

УДК 524.78

Л. С. Пилюгин<sup>1</sup>, И. А. Зинченко<sup>2</sup>, Т. Х. Туан<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Киевский Национальный университет им. Тараса Шевченко  
03022 Киев, пр. Глушкова 2

<sup>3</sup> Университет штата Вирджиния  
400325, Шарлоттсвилль, Вирджиния, США

## Содержание кислорода в гигантских H II галактиках

*Исследована выборка 93 галактик высокой светимости с эмиссионными спектрами из цифрового обзора неба Sloan Digital Sky Survey. Измерены интенсивности линий в 116 SDSS-спектрах. Определено содержание кислорода в исследованных галактиках. Так как авроральная линия дважды ионизованного кислорода [O III] 436.3 нм не измеряется в спектрах объектов выборки, то необходимое для определения электронной температуры отношение интенсивностей небулярных и авроральных линий вычисляется при помощи ff-соотношения. Полученные содержания кислорода в SDSS-галактиках высокой светимости на 0.2—0.5 dex ниже максимально достижимой величины. Это обусловлено тем, что выборка содержит только богатые газом галактики, в которых протекают мощные вспышки звездообразования. Эквивалентное количество звезд O7 V, возбуждающих свечение областей H II исследованной выборки, на два-три порядка превышает число звезд, возбуждающих свечение ярчайших областей H II в близких галактиках и на порядок превышает число звезд, возбуждающих свечение газа в SBS 0335-052 E.*

*ВМІСТ КИСНЮ В ГІГАНТСЬКИХ H II ГАЛАКТИКАХ, Пілюгін Л. С., Зінченко І. А., Туан Т. Х. — Досліджено вибірку 93 галактик високої світності з емісійними спектрами із цифрового огляду неба Sloan Digital Sky Survey. Виміряно інтенсивності ліній в 116 SDSS-спектрах. Визначено вміст кисню в досліджених галактиках. Через те що авроральна лінія двічі іонізованого кисню [O III] 436.3 нм не вимірюється у спектрах об'єктів вибірки, то необхідне для визначення електронної температури відношення інтенсивностей небулярних і авроральних*

ліній обчислюється за допомогою  $ff$ -співвідношення. Отриманий вміст кисню в SDSS-галактиках високої світності на  $0.2-0.5$  dex нижчий за максимально досягну величину. Це зумовлено тим, що вибірка містить лише багаті газом галактики, в яких відбуваються потужні спалахи зореутворення. Еквівалентна кількість зірок O7 V, що збуджують випромінювання областей H II досліджуваної вибірки, на два-три порядки перевищує кількість зірок, що збуджують випромінювання найяскравіших областей H II у близьких галактиках, і на порядок перевищує кількість зірок, що збуджують випромінювання газу в SBS 0335-052 E.

*OXYGEN ABUNDANCES IN GIANT H II GALAXIES, by Pilyugin L. S., Zinchenko I. A., Thuan T. X. — A sample of emission-line high-luminosity galaxies from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) was investigated. Line intensities in 116 SDSS spectra of 99 galaxies were measured. The oxygen abundances in the galaxies were determined. Since the auroral line of doubly ionized oxygen [O III]  $\lambda$  436.3 nm is not detected in the spectra of the objects from our sample, the temperature-sensitive nebular-to-auroral line ratios are derived from the  $ff$ -relation. The obtained oxygen abundances in high-luminosity SDSS galaxies are lower by 0.2—0.5 dex than the maximum attainable value. This is caused by the fact that our sample of SDSS galaxies contains only gas-rich galaxies with strong star formation bursts. The equivalent number of O7 V stars exciting the radiation of H II regions in galaxies from our SDSS sample exceeds by two-three orders the equivalent number of O7 V stars which excite the radiation of the brightest H II regions in nearby galaxies and exceeds by one order the equivalent number of O7 V stars exciting the gas radiation in SBS 0335-052 E.*

## ВВЕДЕНИЕ

Выявление корреляций между макроскопическими характеристиками галактик важно для понимания образования и эволюции галактик. Предположение о том, что свойства областей H II в галактиках поздних типов коррелируют с макроскопическими характеристиками галактик (светимость и морфологический тип), появилось еще в середине 1970-х гг. [40]. Лекё и др. [24] обнаружили, что содержание кислорода в неправильной галактике коррелирует с массой галактики: чем больше масса галактики, тем выше содержание кислорода в ней. Эта корреляция получила название зависимость «масса — металличность\*». Так как определение масс галактик сталкивается с большими трудностями, то обычно исследуется не зависимость «масса — металличность», а зависимость «светимость — металличность» [29, 38, 39].

\* В теории химической эволюции галактик все химические элементы тяжелее гелия принято называть тяжелыми элементами или металлами. Обычно под металличностью спиральной или неправильной галактики подразумевается содержание в ней кислорода.

Гарнетт и Шиелдс [14] показали, что обнаруженная зависимость для неправильных галактик распространяется также и на спиральные галактики. Они нашли, что содержание кислорода в диске спиральной галактики коррелирует со светимостью галактики.

В результате проведения спектральных обзоров получены спектры большого числа галактик с эмиссионными линиями. Измеренные интенсивности сильных линий в этих спектрах используются для определения содержаний кислорода в галактиках и для исследования зависимости «светимость — металличность». Мельбурн и Солзер [27] построили зависимость «светимость — металличность» для 519 галактик из обзора KISS (KPNO International Spectroscopic Survey). В работе [23] зависимость «светимость — металличность» построена для 6387 галактик из обзора 2dF Galaxy Redshift Survey. Тремонти и др. [43] определили при помощи собственного варианта  $R_{23}$ -калибровки содержание кислорода в 53000 галактик из обзора SDSS (Sloan Digital Sky Survey) и построили диаграммы «светимость — металличность» и «масса — металличность». Они нашли среднее значение содержания кислорода в галактиках высокой светимости  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 9.1$ . Эрб и др. [12] переопределили при помощи N2-калибровки содержание кислорода в той же выборке 53000 галактик и получили среднее значение содержания кислорода в галактиках высокой светимости  $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.65$ . В работе Азари и др. [6] определены содержания кислорода в 82302 галактиках из обзора SDSS при помощи O3N2-калибровки ( $[\text{O III}] = 500.7/[\text{N II}] = 658.4$ ), предложенной Стасинской [41]. Полученные в работе [6] металличности примерно на 0.3 dex ниже металличностей, найденных в работе [43], но на 0.2 dex выше металличностей, найденных при помощи  $T_e$ -метода.

Таким образом, найденное значение содержания кислорода в галактике зависит от используемой калибровки. Средние значения содержания кислорода в галактиках высокой светимости, найденные для одной и той же выборки спектров при помощи разных калибровок, отличаются примерно в три раза. В работах [30, 31] было найдено соотношение между интенсивностями авроральных и небулярных линий (flux-flux,  $ff$ -соотношение) в спектрах областей H II. При помощи  $ff$ -соотношения можно вычислить интенсивность авроральной линии по измеренным интенсивностям небулярных линий в спектре области H II. С использованием вычисленной интенсивности авроральной линии электронная температура в области H II может быть найдена при помощи классического метода. Использование  $ff$ -соотношения для определения содержания кислорода в областях H II дает два очевидных преимущества по сравнению с другими калибровками. Во-первых, в основе  $ff$ -соотношения нет каких-либо предположений, так как это соотношение связывает непосредственно измеряемые величины и устанавливается чисто эмпирически на основе набора «калибровочных точек», т. е. областей H II, в спектрах которых измерены авроральные и небулярные линии. Точность  $ff$ -соотношения зависит только от

количества и качества калибровочных точек. Во-вторых, найденные таким способом содержания кислорода согласуются с содержаниями кислорода, найденными классическим  $T_e$ -методом.

В работах [33, 34]  $ff$ -соотношение использовалось для определения содержания кислорода в близких спиральных галактиках. Было найдено, что содержания кислорода в центрах некоторых спиральных галактик высокой светимости достигает максимально достижимой величины, которая примерно в два раза выше содержания кислорода на Солнце. В данной работе мы продолжим исследование содержания кислорода в галактиках высокой светимости. Будет изучена выборка SDSS-галактик высокой светимости.

### СВОЙСТВА ВЫБОРКИ ГАЛАКТИК

В базе спектральных данных SDSS мы выбрали объекты высокой светимости ( $M_g < -22.0^m$  в полосе  $g$  фотометрической системы SDSS), спектры которых классифицированы (в рамках автоматической классификации) как эмиссионные. Среди этих объектов были выбраны галактики, спектры которых содержат характерные для областей H II эмиссионные линии. Для исследования были отобраны объекты, в спектрах которых шумы не препятствуют определению непрерывного спектра, и следовательно, эмиссионные линии можно измерить более или менее надежно.

Спектры SDSS покрывают интервал длин волн от 380.0 нм до 920.0 нм. Поэтому спектры близких объектов (с красными смещениями  $z < 0.02$ ) не содержат небулярной линии кислорода [O II] 372.7 нм, которая используется для определения содержания иона  $O^+$  в области H II. Когда измерена авроральная линия кислорода [O III] 436.3 нм, то интенсивность небулярной линии кислорода [O II] 372.7 нм можно вычислить, используя  $ff$ -соотношение [2, 3, 32]. В спектрах галактик высокой светимости интенсивность авроральной линии кислорода [O III] 436.3 нм ниже порога обнаружения. Поэтому в наш список включены только объекты, в спектрах которых небулярная линия кислорода [O II] 372.7 нм смещается в красную сторону из-за красного смещения настолько, что попадает в спектральный интервал SDSS. Таким образом, наш список содержит только далекие галактики с красными смещениями больше 0.02, т. е. с расстояниями больше 100 Мпк. Список исследованных галактик и их характеристики приведены в табл. 1. Именем галактики в SDSS служат ее прямое восхождение (часы, минуты, секунды) и склонение (градусы, минуты, секунды) на эпоху 2000 г. Во второй графе указан номер SDSS-спектра, который состоит из номера пластинки, модифицированной юлианской даты наблюдения и номера объекта (отверстия) на пластинке. Если для галактики имеется несколько спектров, то эти спектры расположены в порядке возрастания юлианских дат наблюдений.

## СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В ГИГАНТСКИХ И II ГАЛАКТИКАХ

**Таблица 1.** Характеристики исследованных SDSS-галактик:  $z$  — красное смещение,  $d$  — расстояние,  $L_B$  — светимость галактики в фотометрической полосе  $B$  в единицах светимости Солнца,  $L$  — светимость галактики в линии  $H$  в единицах светимости Солнца,  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})$  — содержание кислорода в галактике

SDSS-номер галактики	Номер спектра	$z$	$\lg d$ ( $d$ , Мпк)	$\lg(L_B/L_\odot)$	$\lg(L/L_\odot)$	$12 + \lg(\text{O}/\text{H})$	
000054.05	144018.0	0750 52235 160	0.144	2.78	10.56	7.57	8.60
001108.53	005043.6	0388 51793 614	0.109	2.66	10.61	7.37	8.44
001554.90	160531.0	0752 52251 524	0.174	2.86	10.47	7.47	8.60
001743.90	152445.4	0752 52251 624	0.305	3.10	10.78	8.16	8.43
005009.01	-100901.3	0657 52177 273	0.163	2.83	10.51	7.64	8.54
005252.41	-000427.7	0394 51812 172	0.116	2.68	10.64	7.51	8.65
		0394 51876 177	0.116	2.68	10.64	7.53	8.65
		0394 51913 177	0.116	2.68	10.64	7.55	8.69
011711.99	-091408.1	0660 52177 507	0.107	2.65	10.53	7.70	8.47
014455.50	-004027.8	0401 51788 110	0.150	2.80	10.51	7.32	8.64
015400.15	-081718.2	0665 52168 455	0.167	2.84	10.58	7.76	8.57
020215.77	131749.6	0427 51900 148	0.207	2.94	10.58	7.79	8.57
021802.07	-003334.6	0405 51816 066	0.144	2.78	10.52	7.59	8.71
030713.77	010144.0	0412 51931 326	0.137	2.76	10.44	7.48	8.52
		0710 52203 365	0.136	2.75	10.44	7.38	8.54
		0412 52235 326	0.137	2.75	10.44	7.50	8.52
		0412 52250 326	0.136	2.75	10.44	7.43	8.51
		0412 52254 326	0.137	2.75	10.44	7.49	8.52
		0412 52258 326	0.136	2.75	10.44	7.46	8.54
		1179 52637 346	0.136	2.75	10.44	7.28	8.52
032756.33	-002818.1	0414 51869 107	0.163	2.83	10.49	7.58	8.48
		0414 51901 092	0.163	2.83	10.49	7.59	8.47
		1181 53358 145	0.163	2.83	10.49	7.55	8.46
074551.52	322322.7	0755 52235 485	0.219	2.96	10.73	7.78	8.57
074557.27	295241.9	0889 52663 427	0.271	3.05	10.53	7.87	8.48
075536.90	250846.3	0928 52578 061	0.239	3.00	10.48	7.78	8.48
		1204 52669 366	0.239	3.00	10.48	7.73	8.49
080032.51	435929.7	0436 51883 009	0.198	2.92	10.61	8.05	8.47
081216.04	270356.0	1206 52670 181	0.173	2.86	10.55	7.70	8.60
081523.39	500414.7	0440 51885 448	0.165	2.84	10.67	7.70	8.63
		0440 51912 511	0.165	2.84	10.67	7.68	8.65
082413.12	433721.0	0547 51959 004	0.118	2.69	10.52	7.89	8.40
		0547 52207 026	0.118	2.69	10.52	7.87	8.40
084504.16	473204.0	0550 51959 064	0.123	2.71	10.71	7.89	8.46
085217.34	570523.2	0448 51900 406	0.089	2.57	10.52	7.17	8.78
085754.08	432705.8	0831 52294 385	0.130	2.73	10.59	7.68	8.52
090416.83	570314.2	0483 51902 117	0.144	2.78	10.72	7.50	8.67
		0483 51924 095	0.144	2.78	10.72	7.47	8.66
		0483 51942 100	0.144	2.78	10.72	7.50	8.67
090603.64	561033.0	0450 51908 412	0.141	2.77	10.63	7.59	8.69
093025.90	564810.3	0451 51908 632	0.205	2.93	10.62	7.79	8.54
094116.98	050933.2	0993 52710 131	0.182	2.88	10.61	7.63	8.61
094333.43	435317.3	0941 52709 387	0.166	2.84	10.61	7.54	8.78
094730.46	002141.7	0266 51602 594	0.126	2.72	10.39	7.26	8.65
		0266 51630 583	0.126	2.72	10.39	7.23	8.62
095234.18	572419.2	0557 52253 502	0.258	3.03	10.76	7.97	8.68
		0558 52317 276	0.258	3.03	10.76	7.90	8.71
095244.17	492244.9	1006 52708 301	0.207	2.94	10.58	8.01	8.49
095804.81	001027.1	0268 51633 475	0.169	2.85	10.61	8.07	8.48

SDSS-номер галактики	Номер спектра	$z$	$\lg d$ ( $d$ , Мпк)	$\lg(L_B/L_\odot)$	$\lg(L/L_\odot)$	12 + $\lg(O/H)$
102025.29 -004741.1	0271 51883 001	0.101	2.62	10.64	7.45	8.74
102257.03 051034.7	0575 52319 407	0.184	2.88	10.59	7.53	8.56
102452.33 592432.0	0560 52296 317	0.193	2.91	10.65	7.62	8.51
103320.12 631116.7	0772 52375 572	0.145	2.78	10.85	7.84	8.73
103807.83 540756.6	0905 52643 072	0.103	2.63	10.68	7.64	8.68
105623.42 025116.0	0508 52366 348	0.127	2.72	10.51	7.16	8.69
111416.02 520729.6	0878 52353 413	0.142	2.77	10.55	7.35	8.54
114035.92 552315.7	1014 52707 620	0.171	2.85	10.68	7.66	8.59
114236.97 015553.5	0514 51994 229	0.124	2.71	10.59	7.97	8.51
114318.59 533442.3	1015 52734 002	0.161	2.83	10.61	7.53	8.61
115716.98 560135.9	1017 52706 460	0.233	2.99	10.60	7.90	8.46
121802.61 012819.2	0518 52282 051	0.185	2.89	10.56	7.81	8.42
122118.47 623103.5	0779 52342 119	0.186	2.89	10.52	7.57	8.61
122534.26 -025029.1	0334 51993 238	0.068	2.45	10.55	7.31	8.54
122941.27 -020505.5	0334 51993 501	0.147	2.79	10.55	7.57	8.62
124108.11 055654.0	0846 52407 565	0.131	2.74	10.64	7.40	8.56
125548.42 505716.7	0886 52381 086	0.151	2.80	10.74	7.80	8.71
125708.06 032524.3	0523 52026 539	0.174	2.86	10.57	7.59	8.52
130901.73 012636.6	0524 52027 017	0.071	2.47	10.52	7.05	8.69
131031.98 000211.7	0294 51986 596	0.179	2.87	10.52	8.03	8.47
131632.69 590820.6	0958 52410 108	0.103	2.63	10.61	7.37	8.62
132051.00 483842.9	1282 52759 182	0.220	2.96	10.60	7.84	8.51
132354.09 -032651.8	0341 51690 057	0.300	3.10	10.54	8.07	8.46
132421.95 542820.2	1040 52722 630	0.175	2.86	10.65	7.70	8.55
132649.50 603207.9	0785 52339 227	0.171	2.85	10.60	7.54	8.47
133642.82 030718.6	0528 52022 539	0.192	2.90	10.58	7.54	8.57
135124.97 482605.7	1284 52736 595	0.168	2.85	10.55	7.58	8.46
135355.90 664800.5	0497 51989 609	0.199	2.92	10.71	7.89	8.44
135547.70 004846.2	0301 51641 364	0.087	2.56	10.49	7.44	8.73
	0301 51942 370	0.087	2.56	10.49	7.46	8.74
135716.37 621728.9	0605 52353 206	0.156	2.81	10.78	7.85	8.48
140729.92 005809.6	0302 51688 448	0.177	2.87	10.54	7.61	8.52
141353.24 592410.3	0788 52338 120	0.173	2.86	10.57	7.45	8.63
141612.28 035341.5	0583 52055 105	0.115	2.68	10.58	7.88	8.47
141659.73 025024.0	0533 51994 574	0.076	2.50	10.56	7.35	8.68
141708.30 -030133.9	0917 52400 246	0.131	2.74	10.50	7.21	8.73
142221.84 452011.8	1287 52728 144	0.168	2.84	10.72	7.85	8.71
143511.03 441059.3	1288 52731 057	0.128	2.73	10.57	7.61	8.41
143638.02 035708.1	0586 52023 475	0.158	2.82	10.60	7.72	8.65
150249.11 -021257.6	0922 52426 236	0.212	2.95	10.80	7.94	8.62
151201.21 533820.3	0793 52370 081	0.074	2.49	10.55	7.28	8.64
154100.95 555057.5	0617 52072 253	0.136	2.75	10.64	7.56	8.71
154311.32 034353.1	0594 52027 416	0.296	3.09	10.50	8.07	8.39
	0594 52045 438	0.296	3.09	10.50	8.09	8.40
	2950 54559 281	0.296	3.09	10.50	7.93	8.40
154532.32 405803.4	1053 52468 214	0.194	2.91	10.61	7.68	8.45
162454.40 445432.5	0626 52057 368	0.229	2.98	10.63	7.92	8.48
163158.72 481722.5	0625 52145 018	0.088	2.56	10.61	7.40	8.68
163330.52 431533.7	0626 52057 112	0.123	2.71	10.70	7.54	8.55
171721.91 301154.3	0978 52431 179	0.147	2.79	10.65	7.72	8.63
	0978 52441 173	0.147	2.79	10.65	7.68	8.63



