

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2019.06.005>

УДК 524.7

И. Ю. Изотова¹, Ю. И. Изотов²

¹Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко
ул. Владимирская 60, Киев, Украина, 01601
iizotova@ukr.net

²Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Национальной академии наук Украины
ул. Метрологическая 146, Киев, Украина, 03043

Свойства галактик с активным звездообразованием в среднем ИК-диапазоне по данным космического телескопа WISE

Проведено исследование фотометрических характеристик в среднем ИК-диапазоне выборки компактных галактик с активным звездообразованием из 14-го выпуска обзора неба SDSS. Выборка включает около 30000 галактик. В спектрах всех отобранных галактик наблюдаются эмиссионные линии H с эквивалентными ширинами $EW(H) > 1$ нм. Отобранные галактики — компактные объекты с угловыми диаметрами меньше $6''$. Около 10000 галактик из полной выборки зарегистрированы на космическом телескопе WISE на длинах волн 3.4 и 4.6 мкм. Значительное количество галактик зарегистрировано также на длинах волн 12 и 22 мкм. С использованием этих данных и результатов наблюдений в ультрафиолетовом диапазоне на космическом телескопе GALEX показано, что нагрев пыли в галактиках выборки осуществляется ультрафиолетовым излучением массивных звезд в областях звездообразования. На длинах волн 3.4 и 4.6 мкм в большинстве исследуемых галактик доминирует излучение звезд и ионизованного газа, тогда как на длинах волн 12 и 22 мкм доминирует излучение пыли. В некоторых галактиках с большой светимостью в линии H излучение пыли наблюдается уже на короткой длине волны 3.4 мкм с крутым увеличением интенсивности на длине волны 4.6 мкм. Это излучение характеризуется «красным» цветом ($W1 - W2 > 2^m$), где $W1$ и $W2$ — звездные величины на длинах волн 3.4 и 4.6 мкм соответственно. Вероятная причина этого излучения — наличие горячей пыли с температурой в сотни кельвин. Приводится

© И. Ю. ИЗОТОВА, Ю. И. ИЗОТОВ, 2019

список из 39 галактик с таким экстремально большим значением показателя цвета $W1 - W2$.

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

Пыль играет важную роль в тепловой и динамической эволюции галактик в различных структурах от протозвезд до больших молекулярных комплексов. Наблюдения с космическими телескопами обнаружили значительное количество ярких галактик на красных смещениях $z > 1$ с большим количеством пыли, излучающей в ИК-диапазоне [4, 5, 8, 10]. Это значит, что пыль образовалась в интенсивных и коротких эпизодах звездообразования, и что в галактиках на больших красных смещениях произошел быстрый переход от образования звезд с нулевой металличностью к образованию звезд, более типичных для современных галактик [3, 18, 22].

Исследования галактик с низкой металличностью на больших красных смещениях трудны из-за их низкой яркости и малых угловых размеров. Однако есть шанс исследовать роль пыли в галактиках с низкой металличностью путем изучения свойств близких карликовых галактик со звездообразованием, таких как неправильные, голубые компактные галактики (BCDs) и «зеленые горошки» (GPs). Эти галактики могут быть аналогами карликовых галактик на больших красных смещениях из-за их высокого темпа звездообразования и низкой металличности [2, 13].

Свойства излучения пыли карликовых галактик со звездообразованием исследовались неоднократно [6, 7, 11, 14, 19, 20, 24, 25]. Излучение этих галактик в ИК-диапазоне возникает в результате поглощения пылью УФ-излучения массивных звезд, ее нагреву и переизлучению в ИК-диапазоне. Было также установлено, что это излучение не может быть описано в рамках модели, где вся пыль имеет одинаковую температуру. В дополнение к пыли с температурой около 30 К во многих галактиках должна находиться теплая и горячая пыль с температурой вплоть до сотен кельвин [9, 12, 14]. Такая пыль дает вклад в излучение не только на длинах волн больше 10 мкм, но и на более коротких длинах волн 3...4 мкм.

Создание фотометрического каталога источников всего неба космического телескопа WISE в четырех спектральных полосах $W1$, $W2$, $W3$, $W4$ (соответственно $\lambda = 3.4, 4.6, 12$ и 22 мкм) в 2011 г. открыло возможность поиска галактик со звездообразованием, в которых есть горячая пыль. Первые результаты в этом направлении были получены в работах [9, 12, 13], где были найдены галактики с очень «красными» показателями цвета $W1 - W2$, указывающими на быстрое увеличение излучения пыли с увеличением длины волны в диапазоне 3.4...4.6 мкм, и, таким образом, на наличие горячей пыли. В нашей работе будет

проведен поиск новых галактик с горячей пылью на базе 14-го выпуска SDSS и предпринято исследование их свойств.

