

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2020.02.003>

УДК 524.7

I. Ю. Ізотова¹, Ю. І. Ізотов²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська 60, Київ, Україна, 01601
iizotova@ukr.net

²Інститут теоретичної фізики ім. М.М.Боголюбова Національної академії наук України
вул. Метрологічна 14б, Київ, Україна, 03143

**Інтегральні характеристики галактик
із зореутворенням з SDSS DR14, що мають
екстремально низький вміст кисню**

Проведено дослідження інтегральних характеристик вибірки з 66 галактик із зореутворенням з 14-го випуску огляду неба SDSS, що мають екстремально низький вміст кисню. Вміст кисню в 42 досліджуваних галактиках з зареєстрованою лінією [O III] 436.3 нм визначено прямим T_e -методом, а для решти галактик — методом сильних ліній. Отримані значення вмісту $12 + \lg(O/H)$ лежать у діапазоні 6.97...7.52, і в середньому вони учтевро менші від значень вмісту, отриманих для великої вибірки компактних галактик з активним зореутворенням з SDSS. Зоряні маси і світності в лінії H для обох вибірок галактик отримано з SDSS-спектрів із малою спектральною апертурою (2-3 в діаметрі). Для визначення їхніх значень для всієї галактики введено апертурні корекції, які враховують випромінювання, що не попадає у спектральну щілину. Зоряні маси і світності в оптичному діапазоні у 100 разів менші за відповідні величини для галактик з вибірки порівняння. На діаграмах «металічність — світність» і «металічність — зоряна маса» ці галактики мають менший вміст кисню при фіксованих масі і світності порівняно з галактиками основної вибірки SDSS. Ймовірна причина — акреція незбагаченого міжгалактичного газу, що призводить до зменшення вмісту кисню у міжзоряному середовищі галактики. Більшість галактик з екстремально низьким вмістом кисню було зареєстровано космічним телескопом WISE у середньому ІЧ-діапазоні. Показник кольору $W1 - W2$, де $W1$ і $W2$ — зоряні величини на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм, у цих

галактиках відповідає величині, типовій для випромінювання зір та/або вільно-вільного випромінювання іонізованого газу, тим самим виключаючи наявність теплого і гарячого пилу внаслідок низької світності УФ-випромінювання — головного джерела нагрівання пилу в галактиках із зореутворенням.

Ключові слова: карликові галактики із зореутворенням, області іонізованого водню, хімічний склад, міжзоряний пил, інфрачервоне випромінювання.

ВСТУП

Близькі карликові галактики з екстремально низьким вмістом кисню ($12 + \lg(O/H) = 7.35$) з їхньою малою масою, високою ефективністю зореутворення і низькою металічністю розглядаються як локальні аналоги галактик на великих червоних зміщеннях. Невеликі відстані до них дозволяють вивчати їх детальніше, ніж галактики на великих z , встановити корисні обмеження на фізичні умови в їхньому міжзоряному середовищі, на походження хімічних елементів і побудову моделей зоряної еволюції. Ці дослідження можна використати для аналізу фізичних властивостей первинних галактик на червоних зміщеннях $z = 5\ldots10$, які, як вважається, були основним джерелом іонізаційного випромінювання на довжинах хвиль < 91.2 нм, що призвело до вторинної іонізації Всесвіту [4, 20, 24—26].

Кількість виявлених галактик з низьким вмістом кисню в сучасну епоху вкрай мала, проте вони домінували на великих червоних зміщеннях. Серед близьких галактик з $z < 0.15$ найменші значення вмісту кисню отримано для J0811+4730 ($12 + \lg(O/H) = 6.98 \pm 0.02$ [19]), AGC198691 (7.02 ± 0.03 [10]), J1234+3901 (7.04 ± 0.03 [18]) і SBS 0335-052W ($6.86\ldots7.22$ для різних областей зореутворення [13]). Такий низький вміст кисню може свідчити про еволюційну молодість галактик, в яких спостерігаються одні з перших епізодів зореутворення.

Великі спектральні огляди, такі як огляд SDSS (Sloan Digital Sky Survey), що містить мільйони спектрів галактик, дають можливість значно збільшити вибірку галактик з екстремально низьким вмістом кисню $12 + \lg(O/H) = 7.35$. У серії робіт [8, 9, 17] на основі даних SDSS DR10 і DR12 було знайдено десятки таких галактик. Галактики J0811+4730 і J1234+3901 з найменшим відомим вмістом кисню [18, 19] виявлено в оглядах SDSS DR13 і DR14. Оскільки лінії кисню в галактиках з екстремально низьким вмістом кисню значно слабші, ніж лінії в галактиках з більшими металічностями, то в SDSS-спектрах значної кількості галактик лінію [O III] $\lambda 436.3$ нм не зареєстровано, виключаючи тим самим визначення вмісту кисню прямим T_e -методом. Тому в роботі [14] для визначення вмісту кисню було розроблено надійний метод сильних ліній з використанням інтенсивностей ліній [O II] $\lambda 372.7$ нм, [O III] $\lambda 495.9$ нм і [O III] $\lambda 500.7$ нм. Метод був адаптований

для галактик з екстремально низькою металічністю. У роботі [14] приведено список 66 галактик, для яких вміст кисню визначався трьома методами, і принаймні одним із трьох методів було отримано вміст кисню $12 + \lg(O/H) = 7.35$.

Залежності між інтегральними характеристиками невеликих вибірок галактик з $12 + \lg(O/H) = 7.35$ за даними SDSS DR10 і DR12 досліджувалися в роботах [8, 9, 17]. Було встановлено, що на діаграмах «вміст кисню — світність» і «вміст кисню — зоряна маса» галактики з екстремально низьким вмістом кисню систематично зміщені в область меншого вмісту кисню по відношенню до екстраполяції залежностей, отриманих для галактик з більшим вмістом кисню. Метою цієї роботи є визначення інтегральних характеристик і залежностей між ними для більшої вибірки з 66 галактик, створеної на основі даних SDSS DR14 і приведеної в роботі [14].

ВИБІРКА ГАЛАКТИК З SDSS DR14 З ЕКСТРЕМАЛЬНО НИЗЬКИМ ВМІСТОМ КИСНЮ

У таблиці приведено деякі характеристики 66 галактик з екстремально низьким вмістом з роботи [14]: екваторіальні координати галактик, їхні червоні зміщення z , абсолютні зоряні величини M_g , отримані з видимих величин у g -смузі SDSS (0.4825 мкм) і виправлені за міжзоряну екстинкцію в нашій Галактиці; та зоряні маси M_{star} , отримані з моделювання розподілу енергії в SDSS-спектрах. При цьому SDSS-спектри було виправлено за повну міжзоряну екстинкцію, отриману із спостережуваного декремента емісійних ліній водню серії Бальмера.

