

УДК 524.7

И. Ю. Изотова¹, С. Л. Парновский¹, А. А. Тютюнник²

¹Научно-исследовательская лаборатория «Астрономическая обсерватория»
Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев-53, ул. Обсерваторная 3

²Национальный авиационный университет
03058 Киев-58, просп. Космонавта Комарова, 1

Изолированные галактики: излучение в дальнем инфракрасном диапазоне, скорость и эффективность текущего звездообразования

Для выборки изолированных галактик определены параметры излучения в дальнем ИК-диапазоне: светимость и показатели цвета, температура пыли, скорость и эффективность текущего звездообразования. Проведен анализ и сравнение значений этих параметров с аналогичными для нормальных галактик в скоплении Virgo. Из сравнения скоростей текущего звездообразования, определенных независимыми способами по излучению галактик в дальнем ИК-диапазоне и радиоконтинууме, получено, что нижний предел доли свободно-свободного (теплого) излучения на частоте 1.4 ГГц составляет 13 %.

ІЗОЛЬОВАНІ ГАЛАКТИКИ: ВИПРОМІНЮВАННЯ У ДАЛЕКОМУ ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ, ШВИДКІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОТОЧНОГО ЗОРЕУТВОРЕННЯ, Изотова І. Ю., Парновський С. Л., Тютюнник А. А. — Для вибірки ізольованих галактик визначено параметри випромінювання у далекому ІЧ-діапазоні: світність та показники кольору, температура пилу, швидкість та ефективність поточного зореутворення. Проведено аналіз та порівняння значень цих параметрів з аналогічними для нормальних галактик у скупченні Virgo. З порівняння швидкостей поточного зореутворення, визначених незалежними способами за світністю в далекому ІЧ-діапазоні та випромінюванням у радіоконтинуумі, отримано, що нижня межа частки вільно-вільного (теплого) випромінювання на частоті 1.4 ГГц складає 13 %.

ISOLATED GALAXIES: FAR INFRARED PROPERTIES, CURRENT STAR FORMATION RATES AND EFFICIENCY, by Izotova I. Y., Parnovsky S. L., Tyutyunnyk A. A. — The parameters of emission in the far infrared spectral range such as the luminosity and color, dust temperature, current star formation rate and star formation efficiency are derived for a sample of isolated galaxies. These parameters are compared with similar ones obtained for normal galaxies from the Virgo cluster. From comparison of the current

star formation rates derived both from the luminosity in the far infrared spectral range and the emission in the radiocontinuum, the lower limit of the fraction of the galaxy free-free emission at 1.4 GHz is shown to be about 13 %.

ВСТУПЛЕНИЕ

Окружение галактик оказывает сильное влияние на их эволюцию и процессы звездообразования. Так, например, в работе [36] показано, что около 56 % галактик с большой светимостью в дальнем ИК-диапазоне ($\lg L_{\text{FIR}}/L_{\odot} \geq 11.5$, где L_{FIR} , L_{\odot} — светимость галактики в ИК-диапазоне и светимость Солнца соответственно) имеют проявления взаимодействия или столкновения. Эта доля увеличивается до 91 % для галактик со сверхвысокой светимостью в ИК-диапазоне ($\lg L_{\text{FIR}}/L_{\odot} \geq 12.0$). С другой стороны, в работе [12] на основе исследования выборки 15749 галактик из обзора «Las Campanas Redshift» показано, что скорость текущего звездообразования, определенная по интенсивности линии [O II] λ 372.7 нм, в галактиках скоплений ниже, чем в галактиках поля.

Для количественной оценки влияния окружения на процессы звездообразования необходима выборка сравнения — выборка галактик, не испытавших взаимодействий с соседями в течение миллиардов лет и эволюционировавших только под действием внутренних процессов. Такими свойствами обладают изолированные галактики, не имеющие близких соседей в пределах заданной окрестности. Истинно изолированные (по жесткому критерию) галактики — редкость во Вселенной: они составляют менее 5 % всех галактик [6]. Их исследованию посвящено много работ [4, 7, 13—15, 21—25, 32, 34]. Выборка изолированных галактик была создана В. Е. Караченцевой [4]. В работах [13, 14] приведены результаты наблюдений изолированных галактик из каталога [4] в линии нейтрального водорода H I $\lambda = 21$ см и определена масса нейтрального водорода $M(\text{H I})$; в [25] для 41 строго изолированной галактики проведен поиск облаков нейтрального газа вокруг галактик, который может быть остатком процессов их формирования; сравнение излучения в дальнем ИК-диапазоне изолированных, двойных и взаимодействующих галактик проведено в работах [15, 31]; в [21] по данным излучения в линии H_{α} изучена скорость образования массивных звезд в 55 ярких галактиках из скопления Virgo и 29 изолированных спиральных галактиках; по наблюдениям в линии $^{12}\text{CO}(1-0)$ в работе [29] для 99 галактик позднего типа из каталога [4] оценена масса молекулярного водорода $M(\text{H}_2)$ и показано, что в среднем $M(\text{H}_2)/M(\text{H I}) \approx 18$ %. В работе [32] проведено изучение 102 галактик ранних типов из каталога [4]. На основе анализа и сравнения функций светимости эллиптических (E) галактик, а также относительного числа эллиптических и линзообразных (S0) галактик из каталога [4] и обзора «Center for Astrophysics» (CfA), авторы работы [32] приходят к заключению, что процессы образования и/или эволюции E-галактик в группах (скоплениях) и изолированных, вероятно, не отличаются между собой. А различное соотношение галактик — S0:E = 4:1 (обзор CfA) и S0:E = 1:1.75 (изолированные галактики [4]) является весомым аргументом в пользу того, что при формировании S0-галактик важную роль играют выметание, удаление газа, имеющие место в группах или богатых скоплениях. Свойства 203 изолированных дисковых галактик из обзора CfA проанализированы в работе [34]. Получено, что спиральные галактики поздних типов, в частности Sc, чаще встречаются среди изолированных систем, а линзообразные S0 — среди галактик, испытывающих возмущение. Дисковые изолированные системы,

как правило, имеют меньшие размеры и светимость, и более голубой цвет по сравнению со взаимодействующими дисковыми галактиками. В работе [34] отмечается почти полное отсутствие больших ярких и массивных объектов среди изолированных систем и наоборот — отсутствие объектов с малыми размерами, массой и светимостью среди галактик, испытывающих возмущение. В новом проекте AMIGA (Analysis of the interstellar Medium of Isolated GALaxies [22—24, 35]) ставится цель всестороннего изучения роли и влияния окружения на свойства и эволюцию галактик. В основе проекта лежит изучение свойств межзвездной среды изолированных галактик на основе наблюдений в широком диапазоне спектра — оптическом (полосе B и линии H_α), ИК (FIR и NIR, дальний и ближний ИК-диапазон), радиодиапазоне (континуум, $H I$ и CO). Новые перспективы в изучении изолированных галактик, как отмечено в [7], открываются с использованием данных SDSS (Sloan Digital Sky Survey) [5], позволяющих существенно увеличить количество исследуемых галактик и диапазон по красным смещениям.

В данной работе на основе данных спутника IRAS [17] и обзора NVSS (National Radio Astronomy Observatory Very Large Array Sky Survey) [10] исследованы изолированные галактики из каталога [4] в дальнем ИК-диапазоне и радиоконтинууме, определены скорость и эффективность текущего звездообразования, проведено сравнение с галактиками в скоплении Virgo и галактиками Маркаряна.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Для исследования были выбраны объекты из каталога изолированных галактик В. Е. Караченцевой [4] (далее KIG). Каталог включает 1051 галактику, полнота выборки галактик составляет $\langle V/V_m \rangle = 0.42$ до $m_B = 15.7^m$, для значительного числа объектов имеются данные наблюдений в оптическом и дальнем ИК-диапазоне; в выборке представлены галактики всех морфологических типов. При построении каталога использовался критерий изолированности: галактика i , имеющая угловой диаметр a_i , считалась изолированной, если угловое расстояние $X_{i,j}$ между этой галактикой и ее соседями j , имеющими угловые размеры a_j , удовлетворяет соотношениям 1) $X_{i,j} \geq 20a_j$ и 2) $a_i/4 \leq a_j \leq 4a_i$.

В результате перекрестного сравнения координат KIG-галактик с координатами объектов каталогов IRAS, NVSS и базы данных внегалактических объектов NED (NASA/IPAC Extragalactic Database) были отобраны 388 изолированных галактик с потоками излучения в дальнем ИК-диапазоне в полосах 12, 25, 60 и 100 мкм, а также 75 галактик с потоками непрерывного радиоизлучения на частоте $\nu = 1.4$ ГГц (из них для 60 галактик имеются значения потоков излучения в дальнем ИК-диапазоне). У всех отобранных галактик измерения потоков имеют оценку качества «хорошо» или «удовлетворительно» (согласно классификации каталога IRAS). Для 269 галактик в базе данных LEDA (Lyon-Meudon Extragalactic Database) были найдены значения потоков излучения нейтрального водорода $H I$, что позволило оценить его массу. Для всех отобранных галактик красные смещения z взяты из NED.