ВЫБОРКА SDSS

Мы исследуем свойства излучения в ИК-диапазоне выборки компактных карликовых галактик с активным звездообразованием, которая была создана на основе 14-го выпуска SDSS [1]. Критерии отбора выборки подробно описаны в работе [13]. Эта выборка включает около 30000 галактик на красных смещениях $z = 0...1$. Отметим основные свойства галактик выборки: 1) в спектрах всех отобранных галактик наблюдаются эмиссионные линии H с эквивалентными ширинами $EW(H) \geq 1$ нм, что указывает на активное звездообразование и наличие горячих массивных звезд; 2) отобранные галактики — компактные объекты с диаметрами меньше 6''; 3) все отобранные галактики на диагностической диаграмме $[O III] \lambda 500.7 / H \alpha$ — $[N II] \lambda 658.4 / H \alpha$ находятся в области галактик со звездообразованием. Эмиссионная линия $[O III] \lambda 436.3$ нм есть в спектрах примерно 18700 из 30000 галактик. Интенсивности эмиссионных линий в спектрах всех галактик были измерены авторами. Химический состав ионизованного газа в этих галактиках определен с использованием прямого T_e -метода. Наиболее точно химический состав определен примерно для 2000 галактик, в спектрах которых линия $[O III] \lambda 436.3$ нм измерена с ошибкой менее 25%. В остальных галактиках химический состав определен полуэмпирическим методом, предложенным в работе [17]. SDSS-спектры также использовались для определения некоторых интегральных характеристик галактик, таких как светимости $L(H\alpha)$ в линии H α , темпы звездообразования SFR и звездные массы M_{star} для всех галактик выборки.

Звездные массы определены из модельного распределения энергии, включающего звездный и газовый компоненты, которое наилучшим образом воспроизводит наблюдаемые SDSS спектры галактик. Детали метода описаны в работе [13].

Выборка была также дополнена фотометрическими данными в пяти полосах u, g, r, i, z оптического диапазона из SDSS, в двух полосах FUV ($\lambda = 0.152$ мкм) и NUV ($\lambda = 0.227$ мкм) УФ-диапазона по наблюдениям на космическом телескопе GALEX и в четырех полосах $W1, W2, W3, W4$ среднего ИК-диапазона по наблюдениям на космическом телескопе WISE. В частности, из базы данных ALLWISE Source Catalog ([http:// wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky](http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky)) были использованы звездные величины $w1mpro, w2mpro, w3mpro, w4mpro$, полученные в результате интегрирования профиля яркости галактики. Эти величины более надежные для компактных объектов по сравнению со звездными величинами, определенными другими методами, например с использованием кривых роста.

ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В СРЕДНЕМ ИК-ДИАПАЗОНЕ ГАЛАКТИК С АКТИВНЫМ ЗВЕДОБРАЗОВАНИЕМ

Для исследования свойств излучения в среднем ИК-диапазоне из всей выборки компактных карликовых галактик с активным звездообразованием были отобраны около 10000 компактных галактик, которые зарегистрированы по крайней мере на двух длинах волн 3.4 и 4.6 мкм. Все эти галактики имеют диаметры меньше 6 . Однако бóльшая часть излучения в этих галактиках из-за наличия ярких областей звездообразования в их центрах сконцентрирована в значительно меньших по размеру областях. В таких случаях потери излучения минимальны в спектральных SDSS-наблюдениях с небольшими круглыми диафрагмами, имеющими диаметры 2 и 3 , что позволяет сравнивать эти спектральные данные с фотометрическими данными УФ-, оптического и среднего ИК-диапазонов.

В частности, экстраполяция модельного распределения энергии в SDSS-спектре оптического диапазона может быть сравнена с фотометрическими данными в других диапазонах. В компактных галактиках с активным звездообразованием основными источниками энергии являются молодые звезды, которые ионизируют межзвездный газ, вызывая его свечение в континууме и эмиссионных линиях в широком диапазоне длин волн, и нагревают межзвездную пыль, заставляя ее светиться в ИК-диапазоне. Однако соотношения между непрерывным излучением, создаваемым звездами, ионизованным газом и пылью, разные в разных диапазонах. В УФ-диапазоне доминирует звездный континуум (рис. 1), тогда как излучением ионизованного газа можно пренебречь. В оптическом и ближнем ИК-диапазонах доля непрерывного излучения ионизованного газа выше, и она увеличивается с увеличением длины волны, а также с увеличением эквивалентной ширины $EW(H\beta)$ эмиссионной линии $H\beta$. Это видно из сравнения распределений энергии в спектрах галактики J1126+3803 с «голубым» показателем цвета $W1 - W2 = 0.31^m$ и малым значением $EW(H\beta) = 8.7$ нм (рис. 1а) и галактики J0239+0018 с «красным» показателем цвета $W1 - W2 = 2.27^m$ и большим значением $EW(H\beta) = 12.7$ нм (рис. 1б). В среднем ИК-диапазоне в полосах $W3$ (12 мкм) и $W4$ (22 мкм) доминирует излучение теплой пыли с температурой десятки кельвин. В то же время в полосах $W1$ (3.4 мкм) и $W2$ (4.6 мкм) картина зависит от того, есть ли в галактике горячая пыль с температурой сотни кельвин. В галактике, где горячей пыли нет (рис. 1а), в полосах $W1$ и $W2$ доминируют звездный и газовый континуум, тогда как в галактике на рис. 1б в этих полосах доминирует излучение горячей пыли.