Метод моделювання розподілу енергії в спектрі галактики, використовуваний в роботі [14] для визначення зоряної маси, враховує вклад небулярного континууму, який більший для галактик з більшою еквівалентною шириною EW лінії H α . Пайовий вклад небулярного континууму поблизу лінії H α визначається відношенням спостережуваної EW до значення еквівалентної ширини EW для чисто небулярного випромінювання, яке дорівнює 90...110 нм (нижнє значення для найменших металічностей). У роботі [15] було показано, що маси галактик з великими значеннями EW з урахуванням небулярного континууму в середньому на 0.4 у логарифмічній шкалі нижчі, ніж у моделі без його урахування. Метод полягає у якнайкращому відтворенні спостережуваного розподілу енергії у спектрі галактики. Для цього початковими є моделі зоряної еволюції для зір з найменшим вмістом важких елементів, що становить 1/50 від сонячного вмісту [6]. За моделі зоряних атмосфер прийнято моделі [21]. Крім того, наша модель повинна відтворювати спостережувану еквівалентну ширину лінії H α . Типові помилки методу у визначенні зоряної маси компактних галактик з кутовими розмірами, близькими до спектральної апертури, становлять 0.2...0.3 в логарифмічній шкалі і викликані головним чи-

Інтегральні характеристики галактик з активним зореутворенням з SDSS DR14 з найменшою металічністю

Ім'я	J_{2000}	J_{2000}	z	$12 + \lg(\text{O/H})$	EW , нм	$\lg M_{\text{star}} - \lg M_{\odot}$	M_g	M_{FUV}	L , Дж/с	$W1$	$W2$
J0006+2413	00 ^h 06 ^m 49.0 ^s	+24 13 07	0.0342	7.25	4.0	7.6	-15.0	-14.9	32.3	...	...
J0015+0104	00 15 20.7	+01 04 37	0.0069	7.06	17.7	5.7	-14.6	-14.1	32.3	...	...
J0029-0025	00 29 49.5	-00 25 40	0.0141	7.25	3.5	7.1	-14.2	-12.4	31.7	...	...
J0042+3247	00 42 33.4	+32 47 21	0.1426	7.22	6.8	8.1	-17.2	...	33.3	...	...
J0106+2345	01 06 09.2	+23 45 34	0.0521	7.17	27.7	6.5	-15.1	-16.1	31.6	...	...
J0107+0103	01 07 46.6	+01 03 52	0.0022	7.31	2.1	7.5	-15.2	...	32.0	14.7	14.4
J0113+0052	01 13 40.4	+00 52 39	0.0038	7.16	4.6	7.6	-14.3	...	32.1	...	...
J0122+0048	01 22 41.6	+00 48 42	0.0573	7.22	15.6	7.0	-16.1	-15.2	33.1	...	...
J0137+2032	01 37 41.0	+20 32 47	0.0348	7.31	2.7	6.8	-13.8	...	31.2	...	...
J0143+1958	01 43 15.2	+19 58 06	0.0017	7.29	2.1	4.4	-7.6	...	29.0	...	...
J0153+0104	01 53 12.0	+01 04 40	0.0633	7.39	22.9	6.4	-16.2	...	33.3	17.8	...
J0207-0821	02 07 24.8	-08 21 44	0.0127	7.30	2.9	7.3	-14.2	-12.5	31.7	...	...
J0222-0935	02 22 38.6	-09 35 35	0.1148	7.26	6.0	8.2	-17.1	...	33.1	...	...
J0223-0918	02 23 02.7	-09 18 22	0.0503	7.36	2.3	7.9	-15.9	...	32.0	...	...
J0247-0404	02 47 12.8	-04 04 31	0.0350	7.11	8.5	7.0	-14.0	-14.4	32.1	16.4	16.7
J0314-0108	03 14 26.1	-01 08 47	0.0274	7.26	3.1	8.2	-17.9	-15.3	33.6	15.6	15.4
J0808+3244	08 08 56.3	+32 44 19	0.1464	7.31	5.0	9.0	-18.8	...	33.8	17.4	16.8
J0811+4730	08 11 52.1	+47 30 26	0.0445	6.97	28.2	6.0	-15.3	...	33.1	...	...
J0834+5905	08 34 37.2	+59 05 36	0.0048	7.22	2.2	7.6	-13.7	-11.1	31.6	15.0	15.0
J0859+3923	08 59 46.9	+39 23 06	0.0020	7.35	2.8	6.8	-13.1	-10.5	31.2	15.9	15.8
J0906+2528	09 06 00.9	+25 28 11	0.0092	7.39	1.4	7.6	-16.2	-14.7	32.2	16.2	15.7
J0911+3135	09 11 59.4	+31 35 36	0.0025	7.32	1.6	6.4	-12.8	-11.1	31.0	16.1	15.9
J0921+4038	09 21 36.6	+40 38 54	0.0714	7.32	30.1	6.7	-15.7	...	33.1	...	...
J0934+5514A	09 34 02.0	+55 14 28	0.0025	7.14	5.8	6.6	-14.0	-13.9	31.9	15.4	14.8
J0934+5514B	09 34 02.4	+55 14 23	0.0027	7.26	14.8	5.5	-13.1	-14.1	32.3	15.4	14.8
J0944+0936	09 44 44.6	+09 36 49	0.0018	7.34	1.9	7.2	-15.4	...	32.0	...	...
J0945+3835	09 45 19.6	+38 35 53	0.0725	7.33	9.4	7.0	-16.8	-17.2	33.1	15.9	15.7
J0949+3426	09 49 35.1	+34 26 16	0.0050	7.55	3.3	7.5	-15.7	...	32.4	17.3	16.4
J0950+3127	09 50 19.5	+31 27 22	0.0018	7.42	1.2	6.3	-11.8	-10.8	30.3	16.1	15.9
J0955+6442	09 55 31.5	+64 42 50	0.0032	7.16	6.3	6.3	-12.8	-11.0	31.4	17.2	17.2
J0956+2849	09 56 46.1	+28 49 44	0.0016	7.25	1.8	6.9	-14.8	...	31.8	15.8	15.8
J0959+4626	09 59 05.8	+46 26 50	0.0020	7.26	5.4	6.4	-12.2	-10.5	31.2	...	...
J1000+3032	10 00 36.5	+30 32 10	0.0017	7.33	1.6	6.5	-11.7	-9.3	30.4	15.5	15.2
J1034+1546	10 34 05.4	+15 46 50	0.0041	7.37	2.0	6.8	-13.4	-11.7	31.4	16.0	16.0
J1036+2036	10 36 39.5	+20 36 16	0.0549	7.31	8.3	7.2	-15.5	-14.8	32.5	...	...
J1053+4713	10 53 21.3	+47 13 21	0.0680	7.24	9.2	7.4	-16.8	...	33.3	...	...
J1109+2007	11 09 09.5	+20 07 30	0.0038	7.19	6.2	7.3	-13.9	-11.9	31.9	15.5	15.3
J1119+0935	11 19 28.1	+09 35 44	0.0036	7.27	3.0	6.7	-13.9	-13.0	31.7	16.1	16.2
J1121+3744	11 21 46.7	+37 44 21	0.0064	7.28	1.3	7.5	-14.5	...	31.4	16.8	16.6
J1139+1917	11 39 31.8	+19 17 25	0.0115	7.33	3.9	8.3	-16.0	-14.8	32.4	16.4	16.3
J1153+3419	11 53 28.2	+34 19 22	0.0075	7.34	0.9	7.6	-14.6	-12.0	31.5	16.2	16.4
J1157+1713	11 57 44.1	+17 13 29	0.0127	7.05	1.0	8.2	-16.0	-14.0	32.0	16.5	16.7
J1157+5638	11 57 54.2	+56 38 17	0.0015	7.52	8.5	6.1	-12.3	-10.6	31.4	16.0	15.7
J1206+5007	12 06 08.5	+50 07 21	0.0514	7.19	21.9	6.4	-15.4	...	32.8	17.1	17.1
J1208+3727	12 08 09.8	+37 27 25	0.0036	7.30	1.9	7.1	-13.3	-11.5	31.1	16.4	16.0
J1220+4915	12 20 51.6	+49 15 55	0.0123	7.20	16.9	5.8	-12.9	-12.0	31.9	17.9	16.4
J1223+0727	12 23 58.2	+07 27 02	0.0041	7.36	2.6	6.7	-13.9	-12.4	31.6	16.4	16.0
J1226+0952	12 26 55.7	+09 52 56	0.0033	7.21	3.5	6.8	-14.1	-12.1	31.7	16.6	16.6
J1228-0125	12 28 45.5	-01 25 27	0.0728	7.35	10.7	7.0	-15.7	-15.9	32.6	...	...
J1234+3901	12 34 15.7	+39 01 16	0.1330	7.03	24.2	7.4	-17.2	-17.8	33.8	17.0	16.2
J1235+2755	12 35 52.4	+27 55 54	0.0026	7.37	3.1	7.4	-14.9	-14.2	32.2	15.8	15.9