Для исследуемых объектов данные излучения в дальнем ИК-диапазоне были выбраны из каталогов точечных источников IRAS Point Source Catalog (PSC, объекты ярче 0.5 Ян*) или слабых источников IRAS Faint Source

* $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Гц})$

Survey (FSS, объекты ярче 0.2 Ян) в зависимости от оценки качества наблюдательных данных в PSC и FSS. При одинаковой оценке качества предпочтение отдавалось данным FSS. При этом количество галактик из PSC и FSS на 60 мкм и 100 мкм приблизительно одинаково, в то время как в коротковолновом диапазоне в полосах 12 мкм и 25 мкм в каталоге FSS найдено приблизительно втрое больше галактик, чем в каталоге PSC. Коэффициент линейной корреляции данных наблюдений удовлетворительного и хорошего качества из каталогов PSC и FSS равен $r \approx 0.94$ для излучения в полосах 12 и 25 мкм, и $r \approx 0.99$ для 60 и 100 мкм.

Красные смещения для изолированных галактик из каталога [4], отождествленных с объектами из PSC и FSS, составляют $0.0002 \leq z \leq 0.0592$ со значением медианы 0.0165 и средним значением $\langle z \rangle = 0.017$. Для сравнения: в полной выборке изолированных галактик из каталога [4] диапазон изменения красного смещения составляет $1.07 \cdot 10^{-4} \leq z \leq 0.0762$, значение медианы 0.0197, $\langle z \rangle = 0.021$.

На рис. 1, а приведено распределение отобранных галактик по морфологическим типам: тип E — 27 галактик (в подвыборку объединены эллиптические и линзообразные галактики), S — 184 (подвыборка включает подтипы Sa—Sd спиральных галактик), SB — 55 (включает все подтипы галактик с баром), SAB — 35 (все подтипы), Irr — 22 (Irr, Sm, Sdm). Из рассмотрения были исключены KIG-галактики, отождествленные как галактики Маркаряна или пекулярные галактики.

На основе данных первого выпуска SDSS [5] был создан каталог изолированных галактик CVIG (Catalog of Very Isolated Galaxies) [7], включающий 2980 изолированных галактик с блеском 16^m — 19^m в полосе g. Среднее и максимальное красные смещения галактик из каталога равны $\langle z \rangle = 0.0642$ и $z_{\max} = 0.2374$ соответственно. Выборка содержит 1414 (47 %) спиральных галактик поздних типов и 1566 (53 %) галактик ранних типов.

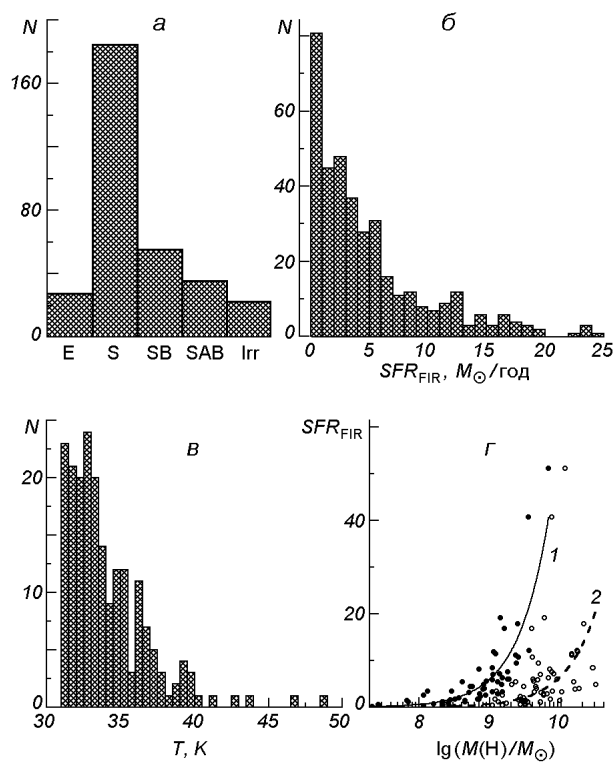


Рис. 1. Распределения количества N изолированных галактик: а — по морфологическим типам, б — по скорости SFR_{FIR} текущего звездообразования, в — по температуре пыли T_d в однокомпонентной модели; г — зависимость скорости SFR_{FIR} от массы молекулярного водорода $M(\text{H}_2)$ (точки) и суммарной массы водорода $M(\text{H}_2) + M(\text{H I})$ (кружки)

Для изолированных галактик из каталога CVIG по их координатам мы провели перекрестное отождествление с объектами из IRAS, NVSS и NED, аналогичное выполненному ранее для галактик KIG. Дополнительно были использованы изображения, полученные в SDSS, которые позволили отождествить объекты CVIG с IRAS (PSC и FSS) и NVSS при условии, что угловое расстояние между ними в основном не превышает $0.5'—0.6'$. В результате отобраны 60 и 28 галактик с данными IRAS и NVSS соответственно. В табл. 1 приведены отождествления CVIG-галактик с объектами IRAS: номер галактики в каталоге CVIG [7], имя в каталоге SDSS, отождествление галактики в базе данных NED, имя галактики в каталогах IRAS PSC и IRAS FSS (приведены данные согласно NED и оригинальные отождествления, если в NED они отсутствуют), координаты галактики в соответствующих IRAS-каталогах. CVIG-галактики, отождествленные с объектами из NVSS, приведены в табл. 2. Поскольку критерии изолированности галактик, используемые при построении каталогов CVIG и KIG, близки [7], полученная подвыборка CVIG была использована для сравнения с результатами исследования выборки KIG.

ВЫЧИСЛЕНИЯ

Для KIG-галактик были определены следующие параметры: светимость в дальнем ИК-диапазоне спектра L_{FIR} ; ИК-избыток $\lg(L_{\text{FIR}}/L_{\text{B}})$; показатели цвета $\lg(F_{12}/F_{25})$ и $\lg(F_{60}/F_{100})$, где F_{12} , F_{25} , F_{60} и F_{100} — монохроматические потоки излучения на длинах волн 12, 25, 60 и 100 мкм; температура пыли T_{d} (из отношения потоков F_{60} и F_{100} , подробнее см. [2]); монохроматическая светимость $L_{1.4}$ в радиоконтинууме на частоте $\nu = 1.4$ ГГц; скорости текущего звездообразования SFR_{FIR} и $SFR_{1.4}$, определенные по светимостям галактики в дальнем ИК-диапазоне и радиоконтинууме, эффективность звездообразования SFE. При вычислениях постоянная Хаббла принята равной $H_0 = 75 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Светимость галактики L_{FIR} в дальнем ИК-диапазоне согласно [17] равна

$$L_{\text{FIR}}/L_{\odot} = 3.89 \cdot 10^5 (2.58F_{60} + F_{100}) D^2,$$

где F_{60} , F_{100} — монохроматические потоки излучения (здесь и далее — в Ян), $D = cz/H_0$ — расстояние до галактики в Мпк, c — скорость света, L_{\odot} — светимость Солнца.

В предположении, что в областях звездообразования излучение молодых звезд, полностью поглощаясь пылью, нагревает ее, и затем пыль переизлучает полученную энергию в дальнем ИК-диапазоне, скорость текущего звездообразования SFR_{FIR} определяется согласно [33] из соотношения

$$SFR_{\text{FIR}} = 6.5 \cdot 10^{-10} L_{\text{FIR}}/L_{\odot}, \text{ М}_{\odot}/\text{год}, \quad (1)$$

где L_{FIR} — светимость галактики в дальнем ИК-диапазоне.

Подробное обсуждение применимости выражений для L_{FIR} и SFR_{FIR} , а также используемых при этом приближений приведено в работах [1, 17, 33].

Скорость текущего звездообразования $SFR_{1.4}$ определена согласно [3] из соотношения

$$SFR_{1.4} = 2.5 \cdot 10^6 A L_{1.4}/L_{\odot}, \text{ М}_{\odot}/\text{год}, \quad (2)$$

где A — доля теплового (свободно-свободного) излучения в общем излучении в радиоконтинууме; $L_{1.4}/L_{\odot} = 3.07 \cdot 10^{-7} D^2 F_{1.4}$ — монохроматическая светимость галактики в радиоконтинууме на частоте $\nu = 1.4$ ГГц, где $F_{1.4}$ — соответствующий монохроматический поток излучения.