На рис. 2а и 2б приведены положения галактик, зарегистрированных на длинах волн 3.4, 4.6, и 12 мкм, на цветовой диаграмме $(W1 - W2) - (W2 - W3)$ для выборки компактных галактик из SDSS. Выборка разделена на две подвыборки галактик — с большими значениями светимости $L(H\beta) > 10^{33.5}$ Дж/с и большими значениями

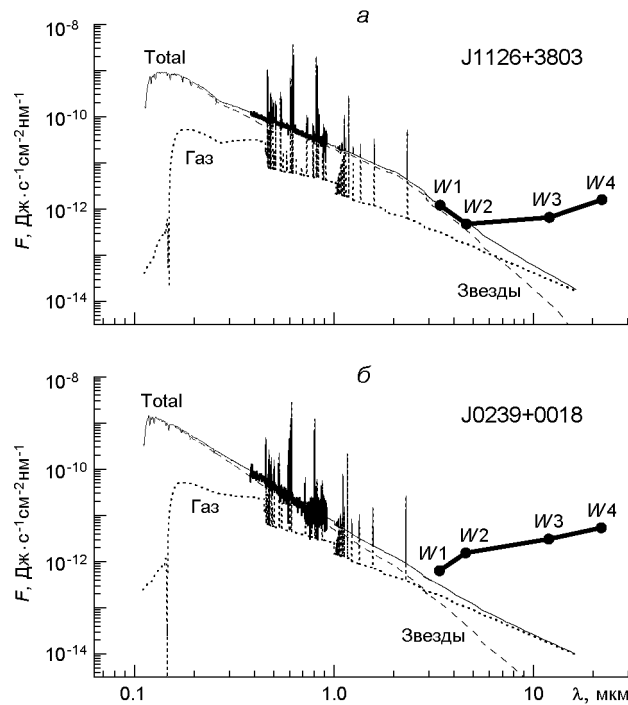


Рис. 1. Распределения энергии от УФ- до среднего ИК-диапазонов в спектрах двух галактик со звездообразованием: *a* — галактика J1126+3803 с «голубым» показателем цвета $W1 - W2 = 0.31^m$ и малым значением $EW(H) = 8.7$ нм; *б* — галактика J0239+0018 с «красным» показателем цвета $W1 - W2 = 2.27^m$ и большим значением $EW(H) = 12.7$ нм. Толстые сплошные линии — наблюдаемые оптические спектры из SDSS, темные кружки, соединенные линиями — наблюдаемые потоки в четырех полосах среднего ИК-диапазона, тонкие пунктирные, штриховые и сплошные линии — модельные распределения газового излучения, звездного излучения и их суммы соответственно

$EW(H) > 10$ нм (точки на рис. 2б), а также галактик с малыми значениями светимости $L(H) < 10^{33.5}$ Дж/с и малыми значениями $EW(H) < 10$ нм (точки на рис. 2а). Темными и светлыми кружками показаны галактики с наибольшими («красными») показателями цвета $W1 - W2 > 2^m$, найденные соответственно в этой работе и в работе [13]. Положению этих галактик на диаграмме соответствует излучение черного тела с температурой около 400 К (см. табл. 1 в работе [23]). Для сравнения эллипс ограничивает область активных ядер галактик [21], которая лежит в стороне от большинства галактик со звездообразованием. Диаграмма $(W1 - W2) - (W2 - W3)$ часто используется для селекции активных ядер. Однако тот факт, что часть галактик из нашей выборки (см. рис. 2б) попадает в область внутри эллипса, указывает на ненадежность этого метода.

Большинство галактик со звездообразованием из нашей выборки имеют «голубой» цвет ($W1 - W2 \approx 0.5^m$), в соответствии с цветом для звездного и газового излучения (точки на рис. 2а). С другой стороны, значительное количество галактик с большими значениями $L(H)$ и