Закінчення таблиці

Ім'я	α_{2000}	δ_{2000}	z	$12 + \lg(\text{O/H})$	$EW_{\text{H}\beta}$	$\lg M_{\text{star}} - \lg M_{\odot}$	M_g	M_{FUV}	$L, \text{Дж/с}$	$W1$	$W2$
J1244+3212	12 44 11.2	+32 12 22	0.0022	7.50	0.7	7.4	-15.6	...	31.8	14.9	14.7
J1250+1728	12 50 31.3	+17 28 16	0.0029	7.31	1.5	7.5	-14.3	-12.1	31.6	16.0	15.7
J1257+3341	12 57 40.6	+33 41 39	0.0030	7.52	10.9	6.4	-13.3	-12.1	31.8	16.0	15.6
J1258+1413	12 58 40.2	+14 13 01	0.0007	7.27	1.6	7.4	-13.7	-11.2	31.3	15.1	14.9
J1308+2002	13 08 28.4	+20 02 02	0.0050	7.40	0.7	7.2	-14.3	-12.1	31.3	15.9	15.9
J1314+2438	13 14 59.2	+24 38 39	0.0127	7.28	0.6	7.8	-15.7	-12.8	31.8	16.3	16.4
J1315+1745	13 15 56.3	+17 45 38	0.0032	7.38	1.5	7.5	-15.5	-12.3	32.1	14.3	14.2
J1414-0208	14 14 54.1	-02 08 23	0.0051	7.30	5.5	7.0	-14.1	-12.4	31.8	16.7	16.4
J1424+5200	14 24 19.5	+52 00 38	0.0495	7.22	1.3	7.1	-14.2	...	31.1	17.2	16.7
J1433+1544	14 33 21.3	+15 44 22	0.0203	7.37	3.4	7.2	-13.4	...	31.4	15.3	15.1
J1444+4237	14 44 12.8	+42 37 44	0.0021	7.27	3.0	6.8	-14.3	...	31.8	15.8	15.6
J1522+4201	15 22 55.6	+42 01 58	0.0019	7.37	1.9	6.8	-12.3	-9.5	30.9	16.5	16.4
J1640+2845	16 40 21.4	+28 45 56	0.0033	7.37	3.2	7.4	-13.9	-12.6	31.5	16.3	16.1
J1703+2126	17 03 11.6	+21 26 21	0.1017	7.32	0.9	9.1	-19.0	-16.4	33.1	14.0	13.9
J2104-0035	21 04 55.3	-00 35 22	0.0047	7.20	2.1	6.9	-14.8	-12.9	31.8	14.6	14.8

ном похибками визначення коефіцієнта екстинкції і еквівалентної ширини H . Детальніше метод описано, наприклад, в роботі [12].

Переважна частина галактик з вибірки [14] лежить на невеликих червоних зміщеннях, тому їхні кутові розміри помітно перевищують розміри щілини, використованої для отримання спектрів. В результаті інтегральні характеристики галактик, такі як світність L галактики в лінії H і її зоряна маса M_{star} , визначувані зі спектрів, будуть заниженими. Тому необхідно вводити апертурні корекції до даних роботи [14], де вони не були враховані. Єдиний шлях для врахування цих корекцій полягає у порівнянні повної зоряної величини (наприклад g) із зоряною величиною усередині спектральної апертури (g_{ap}), які доступні у базі даних SDSS. Введемо апертурну корекцію $corr$ для M_{star} і L у вигляді

$$corr = 2.512^{g_{ap} - g}, \quad (1)$$

припускаючи, що розподіл енергії в галактиці усередині і поза щілиною подібні, а вклад небуллярного континууму, тобто $EW_{\text{H}\beta}$, в різних областях галактики постійний. У карликівій галактиці, як правило, спостерігається градієнт кольору, що свідчить про старіше зоряне населення на периферії галактики, що робить корекцію менш визначеною. Проте ми застосуємо вираз (1) для корекції M_{star} з роботи [14].

Відстані до галактик, використані для розрахунку маси, світностей і абсолютних зоряних величин, визначено з червоних зміщень при значеннях космологічних параметрів $H_0 = 67.1 \text{ км с}^{-1} \text{Мпк}^{-1}$, $q_0 = 0.682$, $\Omega_m = 0.318$ [3].

Як вже зазначалося, в роботі [14] приведено значення вмісту кисню $12 + \lg(\text{O/H})$, розраховані трьома методами: прямим T_e -методом в

галактиках із зареєстрованою лінією [O III] 436.3 нм, а також напів-емпіричним і емпіричним методами сильних ліній в усіх галактиках з використанням інтенсивностей ліній [O II] 372.7 нм, [O III] 495.9, 500.7 нм. У таблиці для кожної галактики приведено лише одне значення вмісту кисню, а саме визначене прямим T_e -методом, якщо лінія [O III] 436.3 нм зареєстрована, або методом сильних ліній в іншому разі. Для деяких галактик значення вмісту кисню $12 + \lg(O/H)$, отримані прямим T_e -методом, перевищують значення 7.35, тоді як значення, отримані методом сильних ліній для тих же галактик, менші від 7.35. Ці розбіжності пов'язані з помилками вимірювань інтенсивності слабкої лінії [O III] 436.3 нм. Кількість таких галактик дорівнює 15, вони також включені у вибірку. Відмітимо також, що вміст кисню, визначений в локальних областях близьких протяжних карликових галактик, мабуть, не потребує апертурних корекцій, оскільки у ряді детально досліджених карликових галактик з екстремально низькою металічністю вміст кисню практично постійний по тілу галактики [11, 16].