Таблица 1. Отождествление изолированных галактик из каталога CVIG с объектами из каталогов IRAS

CVIG номер	SDSS-объект	NED-объект	IRAS-объект	IRAS-координаты
35	J001114.37-110159.1	—	IRASF00086-1118	001114.32-110144.1
40	J001529.74+003823.1	SDSS J001529.74+003823.1	IRAS 00129+0021	001529.74+003823.2
61	J002544.72-000034.4	2MASX J00254471-0000340	IRAS 00231-0017	002544.73-000034.4
84	J003158.20-090814.4	2MASX J00315821-0908141	IRASF00294-0924	003158.20-090814.5
164	J005735.95+143605.4	2MASX 00573593+1436051	IRASF00549+1419	005735.94+143605.3
184	J010156.61-092535.9	—	IRASF00594-0941	010156.72-092550.5
206	J010807.36-102217.7	—	IRASF01056-1038	010809.56-102202.2
241	J011913.77-091731.7	2MASX J01191376-0917325	IRASF01167-0933	011913.77-091731.8
349	J015301.51-010841.5	2MASX J01530155-0108419	IRASF01504-0123	015301.51-010841.5
357	J015443.56-091639.5	2MASX J01544356-0916395	IRASF01522-0931	015443.57-091639.5
370	J015950.97+005616.5	2MASX J01595097+0056167	IRASF01572+0041	015950.96+005616.6
428	J021542.64+135551.4	2MASX J02154263+1355517	IRAS 02130+1341	021542.65+135551.9
457	J022636.57+003856.0	UGC 01911	IRASF02240+0025	022636.58+003856.0
466	J022926.90-004208.3	—	IRASF02268-0055	022924.92-004216.4
468	J023005.85-072032.0	2MASX J02300586-0720325	IRASF02276-0734	023005.86-072032.1
482	J023537.70+010154.1	KUG 0233+008	IRASF02330+0048	023537.70+010154.1
517	J024700.18-000921.4	2MASXi J0247001-000921	IRAS 02444-0021	024700.19-000921.4
594	J032232.78-000004.4	2MASX J03223276-0000035	IRAS 03199-0010	032232.79-000004.3
605	J032614.50-001210.8	MRK 0611	IRAS 03236-0022	032614.48-001210.7
615	J033201.99+011034.4	2MASX J03320199+0110346	IRAS 03294+0100	033201.98+011034.5
627	J033623.01-005257.6	2MASX J03362300-0052576	IRASF03338-0102	033623.03-005257.7
803	J082239.12+513708.0	—	IRASF08189+5146	082242.11+513702.3
877	J084114.40+521144.8	2MASX J08411442+5211439	IRAS 08375+5222	084114.39+521144.7
903	J084747.76-002251.4	2MASX J08474769-0022514	IRASF08452-0011	084747.70-002251.4
991	J091723.76+590307.2	2MASX J09172374+5903065	IRASF09136+5915	091723.77+590307.2
1027	J092908.40+555915.3	—	IRASF09254+5612	092901.93+555929.0
1121	J095749.44-001239.3	2MASX J09574953-0012390	IRASF09552+0001	095749.55-001239.4
1191	J102008.16-004750.8	2MASX J10200807-0047503	IRAS 10176-0032	102008.10-004750.8
1257	J104034.69+644146.9	2MASX J10403484+6441461	IRASF10371+6457	104034.69+644147.0
1337	J110326.88+664010.9	2MASX J11032685+6640111	IRASF11002+6656	110326.80+664011.0
1339	J110338.40-005208.4	—	IRAS 11010-0035	110337.34-005156.7
1394	J111708.88+671434.0	—	IRASF11141+6730	111712.60+671412.9
1446	J112903.84+655752.9	—	IRASF11261+6614	112903.42+655814.2
1504	J114236.96+015553.6	SDSS J114236.97+015553.4	IRASF11400+0212	114236.97+015553.5
1525	J114705.28-000135.3	2MASX J11470520-0001348	IRASF11445+0014	114705.19-000135.3
1543	J115140.80+675042.0	2MASX J11514062+6750415	IRASF11489+6807	115140.77+675041.9
1594	J120351.07-034234.5	LCRS B120117.2-032552	IRASF12013-0326	120351.13-034234.6
1655	J121712.52+624932.4	2MASX J12171246+6249327	IRAS 12147+6306	121712.51+624932.6
1682	J122438.69+013243.0	CGCG 014-028	IRASF12220+0149	122438.69+013242.5
1704	J122958.80+000138.0	2MASX J12295883+0001379	IRAS 12274+0018	122958.84+000138.0
1818	J125645.12+001117.5	SDSS J125645.02+001117.5	IRASF12542+0027	125645.02+001117.5
1841	J130239.12+634929.6	—	IRASF13007+6405	130241.06+634917.3
2041	J135412.72+025250.8	2MASX J13541278+0252509	IRASF13516+0307	135412.76+025250.8
2074	J140242.00+650556.4	2MASX J14024190+6505568	IRAS 14013+6520	140241.93+650556.5
2101	J140929.28+645450.0	2MASX J14092919+6454496	IRASF14082+6508	140929.14+645450.1
2122	J141535.52+021316.7	—	IRASF14130+0227	141537.32+021311.1
2155	J142816.56+000008.2	2MASX J14281649+0000088	IRAS 14257+0013	142816.47+000008.4
2227	J144718.19+581333.4	2MASX J14471820+5813334	IRAS 14459+5825	144718.11+581333.3
2251	J145249.20+583334.9	—	IRASF14514+5845	145246.27+583325.4
2346	J151905.76-000156.7	2MASX J15190585-0001567	IRASF15165+0008	151905.84-000156.4
2373	J152637.68+003533.4	CGCG 021-096	IRAS 15240+0046	152637.67+003533.5
2392	J153128.80+033450.7	2MASX J15312877+0334508	IRAS 15289+0345	153128.79+033450.7
2402	J153415.84-001143.6	2MASX J15341580-0011436	IRASF15317-0001	153415.78-001143.6
2427	J153952.80+562206.2	SBS 1538+565	IRASF15387+5631	153952.87+562206.1
2603	J163202.16+431148.8	—	IRASF16304+4318	163202.17+431159.9
2649	J164428.56+435904.2	—	IRAS 16429+4404	164426.47+435916.6
2687	J170007.20+611714.2	2MASX J17000705+6117147	IRASF16595+6121	170007.13+611714.3
2716	J170828.81+283305.6	FBQS J170828.7+283305	IRAS 17065+2836	170828.79+283305.7
2797	J204756.88-052421.2	2MASX J20475691-0524211	IRASF20452-0535	204756.91-052421.3
2930	J233440.80-002537.6	—	IRASF23321-0041	233442.34-002515.5

Таблица 2. Отождествление изолированных галактик из каталога CVIG с объектами из NVSS

CVIG номер	SDSS-объект	NED-объект	NVSS-объект	NVSS-координаты
40	J001529.74+003823.1	SDSS J001529.74+003823.1	J001529+003819	001529.74+003823.2
51	J001836.89+003930.9	SDSS J001836.89+003930.9	J001836+003930	001836.89+003931.1
68	J002837.83-095953.8	—	J002837-095955	002837.62-095955.9
76	J003005.32+002449.5	—	J003004+002458	003004.94+002458.9
162	J005649.44-003732.1	—	J005648-003739	005648.39-003739.2
188	J010259.23+002550.1	2MASX J01025926+0025502	J010258+002554	010259.24+002550.1
200	J010731.41-004803.2	—	J010730-004810	010730.14-004810.4
208	J010838.11+001631.2	—	J010838+001608	010838.17+001608.9
242	J011930.16+010228.7	—	J011931+010229	011931.26+010229.5
337	J015007.89+001313.3	2MASX J01500789+0013135	J015007+001318	015007.90+001313.4
342	J015112.93-004359.4	—	J015114-004421	015114.26-004421.2
349	J015301.51-010841.5	2MASX J01530155-0108419	J015301-010844	015301.51-010841.5
357	J015443.56-091639.5	2MASX J01544356-09163	J015443-091630	015443.57-091639.5
428	J021542.64+135551.4	2MASX J02154263+1355517	J021542+135551	021542.65+135551.9
429	J021605.23-073452.5	—	J021605-073447	021605.87-073447.7
468	J023005.85-072032.0	2MASX J02300586-0720325	J023005-072039	023005.86-072032.1
482	J023537.70+010154.1	KUG 0233+008	J023538+010158	023537.70+010154.1
506	J024207.36+010108.1	2MASX J02420736+0101081	J024207+010059	024207.38+010108.2
517	J024700.18-000921.4	2MASX J02470016-0009215	J024700-000920	024700.19-000921.4
540	J025546.46-005019.3	KUG 0253-010	J025545-005032	025546.47-005019.3
580	J031802.56+000906.8	2MASX J03180255+0009071	J031803+000923	031802.57+000906.9
594	J032232.78-000004.4	2MASX J03223276-0000035	J032232-000004	032232.79-000004.3
605	J032614.50-001210.8	MRK 0611	J032614-001220	032614.48-001210.7
629	J033858.15+000727.3	—	J033859+000743	033859.91+000743.6
998	J091856.16+521339.3	—	J091858+521400	091858.84+521400.8
2076	J140335.28+045539.5	SDSS J140335.34+045539.5	J140334+045532	140335.34+045539.6
2438	J154141.76+030102.6	2MASX J15414165+0301031	J154141+030120	154141.68+030102.7
2456	J154534.08+024148.0	—	J154534+024135	154534.78+024135.0

Как отмечено в работе [3], определенные таким способом скорости текущего звездообразования SFR_{FIR} и $SFR_{1.4}$ в силу принятых допущений следует рассматривать как соответственно нижний и верхний пределы (при $A = 1$) истинной скорости текущего звездообразования.