Окончание табл. 1

SDSS-номер галактики	Номер спектра	$z$	$\lg d$ ( $d$ , Мпк)	$\lg(L_B/L_\odot)$	$\lg(L/L_\odot)$	$12 +$ $\lg(O/H)$
	2974 54592 304	0.147	2.79	10.65	7.69	8.63
172621.63 570910.0	0358 51818 374	0.143	2.78	10.75	7.67	8.57
173052.83 621333.2	0354 51792 615	0.170	2.85	10.57	7.50	8.60
203724.58 -062200.3	0634 52164 230	0.133	2.74	10.53	8.02	8.55
204402.91 -064657.9	0635 52145 316	0.142	2.77	10.54	7.66	8.58
210413.27 085524.1	0727 52207 274	0.235	2.99	10.56	7.88	8.44
211442.70 002436.9	0986 52443 485	0.140	2.77	10.39	7.39	8.57
212241.47 010926.9	0987 52523 502	0.205	2.93	10.50	7.62	8.46
	1027 52557 510	0.205	2.93	10.50	7.64	8.46
212547.62 101132.4	0730 52466 219	0.201	2.92	10.46	7.60	8.62
220405.29 005917.4	0373 51788 332	0.290	3.08	10.62	8.19	8.46
225108.53 -005343.5	0379 51789 259	0.162	2.83	10.66	8.03	8.49
225540.25 124944.4	0741 52261 123	0.201	2.92	10.49	7.83	8.48
225638.65 -093125.3	0724 52254 177	0.172	2.85	10.54	7.40	8.63
232123.51 -093134.9	0645 52203 515	0.070	2.46	10.68	7.14	8.74
232940.32 -091122.1	0646 52523 501	0.152	2.80	10.50	7.73	8.62

Интенсивности линий в спектрах были измерены с помощью пакета IRAF. Интенсивности линий в спектрах объектов, для которых имеется два и более спектра, были измерены также по следующей методике, которая иллюстрируется на примере измерения интенсивности линии H $\beta$ . Поток излучения в континууме в интервале длин волн от  $\lambda_1 = \lambda_0 - 8$  нм до  $\lambda_2 = \lambda_0 + 8$  нм аппроксимируется линейной функцией

$$f_c(\lambda) = c_0 + c_1 \lambda, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны линии H $\beta$ . Значения коэффициентов  $c_0$  и  $c_1$  определяются методом итераций. На каждом шаге находятся значения коэффициентов методом наименьших квадратов по точкам, исключая линию от  $\lambda_1 - 1$  нм до  $\lambda_2 + 1$  нм. Если есть точки, отклонения которых от найденной аппроксимации превышают среднее значение отклонений более чем в три раза, то эти точки отбрасываются, и находятся новые значения коэффициентов.

Профиль каждой линии аппроксимировался гауссианой

$$f(\lambda) = F \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-(\lambda - \lambda_0)^2 / (2 \sigma^2)}, \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  — длина волны центра линии,  $\sigma$  — ширина линии,  $F$  — интенсивность линии. В линиях H $\beta$  могут наблюдаться широкие абсорбционные компоненты (см. рис. 1), поэтому профиль линии H $\beta$  аппроксимируется суммой двух гауссиан. В этом случае полный поток на длине волны  $\lambda$  дается выражением

$$f(\lambda) = f_{,e}(\lambda) + f_{,a}(\lambda) + f_c(\lambda). \quad (3)$$

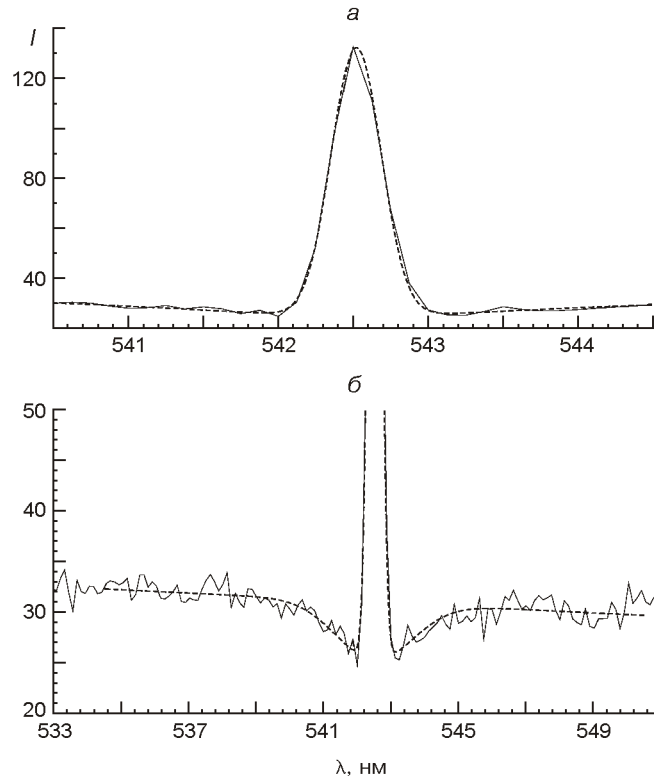


Рис. 1. Интенсивность  $I$  линии  $H$  в спектре Sp 394-51812-172 галактики SDSS 005252.41-000427.7: непрерывная линия — наблюдаемый спектр, штриховая — МНК-аппроксимация. Фрагменты  $a$  и  $b$  представляют один и тот же спектр в разных масштабах

Значения  $F_{\lambda_e, 0, e}, F_{\lambda_a, 0, a}$  находятся из стандартного условия минимума стандартного отклонения остатков регрессии (3) в интервале длин волн  $\lambda_1 - \lambda_2$ :

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (f(\lambda_k) - f^{obs}(\lambda_k))^2}. \quad (4)$$

Аппроксимация линии  $H$  в спектре Sp 394-51812-172 галактики SDSS 005252.41-000427.7 показана на рис. 1.

Эмиссионные линии ионизованного кислорода [OII] 372.7 и [OII] 372.9 нм в SDSS-спектрах перекрываются. Эта бленда аппроксимировалась суммой двух гауссиан. Измеренные интенсивности линий исправлены за покраснение с использованием аналитической аппроксимации кривой покраснения из работы [18]. Коэффициент экстинкции  $C_H$  определялся с использованием линий  $H$  и  $H$ . Интенсивности линий [O II] 372.7 нм, [O III] 495.9 нм, [O III] 500.7 нм, [N II] 654.8 нм, [N II] 658.4 нм, [S II] 671.7 нм, [S II] 673.1 нм, исправленные за покраснение и нормированные на интенсивность линии  $H$ , приведены в табл. 2. Эти данные лежат в основе нашего исследования.



**Таблица 2. Интенсивности линий в спектрах SDSS галактик. Интенсивности линий исправлены за межзвездное поглощение и нормированы на интенсивность линии H**