Додатково до даних [14] у цій роботі було розраховано абсолютні зоряні величини M_{FUV} в ультрафіолетовому діапазоні на довжині хвилі = 0.152 мкм з використанням даних, отриманих на космічному телескопі GALEX і виправлених за повну міжзоряну екстинкцію, що включає екстинкції в галактиці і в нашій Галактиці, а також світності L в лінії H α , отримані із спостережуваних потоків в SDSS-спектрах, виправлені за повну міжзоряну екстинкцію і спектральну апертуру. У таблиці також приведено видимі зоряні величини $W1$ і $W2$ відповідно на довжинах хвиль 3.4 мкм і 4.6 мкм, отримані за спостереженнями на космічному телескопі WISE. Проте ми не наводимо дані WISE на довжинах хвиль 12 мкм і 22 мкм, оскільки тільки дуже небагато галактик з таблиці було зареєстровано на цих довжинах хвиль.

Вибірка включає декілька відомих галактик. Зокрема, об'єкти J0934+5514A і J0934+5514B — це відповідно NW- і SE-компоненти галактики I Zw 18. З іншого боку, деякі відомі галактики, наприклад SBS 0335-052, не включені, оскільки вони розташовані в області неба, що не покривається оглядом SDSS.

РОЗПОДІЛИ ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ЗАЛЕЖНОСТІ МІЖ НИМИ

Гістограми розподілів деяких інтегральних характеристик галактик з екстремально низьким вмістом кисню приведено на рис. 1 жирними лініями. Для порівняння використано вибірку порівняння, що складається з компактних карликових галактик з активним зореутворенням, відібраних з 14-го випуску SDSS [2]. Критерії відбору вибірки порівняння детально описано в роботі [12]. Ця вибірка включає близько 30000 галактик на червоних зміщеннях $z = 0...1$. Переважна частина

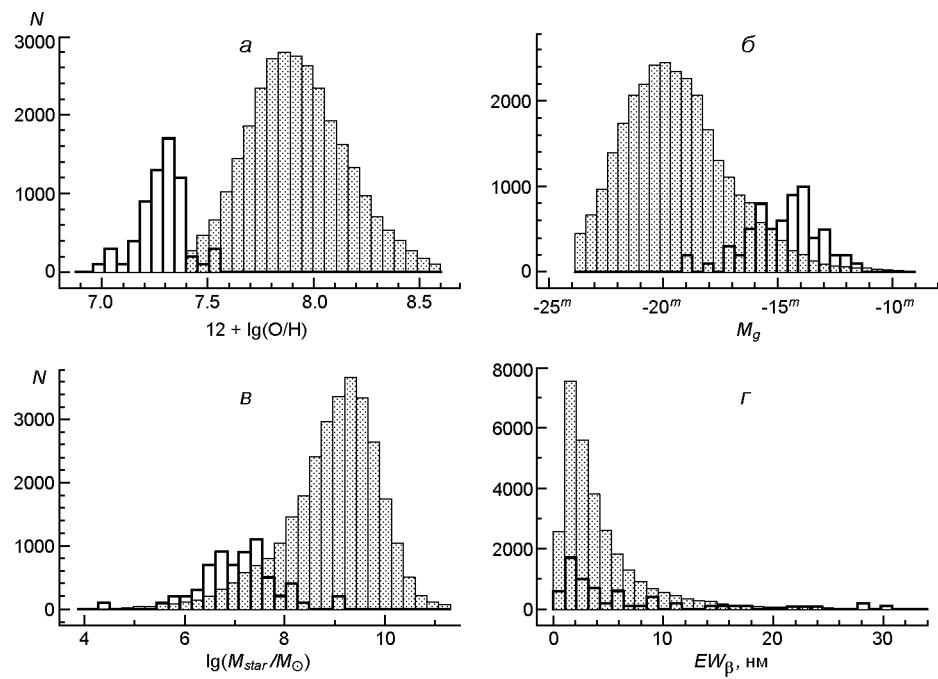


Рис. 1. Гістограми розподілів галактик із зореутворенням: *а* — по значеннях вмісту кисню $12 + \lg(\text{O/H})$, *б* — по абсолютних зоряних величинах SDSS M_g ($\lambda = 0.4825$ мкм), *в* — по зоряних масах M_{star} , *г* — по еквівалентній ширині EW емісійної лінії Н. Жирні лінії — збільшенні в 100 разів розподіли для галактик з екстремально низьким вмістом кисню, тонкі лінії (заштриховані стовпці) — кількість компактних галактик із зореутворенням з вибірки порівняння SDSS

відібраних галактик — компактні об'єкти з діаметрами менше 6'. У спектрах усіх відібраних галактик лінії Н спостерігаються в емісії з еквівалентною шириною $EW = 1$ нм, що вказує на активне зореутворення і наявність гарячих масивних зірок. Емісійна лінія [О III] 436.3 нм спостерігається у спектрах приблизно 18700 з 30000 галактик. У 2000 спектрах цю лінію вимірюють з похибкою, меншою за 25%, що дозволяє надійно визначити хімічний склад міжзорянного середовища цих галактик. Ці ж спектри з урахуванням корекції за екстинкцією і спектральну апертуру використовувалися для визначення деяких інтегральних характеристик галактик, таких як світності L і зоряні маси M_{star} . На рис. 1 гістограми розподілів вибірки порівняння приведено тонкими лініями (заштриховані стовпці).

З рис. 1*a* видно, що середній вміст кисню в галактиках з екстремально низьким вмістом кисню приблизно у чотири рази менший (0.6 у логарифмічній шкалі) ніж для галактик вибірки порівняння. Світності у смузі g ($\lambda = 0.4825$ мкм) і зоряні маси галактик з екстремально низьким вмістом кисню приблизно у 100 разів менші, ніж для вибірки порівняння (рис. 1*b* і 1*c*). Уперше зменшення вмісту кисню зі зменшенням маси галактики досліджувалося в роботі [22]. Отриманий результат свідчить про можливість декількох сценаріїв процесів, що

протікають у міжзоряному середовищі карликових галактик з екстремально низьким вмістом кисню. Можливо, збагачення міжзоряного середовища в карликових галактиках з екстремально низьким вмістом кисню відбувається з меншим середнім темпом зореутворення, попри те що у певні моменти часу в цих галактиках відбуваються рідкісні, але потужні спалахи зореутворення. Можливо, це результат викиду речовини, збагаченої важкими елементами, за межі галактики внаслідок її малої маси, або акреції на галактику незбагаченого міжгалактичного газу. Водночас, як видно з рис. 1 ε , розподіл галактик по значеннях еквівалентної ширини EW в обох вибірках подібні з відносно невеликими середніми значеннями 3...4 нм, характерними для відносно пізніх спалахів зореутворення з віком 6...10 млн років. Проте у спектрах 18 % галактик з екстремально низьким вмістом кисню еквівалентна ширина $EW > 10$ нм, включаючи галактики J0811+4730 ($EW = 28.2$ нм) і J1234+3901 ($EW = 24.2$ нм), що відповідає молодшому віку спалахів — менше 3 млн років.

Залежності вмісту кисню від маси галактики, абсолютних зоряних величин M_g і M_{FUV} і світності L в лінії H приведено на рис. 2. Галактики з екстремально низьким вмістом кисню, який було визначено прямим методом і методом сильних ліній, позначені відповідно темними і світлими кружками, вибірка порівняння показана точками. Хрестиками, сполученими суцільною лінією, позначено середні значення вмісту $12 + \lg(\text{O/H})$ для галактик вибірки порівняння.