Эффективность звездообразования определена из соотношения $SFE = SFR_{\text{FIR}} / [1.3(M(\text{H I}) + M(\text{H}_2))]$, где $M(\text{H I}) + M(\text{H}_2)$ — суммарная масса нейтрального и молекулярного водорода, а множитель 1.3 учитывает вклад гелия [1].

Масса нейтрального водорода вычисляется согласно [26]

$$M(\text{H I})/M_{\odot} = 2.36 \cdot 10^5 F_{\text{H I}} D^2,$$

где $F_{\text{H I}}$ — поток излучения в линии 21 см нейтрального водорода в $\text{Ян} \cdot \text{км}/\text{с}$, D — расстояние в Мпк.

Масса молекулярного водорода $M(\text{H}_2)$ для изолированных спиральных галактик была вычислена с учетом зависимости отношения $M(\text{H}_2)/M(\text{H I})$ от морфологического типа галактики, полученной в [37].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 3 приведены вычисленные значения медиан распределений расстояния D , ИК-избытка $\lg(L_{\text{FIR}}/L_{\text{B}})$, скорости текущего звездообразования SFR_{FIR} , средние значения температуры пыли T_{d} со средней квадратичной ошибкой и SFR_{FIR} со стандартным отклонением σ выборки; в последней графе приведены количества галактик N . Для спиральных галактик S выделены подтипы: ранние — S_{E} (включены галактики Sa, Sab, SAa, SAab), промежуточные — S_{M} (Sb, Sbc, SAB, SABc), поздние — S_{L} (Sc, Scd, Sd).

Таблица 3. Характеристики выборки изолированных KIG галактик с излучением в дальнем ИК-диапазоне

Морфологический тип	Выборка	D, Мпк (медиана)	$\lg(L_{\text{FIR}}/L_{\text{B}})$ (медиана)	$\langle T_{\text{d}} \rangle$, К	$\langle \text{SFR}_{\text{FIR}} \rangle$, $M_{\odot}/\text{год}$; σ выборки	SFR_{FIR} , $M_{\odot}/\text{год}$ (медиана)	N
E	KIG	74.7	-0.15	32.9±0.7 (36)	7.0 5.4	5.7	27
E	Virgo	—	-0.87	—	—	0.4	7
S	KIG	72.1	-0.22	30.8±0.2 (198)	5.8 6.4	3.7	184
S _E		86.7	-0.24	30.5±0.3	5.8 5.2	4.3	42
S _M		78.1	-0.17	31.1±0.4	6.7 5.6	4.8	81
S _L		54.5	-0.32	30.6±0.4	4.7 8.0	2.1	51
S	Virgo	—	-0.41	—	—	1.5	60
SB	KIG	63.4	-0.45	30.7±0.4 (55)	4.8 4.8	3.2	55
SB _E		58.5	-0.51	31.6±1.2	4.7 4.9	3.6	12
SB _M		78.2	-0.32	30.5±0.6	6.9 4.7	6.1	24
SB _L		19.9	-0.69	30.3±0.4	2.1 3.7	0.9	18
SB	Virgo	—	-0.45	—	—	0.6	34
SAB	KIG	25.6	-0.60	30.1±0.4 (35)	3.3 4.6	2.0	35
SAB	Virgo	—	-0.35	—	—	1.7	17
Irr	KIG	56.2	-0.32	33.6±0.8 (23)	10.8 18.3	3.2	22
Irr	Virgo	—	-0.52	—	—	0.2	6
Vce	KIG	67.3	-0.23	31.1±0.2 (347)	5.8 7.5	3.5	323
Vce	Virgo	—	-0.46	31.9±0.2 (124)	—	0.7	124

Аналогичное разделение по подтипам проведено для спиральных галактик с перемычкой (SB). В табл. 3 для сравнения приведены также ИК-избыток $\lg(L_{\text{FIR}}/L_{\text{B}})$ и медиана скорости текущего звездообразования для галактик в скоплении Virgo.

Гистограммы распределения скорости текущего звездообразования SFR_{FIR} и температуры пыли T_{d} для KIG-галактик приведены на рис. 1, б и в соответственно.

Как следует из табл. 3 и рис. 1, б, диапазон изменения SFR_{FIR} значителен, и распределение этой величины существенно отличается от нормального из-за длинного «хвоста» в области больших SFR_{FIR} . Поэтому для сравнения более показательными являются значения медианы SFR_{FIR} . Как для полных выборок KIG-галактик и галактик в скоплении в Virgo, так и для отдельных морфологических типов медиана SFR_{FIR} в изолированных галактиках выше, чем в галактиках из скопления в Virgo, что согласуется с результатами работы [21]. Инфракрасный избыток $\lg(L_{\text{FIR}}/L_{\text{B}})$ в изолированных галактиках также больше, за исключением спиральных галактик SB с перемычкой (здесь они практически равны) и переходного класса SAB (однако отметим, что количество таких галактик в Virgo мало). Полученный результат соответствует выводам работы [12] о том, что в нормальных галактиках вариации скорости звездообразования при изменении окружения (поле, скопление), вероятно, определяются физическими процессами, приводящими к удалению газа.

Применение t -теста Стьюдента (здесь и далее все статистические выводы сделаны с помощью t -теста на уровне значимости $\alpha = 0.05$) не выявило различия средних скоростей текущего звездообразования SFR при сравнении морфологических типов E — S, E — SB, E — Irr у KIG-галактик. Аналогичный результат получен при сравнении средних значений SFR для пар выборок галактик E — подтипы S_E, S_M; S — SB, S — SB_E, SB_M, SB_L. На пределе значимости статистически отличаются пары выборок E — S_L, S — SB_L, S — Irr. Однако отметим, что распределение величин SFR отличается

от нормального, и применение t -теста Стьюдента не совсем корректно. Поэтому мы в каждой выборке отбрасывали (урезали) большие значения SFR и оставляли 95, 90, 85 % и т. д. от общего числа точек до тех пор, пока приостановилось изменение t -параметра в исследуемой выборке. При этом были выявлены достоверные различия средней скорости звездообразования для галактик типов E и S (урезание 20 % и больше); E и S_L (≥ 5 %); E и SB (≥ 5 %); E и SB_L (≥ 5 %); S_E и S_L (≥ 10 %); SB_E и SB_L (≥ 5 %); SB_M и SB_L . Таким образом, заметна устойчивая тенденция различия средних скоростей текущего звездообразования в эллиптических галактиках и поздних спиральных и спиральных с перемычками галактиках, поздних и ранних спиральных галактиках, поздних и ранних спиральных галактиках с перемычкой, поздних и промежуточных спиральных галактиках с перемычкой.

Для галактик из KIG-выборки установлено различие средних температур пыли $\langle T_d \rangle$ при сравнении следующих пар морфологических типов галактик: E — S, E — S_L , E — S_E , S — Irr. При этом значения медиан температуры T_d практически одинаковы для галактик типов S (30.2 K), SB (30.1 K) и SAB (30.0 K), и несколько выше для галактик типов E (32.5 K) и Irr (32.6 K). Для KIG-выборки получено значение 2.2 K различия медиан температуры пыли для E-S0/Sa и Sb-Sbc галактик, близкое к аналогичному значению 2.4 K для галактик из CfA-обзора [30]. Довольно высокое значение температуры пыли (близкое к тому, что получено нами) в галактиках раннего морфологического типа E в работе [30] объясняется не повышенным уровнем звездообразования, а концентрированием пыли в центральных областях галактики, где плотность потока излучения основного звездного населения достаточно велика для соответствующего нагрева пыли.