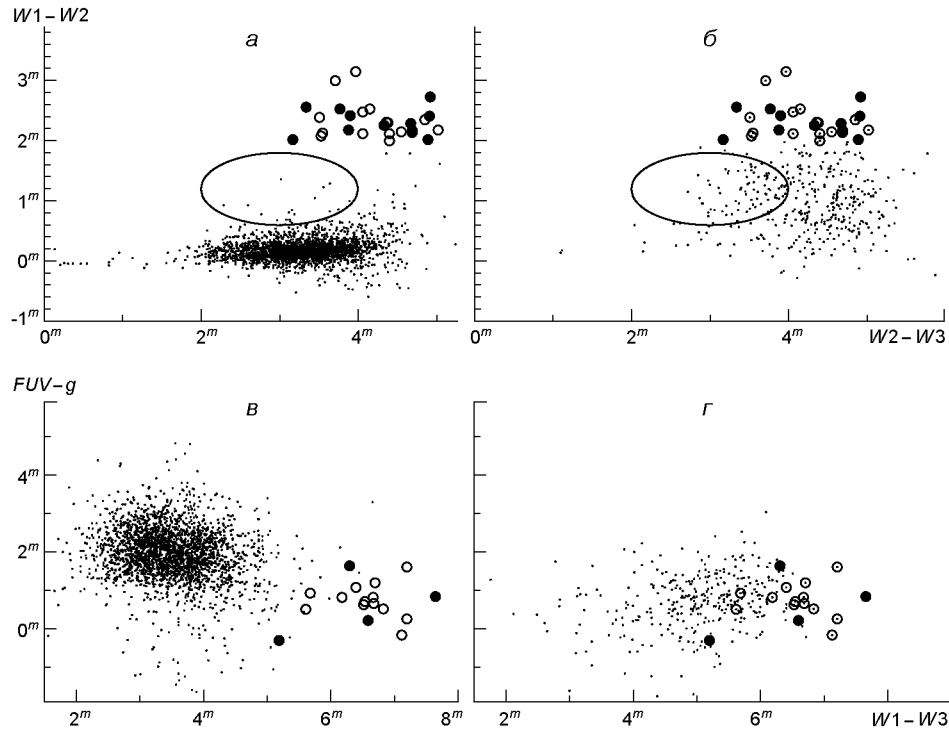


Рис. 2. Положения галактик на цветовых диаграммах ($W1 - W2$) — ($W2 - W3$) (а и б) и ($FUV - g$) — ($W1 - W3$) (в и г), где $W1$, $W2$ и $W3$ — звездные величины на длинах волн 3,4, 4,6 и 12 мкм из каталога WISE, FUV — звездная величина на длине волны 0,152 мкм из каталога GALEX, g — звездная величина на длине волны 0,4825 мкм из каталога SDSS. Точками представлены: на фрагментах а и в — галактики из 14-го выпуска каталога SDSS [15], имеющие эквивалентную ширину $EW(H\ \gamma) < 10$ нм и светимость $L(H\ \gamma) < 10^{33.5}$ Дж/с, а на фрагментах б и г — галактики с $EW(H\ \gamma) > 10$ нм и $L(H\ \gamma) > 10^{33.5}$ Дж/с. Светлые и темные кружки — галактики с $W1 - W2 > 2^m$, найденные в 7-м [13] и 14-м (эта статья) выпусках SDSS соответственно. Эллипсом очерчена область расположения галактик с активными ядрами [21]

$EW(H\ \gamma)$ (точки на рис. 2б) может иметь более «красный» цвет ($W1 - W2 > 0.5^m$), подтверждая вывод работ [12, 13], согласно которому горячая пыль есть в основном в галактиках с большими областями ионизованного водорода высокого возбуждения, которые своим УФ-излучением нагревают пыль до высоких температур.

Среди галактик с наибольшими значениями показателя цвета $W1 - W2 > 2^m$ приблизительно половина найдена в этой работе (темные кружки на рис. 2), в дополнение к галактикам, представленным в работах [12, 13]. Полный список из 39 компактных галактик с $W1 - W2 > 2^m$, найденных в 14-м выпуске SDSS, вместе с координатами, звездными величинами, значениями содержания кислорода, эквивалентными ширинами линии H и звездными массами представлен в таблице. В среднем эти галактики имеют значение содержания кислорода, в пять раз меньшие, чем солнечное содержание, малые звездные массы и большие эквивалентные ширины линии H.