Слід зазначити, що на діаграмах рис. 2 a ...2 ε не видно систематичних відмінностей між положенням галактик з екстремально низьким вмістом кисню, в яких вміст кисню визначено різними методами — прямим T_e -методом і методом сильних ліній. Це свідчить про надійність методу сильних ліній, розробленого в роботі [14]. Проте на рис. 2 ε спостерігається певний зсув у бік більших світностей L галактик із вмістом кисню, який було отримано прямим методом. Цей зсув є прямим наслідком того, що емісійна лінія [O III] 436.3 нм, використовувана в прямому T_e -методі для визначення вмісту кисню, як правило, зареєстрована у спектрах галактик з лінією H, яка має більший потік і/або більшу еквівалентну ширину. Друга особливість залежностей на рис. 2 полягає в тому, що їх побудовано для широкого діапазону зоряних мас і світностей в оптичному і ультрафіолетовому діапазонах, включаючи найменші маси і світності для галактик. Це відрізняє наші залежності від залежностей, що обговорюються в літературі, де, як правило, розглядаються галактики із зоряними масами $(10^8 \dots 10^9) M_\odot$ [23]. При цьому зоряні маси галактик для менших вибірок, які обговорюються, наприклад, в роботах [8, 9], сумірні із зоряними масами галактик з цієї роботи. Відмітимо також, що у більшості робіт використовуються різноманітні методи сильних ліній для визначення вмісту кисню, що іноді дають для однієї і тієї ж галактики суперечливі значення, які можуть відрізнятися у декілька разів. Тому ми не проводимо порівняння із залежностями, отриманими в цих роботах.

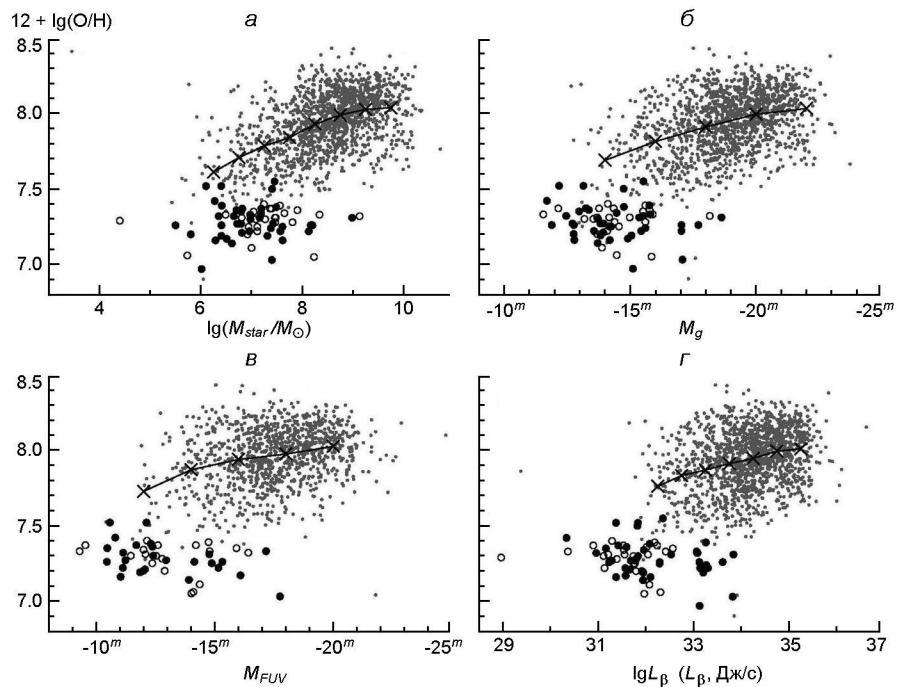


Рис. 2. Залежність вмісту кисню $12 + \lg(\text{O/H})$: a — від зоряної маси M_{star} , b — від абсолютної зоряної величини M_g ($= 0.4825$ мкм), c — від світності L в лінії H. Темні і світлі кружки — галактики з екстремально низьким вмістом кисню, в яких значення $12 + \lg(\text{O/H})$ були отримані відповідно прямим T_e -методом і методом сильних ліній. Точки — компактні SDSS-галактики з вибірки порівняння, в яких інтенсивність ліній [O III] $\lambda 436.3$ нм визначено з точністю краще 25% , а вміст кисню отримано з використанням T_e -методу. Хрестики і суцільна лінія — середні значення вмісту $12 + \lg(\text{O/H})$ в рівних інтервалах незалежної змінної

Характерною особливістю вибірки галактик з екстремально низьким вмістом кисню (рис. 2 a) є те, що вміст кисню в цих галактиках при фіксованій зоряній масі нижчий, ніж у галактиках вибірки порівняння. Наприклад, в роботах [8, 9] подібний зсув було відмічено для менших вибірок галактик із вмістом кисню $12 + \lg(\text{O/H}) = 7.35$. Як вже раніше зазначалося, одним з можливих пояснень зменшеного вмісту кисню міжзоряного газу може бути втікання у галактику незбагаченого міжгалактичного газу і його перемішування з міжзоряним середовищем галактики. Такий механізм, зокрема, пропонувався в роботі [5]. Друга можливість — втрата галактикою газу, збагаченого важкими елементами, при еволюції масивних зір (зоряний вітер, спалахи наднових) внаслідок малої маси галактики. Труднощами цієї моделі є те, що при тій же масі спостерігаються галактики з набагато більшим вмістом кисню. Подібна поведінка галактик з екстремально низьким вмістом кисню характерна і для залежностей вмісту кисню від абсолютної зоряних величин M_g і M_{FUV} (рис. 2 b і 2 c) а також від світності L (рис. 2 d).

Спостереження за допомогою космічного телескопа WISE в середньому інфрачервоному діапазоні на довжинах хвиль 3.4 мкм (сму-

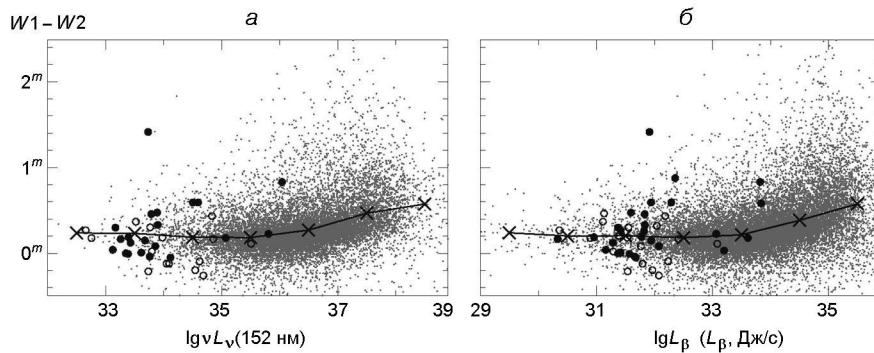


Рис. 3. Залежність показника кольору $W1 - W2$: *а* — від світності L (0.152 мкм) у FUV-діапазоні, *б* — від світності L в лінії Н. Символи ті ж, що і на рис. 2. Хрестики і суцільні лінії — середні значення $W1 - W2$ в рівних інтервалах незалежної змінної