Для сравнения: определенная аналогичным образом температура пыли в галактиках Н II Маркаряна (Первый Бюраканский обзор) равна $\langle T_d \rangle = 37$ K [2]; различие средних температур пыли T_d выборок галактик Н II Маркаряна и изолированных галактик KIG, а также галактик Н II Маркаряна и Virgo является статистически достоверным.

При исследовании ИК-излучения в семи скоплениях галактик [8] получен противоположный результат: температура пыли не зависит от морфологического типа галактики.

Для изучения эффективности звездообразования мы использовали два подхода: определение отношения скорости текущего звездообразования: а) к полной массе газа — учитываются нейтральный водород H I, молекулярный водород H_2 , гелий He; б) к массе H_2 . Для 60 галактик из нашей выборки мы определили значения отношений $M(H_2)/M(H I)$ и $SFR_{FIR}/M(H_2)$, эффективность звездообразования SFE, используя данные работы [29] о массе молекулярного водорода $M(H_2)$, полученной из наблюдений изолированных галактик [4] в линии $^{12}CO(J = 1-0)$ (табл. 4). Для этих галактик установлена довольно тесная корреляционная связь (коэффициент линейной корреляции $r > 0.75$) скорости текущего звездообразования SFR_{FIR} и массы молекулярного водорода $M(H_2)$, выражаемая уравнением регрессии $SFR_{FIR} = 6.02 \cdot 10^{-9} M(H_2)$ (рис. 1, z , кривая 1). Тесная зависимость свидетельствует в пользу того, что излучение в дальнем ИК-диапазоне в изолированных KIG-галактиках связано с молекулярными облаками, которые могут быть областями звездообразования. С другой стороны, корреляционная связь между SFR_{FIR} и суммарной массой водорода $M(H_2) + M(H I)$ в галактике практически отсутствует (рис. 1, z , кривая 2, $r < 0.4$). Полученный результат качественно не изменится при изменении коэффи-

Таблица 4. Массы $M(\text{H I})$ атомарного и $M(\text{H}_2)$ молекулярного водорода, эффективность звездообразования выборки KIG галактик

Номер KIG	Морфологический тип	$\text{SFR}_{\text{FIR}}, M_{\odot}/\text{год}$	$M(\text{H}_2), 10^9 M_{\odot}$ [29]	$M(\text{H I}), 10^9 M_{\odot}$	$\frac{M(\text{H}_2)}{M(\text{H I})}$	$\text{SFR}_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2), 10^{-9}/\text{год}$	$\text{SFE}, 10^{-10}/\text{год}$
1	SABbc	11.11	2.34	12.15	0.19	4.74	5.90
4	SABc: sp	6.96	1.12	4.09	0.27	6.20	10.26
22	Sc	40.59	3.55	4.06	0.87	11.44	41.02
33	SAB(rs)cd	7.16	1.38	6.72	0.21	5.19	6.80
53	SB(rs)c	1.15	0.45	2.70	0.17	2.57	2.81
56	SB(rs)b	8.10	0.71	6.34	0.11	11.44	8.84
59	SA(rs)cd	1.42	2.88	6.85	0.42	0.49	1.12
72	SA(rs)b	3.22	1.10	3.19	0.34	2.94	5.78
87	Sa	3.41	0.30	7.36	0.040	11.56	3.43
94	Scd:	2.00	0.37	2.68	0.14	5.38	5.04
123	SB(rs)bc	8.43	1.10	27.49	0.040	7.69	2.27
155	SA(s)c	2.57	0.12	1.39	0.084	21.97	13.08
176	SAB(rs)c:	1.70	0.71	6.53	0.11	2.40	1.81
180	SA(rs)c:	0.13	0.02	0.82	0.027	5.91	1.20
191	(R')SBa	3.90	0.85	3.69	0.23	4.58	6.61
291	SA(rs)dm:	0.50	0.027	2.68	0.010	18.52	1.42
298	SB(rs)a	5.99	1.82	7.23	0.25	3.29	5.09
339	(R')SB(s)	17.85	2.51	18.61	0.14	7.11	6.50
343	SBcd:	3.20	1.51	8.86	0.17	2.11	2.37
363	Sb:	4.80	0.83	1.24	0.67	5.77	17.81
383	SB(rs)ab	1.17	0.071	1.27	0.056	16.48	6.72
444	SB(s)mpec	19.13	1.41	4.56	0.31	13.54	24.62
464	SAC pecsp	0.36	0.22	0.89	0.25	1.64	2.50
489	SB(s)m	4.39	0.54	2.53	0.21	8.18	11.02
509	SAB(r)d?s	0.41	0.27	1.25	0.22	1.52	2.07
512	SB(s)cd	0.31	0.12	3.48	0.034	2.65	0.66
527	SABc: sp	3.08	0.51	4.78	0.11	6.00	4.48
545	Sb	4.76	1.48	30.22	0.049	3.22	1.16
547	SAB(s)d	0.11	0.02	0.30	0.074	5.00	2.67
604	(R)SB(s)a	0.84	0.26	1.45	0.18	3.19	3.77
605	SB(r)ab	0.68	0.16	3.04	0.053	4.20	1.64
626	SAB(rs)cd	1.39	0.068	3.15	0.021	20.44	3.32
638	Sc? sp	4.36	0.58	3.94	0.15	7.58	7.44
652	SA(rs)c:	1.71	0.32	2.45	0.13	5.28	4.75
653	SA(r)b:	2.80	0.72	5.76	0.13	3.87	3.32
669	SB(r)a	1.70	0.68	0.51	1.32	2.52	11.02
712	(R)SB(r)a	1.09	0.22	3.21	0.068	4.98	2.45
772	Scd:	1.39	0.45	2.51	0.18	3.11	3.62
786	Sb	16.78	1.62	2.29	0.71	10.35	33.00
791	Sa?	3.41	0.14	1.12	0.12	25.26	20.90
800	SBb	6.19	1.51	5.29	0.29	4.09	7.00
812	Sbc	3.79	0.81	15.28	0.053	4.66	1.81
840	SB(s)b	2.81	1.32	4.52	0.29	2.13	3.70
850	SA(rs)c	5.54	0.91	3.25	0.28	6.08	10.23
862	SBbc:	9.38	2.40	2.48	0.97	3.91	14.78
890	Sbc	12.04	3.63	13.59	0.27	3.32	5.38
906	Sb	11.33	1.23	13.26	0.093	9.21	6.01
911	SBb	5.89	1.91	2.21	0.86	3.09	11.02
935	SAB(rs)cd	5.86	1.10	3.71	0.30	5.35	9.38
940	Sb	51.00	6.76	4.91	1.38	7.54	33.62
976	Sab	2.46	0.89	4.89	0.18	2.76	3.28
1001	(R)SA(ra)	1.03	0.21	4.99	0.043	4.81	1.52
1003	Sc	5.36	0.42	1.92	0.22	12.85	17.67
1006	Sm	7.55	1.82	5.66	0.32	4.15	7.77
1013	Sa	10.60	2.57	1.49	1.73	4.13	20.09
1019	Sc:	5.32	1.32	14.18	0.091	4.04	2.64
1028	E	1.56	0.28	2.26	0.13	5.53	4.76
1036	Sdm:	11.80	1.15	16.44	0.072	10.28	5.16
1038	SB(rs)b	3.89	0.83	17.48	0.048	4.68	1.63
1039	SBcd:	2.19	0.74	2.00	0.37	2.96	6.14

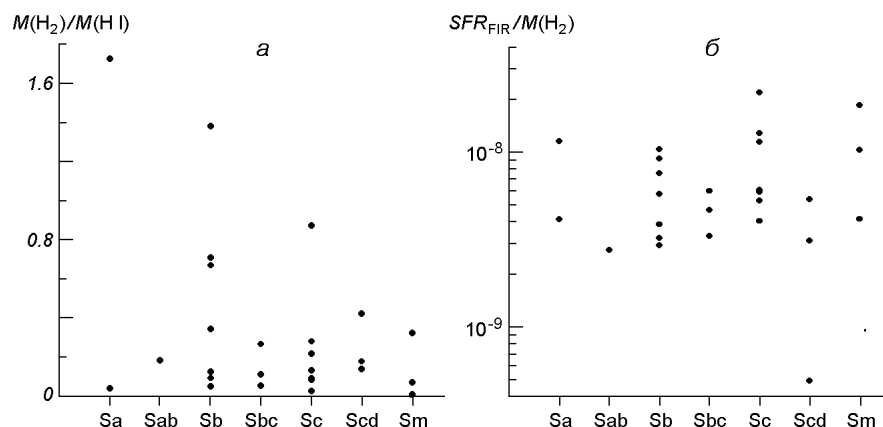


Рис. 2. Отношения: *a* — масс молекулярного и атомарного водорода ($M(\text{H}_2)/M(\text{H I})$), *б* — скорости текущего звездообразования к массе молекулярного водорода ($SFR_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2)$, год^{-1}) для галактик разных морфологических типов

циента, связывающего массу молекулярного водорода $M(\text{H}_2)$ и светимость в линии CO.