SDSS-номер галактики	Номер спектра	[OII] 372.7	[OIII] 495.9	[OIII] 500.7	[NII] 654.8	[NII] 868.4	[SII] 671.7	[SII] 673.1	
000054.05	144018.0	0750 52235 160	3.079	0.283	0.794	0.306	0.949	0.475	0.350
001108.53	005043.6	0388 51793 614	3.650	0.625	1.850	0.112	0.516	0.483	0.341
001554.90	160531.0	0752 52251 524	3.185	0.317	0.798	0.281	0.901	0.504	0.364
001743.90	152445.4	0752 52251 624	3.469	0.684	2.039	0.230	0.573	0.383	0.308
005009.01	-100901.3	0657 52177 273	3.879	0.445	1.219	0.309	0.988	0.437	0.377
005252.41	-000427.7	0394 51812 172	2.422	0.205	0.532	0.352	1.146	0.451	0.360
		0394 51876 177	2.805	0.225	0.574	0.337	1.110	0.446	0.327
		0394 51913 177	2.595	0.143	0.483	0.346	1.140	0.429	0.319
011711.99	-091408.1	0660 52177 507	2.917	0.488	1.490	0.209	0.687	0.373	0.274
014455.50	-004027.8	0401 51788 110	3.234	0.245	0.701	0.365	1.141	0.454	0.355
015400.15	-081718.2	0665 52168 455	3.224	0.337	1.013	0.314	0.994	0.302	0.272
020215.77	131749.6	0427 51900 148	2.694	0.296	0.856	0.387	1.097	0.319	0.276
021802.07	-003334.6	0405 51816 066	2.343	0.162	0.388	0.328	1.086	0.461	0.368
030713.77	010144.0	0412 51931 326	3.110	0.393	1.172	0.209	0.716	0.433	0.299
		0710 52203 365	3.868	0.423	1.219	0.203	0.695	0.399	0.281
		0412 52235 326	3.075	0.389	1.134	0.203	0.682	0.427	0.324
		0412 52250 326	3.425	0.470	1.256	0.188	0.723	0.442	0.316
		0412 52254 326	3.080	0.440	1.170	0.203	0.753	0.399	0.314
		0412 52258 326	3.418	0.381	1.169	0.207	0.714	0.423	0.334
		1179 52637 346	3.274	0.532	1.055	0.212	0.687	0.692	0.391
032756.33	-002818.1	0414 51869 107	3.445	0.533	1.557	0.208	0.747	0.401	0.369
		0414 51901 092	3.033	0.516	1.517	0.219	0.795	0.457	0.366
		1181 53358 145	2.733	0.535	1.523	0.236	0.746	0.448	0.351
074551.52	322322.7	0755 52235 485	3.615	0.340	1.059	0.258	0.779	0.452	0.364
074557.27	295241.9	0889 52663 427	3.327	0.477	1.536	0.251	0.670	0.356	0.290
075536.90	250846.3	0928 52578 061	3.665	0.561	1.507	0.246	0.737	0.494	0.367
		1204 52669 366	4.332	0.548	1.609	0.212	0.719	0.475	0.388
080032.51	435929.7	0436 51883 009	3.130	0.494	1.507	0.254	0.763	0.380	0.278
081216.04	270356.0	1206 52670 181	3.067	0.281	0.796	0.332	1.076	0.489	0.365
081523.39	500414.7	0440 51885 448	3.131	0.224	0.758	0.356	0.984	0.443	0.364
		0440 51912 511	3.487	0.251	0.740	0.288	0.870	0.402	0.308
082413.12	433721.0	0547 51959 004	2.606	0.782	2.279	0.132	0.398	0.364	0.280
		0547 52207 026	2.780	0.766	2.307	0.140	0.418	0.384	0.268
084504.16	473204.0	0550 51959 064	2.514	0.495	1.498	0.246	0.741	0.378	0.283
085217.34	570523.2	0448 51900 406	3.696	0.162	0.479	0.309	0.980	0.465	0.358
085754.08	432705.8	0831 52294 385	4.398	0.462	1.408	0.197	0.600	0.459	0.288
090416.83	570314.2	0483 51902 117	2.178	0.144	0.436	0.413	1.225	0.395	0.296
		0483 51924 095	2.170	0.148	0.468	0.413	1.243	0.384	0.303
		0483 51942 100	2.330	0.137	0.496	0.417	1.271	0.414	0.333
090603.64	561033.0	0450 51908 412	3.216	0.206	0.575	0.352	1.053	0.430	0.323
093025.90	564810.3	0451 51908 632	2.998	0.267	1.095	0.360	1.034	0.363	0.240
094116.98	050933.2	0993 52710 131	3.010	0.247	0.789	0.368	1.133	0.444	0.321
094333.43	435317.3	0941 52709 387	3.082	0.138	0.405	0.349	1.124	0.420	0.346
094730.46	002141.7	0266 51602 594	2.907	0.236	0.617	0.344	1.198	0.501	0.401
		0266 51630 583	3.055	0.275	0.702	0.408	1.208	0.487	0.386
095234.18	572419.2	0557 52253 502	3.034	0.198	0.589	0.307	1.026	0.396	0.320
		0558 52317 276	3.236	0.185	0.549	0.316	1.010	0.420	0.316
095244.17	492244.9	1006 52708 301	3.427	0.506	1.387	0.225	0.692	0.407	0.321
095804.81	001027.1	0268 51633 475	2.840	0.465	1.446	0.210	0.590	0.308	0.247
102025.29	-004741.1	0271 51883 001	3.353	0.179	0.501	0.380	1.131	0.403	0.330

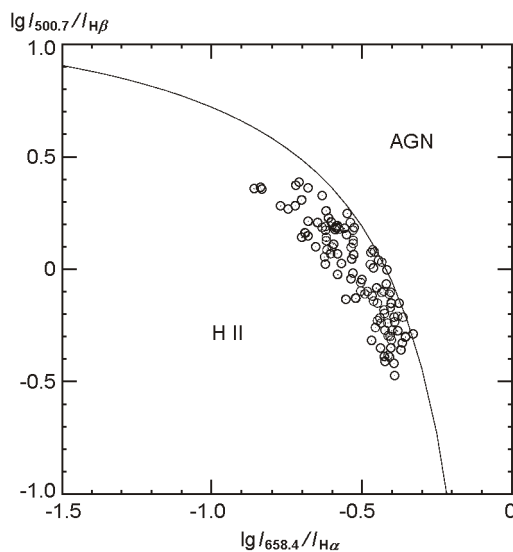
SDSS-номер галактики	Номер спектра	[OII] 372.7	[OIII] 495.9	[OIII] 500.7	[NII] 654.8	[NII] 868.4	[SII] 671.7	[SII] 673.1	
102257.03	051034.7	0575 52319 407	4.761	0.448	1.293	0.217	0.731	0.451	0.382
102452.33	592432.0	0560 52296 317	3.820	0.507	1.341	0.208	0.693	0.505	0.416
103320.12	631116.7	0772 52375 572	3.042	0.152	0.505	0.386	1.113	0.438	0.361
103807.83	540756.6	0905 52643 072	2.375	0.167	0.446	0.379	1.138	0.401	0.311
105623.42	025116.0	0508 52366 348	3.467	0.218	0.605	0.320	1.045	0.441	0.324
111416.02	520729.6	0878 52353 413	3.832	0.406	1.194	0.318	1.002	0.493	0.369
114035.92	552315.7	1014 52707 620	3.953	0.366	0.993	0.373	1.102	0.537	0.378
114236.97	015553.5	0514 51994 229	3.144	0.406	1.250	0.266	0.838	0.368	0.291
114318.59	533442.3	1015 52734 002	3.235	0.274	0.775	0.343	0.931	0.384	0.273
115716.98	560135.9	1017 52706 460	3.240	0.563	1.634	0.182	0.603	0.448	0.318
121802.61	012819.2	0518 52282 051	3.218	0.729	2.120	0.260	0.671	0.319	0.285
122118.47	623103.5	0779 52342 119	3.092	0.262	0.785	0.296	1.061	0.525	0.362
122534.26	-025029.1	0334 51993 238	4.413	0.475	1.300	0.258	0.851	0.498	0.360
122941.27	-020505.5	0334 51993 501	3.198	0.278	0.734	0.232	0.802	0.460	0.327
124108.11	055654.0	0846 52407 565	2.882	0.292	0.943	0.229	0.755	0.431	0.296
125548.42	505716.7	0886 52381 086	2.941	0.164	0.501	0.404	1.272	0.392	0.312
125708.06	032524.3	0523 52026 539	3.601	0.429	1.259	0.170	0.638	0.464	0.319
130901.73	012636.6	0524 52027 017	2.252	0.149	0.407	0.341	1.078	0.457	0.352
131031.98	000211.7	0294 51986 596	2.898	0.495	1.538	0.279	0.745	0.326	0.267
131632.69	590820.6	0958 52410 108	3.789	0.299	0.871	0.266	0.901	0.488	0.351
132051.00	483842.9	1282 52759 182	2.857	0.371	1.185	0.329	0.974	0.357	0.281
132354.09	-032651.8	0341 51690 057	3.048	0.543	1.607	0.198	0.648	0.364	0.277
132421.95	542820.2	1040 52722 630	3.215	0.364	1.074	0.358	1.059	0.335	0.280
132649.50	603207.9	0785 52339 227	3.495	0.522	1.615	0.252	0.831	0.358	0.272
133642.82	030718.6	0528 52022 539	3.296	0.346	0.960	0.259	0.849	0.439	0.340
135124.97	482605.7	1284 52736 595	2.969	0.534	1.563	0.224	0.754	0.426	0.322
135355.90	664800.5	0497 51989 609	3.801	0.622	1.909	0.131	0.488	0.461	0.312
135547.70	004846.2	0301 51641 364	2.393	0.136	0.380	0.366	1.165	0.398	0.321
		0301 51942 370	2.253	0.113	0.335	0.379	1.170	0.416	0.338
135716.37	621728.9	0605 52353 206	3.019	0.454	1.490	0.292	0.849	0.377	0.306
140729.92	005809.6	0302 51688 448	4.028	0.491	1.384	0.185	0.573	0.450	0.369
141353.24	592410.3	0788 52338 120	3.485	0.262	0.772	0.374	1.123	0.450	0.345
141612.28	035341.5	0583 52055 105	2.868	0.515	1.532	0.283	0.856	0.345	0.285
141659.73	025024.0	0533 51994 574	2.800	0.185	0.534	0.345	1.086	0.424	0.310
141708.30	-030133.9	0917 52400 246	2.587	0.176	0.411	0.380	1.111	0.397	0.370
142221.84	452011.8	1287 52728 144	3.619	0.197	0.611	0.478	1.247	0.408	0.298
143511.03	441059.3	1288 52731 057	4.493	0.778	2.270	0.120	0.423	0.460	0.342
143638.02	035708.1	0586 52023 475	2.958	0.216	0.634	0.336	1.082	0.457	0.343
150249.11	-021257.6	0922 52426 236	3.010	0.255	0.720	0.337	0.995	0.430	0.334
151201.21	533820.3	0793 52370 081	2.695	0.223	0.611	0.359	1.166	0.427	0.354
154100.95	555057.5	0617 52072 253	3.077	0.195	0.515	0.423	1.347	0.405	0.326
154311.32	034353.1	0594 52027 416	2.899	0.830	2.440	0.180	0.561	0.342	0.261
		0594 52045 438	2.636	0.773	2.300	0.178	0.602	0.335	0.255
		2950 54559 281	2.763	0.747	2.358	0.172	0.547	0.343	0.271
154532.32	405803.4	1053 52468 214	4.060	0.614	1.918	0.194	0.546	0.408	0.348
162454.40	445432.5	0626 52057 368	3.334	0.506	1.429	0.241	0.808	0.409	0.305
163158.72	481722.5	0625 52145 018	4.046	0.257	0.706	0.360	1.137	0.612	0.454
163330.52	431533.7	0626 52057 112	3.587	0.371	1.155	0.268	0.854	0.390	0.299
171721.91	301154.3	0978 52431 179	2.308	0.172	0.583	0.367	1.171	0.406	0.315
		0978 52441 173	2.529	0.196	0.612	0.376	1.163	0.415	0.336
		2974 54592 304	2.087	0.165	0.530	0.381	1.197	0.425	0.336