Характеристики галактик из SDSS с $W1 - W2 > 2^m$

$J_{2000.0}$	$J_{2000.0}$	z	$12 + \lg O/H$	g	FUV	$W1$	$W2$	$W3$	$W4$	$EW(H_{\text{нм}})$	$\lg M_{\text{star}} - \lg M_{\text{sun}}$
00 ^h 23 ^m 20.1 ^s	28 47 40	0.33380	7.82	22.08 ^m	22.87 ^m	17.08 ^m	14.83 ^m	11.17 ^m	8.20 ^m	8.7	9.44
00 32 57.5	24 42 08	0.71309	8.02	21.91	21.11	17.84	15.57	10.83	8.77	4.6	9.72
00 51 40.6	23 17 27	0.21078	7.94	20.69	...	16.21	13.65	10.31	7.31	17.0	8.94
00 57 35.9	24 52 02	0.25536	8.00	20.85	...	17.67	15.25	11.35	8.65	19.8	9.19
00 57 40.8	04 02 05	0.24251	7.96	21.32	17.87	16.71	14.54	9.85	6.44	19.0	9.33
01 01 03.7	-00 11 46	0.24338	8.12	20.38	22.00	16.19	13.66	9.89	6.49	14.7	9.14
01 35 37.6	14 55 11	0.21780	8.02	18.96	...	14.13	12.09	8.51	5.78	4.6	9.45
02 23 12.1	03 38 40	0.06370	8.14	19.90	21.78	17.66	15.57	11.49	8.18	7.7	8.34
02 39 00.8	00 18 36	0.21656	8.09	20.72	...	17.76	15.47	10.80	7.42	12.7	8.28
03 33 19.2	00 17 31	0.19381	8.07	20.22	20.83	17.83	15.71	11.31	7.79	13.8	9.53
09 02 50.8	49 05 16	0.34130	7.78	21.90	...	17.56	15.25	...	...	1.8	9.01
09 36 23.3	09 00 01	0.22367	8.12	20.32	20.82	18.24	16.10	11.41	7.94	14.8	9.75
10 09 41.4	49 35 27	0.30840	8.29	21.44	...	16.94	14.88	10.66	7.31	7.7	9.42
10 18 03.3	41 06 21	0.23708	7.82	20.43	21.07	17.92	15.62	11.24	7.70	16.6	9.63
10 21 07.2	58 51 34	0.34463	8.14	21.41	...	18.29	16.26	...	...	8.8	9.19
10 46 45.8	30 23 31	0.12706	8.16	19.17	...	14.78	11.86	8.11	5.05	7.5	9.02
11 01 20.4	40 22 42	0.27982	8.01	20.86	...	18.04	15.51	11.36	7.79	15.4	8.81
11 08 20.1	45 20 15	0.47420	7.85	21.96	...	18.83	16.36	12.29	...	4.0	9.26
11 08 55.5	35 48 55	0.24490	8.03	20.70	20.38	15.16	13.14	9.97	7.62	10.9	8.57
11 41 06.2	45 15 40	0.12618	7.63	18.89	20.31	14.68	12.56	9.16	6.35	3.7	9.89
11 43 48.3	32 42 58	0.07400	8.16	18.62	20.21	16.79	14.61	9.59	6.11	18.5	9.07
12 26 51.5	47 08 53	0.26613	8.03	21.21	...	17.42	15.24	11.36	7.80	17.0	8.87
12 28 50.5	32 19 09	0.17439	7.84	21.28	22.46	17.48	15.33	10.78	7.84	32.7	9.31
12 38 03.8	46 18 20	0.09885	8.11	18.95	20.01	15.52	13.52	9.12	5.62	12.7	9.16
12 43 46.0	45 24 02	0.34010	8.07	21.49	21.69	17.96	15.70	11.37	8.48	10.3	9.46
13 11 15.0	-00 27 58	0.23094	8.28	20.21	20.90	17.44	14.96	10.90	8.06	11.2	9.28
13 15 14.1	26 18 41	0.30538	8.16	21.30	...	16.45	13.45	9.74	6.70	28.8	9.15
13 27 34.5	61 51 03	0.31661	8.02	20.79	21.28	18.21	16.13	12.60	...	15.1	8.40
13 53 40.8	16 49 21	0.08390	7.58	20.17	20.99	18.54	15.81	10.89	8.15	23.3	7.41
14 39 05.2	24 53 53	0.21194	8.09	19.54	20.45	14.27	12.14	8.59	6.17	14.4	8.67
14 57 35.1	22 32 02	0.14876	8.04	19.43	20.23	16.26	13.95	9.59	6.51	17.8	8.61
15 14 08.6	38 52 07	0.33288	8.40	20.45	20.69	17.90	15.55	10.70	7.79	10.0	9.97
15 28 04.6	25 27 59	0.06790	8.11	19.21	...	16.81	14.40	9.49	6.07	12.6	8.70
15 32 47.5	36 49 29	0.07290	7.69	19.98	...	18.31	16.29	11.40	8.79	23.6	7.66
15 37 37.3	58 47 41	0.21434	8.04	20.43	20.25	17.55	14.40	10.43	7.38	16.6	9.41
15 41 01.3	17 53 34	0.25986	7.95	21.31	...	18.66	16.27	12.76	9.11	22.9	7.95
15 44 07.1	06 17 37	0.12030	8.52	21.41	...	17.50	15.42	...	...	1.0	8.90
16 04 36.7	08 19 59	0.31233	8.02	20.80	21.60	17.93	15.81	11.75	8.49	14.6	8.97
23 48 22.7	22 03 15	0.04370	7.56	20.35	...	18.06	15.63	11.03	8.03	21.9	6.46

На рис. 2в и 2г на цветовой диаграмме ($FUV - g$) — ($W1 - W3$) приведены положения галактик, зарегистрированных на длинах волн 0.152, 0.4825, 3.4 и 12 мкм. Видно, что галактики, имеющие либо одновременно малые значения $L(H_{\text{нм}})$ и $EW(H_{\text{нм}})$, либо одновременно большие, четко разделяются (точки на рис. 2в и 2г соответственно), подтверждая вывод, сделанный в работе [13], согласно которому об-

ласти звездообразования являются основным источником нагрева горячей пыли. Получено, что галактики с самыми большими значениями $W1 - W2$ (светлые и темные кружки) имеют также самые «красные» показатели цвета $W1 - W4$, подтверждая крутой рост яркости галактики на длинах волн 3.4...12 мкм из-за излучения горячей пыли. Поскольку цвет $FUV - g$ является характеристикой жесткости излучения, то самые малые его значения в галактиках с самыми большими значениями $W1 - W2$ указывают на то, что излучение в них самое жесткое с крутым ростом в УФ-область спектра.