Аналогичный результат (отсутствие тесной корреляционной связи) был получен для зависимости $L_{\text{FIR}} - M(\text{H I})$ для галактик Маркаряна [2] и зависимости $L_{\text{FIR}} - M(\text{H I} + \text{H}_2)$ для выборки близких спиральных галактик [28].

Значения отношения $M(\text{H}_2)/M(\text{H I})$ (рис. 2, *a*, табл. 4) в KIG-галактиках существенно ниже значений, приведенных в работе [37] для галактик соответствующих морфологических типов. Выявить тенденцию изменения этого отношения как функцию морфологического типа галактик (аналогичную полученной в работе [37]) для нашей выборки не представляется возможным в силу малой статистики. Отметим также, что медианы значений массы нейтрального водорода $M(\text{H I})$ в подвыборках галактик разных морфологических типов нашей выборки ниже аналогичных значений выборки галактик из Uppsala General Catalog (UGC) [26]. Медианы значений $M(\text{H I})$ для KIG-галактик разного морфологического типа лучше согласуются со значениями $M(\text{H I})$, полученными для галактик соответствующих морфологических типов Местного Сверхскопления [26]. Такие различия для разных выборок могут быть связаны как с эффектами, выявленными в работе [34] (систематическое различие размеров и светимости изолированных и неизолированных галактик), так и с селекцией по потоку в дальнем ИК-диапазоне.

Значения отношений $SFR_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2)$ для морфологических типов спиральных KIG-галактик показаны на рис. 2, *б*. Часто это отношение принимается как показатель эффективности звездообразования. Для нашей выборки $SFR_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2)$ слабо зависит от морфологического типа, что согласуется с результатами работ [11, 28], полученными для спиральных галактик. Однако статистика мала и не позволяет сделать более определенные выводы.

Чтобы увеличить выборку, для 135 спиральных KIG-галактик мы аппроксимировали массу $M(\text{H}_2)$ по известным значениям $M(\text{H I})$ и средним отношениям $M(\text{H}_2)/M(\text{H I})$ в зависимости от морфологического типа галактики, приведенным в работе [37]. Однако отметим, что отношения

Таблица 5. Эффективность звездообразования KIG галактик

Морфологический тип	$M(\text{H I})$,	SFE_{cal} ,	SFE_{obs} ,
	$10^9 M_{\odot}$ (медиана)	$10^{-10}/\text{год}$ (медиана)	$10^{-10}/\text{год}$ (медиана)
E	Среднее 2.13 (2)	—	4.7 (1)
S	4.6 (124)	2.1 (124)	5.5 (24)
S _E	4.7 (23)	2.2 (23)	3.4 (3)
S _M	6.4 (51)	1.4 (51)	5.8 (11)
S _L	3.5 (50)	2.3 (50)	4.9 (10)
SB	4.3 (50)	—	3.7 (17)
SB _E	3.2 (9)	—	4.3 (6)
SB _M	8.5 (20)	—	5.4 (6)
SB _L	3.2 (21)	—	2.4 (5)
SAB	3.5 (31)	—	3.3 (7)
Irr	1.7 (19)	—	5.2 (3)

$M(\text{H}_2)/M(\text{H I})$ из работы [37] существенно выше, чем полученные нами для выборки 60 KIG-галактик с измеренными массами молекулярного водорода $M(\text{H}_2)$. В табл. 5 приведены медианы эффективности текущего звездообразования, определенной для полной массы газа $SFE = SFR_{\text{FIR}}/1.3(M(\text{H I}) + M(\text{H}_2))$ как с точными значениями массы молекулярного водорода $M(\text{H}_2)$ (SFE_{obs}), так и $M(\text{H}_2)$, вычисленными с учетом зависимости из работы [37] (SFE_{cal}).

Как следует из табл. 5, медианы значений эффективностей звездообразования SFE_{cal} в ранних (S_E) и поздних (S_L) спиральных галактиках не различаются. Аналогичный результат получен в работе [1]: среднее значение и дисперсия $\lg(L_{\text{FIR}}/(M(\text{H I}) + M(\text{H}_2)))$ для ранних (S0/Sa,Sb) и поздних (Sc—Irr) типов составляет соответственно 0.08 ± 0.42 и 0.03 ± 0.25 . Такое поведение SFE_{cal} не соответствует ожидаемому: поскольку при переходе от Sa к Sc отношение $M(\text{H}_2)/M(\text{H I})$ согласно [37] уменьшается, а отношение $SFR_{\text{FIR}}/M(\text{H}_2)$ согласно [11] в среднем остается постоянным, следует ожидать более высокую эффективность звездообразования в галактиках ранних типов по сравнению с поздними. Статистическое равенство значений SFE для галактик ранних и поздних типов, как отмечено в [1], создает проблему объяснения более высокого содержания газа в последних. Одним из возможных объяснений более высокого содержания газа в поздних спиральных галактиках может быть их меньший возраст по сравнению с ранними спиралями.

Из табл. 5 также видно, что для спиральных галактик медианы значений эффективности звездообразования SFE_{obs} выше, чем SFE_{cal} , что является следствием различий отношения $M(\text{H}_2)/M(\text{H I})$ для KIG-галактик и выборки из [37].

Для 99 изолированных галактик, надежно измеренных в фотометрических полосах $\lambda\lambda = 12, 25, 60$ и 100 мкм, построена диаграмма цвета $\lg(F_{12}/F_{25}) - \lg(F_{60}/F_{100})$ (далее $[i]/[j]$, где i, j — монохроматические потоки излучения в соответствующих полосах IRAS) (рис. 3, а).

На диаграмме также приведена кривая для феноменологической модели Хелюу [16], в рамках которой излучение галактик в дальнем ИК-диапазоне может быть представлено двумя компонентами: относительно «холодным», связанным с нагреванием пыли межзвездным полем излучения, создаваемым основным звездным населением, и «теплым», которое формируется в областях звездообразования и определяется его параметрами. Доля этих компонентов в общем излучении в дальнем ИК-диапазоне различается для

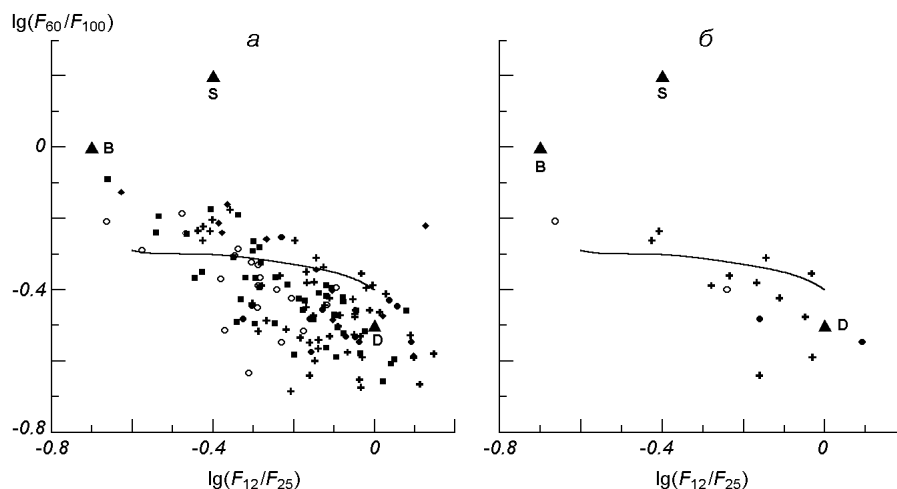


Рис. 3. Диаграмма цвета изолированных галактик: ромбики — эллиптические галактики (E), крестики — спиральные галактики (S), кружки и точки — спиральные галактики с баром (SB) и промежуточный тип (SAB) соответственно, темные треугольники — модельные расчеты [27] для дисков спиральных галактик (D), галактик со вспышкой звездообразования (B), галактик Сейферта (S); квадратики — галактики из скопления в Virgo. Непрерывная линия разделяет галактики с преобладанием в общем ИК-излучении «теплого» (выше) и «холодного» (ниже) компонента (см. текст); *a* — все данные, *б* — та же диаграмма, на которой оставлены только данные для KIG-галактик с известными значениями потоков на 1.4 ГГц

