—345.
5. de Vaucouleurs G. Nearby groups of galaxies // *Stars and Stellar Systems (chapter 14)* / Eds A. Sandage, M. Sandage, J. Kristian J. — Chicago: Univ. Chicago Press, 1965.—Р. 557—600.
6. de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A. Rotation and mass of the Magellanic-type galaxy NGC 4631 // *Astrophys. J.*—1963.—137, N 2.—Р. 363—375.
7. de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corvin H. G., et al. Third Reference Catalog of Bright Galaxies. — New York: Springer, 1991.
8. Fouque P.,ourgoulhon E., Chamaraux P., Paturel G. Groups of galaxies within 80 Мпк. II. The catalogue of groups and group members // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1992.—93, N 2.—Р. 211—233.

9. Garcia A. M. General study of group membership. II. Determination of nearby groups // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1993.—100, N 1.—P. 47—90.
10. Garnett D. R. Electron temperature variations and the measurement of nebular abundances // *Astron. J.*—1992.—103, N 4.—P. 1330—1337.
11. Gibson B. K., Hughes S. M. G., Stetson P. B., et al. The Hubble Space Telescope Key Project on the extragalactic distance scale. XVII. The Cepheid distance to NGC 4725 // *Astrophys. J.*—1999.—512, N 1.—P. 48—64.
12. Golla G., Wielebinski R. CO emission in NGC 4631: evidence for a mild starburst // *Astron. and Astrophys.*—1994.—286, N 3.—P. 733—747.
13. Hägele G., Perez-Montero E., Diaz A. I., Terlevich E., Terlevich R. The temperature and ionization structure of the emitting gas in H II galaxies: implications for the accuracy of abundance determinations // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—372, N 1.—P. 293—312.
14. IRAS catalog and Atlases: Explanatory Supplement / Eds C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al. — Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1988.—80 p.
15. Izotova I., Parnovsky S. Star formation rate in Markarian galaxies // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.*—2000.—N 3.—P. 99—100.
16. Izotov Y. I., Stasińska G., Meynet G., et al. The chemical composition of metal-poor emission-line galaxies in the Data Release 3 of the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2006.—448, N 3.—P. 955—970.
17. Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A. The primordial helium abundance: systematic effects and a new determination // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1993.—108, N 1.—P. 1—39.
18. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Huchtmeier W. K., Makarov D. I. A catalog of neighboring galaxies // *Astron. J.*—2004.—127, N 4.—P. 2031—2068.
19. Karachentsev I. D., Sharina M. E., Dolphin A. E., et al. Galaxy flow in the Canes Venatici I cloud // *Astron. and Astrophys.*—2003.—398, N 2.—P. 467—477.
20. Kniazev A. Y., Grebel E. K., Hao L., et al. Discovery of eight new extremely metal-poor galaxies in the SLOAN Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2003.—593, N 2.—P. 73L—77L.
21. Matteucci F., Tosi M. Nitrogen and oxygen evolution in dwarf irregular galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1985.—217, N 2.—P. 391—405.
22. Oey M. S., Shields J. C. Calibration of nebular emission-line diagnostics. II. Abundances // *Astrophys. J.*—2000.—539, N 2.—P. 687—705.
23. Pagel B. E. J., Simonson E. A., Terlevich R. J., Edmunds M. G. The primordial helium abundance from observations of extragalactic H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1992.—255, N 2.—P. 325—345.
24. Perez-Montero E., Diaz A. I. Line temperatures and elemental abundances in H II galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—346, N 1.—P. 105—118.
25. Pilyugin L. S. Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. III. Is the disk formed through mergers of fragments? // *Astron. and Astrophys.*—1996.—313, N 3.—P. 803—809.
26. Pilyugin L. S. The bends in the slopes of radial abundance gradients in the disks of spiral galaxies—Do they exist? // *Astron. and Astrophys.*—2003.—397, N 1.—P. 109—114.
27. Pilyugin L. S. On the relationship between auroral and nebular oxygen line intensities in spectra of H II regions // *Astron. and Astrophys.*—2005.—436, N 1.—P. 1L—4L.
28. Pilyugin L. S. On the electron temperature determination in high-metallicity H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—375, N 2.—P. 685—690.
29. Pilyugin L. S., Edmunds M. G. Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. I. On the infall model of galactic chemical evolution // *Astron. and Astrophys.*—1996.—313, N 3.—P. 783—791.
30. Pilyugin L. S., Edmunds M. G. Chemical evolution of the Milky Way Galaxy. II. On the origin of scatter in the age-metallicity relation // *Astron. and Astrophys.*—1996.—313, N 3.—P. 792—802.
31. Pilyugin L. S., Ferrini F. On the oxygen abundance deficiency in spiral galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1998.—336, N 1.—P. 103—115.
32. Pilyugin L. S., Thuan T. X. Oxygen abundance determination in H II regions: the strong line intensities—abundance calibration revisited // *Astrophys. J.*—2005.—631, N 1.—P. 231—243.
33. Pilyugin L. S., Thuan T. X. The oxygen abundance of nearby galaxies from Sloan Digital Sky Survey spectra // *Astrophys. J.*—2007.—669, N 1.—P. 299—314.
34. Pilyugin L. S., Thuan T. X., Vilchez J. M. Oxygen abundance in the most oxygen-rich spiral galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—367, N 3.—P. 1139—1146.
35. Pilyugin L. S., Thuan T. X., Vilchez J. M. On the maximum value of the cosmic abundance of oxygen and the oxygen yield // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—376, N 1.—P. 353—360.
36. Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Contini T. Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties // *Astron. and Astrophys.*—