СРАВНЕНИЕ С ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ГАЛАКТИК, ПОЛУЧЕННЫМИ ИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ SDSS

На рис. 3 представлены зависимости значений $W1 - W2$ от значений интегральных характеристик галактик $EW(H\delta)$ в линии $H\delta$, $12+\lg O/H$, M_{star} / M_{Sun} и $L(H\delta)$, полученных из SDSS-спектров галактик. Отсутствие зависимостей как для выборки, так и для галактик с $W1 - W2 > 2^m$ свидетельствует о том, что наличие горячей пыли связано также с другими характеристиками галактик, например с плотностью межзвездной среды и взаимным расположением облаков газа с пылью и источником нагрева пыли. Однако имеющиеся наблюдательные данные не позволяют исследовать эту возможность.

Данное исследование на два порядка величины расширяет диапазоны звездной массы галактик и их светимости в линии $H\delta$ в область малых значений для галактик с $W1 - W2 > 2^m$ (темные кружки на рис. 3в и 3г) по сравнению с данными [13] (светлые кружки). С другой стороны, диапазоны значений $EW(H\delta)$ и $12+\lg O/H$ в двух исследованиях сравнимы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование фотометрических характеристик в среднем ИК-диапазоне по данным наблюдений космического телескопа WISE большой выборки компактных галактик с активным звездообразованием из 14-го выпуска фотометрического и спектрального обзора неба SDSS. Также проведено сравнение фотометрических характеристик с интегральными характеристиками галактик, полученными из анализа SDSS спектров галактик. В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

1. Цветовая диаграмма $(W1 - W2) - (W2 - W3)$ в среднем ИК-диапазоне, где $W1$, $W2$, $W3$ — звездные величины WISE соответственно на длинах волн 3.4, 4.6 и 12 мкм, свидетельствует о том, что нагрев пыли, излучающей на этих длинах волн, производится УФ-излучением молодых звезд в областях звездообразования.

2. Распределение энергии галактики в среднем ИК-диапазоне зависит от температуры пыли, которая в свою очередь зависит от свети-

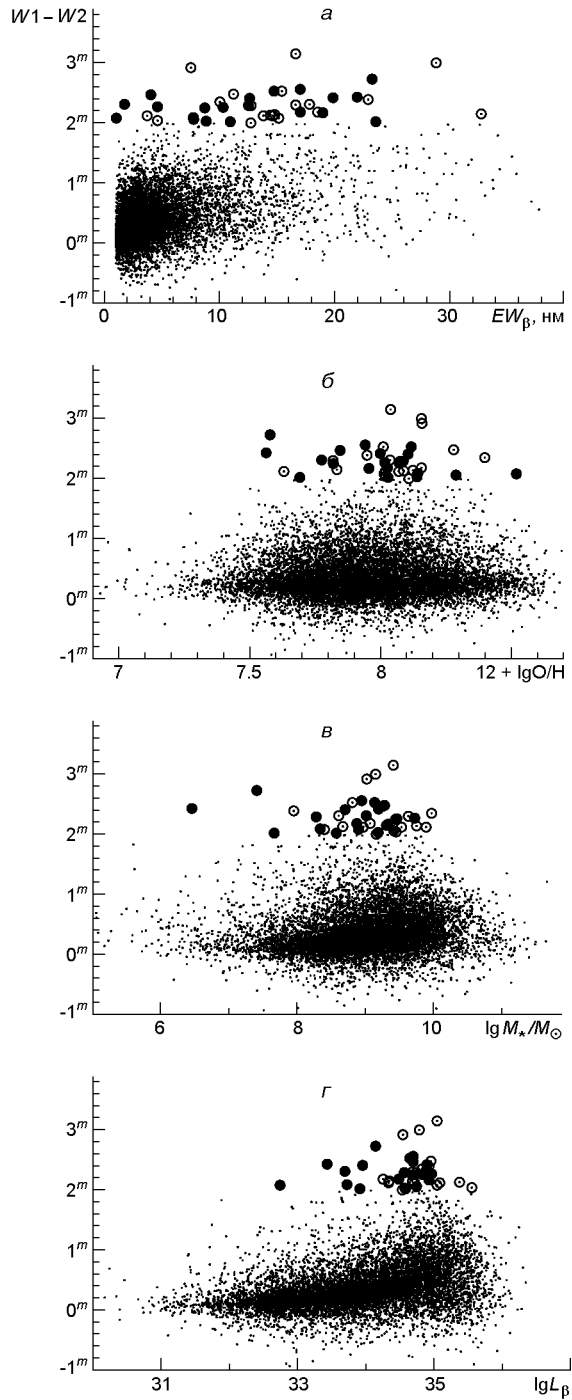


Рис. 3. Зависимость показателя цвета $W1 - W2$ галактик выборки: a — от эквивалентной ширины $EW(\text{H})$, $б$ — от содержания кислорода $12 + \lg \text{O}/\text{H}$, $в$ — от звездной массы M_{star} , $г$ — от светимости $L(\text{H})$. Точки — галактики из 14-го выпуска SDSS, светлые и темные кружки — галактики с $W1 - W2 > 2^m$, найденные в 7-м [13] и 14-м (эта статья) выпусках SDSS соответственно