разных галактик. Непрерывная линия разделяет галактики с превалированием в общем ИК-излучении относительно «теплого» компонента (выше кривой) и относительно «холодного» компонента (ниже кривой). Положение кривой зависит от принятых в модели предположений, в частности свойств пыли и ее распределения по размерам [16]. На рис. 3, *a* темными треугольниками также приведены данные расчета моделей [27] для галактик Сейферта с активными ядрами (S), галактик со вспышками звездообразования (B), и дисков спиральных галактик (D). Как следует из рис. 3, *a*, изолированные галактики расположены вдоль прямой, соединяющей галактики со вспышками звездообразования и диски спиральных галактик, и ни одна не попадает в область галактик с активными ядрами. При этом значительное их число находится в области с доминирующим излучением «холодного» компонента. Диапазон изменения цвета [12]/[25] в эллиптических и спиральных галактиках практически одинаков, а их средние значения статистически не различаются согласно *t*-тесту Стьюдента ($\alpha = 0.05$). Для E- и S-галактик различаются средние значения цвета [60]/[100]: -0.319 ($\sigma = 0.149$) и -0.455 ($\sigma = 0.128$), указывая на более высокую температуру пыли в E-галактиках. Такое различие, вероятно, может быть объяснено более концентрированным к центру E-галактики пространственным распределением пыли и/или недавней вспышкой звездообразования, приводящими к нагреву пыли (см. положение ряда эллиптических галактик на рис. 3, *a* выше непрерывной кривой).

Статистически достоверным является различие цвета [12]/[25]: -0.135 ($\sigma = 0.141$) и -0.323 ($\sigma = 0.142$); а также [60]/[100]: -0.455 ($\sigma = 0.128$) и -0.381 ($\sigma = 0.116$) для S и SB галактик соответственно. Такое различие, вероятно, также может быть следствием различного пространственного распределения пыли по отношению к источникам ее нагрева (области звездообразования, межзвездного поля излучения) в галактиках разных морфологических типов.

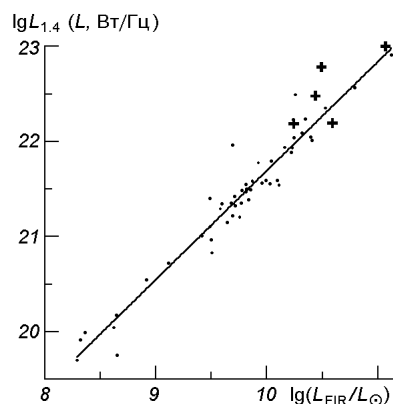


Рис. 4. Корреляционная связь между монохроматической светимостью $L_{1.4}$ в радиоконтинууме и светимостью L_{FIR} в дальнем ИК-диапазоне изолированных галактик (использованы данные IRAS хорошего и удовлетворительного качества). Точки — данные для выборки KIG-галактик, крестики — для выборки CVIG

Не выявлено различия цвета $[12]/[25]$ и $[60]/[100]$ для галактик из выборок KIG и скопления в Virgo. Поскольку характеристики цвета в дальнем ИК-диапазоне удовлетворительно объясняются в рамках трехкомпонентной модели пыли (ПАН-молекулы, графито-силикатная смесь пылинок промежуточных и больших размеров с определенным законом распределения частиц по размерам) в комбинации с подходящим спектральным распределением энергии источника, нагревающего пыль [18, 30], статистически равные показатели цвета $[12]/[25]$ и $[60]/[100]$ у галактик из выборок KIG и скопления в Virgo свидетельствуют в пользу близких комбинаций «пыль-источник энергии ее нагрева» сравниваемых выборок.

С другой стороны, для изолированных галактик получена тесная корреляция ($r = 0.96$) между светимостями L_{FIR} и $L_{1.4}$ (рис. 4). Такая тесная корреляция позволяет в случае необходимости (для статистических исследований) расширять количество данных излучения галактик в дальнем ИК-диапазоне или радиоконтинууме на 1.4 ГГц по известному параметру. На рис. 4 данные для выборки KIG показаны точками, для выборки CVIG — крестами (использованы данные IRAS хорошего и удовлетворительного качества). Видно, что CVIG-галактики удовлетворительно укладываются на зависимость, построенную для KIG-галактик.

Такая же тесная корреляционная связь ранее была установлена для галактик с разным уровнем активности звездообразования [3, 9, 19]. Физические предпосылки такой тесной связи детально обсуждаются в работе [9] и заключаются в следующем. Излучение нормальных галактик в радиоконтинууме состоит из двух компонентов: свободно-свободного (теплого) излучения в областях H II и нетеплого излучения (большая часть), создаваемого релятивистскими электронами из остатков сверхновых типа SN II и SN Ib, которые, в свою очередь, являются результатом эволюции массивных звезд с $M \geq 8M_{\odot}$ со временем жизни менее $3 \cdot 10^7$ лет. Таким образом, излучение нормальных галактик в радиоконтинууме является индикатором текущего звездообразования. Тесная корреляционная связь светимостей L_{FIR} и $L_{1.4}$, установленная для KIG-галактик, свидетельствует о том, что в нормальных галактиках пыль нагревается не столько межзвездным полем излучения, создаваемым основным звездным населением галактик, сколько в областях звездообразования. Однако на диаграмме цвета некоторые галактики, для которых установлена тесная корреляционная связь $L_{\text{FIR}} - L_{1.4}$, попадают в область, в которой, согласно модели [16], пыль нагревается преимущественно межзвездным полем излучения, а не в областях звездообразования, ответственных за свободно-свободное излучение в радиоконтинууме (рис. 3, б). Вероятная причина противоречия

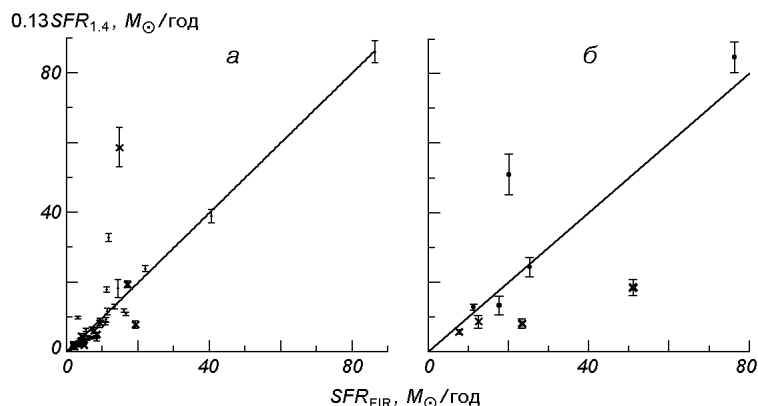


Рис. 5. Корреляционная связь скоростей текущего звездообразования, определенных по излучению в дальнем ИК-диапазоне (SFR_{FIR}) и радиоконтинууме ($SFR_{1.4}$) для выборок галактик KIG (а) и CVIG (б). Крестики — объекты, имеющие данные IRAS низкого качества

связана с неопределенностью исходных параметров, положенных в основу модели [16].

Выражение (2) для $SFR_{1.4}$ при $A = 1$ соответствует случаю, когда монохроматическое излучение в радиоконтинууме на данной частоте является полностью тепловым (свободно-свободным) излучением ионизованного газа. Это выражение было получено из соотношения между тепловым оптическим и радиоизлучением ионизованного газа. Если дополнительно есть нетепловое радиоизлучение, то $A < 1$. Приравнявая $SFR_{1.4}$ к SFR_{FIR} как к нижнему пределу скорости текущего звездообразования в галактике [3], можно определить значение A , т. е. нижний предел доли теплового (свободно-свободного) излучения в радиоконтинууме.

Для нормальных KIG-галактик удовлетворительное согласие скоростей звездообразования, определенных по светимости в дальнем ИК-диапазоне SFR_{FIR} (1) и излучению в радиоконтинууме $SFR_{1.4}$ (2), получено при значении нижнего предела доли теплового (свободно-свободного) излучения в общем излучении в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц, равном 0.13 (рис. 5, а).

Близкие значения доли теплового (свободно-свободного) излучения в общем излучении в радиоконтинууме на этой частоте, полученные для нормальных дисковых галактик (из среднего отношения $\langle S_{1.4}/F(H_\alpha) \rangle$) и галактики M82, отмечены в работе [9].

Связь скоростей звездообразования SFR_{FIR} и $SFR_{1.4}$, определенных по светимости в дальнем ИК-диапазоне и монохроматической светимости в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц для изолированных галактик выборки CVIG, приведена на рис. 5, б.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено исследование излучения в дальнем ИК-диапазоне изолированных галактик из каталога В. Е. Караченцевой [4]. Проведено отождествление изолированных галактик из каталогов [4, 7] с базой данных наблюдений спутника IRAS и объектами каталога NVSS. Показано, что скорость текущего звездообразования SFR изолированных галактик [4] как для всей выборки, так и для отдельных морфологических типов выше аналогичных значений SFR для галактик в скоплении в Virgo.