SDSS-номер галактики	Номер спектра	[OII]	[OIII]	[OIII]	[NII]	[NII]	[SII]	[SII]			
		372.7	495.9	500.7	654.8	868.4	671.7	673.1			
172621.63	570910.0	0358	51818	374	3.652	0.341	1.048	0.297	0.971	0.457	0.363
173052.83	621333.2	0354	51792	615	3.792	0.352	0.897	0.289	0.909	0.466	0.370
203724.58	-062200.3	0634	52164	230	3.452	0.374	1.107	0.294	0.842	0.438	0.333
204402.91	-064657.9	0635	52145	316	2.966	0.334	0.823	0.320	1.018	0.437	0.368
210413.27	085524.1	0727	52207	274	3.354	0.586	1.818	0.223	0.692	0.321	0.241
211442.70	002436.9	0986	52443	485	3.067	0.324	0.905	0.259	0.835	0.453	0.351
212241.47	010926.9	0987	52523	502	3.324	0.543	1.629	0.222	0.719	0.407	0.287
		1027	52557	510	3.438	0.565	1.691	0.218	0.701	0.399	0.317
212547.62	101132.4	0730	52466	219	2.897	0.281	0.657	0.375	1.076	0.468	0.365
220405.29	005917.4	0373	51788	332	3.965	0.587	1.774	0.386	0.814	0.439	0.356
225108.53	-005343.5	0379	51789	259	3.024	0.478	1.341	0.282	0.851	0.428	0.362
225540.25	124944.4	0741	52261	123	3.801	0.544	1.548	0.224	0.687	0.478	0.328
225638.65	-093125.3	0724	52254	177	3.117	0.252	0.704	0.341	1.026	0.445	0.348
232123.51	-093134.9	0645	52203	515	2.879	0.138	0.444	0.321	1.051	0.465	0.370
232940.32	-091122.1	0646	52523	501	2.866	0.281	0.675	0.349	1.132	0.432	0.333

Для исследования характера возбуждения областей Н II обычно используются диаграммы, на которых интенсивности линий низкого возбуждения сравниваются с интенсивностями линий высокого возбуждения. Диаграмма  $[N II] \ 658.4/H - [O III] \ 500.7/H$  используется для того, чтобы разделить области Н II, которые ионизованы горячими звездами, и активные ядра галактик. Положения объектов из нашего списка на диаграмме  $[N II] \ 658.4/H - [O III] \ 500.7/H$  представлены на рис. 2 кружками. Линия, которая разделяет области Н II и активные ядра галактик, взята из работы [19]. Рис. 2 показывает, что объекты из нашего списка возбуждаются горячими звездами.

Эмиссионные линии  $[O III] \ 500.7 \text{ нм}$  и  $[O III] \ 495.9 \text{ нм}$  дважды ионизованного кислорода образуются при переходах с одного уровня.

Рис. 2. Диаграмма  $[N II] \ 658.4/H - [O III] \ 500.7/H$ . Кружки — объекты из нашего списка. Линия разделяет активные ядра галактик и области Н II, ионизованные горячими звездами



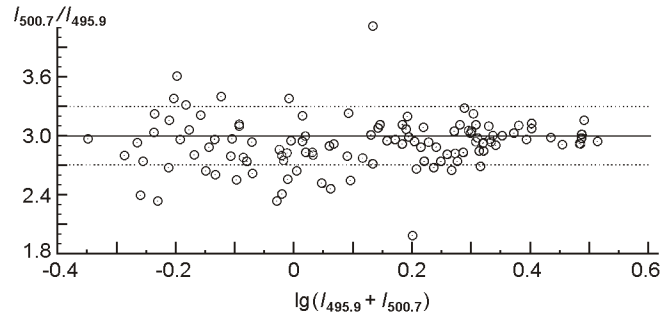


Рис. 3. Измеренные отношения интенсивностей небулярных линий кислорода. Величина ожидаемого отношения показана непрерывной линией. Штриховыми линиями показаны отклонения 10 % от ожидаемого значения

Отношение их интенсивностей определяется отношением величин соответствующих коэффициентов спонтанных переходов и должно быть одинаковым в спектрах всех туманностей. Поэтому измеренные отношения интенсивностей линий [O III] 500.7/[O III] 495.9 можно использовать для проверки достоверности спектральных данных. На рис. 3 приведены отношения интенсивностей линий кислорода [O III] 500.7/[O III] 495.9, измеренные при помощи пакета IRAF. Видно, что в большинстве случаев отклонение отношений кислородных линий от ожидаемого значения [O III] 500.7/[O III] 495.9 = 3 не превышает 10 %.

Отношение интенсивностей линий серы [S II] 671.7/[S II] 673.1 обычно используется для определения электронной концентрации в области H II. На рис. 4 показаны измеренные значения этих отношений для исследуемой выборки галактик. Ожидаемый предел низкой плотности ( $[S II] 671.7/[S II] 673.1 = 1.44$  для  $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$  при электронной температуре 10000 К) показан непрерывной линией. Штриховой линией показано значение отношения 1.29, соответствующее плотности  $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$ , пунктирной — значение 1.18, соответствующее плотности  $n_e = 200 \text{ см}^{-3}$ . Видно, что в большинстве исследуемых объектов электронная концентрация ниже  $200 \text{ см}^{-3}$ . Эти данные согласуются с результатами работ [9, 48], в которых найдено, что электронная плотность в большинстве внегалактических областей H II порядка  $100 \text{ см}^{-3}$  и ниже. Рис. 4 показывает, что при определении

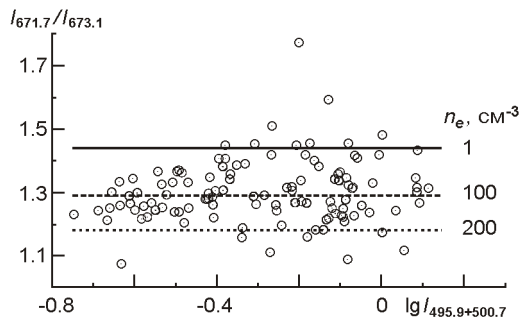


Рис. 4. Измеренные отношения интенсивностей линий серы [S II] 671.7 / [S II] 673.1 для исследуемой выборки галактик. Непрерывная линия — ожидаемое отношение для  $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$  (при электронной температуре 10000 К), штриховая линия — ожидаемое отношение для  $n_e = 100 \text{ см}^{-3}$ , пунктирная — ожидаемое отношение для  $n_e = 200 \text{ см}^{-3}$

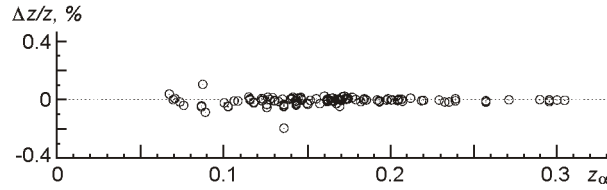


Рис. 5. Различия  $z/z$  между найденными нами значениями красных смещений  $z$  для линии Н и  $z$  для линии Н

химического состава в рассматриваемых объектах можно использовать приближение низкой плотности.

При измерении интенсивности линии измеряется также длина волны центра линии. Эти измерения использовались для определения значений красных смещений галактик. Эталонные длины волн линий, используемые в рамках SDSS-проекта, взяты из работы [42]. Расхождение  $z/z$  между найденными значениями красных смещений  $z$  для линии Н и  $z$  для линии Н

$$z/z = 100 \frac{z - z}{z} \quad (5)$$

показаны на рис. 5. Видно, что ошибка определения красных смещений для исследуемой выборки галактик не превышает 0.1 %. Следует отметить, что найденные значения красных смещений совпадают в пределах ошибок со значениями, приведенными в базе данных SDSS.

## СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА В ГАЛАКТИКАХ

При определении содержания кислорода мы используем двухзонную модель распределения температуры в области Н II. Так как авроральная линия кислорода [O III] 436.3 нм не измеряется в спектрах исследуемых объектов, то диагностическое отношение интенсивностей  $Q_{3,0} = ([O III] 495.9 + 500.7)/[O III] 436.3$  вычисляется при помощи  $ff$ -соотношения

$$\lg Q_{3,0} = 2.53 - 1.08P - 1.42 \lg R_3, \quad (6)$$

где  $P$  — параметр возбуждения туманности.

Формулы для определения электронной температуры  $t_3$  в зоне свечения дважды ионизованного кислорода

$$t_3 = \frac{1.46}{\lg Q_{3,0} - 0.88 - 0.17 \lg t_3 - 0.030 t_3} \quad (7)$$

и содержания иона  $O^{++}$  в туманности

$$12 - \lg(O/H) = \lg(R_3) - 6.25 - \frac{120}{t_3} - 0.63 \lg t_3 - 0.012 t_3 \quad (8)$$

получены в рамках 5-уровневой модели иона  $O^{++}$  для набора атомных данных из [16] (эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов), [11] (энергии возбужденных уровней), а также [4] (эффективные сечения для электронных ударов).

Электронная температура  $t_2$  в зоне свечения однажды ионизованного кислорода определяется из уравнения

$$t_2 = 0.314 - 0.672t_3. \quad (9)$$

В рамках 5-уровневой модели иона  $O^+$  для набора атомных данных из [16] (эйнштейновские коэффициенты спонтанных переходов), [46] (энергии возбужденных уровней), а также [36] (эффективные сечения для электронных ударов) получена формула для определения содержания иона  $O^+$  в туманности:

$$\begin{aligned} 12 \lg(O^+ / H^+) = \\ = \lg R_2 - 5.92 - \frac{1.62}{t_2} - 0.54 \lg t_2 - 0.008 t_2 - \lg(1 - 2.43x_2), \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$x_2 = 10^{-4} n_e t_2^{1/2}, \quad (11)$$

$n_e$  — электронная плотность в  $\text{см}^{-3}$ .