мости галактики $L(H)$ в линии H и ее эквивалентной ширины $EW(H)$. В галактиках с малыми $L(H) < 10^{33.5}$ Дж/с и $EW(H) < 10$ нм излучение пыли доминирует в полосах $W3$ на длине волны 12 мкм и $W4$ на длине волны 22 мкм, тогда как на более коротких длинах волн 3.4 мкм ($W1$) и 4.6 мкм ($W2$) основной вклад в излучение вносят звезды и ионизованный газ. С другой стороны, в значительной части галактик с большими $L(H)$ и $EW(H)$ пыль нагрета до больших температур и дает основной вклад в излучение в полосах $W1$ и $W2$.

3. Индикатором наличия горячей пыли, нагретой до температуры в сотни кельвин, может служить цвет $W1 - W2$. В галактиках с «голубым» показателем цвета $W1 - W2 < 0.5^m$ горячая пыль отсутствует, и в полосах $W1$ и $W2$ доминирует излучение звезд и ионизованного газа, тогда как при больших $W1 - W2$ («красный» показатель цвета) заметным становится вклад горячей пыли, которая доминирует в полосах $W1$ и $W2$ для галактик с экстремальными значениями $W1 - W2 > 2^m$. В данной работе приведен список из 39 компактных галактик со звездообразованием с $W1 - W2 > 2^m$, найденных в 14-м выпуске обзора SDSS.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят анонимного рецензента за полезные замечания. В публикации используются данные наблюдений Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE), космического телескопа Galaxy Evolution Explorer (GALEX) и цифрового обзора 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, Observatório 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.

REFERENCES

1. 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 p.
2. Cardamone C., Schawinski K., Sarzi M., et al. (2009) Galaxy Zoo Green Peas: discovery of a class of compact extremely star-forming galaxies. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 399. 1191—1205.
3. Chiaki G., Schneider R., Nozawa T., Omukai K., Limongi M., Yoshida N., Chieffi A. (2014) Dust grain growth and the formation of the extremely primitive star SDSS J102915+172927. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 439. 3121—3127.
4. Dole H., Lagache G., Puget J.-L., et al. (2006) The cosmic infrared background resolved by Spitzer. Contributions of mid-infrared galaxies to the far-infrared background. *Astron. and Astrophys.* 451. 417—429.
5. Elbaz D., Cesarsky C. J., Chanial P., et al. (2002) The bulk of the cosmic infrared background resolved by ISOCAM. *Astron. and Astrophys.* 384. 848—865.
6. Engelbracht C. W., Gordon K. D., Rieke G. H., et al. (2005) Metallicity effects on mid-infrared colors and the 8 μ m PAH emission in galaxies. *Astrophys. J.* 628. L29—L32.
7. Engelbracht C. W., Rieke G. H., Gordon K. D., et al. (2008) Metallicity effects on dust properties in starbursting galaxies. *Astrophys. J.* 678. 804—827.
8. Frayer D. T., Fadda D., Yan L., et al. (2006) Spitzer 70 and 160 μ m observations of the extragalactic first look survey. *Astron. J.* 131. 250—260.
9. 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 p.
10. Hauser M. G., Dwek E. (2001) The cosmic infrared background: Measurements and implications. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 39. 249—307.
11. Hunt L. K., Thuan T. X., Izotov Y. I., Sauvage M. (2010) The Spitzer view of low-metallicity star formation. III. Fine-structure lines, aromatic features, and molecules. *Astrophys. J.* 712. 164—187.
12. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., Henkel C. (2011) Star-forming galaxies with hot dust emission in the Sloan Digital Sky Survey discovered by the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE). *Astron. and Astrophys.* 536(L7). 4 p.
13. 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 p.
14. Izotov Y. I., Guseva N. G., Fricke K. J., et al. (2014) Dust emission in star-forming dwarf galaxies: General properties and the nature of the submm excess. *Astron. and Astrophys.* 570(97). 21 p.
15. 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 p.