га $W1$), 4.6 мкм ($W2$), 12 мкм ($W3$) і 22 мкм ($W4$) можуть дати важливу інформацію про випромінювання пилу в галактиках з екстремально низьким вмістом кисню. В роботі [12] було встановлено, що у більшості компактних галактик з зореутворенням з SDSS випромінювання пилу спостерігається на довжинах хвиль 12 і 22 мкм, тоді як на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм домінує випромінювання зір і газу з показником кольору $W1 - W2 \sim 0^m$. Однак у невеликій кількості галактик спостерігається крутé зростання інтенсивності зі збільшенням довжини хвилі, починаючи вже з довжини хвилі 3.4 мкм, що характеризується «червоним» показником кольору $W1 - W2 > 2^m$. Це вказує на наявність гарячого пилу з температурою кілька сотень кельвін. У роботі [12] встановлено, що «червоний» показник кольору $W1 - W2$ знайдено лише для галактиках з великими значеннями світності L і EW . Серед відомих галактик з показником кольору $W1 - W2 > 2^m$ є тільки одна галактика SBS 0335-052E з екстремально низьким вмістом кисню [7]. З іншого боку, в недавній роботі [1] серед компактних галактик 14-го выпуску SDSS знайдено 39 галактик з $W1 - W2 > 2^m$, але серед них немає жодної галактики з вмістом кисню $12 + \log(O/H) < 7.5$.

Серед галактик з екстремально низьким вмістом кисню майже всі зареєстровано у смугах $W1$ і $W2$ (таблиця), але майже немає галактик, зареєстрованих у смугах $W3$ і $W4$. Тому значення $W3$ і $W4$ в таблиці не наведено. На рис. 3 показано залежності показника кольору $W1 - W2$ від світності в ультрафіолетовому діапазоні L (0.152 мкм) і світності L в лінії Н. Видно, що показник кольору $W1 - W2$ збільшується зі збільшенням світності, що свідчить про більший внесок випромінювання гарячого пилу в галактиках з більшими світностями внаслідок його нагрівання ультрафіолетовим випромінюванням молодих масивних зірок. Раніше такий же висновок було зроблено у роботі [12].

Галактики з екстремально низьким вмістом кисню на рис. 3 розташовуються в області низьких світностей, недостатніх для нагрівання пилу до досить високої температури, і тому мають показники кольору

$W1 - W2$, близькі до нуля. Нагадаємо, що такі показники кольору характерні для випромінювання зір і вільно-вільного випромінювання іонізованого газу. Однак отриманий результат вимагає подальшого дослідження з використанням більшої вибірки. На жаль, галактик з низьким значенням вмісту кисню спостерігається мало. Тільки в галактиці J1220 + 4915 показник кольору $W1 - W2 = 1.4''$, що вказує на істотний внесок пилу у випромінювання на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм.

ВИСНОВОК

У даній роботі проведено дослідження інтегральних характеристик галактик із зореутворенням з вибірки роботи [14], відібраних з випуску DR14 огляду SDSS (Sloan Digital Sky Survey), зі значеннями вмісту кисню міжзоряного газу $12 + \lg(O/H) = 7.35$. Вибірка включає 66 галактик з найменшими відомими вмістами кисню. Проведено порівняння властивостей цих галактик і великої вибірки компактних галактик з активним зореутворенням з 14-го випуску SDSS. В результаті були отримані такі результати.

1. Галактики з екстремально низьким вмістом кисню є карликовими галактиками із зореутворенням, що мають зоряні маси M_{star} і абсолютні зоряні g -величини M_g в SDSS ($= 0.4825$ мкм), які в середньому в 100 разів менші, ніж середні значення для компактних галактик з активним зореутворенням з вибірки порівняння.

2. Галактики з екстремально низьким вмістом кисню на діаграмах «вміст кисню — зоряна маса» і «вміст кисню — світність» в оптичному і УФ-діапазонах, а також в емісійній лінії H α зміщені у бік менших вмістів кисню порівняно із залежностями, отриманими для галактик вибірки порівняння. Можливе пояснення цього зсуву — акреція на галактику міжгалактичного газу з дефіцитом важких елементів, і його перемішування з міжзоряним середовищем галактики.

3. Середній показник кольору в середньому ГЧ-діапазоні на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм, рівний $W1 - W2 \sim 0''$, в галактиках з екстремально низьким вмістом кисню можна пояснити випромінюванням зір і вільно-вільним випромінюванням іонізованого газу. Внесок випромінювання пилу на цих довжинах хвиль незначний внаслідок низької світності галактик в УФ-діапазоні і незначного іонізаційного випромінювання — основних джерел нагрівання пилу в галактиках із зореутворенням. З іншого боку, в компактних галактиках з вибірки порівняння з більшими світностями в УФ-діапазоні показник кольору $W1 - W2$ збільшується із збільшенням світності, що свідчить про нарastaючий внесок випромінювання гарячого пилу на довжинах хвиль 3.4 мкм і 4.6 мкм.

ПОДЯКИ

Автори дякують анонімному рецензенту за корисні зауваження. У публікації використовуються дані спостережень Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE), космічного телескопа Galaxy Evolution Explorer (GALEX) і цифрового огляду неба Sloan Digital Sky Survey (SDSS). WISE is a joint project of the University of California, Los Angeles, and the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, funded by the National Aeronautics and Space Administration. GALEX is NASA mission managed by Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Funding for the Sloan Digital Sky Survey IV has been provided by the Alfred P. Sloan Foundation, the U.S. Department of Energy Office of Science, and the Participating Institutions. SDSS acknowledges support and resources from the Center for High-Performance Computing at the University of Utah. The SDSS web site is www.sdss.org. SDSS is managed by the Astrophysical Research Consortium for the Participating Institutions of the SDSS Collaboration including the Brazilian Participation Group, the Carnegie Institution for Science, Carnegie Mellon University, the Chilean Participation Group, the French Participation Group, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Instituto de Astrofísica de Canarias, the Johns Hopkins University, Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (IPMU)/University of Tokyo, the Korean Participation Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Leibniz Institut für Astrophysik Potsdam (AIP), Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA Heidelberg), Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA Garching), Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE), National Astronomical Observatories of China, New Mexico State University, New York University, University of Notre Dame, Observatario Nacional/MCTI, The Ohio State University, Pennsylvania State University, Shanghai Astronomical Observatory, United Kingdom Participation Group, Universidad Nacional Autónoma de México, University of Arizona, University of Colorado Boulder, University of Oxford, University of Portsmouth, University of Utah, University of Virginia, University of Washington, University of Wisconsin, Vanderbilt University, and Yale University. This research has made use of the NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) which is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.

1. Изотова И. Ю., Изотов Ю. И. Свойства галактик с активным звездообразованием в среднем инфракрасном диапазоне по данным космического телескопа WISE. *Кинематика и физика небес. тел.* 2019. 35. № 6. 5—17.
2. Abolfathi B., Aguado D. S., Aguilar G., et al. The fourteenth data release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2018. 235. № 42. 19 p.