Полное содержание кислорода находится из соотношения

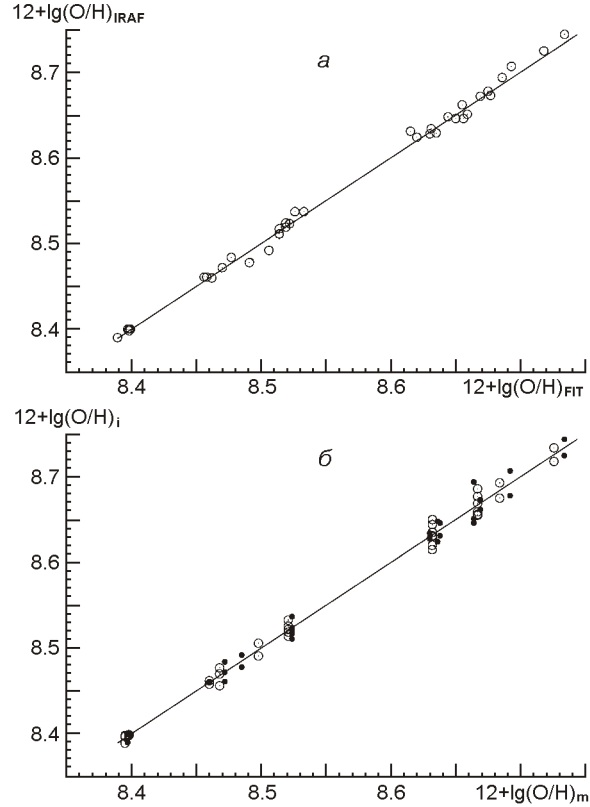
$$\frac{O}{H} = \frac{O^+}{H^+} + \frac{O^{++}}{H^+}. \quad (12)$$

Используя измеренные интенсивности линий [O II]  $\lambda 372.7$ , [O III]  $\lambda 495.9 + \lambda 500.7$  и приведенные уравнения, мы определили содержание кислорода  $(O/H)_{ff}$  для нашей выборки областей H II. Полученные содержания кислорода  $(O/H)_{ff}$  приведены в табл. 1. Используемая нами методика позволяет получить надежные значения электронных температур (и следовательно, содержаний ионов кислорода) для объектов, в которых интенсивность небулярной линии дважды ионизованного кислорода удовлетворяет условию  $\lg R_3 < 0.5$ . Поэтому объекты с  $\lg R_3 > 0.5$  были исключены из нашего списка. Окончательный список содержит 93 объекта, а полное число спектров равно 116.

Для 13 галактик получены два и более определения содержаний кислорода, так как для них имеется два и более SDSS-спектра. Это дает возможность оценить точность определения содержаний кислорода. Интенсивности линий в этих спектрах были измерены двумя способами. На рис. 6, а сравниваются содержания кислорода  $12 + \lg(O/H)_{\text{IRAF}}$ , найденные с интенсивностями линий, измеренными при помощи пакета IRAF, и содержания кислорода  $12 + \lg(O/H)_{\text{FIT}}$ , найденные с использованием интенсивностей линий, измеренных путем аппроксимации линий гауссианами. Из рис. 6, б видно, что содержания кислорода, найденные по интенсивностям линий, измеренным двумя способами, хорошо согласуются между собой. На рис. 6, в содержания кислорода для отдельных спектров галактики сравниваются



Рис. 6. Коррелятивные зависимости: *a* — значений содержания кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{\text{IRAF}}$ , найденных с использованием пакета IRAF, и значений содержания  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_{\text{FIT}}$ , найденных путем представления линий гауссианами; *б* — значений содержания  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_i$  для отдельных спектров галактики и средних значений содержания кислорода  $12 + \lg(\text{O}/\text{H})_m$  для данной галактики (точки — IRAF-значения, кружки — FIT-значения)



со средними значениями содержаний кислорода для данной галактики. Видно, что содержания кислорода, найденные для отдельных спектров, хорошо согласуются между собой; разница не превышает 0.05 dex. Таким образом, точность измерения интенсивностей линий в SDSS-спектрах галактик позволяет получить достаточно надежные оценки содержаний кислорода в объектах высокой металличности.

### ЗАВИСИМОСТЬ СВЕТИМОСТЬ — МЕТАЛЛИЧНОСТЬ

Положения исследованных нами SDSS-галактик на диаграмме «светимость — металличность» показаны точками на рис. 7. Расстояния до галактик определены с использованием стандартной формулы

$$d = cz / H_0, \quad (13)$$

где  $d$  — расстояние до галактики,  $c$  — скорость света,  $z$  — красное смещение,  $H_0$  — постоянная Хаббла. Для постоянной Хаббла принято значение  $H_0 = 72$  (8) км с<sup>-1</sup>Мпк<sup>-1</sup>, полученное в рамках ключевого проекта на Космическом телескопе Хаббла [15]. Видимая звездная величина галактики в полосе  $B$  вычислена по звездным величинам в полосах  $g$  и  $r$  фотометрической системы SDSS при помощи формулы

$$m_B = m_g - 0.42(m_g - m_r) - 0.22, \quad (14)$$

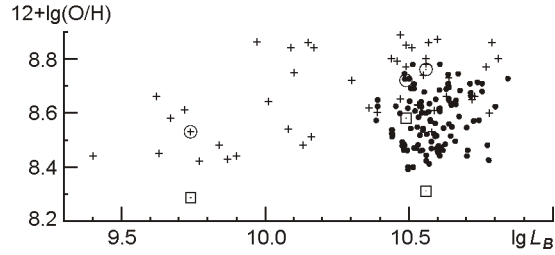


Рис. 7. Зависимость светимость — металличность: точки —  $(O/H)_{ff}$ -содержания в галактиках нашей выборки, кружки и квадратики —  $(O/H)_{Te}$ -содержания соответственно в центрах и в дисках (на галактоцентрическом расстоянии 0.5 изофотного радиуса) спиральных галактик NGC598 (M33), NGC5194 (M51) и NGC5457 (M101). Крестики —  $(O/H)_{ff}$ -содержания в центрах близких спиральных галактик по данным [34]

которая получена по данным [17]. С помощью найденного расстояния до галактики вычисляется модуль расстояния  $m - M = 5 \lg d - 5$  (здесь  $d$  — расстояние в парсеках) и находится светимость  $\lg L_B/L_\odot = 0.4(M_{B,\odot} - M_B)$ , где  $M_{B,\odot} = 5.48$  [1].

Радиальное распределение содержания кислорода в дисках трех близких спиральных галактик установлено достаточно надежно на базе областей H II, содержания кислорода в которых определены классическим  $T_e$ -методом. Сравнение положений этих галактик на диаграмме «светимость — металличность» с положениями исследованных нами SDSS-галактик может служить косвенной проверкой достоверности найденных содержаний кислорода в исследованных галактиках.

Спектральные наблюдения областей H II в спиральной галактике NGC5457 = M101 проводились неоднократно. В спектрах ряда областей H II измерена авроральная линия [O III] 436.3 (см. компиляцию спектральных данных [28]), что позволяет определить содержание кислорода в них классическим  $T_e$ -методом. Радиальное распределение содержаний кислорода в диске NGC5457, полученное в работах [7, 21] для областей H II с измеренными электронными температурами, дается уравнением

$$12 \lg(O/H)_{T_e} = 8.76 - 0.90R_G, \quad (15)$$

где  $R_G$  — галактоцентрические расстояния, выраженные в единицах фотометрического (изофотного) радиуса галактики  $R_{25}$ . Недавно в работах [8, 13] по измерениям интенсивности авроральных линий азота [N II] 575.5 нм в спектрах 10 областей H II в диске спиральной галактики NGC5194 = M51 было определено содержание кислорода  $T_e$ -методом. Было получено, что радиальное распределение содержания кислорода в диске NGC5194 дается уравнением

$$12 \lg(O/H) = 8.72 - 0.28R_G. \quad (16)$$

В работе [25] по измерениям интенсивности авроральной линии [O III] 436.3 нм в спектрах ряда областей H II диска спиральной

галактики NGC598 = M33 с привлечением данных [10, 22, 45] найдено радиальное распределение содержаний кислорода в диске NGC598:

$$12 \lg(\text{O} / \text{H}) = 8.53 - 0.054R, \quad (17)$$

где  $R$  — галактоцентрические расстояния в килопарсеках. Фотометрический радиус галактики NGC598 равен  $R_{25} = 9.06$  кпк [35]. С этим значением  $R_{25}$  уравнение (17) переписется в виде

$$12 \lg(\text{O} / \text{H})_{T_e} = 8.53 - 0.49R_G. \quad (18)$$

Таким образом, радиальное распределение содержания кислорода в дисках галактик M33, M51 и M101 установлено на базе классического  $T_e$ -метода по областям H II. Сравним положения галактик NGC598, NGC5194 и NGC5457 на диаграмме «светимость — металличность» с положениями исследованных нами SDSS-галактик (рис. 7). Положения SDSS-галактик показаны точками. Поскольку вспышки звездообразования и сопутствующие им области H II могут находиться на разных галактоцентрических расстояниях, то полученные нами содержания кислорода в разных SDSS-галактиках могут характеризовать металличность на разных галактоцентрических расстояниях. Кружками на рис. 7 показаны содержания кислорода в центрах галактик NGC598, NGC5194 и NGC5457. Светимости галактик взяты из работы [35]. Квадратиками на рис. 7 показаны содержания кислорода в галактиках NGC598, NGC5194 и NGC5457 на галактоцентрическом расстоянии, равном половине фотометрического радиуса галактики  $R_{25}$ . Видно, что  $(\text{O}/\text{H})_{ff}$ -содержания в выборке SDSS-галактик соответствуют  $(\text{O}/\text{H})_{T_e}$ -содержаниям в гигантских спиральных галактиках NGC5457 (на галактоцентрических расстояниях от  $0.1R_{25}$  до  $0.4R_{25}$ ) и NGC5194 (от  $0.1R_{25}$  до  $0.8R_{25}$ ). Это можно рассматривать как косвенное подтверждение реалистичности оценок  $(\text{O}/\text{H})_{ff}$ -содержаний в исследованных галактиках.