16. 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 p.
17. Izotov Y. I., Thuan T. X. (2007) MMT Observations of New extremely metal-poor emission-line galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophys. J.* 665. 1115—1128.
18. Nozawa T., Kozasa T., Umeda H., et al. (2003) Dust in the early universe: Dust formation in the ejecta of population III supernovae. *Astrophys. J.* 598. 785—803.
19. Rémy-Ruyer A., Madden S. C., Galliano F., et al. (2013) Revealing the cold dust in low-metallicity environments. I. Photometry analysis of the Dwarf Galaxy Survey with Herschel. *Astron. and Astrophys.* 557(95), 32 p.
20. Rémy-Ruyer A., Madden S. C., Galliano F., et al. (2014) Gas-to-dust mass ratios in local galaxies over a 2 dex metallicity range. *Astron. and Astrophys.* 563(31), 22 p.
21. Schneider D. P., Richards G. T., Hall P. B., et al. (2010) The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release. *Astron. J.* 139. 2360.
22. Schneider R., Omukai K., Bianchi S., Valiante R. (2012) The first low-mass stars: critical metallicity or dust-to-gas ratio? 2012, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 419. 1566—1575.
23. Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer, A. K., et al. (2010) The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance. *Astron. J.* 140. 1868—1881.
24. Wu Y., Charmandaris V., Hao L., et al. (2006) Mid-infrared properties of low-metallicity blue compact dwarf galaxies from the Spitzer infrared spectrograph. *Astrophys. J.* 639. 157—172.
25. Wu Y., Charmandaris V., Hunt L. K., et al. (2007) Dust in the extremely metal-poor blue compact dwarf galaxy I Zw 18: The Spitzer mid-infrared view. *Astrophys. J.* 662. 952—958.

*I. Ю. Изотова*¹, *Ю. И. Изотов*²

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна

²Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова
Національної академії наук України, Київ, Україна

ВЛАСТИВОСТІ ГАЛАКТИК З АКТИВНИМ ЗОРЕУТВОРЕННЯМ У СЕРЕДНЬОМУ ІЧ-ДІАПАЗОНІ ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОГО ТЕЛЕСКОПА WISE

Проведено дослідження фотометричних характеристик у середньому ІЧ-діапазоні вибірки компактних галактик з активним зореутворенням з 14-го випуску огляду неба SDSS. Вибірка налічує близько 30000 галактик. У спектрах усіх відібраних галактик спостерігаються емісійні лінії H з еквівалентними ширинами $EW(H) > > 1$ нм. Відібрані галактики — компактні об'єкти з кутовими діаметрами менше 6". Близько 10000 галактик зареєстровано на космічному телескопі WISE на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм. Значну кількість галактик зареєстровано також на довжинах хвиль 12 і 22 мкм. На основі цих даних та результатів спостережень в УФ-діапазоні на космічному телескопі GALEX показано, що нагрівання пилу в галактиках вибірки здійснюється УФ-випромінюванням масивних зір в областях зореутворення. У більшості з цих галактик на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм домінує випромінювання зір та іонізованого газу, тоді як на довжинах хвиль 12 і 22 мкм домінує випромінювання пилу. В деяких галактиках з великою світністю в лінії H випромінювання пилу спостерігається вже на короткій довжині хвилі 3.4 мкм з крутим зростанням

інтенсивності на довжині хвилі 4.6 мкм, та характеризується «червоним» кольором ($W1 - W2 > 2^m$), де $W1$ і $W2$ — зоряні величини на довжинах хвиль 3.4 і 4.6 мкм відповідно. Ймовірна причина цього випромінювання — наявність гарячого пилу з температурою у сотні кельвін. Наведено список з 39 галактик з таким екстремально великим значенням показника кольору $W1 - W2$.

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

*I. Y. Izotova*¹, *Y. I. Izotov*²

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

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

PROPERTIES OF STAR-FORMING GALAXIES IN MID-INFRARED RANGE FROM THE DATA OBTAINED WITH THE SPACE TELESCOPE WISE

We study photometric properties in the mid-infrared range of a sample of compact star-forming galaxies from the Data Release 14 of the SDSS. The sample includes about 30000 galaxies. The emission lines H α with equivalent widths $EW(H\alpha) > 1$ nm are observed in spectra of all selected galaxies. Selected galaxies are compact objects with angular diameters less than 6 arcsec. About 10000 galaxies were detected by the space telescope WISE at wavelengths 3.4 and 4.6 μ m. Considerable number of galaxies was also detected at wavelengths 12 and 22 μ m. Using these data and the results of observations obtained in the ultraviolet range with the space telescope GALEX it was shown that the dust heating in the sample galaxies is caused by the ultraviolet radiation of massive stars in star-forming regions. The stellar and ionized gas emission dominates at wavelengths 3.4 and 4.6 μ m in majority of galaxies whereas the dust emission dominates at wavelengths 12 and 22 μ m. In some galaxies with high H α luminosity dust emission is observed even at the wavelength 3.4 μ m, and it has a steep increase of the intensity toward the wavelength 4.6 μ m. This emission is characterized by red color ($W1 - W2 > 2^m$), where $W1$ and $W2$ are magnitudes at wavelengths 3.4 and 4.6 μ m, respectively. The probable cause of this emission is the presence of hot dust with a temperature of hundreds Kelvins. We present the list of 39 galaxies with such an extremely high red color $W1 - W2$.

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

Стаття надійшла до редакції 20.06.2019

Після доопрацювання 11.07.2019

Прийнята до друку 11.07.2019