- 2004.—425, N 3.—P. 849—871.
37. *Pilyugin L. S., Vilchez J. M., Thuan T. X.* On the relation between electron temperatures in the  $O^+$  and  $O^{++}$  zones in high-metallicity H II regions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—370, N 4.—P. 1928—1934.
  38. *Rand R. J.* Atomic hydrogen in the NGC 4631 group of galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1994.—285, N 3.—P. 833—856.
  39. *Roberts M. S.* Neutral hydrogen observations of the binary galaxy system NGC 4631/4656. // *Astrophys. J.*—1968.—151, N 1.—P. 117—131.
  40. *Roy L.-R., Wang J., Arsenault R.* Is NGC 4631 a barred spiral galaxy? // *Astron. J.*—1991.—101, N 3.—P. 825—828.
  41. *Saha A., Thin F., Tamman G. A., et al.* Cepheid distances to SNe Ia host galaxies based on a revised photometric zero point of the HST WFPC2 and new PL relations and metallicity corrections // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2006.—165, N 1.—P. 108—137.
  42. *Stayton L. C., Angione R. J., Talbert F. D.* Surface photometry of NGC 4656/4657 // *Astron. J.*—1983.—88, N 5.—P. 602—609.
  43. *Swaters R. A., Balcells M.* The Westerbork HI survey of spiral and irregular galaxies II. R-band surface photometry of late-type dwarf galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2002.—390, N 3.—P. 863—878.
  44. *Terry J. N., Paturel G., Ekholm T.* Local velocity field from nearby galaxies. I. The Peebles model // *Astron. and Astrophys.*—2002.—393, N 1.—P. 57—68.
  45. *Tonry J. L., Dressler A., Blakeslee J. P., et al.* The SBF survey of galaxy distances. IV. Magnitudes, colors, and distances // *Astrophys. J.*—2001.—546, N 2.—P. 681—693.
  46. *Weliachew L., Sancizi R., Guélin M.* Aperture Synthesis Observations of the Neutral Hydrogen in the Galaxies NGC 4631/NGC 4656 // *Astron. and Astrophys.*—1978.—65, N 1.—P. 37—45.

Поступила в редакцию 18.10.07