Крестиками на рис. 7 показаны  $(\text{O}/\text{H})_{ff}$ -содержания в центрах близких спиральных галактик [34]. Видно, что есть максимальное содержание кислорода ( $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.9$ ) в центрах спиральных галактик высокой светимости ( $\lg L_B > 10.0$ ). В работе [34] предложена следующая интерпретация этого факта. В центральных частях некоторых галактик высокой светимости газ практически исчерпан (полностью перешел в звезды), и содержание кислорода в центральных частях этих галактик достигло максимальной величины. Так как максимально достижимая величина содержания кислорода в системе не зависит от массы системы, а определяется только долей массы газа, перешедшей в звезды, то это приводит к появлению плато на диаграмме «светимость — металличность». Из рис. 7 видно, что содержание кислорода в нашей выборке SDSS-галактик высокой светимости на  $0.2$ — $0.5$  dex ниже максимально достижимой величины, что характерно для системы, в которой доля газа составляет 15—40 % от общей массы.

Сравним характеристики излучающих областей в SDSS-галактиках с характеристиками областей H II в близких галактиках. Поток

ионизирующего излучения от скопления звезд, возбуждающих свечение области Н II, принято характеризовать эквивалентным количеством звезд спектрального класса O7, находящихся на главной последовательности (класс светимости — V). Число квантов, ионизирующих атомы водорода, от звезды O7 V равно  $N_{Lc} = 5.62 \cdot 10^{48} \text{ с}^{-1}$  по данным [26] или  $N_{Lc} = 1.12 \cdot 10^{49} \text{ с}^{-1}$  по данным [44]. Один ионизирующий квант от звезды приводит к образованию 0.157 квантов в линии H $\alpha$  и 0.449 квантов в линии H $\beta$  в спектре туманности. Если все ионизирующие кванты звезды поглощаются атомами водорода в туманности (т. е. область Н II ограничена излучением и ионизирующее излучение не поглощается пылинками), то свечение туманности, возбуждаемой звездой O7 V, в линии H $\alpha$  составляет  $\lg(L/L_{\odot}) = 2.97$ , а в линии H $\beta$  —  $\lg(L/L_{\odot}) = 3.30$  при использовании значений  $N_{Lc}$  из [26]. При использовании значений  $N_{Lc}$  из [44] оценки светимости туманности в линиях H $\alpha$  и H $\beta$  в два раза выше.

Используя измеренные потоки в линии H $\beta$  в SDSS-спектрах, мы вычислили эквивалентное количество  $N_{O7V}$  ионизирующих звезд O7 V для каждого объекта. Полученные значения  $N_{O7V}$  представлены на рис. 8, а точками. В работе [20] приведены потоки в линии H $\alpha$  от ярчайших областей Н II в близких спиральных и неправильных галактиках. Величина потока представляет собой среднее значение для трех ярчайших областей Н II в галактике. Вычисленные значения  $N_{O7V}$  для ярчайших областей Н II в близких галактиках представлены кружками. Поток в линии H $\alpha$  от голубой компактной карликовой галактики SBS 0335-052 E [37] свидетельствует о том, что свечение газа в этой галактике возбуждается примерно  $10^4$  звезд O7 V. Из рис. 8, а следует, что число звезд, возбуждающих свечение излучающих областей в нашей выборке SDSS-галактики, на два-три порядка превышает число звезд, возбуждающих свечение ярчайших областей Н II в близких га-

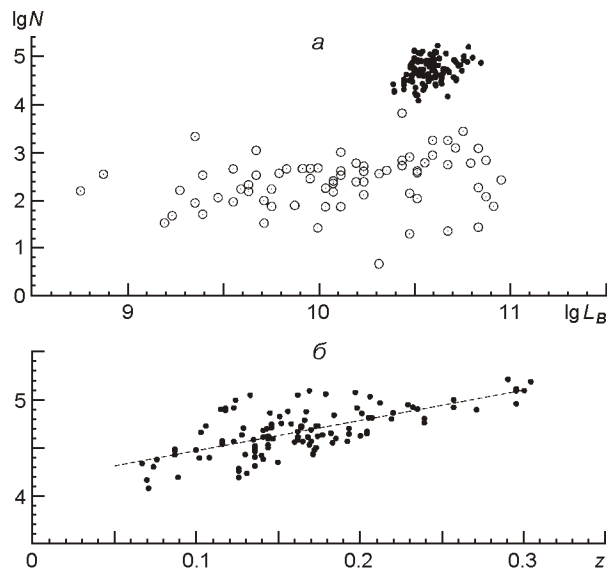


Рис. 8. Эквивалентное количество ионизирующих звезд O7 V: а — в зависимости от светимости (точки — объекты в SDSS-галактиках из нашей выборки, кружки — средние значения для трех ярчайших областей Н II в близких галактиках [20]); б — зависимости от красного смещения  $z$  (точки — отдельные объекты нашей выборки, линия — МНК-аппроксимация)

лактиках и на порядок превышает число звезд, возбуждающих свечение газа в SBS 0335-052 E. Этот факт свидетельствует о том, что наша выборка SDSS-галактик содержит только галактики, в которых протекают мощные вспышки звездообразования и образуются звездные сверхскопления, возбуждающие сверхгигантские области H II. Следует, однако, отметить, что потоки излучения в линии H от некоторых SDSS-галактик достигают  $10^{36}$  Дж/с [5], тогда как для галактик нашей выборки они лежат в интервале от  $2 \cdot 10^{34}$  Дж/с до  $2 \cdot 10^{35}$  Дж/с.

На рис. 8, б число звезд, возбуждающих свечение излучающих областей в выборке SDSS-галактик, представлено в зависимости от красного смещения галактики. На рис. 8, б видно, что  $N_{07V}$  увеличивается с расстоянием до галактики. Эта тенденция может быть обусловлена селекцией при создании выборки SDSS-галактик. Действительно, мы выбирали объекты, спектры которых характерны для областей H II. SDSS-спектры получены с фиксированной апертурой (круглое отверстие с диаметром 3 ") [47]. Красные смещения выборки SDSS-галактик лежат в интервале от  $z = 0.07$  до  $z = 0.3$ . При  $z = 0.07$  измеряется излучение от области с диаметром 4 кпк, при  $z = 0.3$  измеряется излучение от области с диаметром 18 кпк. Очевидно, что чем дальше галактика, тем больше должна быть область H II, чтобы ее излучение доминировало в SDSS-спектре.

Итак, наша выборка SDSS-галактик содержит только галактики, в которых есть сверхгигантские области H II. Очевидно, что активное звездообразование протекает (и сопутствующие гигантские области H II образуются) только при наличии достаточного количества газа. Таким образом, отсутствие в нашей выборке галактик с содержаниями кислорода, близкими к максимально достижимой величине, естественным образом объясняется селекцией при формировании выборки галактик.

На рис. 9 найденные металличности SDSS-галактик представлены в зависимости от красных смещений. Видно, что металличность SDSS-галактики коррелирует с ее красным смещением. Зависимость

$$12 + \lg(O/H) = 8.71(0.03) - 0.88(0.16)Z, \quad (19)$$

полученная методом наименьших квадратов, показана на рис. 9 прямой. Средняя металличность галактик увеличивается при уменьше-

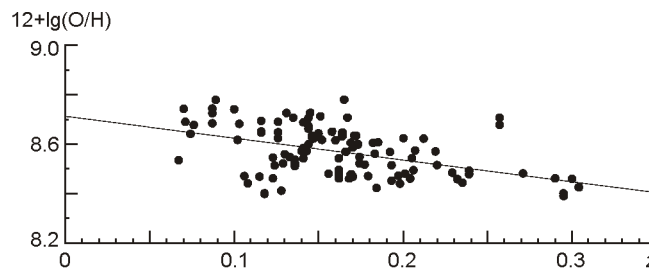


Рис. 9. Диаграмма «содержание кислорода — красное смещение» для нашей выборки SDSS-галактик. Линия — МНК-аппроксимация

нии красного смещения. Диаграмму «металличность — красное смещение» можно рассматривать как диаграмму «металличность — возраст галактики». Увеличение средней металличности галактик с уменьшением красного смещения можно интерпретировать как эволюционные изменения металличности в галактиках. Увеличение содержания кислорода может быть обусловлено уменьшением доли газа в галактиках. Однако нельзя отбросить и иную возможность. Как отмечалось выше, с увеличением красного смещения увеличивается область галактики, которая вносит вклад в SDSS-спектр. Если эмиссионные линии образуются не в единой сверхгигантской области H II, а в совокупности большого числа областей H II, рассредоточенных по диску галактики, то с увеличением красного смещения увеличиваются галактоцентрические расстояния областей H II, излучение которых вносит вклад в SDSS-спектр. Это может дать наблюдаемое уменьшение металличности с красным смещением из-за радиального градиента металличности в дисках спиральных галактик.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В базе спектральных данных SDSS мы выбрали 93 галактики высокой светимости, спектры которых содержат характерные для областей H II эмиссионные линии, пригодные для измерений, т. е. шумы не препятствуют определению непрерывного спектра. Измеренные интенсивности линий используются для определения химического состава.