3. Ade P. A. R., Aghanim N., Armitage-Caplan C., et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron. and Astrophys.* 2014. 571. № 16. 66 p.
4. Bouwens R. J., Illingworth G. D., Oesch P. A., et al. UV luminosity functions at redshifts $z \sim 4$ to $z \sim 10$: 10,000 galaxies from HST Legacy Fields. *Astrophys. J.* 2015. 811. № 33. 49 p.
5. Ekta B., Chengalur J. N. When are extremely metal-deficient galaxies extremely metal deficient. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2010. 406. P. 1238—1247.
6. Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C. Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: from 0.15 to $7M_{\odot}$, and from $Z = 0.0004$ to 0.03 . *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 2000. 141. P. 371—383.
7. Griffith R. L., Tsai C.-W., Stern D., et al. WISE discovery of low-metallicity blue compact dwarf galaxies. *Astrophys. J.* 2011. 736. № L22. 5 p.
8. Guseva N. G., Izotov Y. I., Fricke K. J., Henkel C. New candidates for extremely metal-poor emission-line galaxies in the SDSS/BOSS DR10. *Astron. and Astrophys.* 2015. 579. № 11. 9 p.
9. Guseva N. G., Izotov Y. I., Fricke K. J., Henkel C. Searching for metal-deficient emission-line galaxy candidates: the final sample of the SDSS DR12 galaxies. *Astron. and Astrophys.* 2017. 599. № 65. 12 p.
10. Hirschauer A. S., Salzer J. J., Skillman E. D., et al. ALFALFA discovery of the most metal-poor gas-rich galaxy known: AGC 198691. *Astrophys. J.* 2016. 822. № 108. 13p.
11. Izotov Y. I., Chaffee F. H., Foltz C. B., et al. Helium abundance in the most metal-deficient blue compact galaxies: I ZW 18 and SBS 0335-052. *Astrophys. J.* 1999. 527. P. 757—777.
12. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. Multi-wavelength study of 14 000 star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Astron. and Astrophys.* 2014. 561. № 33. 30 p.
13. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Papaderos P. SBS 0335-052E+W: deep VLT/FORS+UVES spectroscopy of the pair of the lowest-metallicity blue compact dwarf galaxies. *Astron. and Astrophys.* 2009. 503. P. 61—72.
14. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. Low-redshift lowest-metallicity star-forming galaxies in the SDSS DR14. *Astron. and Astrophys.* 2019. 623. № 40. 11 p.
15. Izotov Y. I., Guseva N. G., Thuan T. X. Green Pea galaxies and cohorts: luminous compact emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J.* 2011. 728. № 161. 16 p.
16. Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Chaffee F. H., et al. SBS 0335-052, a probable nearby young dwarf galaxy: evidence pro and con. *Astrophys. J.* 1997. 476. P. 698—711.
17. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G. Hunting for extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: MMT and 3.5 m APO observations. *Astron. and Astrophys.* 2012. 546. № 122. 36p.
18. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G. J1234+3901: an extremely metal-deficient compact star-forming dwarf galaxy at redshift 0.133. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. 483. P. 5491—5498.
19. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G., Liss S. E. J0811+4730: the most metal-poor star-forming dwarf galaxy known. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. 473. P. 1956—1966.
20. Khaire V., Srianand R., Choudhury T. R., et al. The redshift evolution of escape fraction of hydrogen ionizing photons from galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. 457. P. 4051—4062.

21. Lejeune T., Buser R., Cuisinier F. Standard stellar library for evolutionary synthesis. I. Calibration of theoretical spectra. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1997. 125. P. 229—246.
22. Lequeux J., Peimbert M., Rayo J. F., et al. Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies. *Astron. and Astrophys.* 1979. 80. 155—166.
23. Maiolino R., Mannucci F. De re metallica: the cosmic chemical evolution of galaxies. *Astron. Astrophys. Rev.* 2019. 27. № 3. 187 p.
24. Ouchi M., Mobasher B., Shimasaku K., et al. Large area survey for $z = 7$ galaxies in SDF and GOODS-N: Implications for galaxy formation and cosmic reionization. *Astrophys. J.* 2009. 706. P. 1136—1151.
25. Robertson B. E., Ellis R. S., Furlanetto S. R., Dunlop J. S. Cosmic reionization and early star-forming galaxies: a joint analysis of new constraints from Planck and the Hubble Space Telescope. *Astrophys. J.* 2015. 802. № L19. 5 p.
26. Robertson B. E., Furlanetto S. R., Schneider E., et al. New constraints on cosmic reionization from the 2012 Hubble Ultra Deep Field Campaign. *Astrophys. J.* 2013. 768. № 71. 17 p.
27. Wise J. H., Cen R. Ionizing photo escape fractions from high-redshift dwarf galaxies. *Astrophys. J.* 2009. 693. P. 984—999.

REFERENCES

1. Izotova I. Y., Izotov Y. I. (2019) Properties of star-forming galaxies in mid-infrared range from the data obtained with the space telescope WISE. *Kinemat. fiz. nebesnyh tel.* 35(6). 5—17. (In Russian).
2. Abolfathi B., Aguado D. S., Aguilar G., et al. (2018) The Fourteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment. *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 235(42), 19.
3. Ade P. A. R., Aghanim N., Armitage-Caplan C., et al. (2014) Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astron. and Astrophys.* 571(16). 66.
4. Bouwens R. J., Illingworth G. D., Oesch P. A., et al. (2015) UV luminosity functions at redshifts $z \sim 4$ to $z \sim 10$: 10,000 galaxies from HST Legacy Fields. *Astrophys. J.* 811(33). 49.
5. Ekta B., Chengalur J. N. (2010) When are extremely metal-deficient galaxies extremely metal deficient. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 406. 1238—1247.
6. Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C. (2000) Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: from 0.15 to $7M_{\odot}$, and from $Z = 0.0004$ to 0.03 . *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 141. 371—383.
7. Griffith R. L., Tsai C.-W., Stern D., et al. (2011) WISE discovery of low-metallicity blue compact dwarf galaxies. *Astrophys. J.* 736(L22). 5.
8. Guseva N. G., Izotov Y. I., Fricke K. J., Henkel C. (2015) New candidates for extremely metal-poor emission-line galaxies in the SDSS/BOSS DR10. *Astron. and Astrophys.* 579(11). 9.
9. Guseva N. G., Izotov Y. I., Fricke K. J., Henkel C. (2017) Searching for metal-deficient emission-line galaxy candidates: the final sample of the SDSS DR12 galaxies. *Astron. and Astrophys.* 599(65). 12.
10. Hirschauer A. S., Salzer J. J., Skillman E. D., et al. (2016) ALFALFA discovery of the most metal-poor gas-rich galaxy known: AGC 198691. *Astrophys. J.* 822(108). 13.
11. Izotov Y. I., Chaffee F. H., Foltz C. B., et al. (1999) Helium abundance in the most metal-deficient blue compact galaxies: I ZW 18 and SBS 0335-052. *Astrophys. J.*

527. 757—777.

12. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. (2014) Multi-wavelength study of 14 000 star-forming galaxies from the Sloan Digital Sky Survey. *Astron. and Astrophys.* 561(33). 30.
13. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Papaderos P. (2009) SBS 0335-052E+W: deep VLT/FORS+UVES spectroscopy of the pair of the lowest-metallicity blue compact dwarf galaxies. *Astron. and Astrophys.* 503. 61—72.
14. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. (2019) Low-redshift lowest-metallicity star-forming galaxies in the SDSS DR14. *Astron. and Astrophys.* 623(40). 11.
15. Izotov Y. I., Guseva N. G., Thuan T. X. (2011) Green Pea galaxies and cohorts: luminous compact emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J.* 728(161). 16.
16. Izotov Y. I., Lipovetsky V. A., Chaffee F. H., et al. (1997) SBS 0335-052, a probable nearby young dwarf galaxy: evidence pro and con. *Astrophys. J.* 476. 698—711.
17. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G. (2012) Hunting for extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: MMT and 3.5 m APO observations. *Astron. and Astrophys.* 546(122). 36.
18. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G. (2019) J1234+3901: an extremely metal-deficient compact star-forming dwarf galaxy at redshift 0.133. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 483. 5491—5498.
19. Izotov Y. I., Thuan T. X., Guseva N. G., Liss S. E. (2018) J0811+4730: the most metal-poor star-forming dwarf galaxy known. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 473. 1956—1966.
20. Khaire V., Srianand R., Choudhury T. R., et al. (2016) The redshift evolution of escape fraction of hydrogen ionizing photons from galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 457. 4051—4062.
21. Lejeune T., Buser R., Cuisinier F. (1997) Standard stellar library for evolutionary synthesis. I. Calibration of theoretical spectra. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 125. 229—246.
22. Lequeux J., Peimbert M., Rayo J. F., et al. (1979) Chemical composition and evolution of irregular and blue compact galaxies. *Astron. and Astrophys.* 80. 155—166.
23. Maiolino R., Mannucci F. (2019) De re metallica: the cosmic chemical evolution of galaxies. *Astron. Astrophys. Rev.* 27(3). 187.
24. Ouchi M., Mobasher B., Shimasaku K., et al. (2009) Large area survey for $z = 7$ galaxies in SDF and GOODS-N: Implications for galaxy formation and cosmic reionization. *Astrophys. J.* 706. 1136—1151.
25. Robertson B. E., Ellis R. S., Furlanetto S. R., Dunlop J. S. (2015) Cosmic reionization and early star-forming galaxies: a joint analysis of new constraints from Planck and the Hubble Space Telescope. *Astrophys. J.* 802(L19). 5.
26. Robertson B. E., Furlanetto S. R., Schneider E., et al. (2013) New constraints on cosmic reionization from the 2012 Hubble Ultra Deep Field Campaign. *Astrophys. J.* 768(71). 17.
27. Wise J. H., Cen R. (2009) Ionizing photo escape fractions from high-redshift dwarf galaxies. *Astrophys. J.* 693. 984—999.

И. Ю. Изотова¹, Ю. И. Изотов²

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

²Институт теоретической физики им. Боголюбова

Национальной академии наук Украины, Киев, Украина

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛАКТИК
СО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕМ ИЗ SDSS DR14,
ИМЕЮЩИХ ЭКСТРЕМАЛЬНО НИЗКОЕ СОДЕРЖАНИЕ КИСЛОРОДА

Проведено исследование интегральных характеристик выборки из 66 галактик со звездообразованием из 14-го выпуска обзора неба SDSS, имеющих экстремально низкие содержания кислорода. Содержания кислорода в 42 исследуемых галактиках с зарегистрированной линией [O III] 436.3 нм определены прямым T_e -методом, а в остальных галактиках — методом сильных линий. Полученные значения содержания $12 + \lg(\text{O/H})$ находятся в диапазоне 6.97...7.52 и в среднем в 4 раза меньше по сравнению со значениями содержания для большой выборки сравнения компактных галактик с активным звездообразованием из SDSS. Звездные массы и светимости в линии H для обеих выборок галактик получены из SDSS-спектров с малой спектральной апертурой (2-3 в диаметре). Для определения их значений для всей галактики введены апертурные коррекции, учитывающие излучение, не попадающее в спектральную щель. Звездные массы и светимости в оптическом диапазоне в 100 раз меньше соответствующих величин для галактик из выборки сравнения. На диаграммах «металличность — светимость» и «металличность — звездная масса» эти галактики имеют меньшее содержание кислорода при фиксированных массе и светимости по сравнению с галактиками из основной выборки SDSS. Вероятная причина — акреция необогащенного межгалактического газа, приводящая к уменьшению содержания кислорода в межзвездной среде галактики. Большинство галактик с экстремально низким содержанием кислорода зарегистрировано космическим телескопом WISE в среднем ИК-диапазоне. Показатель цвета $W1 - W2$, где $W1$ и $W2$ — звездные величины на длинах волн 3.4 мкм и 4.6 мкм соответственно, в этих галактиках соответствует величине, характерной для излучения звезд и/или свободно-свободного излучения ионизированного газа, тем самым исключая наличие теплой и горячей пыли вследствие низкой светимости УФ-излучения — основного источника нагрева пыли в галактиках со звездообразованием.

Ключевые слова: карликовые галактики со звездообразованием, области ионизованного водорода, химический состав, межзвездная пыль, инфракрасное излучение.

I. Y. Izotova¹, Y. I. Izotov²

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Bogolyubov Institute for Theoretical Physics
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

INTEGRATED CHARACTERISTICS OF SDSS DR14 STAR-FORMING GALAXIES
WITH EXTREMELY LOW OXYGEN ABUNDANCES

We study the integrated characteristics of the sample of 66 star-forming galaxies with extremely low oxygen abundances from the SDSS Data Release 14. Oxygen abundances in 42 studied galaxies with detected [O III] 436.3 nm emission line are derived by the direct T_e method. Oxygen abundances for remaining galaxies are derived by the strong-line method. Derived abundances $12 + \log(\text{O/H})$ are in the range 6.97...7.52 and on average are 4 times lower compared to the value for the large comparison sample of compact star-forming galaxies from the SDSS. Stellar masses and H luminosities for both samples are derived from SDSS spectra with small spectroscopic aperture (2 or 3 arcsec in diameter). For the determination of their values for the entire galaxy we introduce aperture

corrections, which take into account radiation outside the spectroscopic slit. Stellar masses and luminosities in the optical range of the galaxies with extremely low metallicities are by 100 times lower than the respective values for the galaxies from the comparison sample. Galaxies with extremely low metallicities have lower oxygen abundances on the diagrams oxygen abundance — luminosity and oxygen abundance — stellar mass compared to relations for the main SDSS sample at fixed the luminosity and the stellar mass. Possible cause of this offset is an accretion of unenriched intergalactic gas, which results in reduction of the oxygen abundance in the galaxy interstellar medium. Most of the galaxies with extremely low oxygen abundances were detected in the mid-infrared range with the space telescope WISE at wavelengths 3.4 m and 4.6 m. Colour index $W1 - W2$, where $W1$ and $W2$ are magnitudes at wavelengths 3.4 and 4.6 m, in these galaxies corresponds to the values for emission by stars and/or free-free ionized gaz emission precluding the presence of warm and hot dust due to the low luminosity of ultraviolet radiation, which is the main source of dust heating in star-forming galaxies.

Keywords: dwarf star-forming galaxies, H II regions, chemical composition, interstellar dust, infrared radiation.

Стаття надійшла до редакції 28.08.2019

Після доопрацювання 01.10.2019

Прийнята до друку 04.10.2019