Для изолированных галактик из каталогов [4, 7] установлена тесная корреляционная связь светимости в дальнем ИК-диапазоне и монохроматической светимости в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц, выявленная ранее для галактик с активным звездообразованием. Показано, что скорости текущего звездообразования, полученные по светимости в дальнем ИК-диапазоне и излучению в радиоконтинууме на частоте 1.4 ГГц, удовлетворительно согласуются, если принять, что нижний предел доли теплового (свободно-свободного) излучения по отношению к общему излучению в радиоконтинууме на этой частоте составляет 13 %.

Исследование вариаций характеристик излучения в ИК-диапазоне вдоль последовательности Хаббла показывает, что морфологический тип галактики является важным, но не определяющим параметром, поскольку наблюдаются большие дисперсии свойств внутри каждого типа. Причинами такого разброса величин могут быть как неопределенности (ошибки) в классификации и дискретизация по типам непрерывной последовательности, так и собственно различие физических свойств галактик разных типов. При подобном исследовании в дальнейшем, очевидно, полезным будет отдельное рассмотрение активности звездообразования в диске и ядерной области галактики [20].

Авторы благодарят рецензента за полезные критические замечания. Отмечают участие Е. А. Мышко в отождествлении галактик.

При проведении исследования были использованы базы данных внегалактических источников NED (NASA/IPAC Extragalactic Database) и HyperLEDA (Lyon-Meudon Extragalactic Database).

1. Засов В. А. Эффективность звездообразования в спиральных галактиках // Письма в Астрон. журн.—1995.—21, № 10.—С. 730—742.
2. Изотов Ю. И., Изотова И. Ю. Исследование дальнего инфракрасного излучения галактик Маркаряна. 1. Сравнение характеристик галактик в оптическом, и ИК-диапазонах // Астрофизика.—1989.—30, вып. 1.—С. 34—47.
3. Изотова И. Ю., Изотов Ю. И. Темп звездообразования в голубых компактных галактиках из Второго Бюраканского обзора // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 3.—С. 195—205.
4. Караченцева В. Е. Каталог изолированных галактик // Сообщ. Спец. астрофиз. обсерватории АН СССР.—1973.—Вып. 8.—С. 3—72.
5. Abazajian K., Adelman-McCarny J. K., Agueros M. A., et al. The First Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // Astron. J.—2003.—126, N 4.—P. 2081—2086.
6. Adams M., Jensen E., Stocke J. A continuum radio survey of isolated galaxies // Astron. J.—1980.—85, N 8.—P. 1010—1026.
7. Allam S. S., Tucker D. L., Lee B. C. J., Smith A. A Catalog of Very Isolated Galaxies from the SDSS Data Release 1 // preprint: astro-ph /0410172.—1.—6.10.2004.
8. Bicaş M. D., Giovanelli R. Far-infrared properties of cluster galaxies // Astrophys. J.—1987.—321, N 2.—P. 645—657.
9. Condon J. J. Radio emission from normal galaxies // Annu. Rev. Astron. and Astrophys.—1992.—30.—P. 575—611.
10. Condon J. J., Cotton W. D., Greisen E. W., et al. The NRAO VLA sky survey // Astron. J.—1998.—115, N 5.—P. 1693—1716.
11. Devereux N. A., Young J. S. The rate and efficiency of high-mass formation along the Hubble sequence // Astrophys. J.—1991.—371, N 2.—P. 515—524.
12. Hashimoto Y., Oemler A., Lin H., Tucker D. L. The Influence of Environmental on the Star Formation Rates of Galaxies // Astrophys. J.—1998.—499, N 2.—P. 589—605.
13. Haynes M. P., Giovanelli R. Neutral hydrogen in isolated galaxies: first results for five early-type systems // Astrophys. J.—1980.—240, N 2.—P. L87—L91.
14. Haynes M. P., Giovanelli R. Neutral hydrogen in isolated galaxies. IV. Results for the Aresibo sample // Astron. J.—1984.—89, N 6.—P. 758—799.
15. Haynes M. P., Herter T. Far-infrared emission in single and binary galaxies // Astron. J.—1988.—96, N 2.—P. 504—513.
16. Helou G. The IRAS colors of normal galaxies // Astrophys. J.—1986.—311, N 2.—P. L33—L36.

17. *IRAS* catalog and Atlases: Explanatory supplement / Eds C. A. Beichman, G. Neugebauer, H. J. Habing, et al. — Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1988.—80 p.
18. *Izotova I. Yu., Izotov Yu. I.* Simulation of the far infrared emission of blue compact dwarf galaxies // *Astron. and Astrophys. Transactions.*—1992.—3.—P. 101—130.
19. *Izotova I., Parnovsky S.* Star formation rate in Markarian galaxies // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl.*—2000.—N 3.—P. 99—101.
20. *Kennicutt R. C.* Star formation in galaxies along the Hubble sequence // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1998.—36.—P. 189—232.
21. *Koopman R. A., Kenney J. D. P.* Massive Star Formation Rates and Radial Distribution from H α Imaging of 84 Virgo Cluster and Isolated Spiral Galaxies // *Astrophys. J.*—2004.—613, N 2.—P. 851—865.
22. *Lisenfeld U., Verdes-Montenegro L., Espada D., et al.* Study of Interstellar medium and Star Formation of a complete sample of 760 isolated galaxies // «Star Formation through Time», ASP Conference Ser., 2003 // preprint: astro-ph/0210164.—v.1.-7.10.2002.
23. *Lisenfeld U., Verdes-Montenegro L., Espada D., et al.* The role of environment in triggering starburst galaxies. A sample of isolated galaxies // preprint: astro-ph/0411443.—v.1.-16.11.2004.
24. *Lisenfeld U., Verdes-Montenegro L., Espada D., et al.* The AMIGA project. I. Optical characterization of the CIG catalog // *Astron. and Astrophys.*—2005.—436, N 2.—P. 443—455.
25. *Pisano D., Wilcots E. M., Liu C. T.* An H I/Optical Atlas of Isolated Galaxies // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2002.—142, N 2.—P. 161—222.
26. *Roberts M. S., Haynes M. P.* Physical parameters along the Hubble sequence // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1994.—32.—P. 115—152.
27. *Rowan-Robinson M., Efstathiou A.* Multigrain dust cloud models of starburst and Seyfert galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1993.—263, N 3.—P. 675—680.
28. *Sage L. J.* Molecular gas in nearby galaxies. I. CO observations of distance-limited sample // *Astron. and Astrophys.*—1993.—272, N 1.—P. 123—136.
29. *Sauty S., Casoli F., Boselli A., et al.* ¹²CO(1-0) observation of isolated late-type galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2003.—411, N 3.—P. 381—390.
30. *Sauvage M., Thuan X. T.* The far infrared properties of the CfA galaxy sample. II. Gas, Dust, and star formation along the Hubble sequence // *Astrophys. J.*—1994.—429, N 1.—P. 153—171.
31. *Solomon P. M., Sage L. J.* Star-formation rates, molecular clouds, and the origin of far-infrared luminosity of isolated and interacting galaxies // *Astrophys. J.*—1988.—334, N 2.—P. 613—625.
32. *Stocke J. T., Keeney B. A., Lewis A. D., et al.* Very Isolated Early-Type Galaxies // *Astron. J.*—2004.—127, N 3.—P. 1336—1343.
33. *Thronson H. A., Telesco C. M.* Star Formation in Active Dwarf Galaxies // *Astrophys. J.*—1986.—311, N 1.—P. 98—112.
34. *Varela J., Moles M., Marquez I., et al.* Properties of isolated disk galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2004.—420, N 3.—P. 873—879.
35. *Verdes-Montenegro L., Sempere M. J., Sulentic J., Cernicharo J.* Properties of a sample of the most isolated galaxies // *Proc. Symp. «The Promise of the Herschel Space Observatory», 12—15 Dec 2000, Spain / Eds G. L. Pilbratt, J. Cernicharo, A. M. Heras, et al. — Spain; ESA, 2001.—SP-460.*
36. *Wu H., Zou Z. L., Xia X. Y., Deng Z. G.* A statistical study of the spectra of very luminous IRAS galaxies. II. Spectral and environmental analysis // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1998.—132, N 2.—P. 181—193.
37. *Young J. S., Knezek P. M.* The ratio of molecular to atomic gas in spiral galaxies as a function of morphological type // *Astrophys. J.*—1989.—347, N 2.—P. L55—L58.

Поступила в редакцию 10.01.06