Так как авроральная линия дважды ионизованного кислорода [O III] 436.3 нм не измеряется в спектрах объектов из нашей выборки, то необходимое для определения электронной температуры отношение интенсивностей небулярных и авроральных линий вычисляется при помощи  $f_f$ -соотношения.

Полученные нами содержания кислорода в SDSS-галактиках высокой светимости лежат в интервале  $8.40 < 12 + \lg(\text{O}/\text{H}) < 8.75$ . Найденные нами значения примерно в 3 раза ниже содержаний кислорода, полученных Тремонти и др. [43] при помощи собственного варианта  $R_{23}$ -калибровки, и согласуются с содержаниями кислорода, полученными Эрб и др. [12] при помощи N2-калибровки. Содержания кислорода в нашей выборке галактик высокой светимости на 0.2—0.5 dex ниже максимально достижимой величины. Это обусловлено тем, что наша выборка SDSS-галактик содержит только богатые газом галактики, в которых протекают мощные вспышки звездообразования и образуются звездные сверхскопления, возбуждающие сверхгигантские области H II. Эквивалентное количество звезд O7 V, возбуждающих свечение излучающих областей в нашей выборке SDSS-галактик, на два-три порядка превышает количество звезд, возбуждающих свечение ярчайших областей H II в близких галактиках, и на порядок — количество звезд, возбуждающих свечение газа в SBS 0335-052 E.



Металличность SDSS-галактики коррелирует с ее красным смещением. Средняя металличность галактик возрастает при уменьшении красного смещения. Эта тенденция может быть обусловлена эволюционными изменениями в галактиках. Однако специфика SDSS-наблюдений также может быть причиной этой корреляции.

Данная работа была частично финансирована в рамках программы «КосмоМикроФизика» Национальной академии наук Украины.

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

1. Аллен К. У. Астрофизические величины. — М.: Мир, 1977.—446 с.
2. Пилюгин Л. С., Изотова И. Ю., Шолудченко Ю. С. Содержание кислорода в близких галактиках на основе спектров H II областей из цифрового обзора неба Sloan II. Взаимодействующие галактики NGC4631 и NGC4656 // Кинематика и физика небес. тел.—2008.—**24**, № 4.—С. 263—277.
3. 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.—С. 230—240.
4. Aggarwal K. M., Keenan F. P. Excitation rate coefficients for fine-structure transitions in OIII // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1999.—**123**, N 1.—P. 311—349.
5. Argence B., Lamareille F. Emission-lines calibrations of the star formation rate from the Sloan Digital Sky Survey // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**495**, N 3.— P. 759—773.
6. Asari N. V., Cid Fernandes R., Stasinska G., et al. The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**381**, N 1.— P. 263—279.
7. Bresolin F. The oxygen abundance in the inner H II regions of M101. Implications for the calibration of strong-line metallicity indicators // *Astrophys. J.*—2007.—**656**, N 1.—P. 186—197.
8. Bresolin F., Garnett D. R., Kennicutt R. C. Abundances of metal-rich H II regions in M51 // *Astrophys. J.*—2004.—**615**, N 1.—P. 228—241.
9. Bresolin F., Schaerer D., Gonzalez Delgado R. M., Stasinska G. A VLT study of metal-rich extragalactic H II regions. I. Observations and empirical abundances // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**441**, N 3.—P. 981—997.
10. Crockett N. R., Garnett D. R., Masey P., Jacoby G. Neon and oxygen abundances in M33 // *Astrophys. J.*—2006.—**637**, N 2.—P. 741—751.
11. Edle n B. Comparison of theoretical and experimental level values of the  $n = 2$  configurations in the carbon isoelectronic sequence // *Phys. Scripta.*—1985.—**31**, N 5.— P. 345—358.
12. Erb D. K., Shapley A. E., Pettini M., et al. The mass — metallicity relation at  $Z > 2$  // *Astrophys. J.*—2006.—**644**, N 2.—P. 813—828.
13. Garnett D. R., Kennicutt R. C., Bresolin F. The first measured electron temperatures for metal-rich H II regions in M51 // *Astrophys. J.*—2004.—**607**, N 1.—P. 21L—24L.
14. Garnett D. R., Shields G. A. The composition gradient across M81 // *Astrophys. J.*—1987.—**317**, N 1.—P. 82—101.
15. Freedman W. L., Madore B. F., Gibson B. K., et al. Final results from the Hubble Space

- Telescope key project to measure the Hubble constant // *Astrophys. J.*—2001.—**553**, N 1.—P. 47—72.
16. *Froese Fischer C., Tachiev G.* Breit-Pauli energy levels, lifetimes, and transition probabilities for the beryllium-like to neon-like sequences // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.*—2004.—**87**, N 1.—P. 1—184.
  17. *Fukugita M., Ichikawa T., Gunn J. E., et al.* The Sloan Digital Sky Survey photometric system // *Astron. J.*—1996.—**111**, N 4.—P. 1748—1756.
  18. *Izotov Y. I., Thuan T. X., Lipovetsky V. A.* The primordial helium abundance from a new sample of metal-deficient blue compact galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**435**, N 2.—P. 647—667.
  19. *Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., et al.* The host galaxies of active galactic nuclei // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—**346**, N 4.—P. 1055—1077.
  20. *Kennicutt R. C.* Properties of H II region populations in galaxies. I. The first-ranked H II regions // *Astrophys. J.*—1988.—**334**, N 1.—P. 144—158.
  21. *Kennicutt R. C., Bresolin F., Garnett D.* The composition gradient in M101 revisited. II. Electron temperatures and implications for the nebular abundance scale // *Astrophys. J.*—2003.—**591**, N 2.—P. 801—820.
  22. *Kwitter K. B., Aller L. H.* Chemical compositions of H II regions in the Triangulum spiral, M33 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1981.—**195**.—P. **939—957**.
  23. *Lamareille F., Mouhcine M., Contini T., et al.* The luminosity-metallicity relation in the local universe from the 2dF Galaxy Redshift Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**350**, N 2.—P. 396—406.
  24. *Lequeux J., Peimbert M., Rayo J. F., et al.* Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies // *Astron. and Astrophys.*—1979.—**80**, N 2.—P. 155—166.
  25. *Magrini L., Vilchez J. M., Mampaso A., et al.* The metallicity gradient of M33: chemical abundances of H II regions // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**470**, N 3.—P. 865—874.
  26. *Martins F., Schaerer D., Hillier D. J.* A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars // *Astron. and Astrophys.*—2005.—**436**, N 3.—P. 1049—1065.
  27. *Melbourne J., Salzer J. J.* Metal abundances of KISS galaxies. I. Coarse metal abundances and the metallicity-luminosity relation // *Astron. J.*—2002.—**123**, N 5.—P. 2302—2311.
  28. *Pilyugin L. S.* The oxygen abundance distribution in M 101 // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**373**, N 1.—P. 56—62.
  29. *Pilyugin L. S.* Oxygen abundances in dwarf irregular galaxies and the metallicity — luminosity relationship // *Astron. and Astrophys.*—2001.—**374**, N 2.—P. 412—420.
  30. *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. L1—L4.
  31. *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.
  33. *Pilyugin L. S., Thuan T. X., Vilchez J. M.* Oxygen abundances in the most oxygen-rich spiral galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**367**, N 3.—P. 1139—1146.
  32. *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.* 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.

35. *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.
36. *Pradhan A. K., Montenegro M., Nahar S. N., Eissner W.* [O II] line ratios // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**366**, N 1.—P. L6—L9.
37. *Pustilnik S. A., Pramskij A. G., Kniazev A. Y.* SBS 0335-052 E and W: implications of new broad-band and H photometry // *Astron. and Astrophys.*—2004.—**425**, N 1.—P. 51—65.
38. *Richer M. G., McCall M. L.* Oxygen abundances in diffuse ellipticals and the metallicity-luminosity relations for dwarf galaxies // *Astrophys. J.*—1995.—**445**, N 2.—P. 642—659.
39. *Skillman E. D., Kennicutt R. C., Hodge P. W.* Oxygen abundances in nearby dwarf irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1989.—**347**, N 2.—P. 875—882.
40. *Smith H. E.* Spectrophotometric observations of ionized hydrogen regions in nearby spiral and irregular galaxies // *Astrophys. J.*—1975.—**199**, N 3.—P. 591—610.
41. *Stasinska G.* [Ar III]/[O III] and [S III]/[O III]: well-behaved oxygen abundance indicators for H II regions and star forming galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2006.—**454**, N 3.—P. 127L—130L.
42. *Stoughton C., Lupton R. H., Bernardi M., et al.* Sloan Digital Sky Survey: early data release // *Astron. J.*—2002.—**123**.—P. 485—548.
43. *Tremonti C. A., Heckman T. M., Kauffmann G., et al.* The origin of the mass-metallicity relation: insight from 53000 star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2004.—**613**, N 2.—P. 898—913.
44. *Vacca W. D.* On the determination of the number of O stars in H II regions and starburst galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**421**, N 1.—P. 140—152.
45. *Vilchez J. M., Pagel B. E. J., Diaz A. I., et al.* The chemical composition gradient across M 33 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1988.—**235**.—P. 633—653.
46. *Wenaker I.* The spectrum of singly ionized oxygen, O II // *Phys. Scripta.*—1990.—**42**, N 6.—P. 667—684.
47. *York D. G., Adelman J., Anderson J. E., et al.* The Sloan Digital Sky Survey: the technical summary // *Astron. J.*—2000.—**120**, N 3.—P. 1579—1587.
48. *Zaritsky D., Kennicutt R. C., Huchra J. P.* H II regions and the abundance properties of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1994.—**420**, N 1.—P. 87—109.

Поступила в редакцию 23.04.09