

УДК: 524.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАЛЬНОГО ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ГАЛАКТИК МАРКАРЯНА. I. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ГАЛАКТИК В ОПТИЧЕСКОМ И ИК-ДИАПАЗОНАХ

Ю. И. ИЗOTOV, И. Ю. ИЗOTOVA

Поступила 16 марта 1988

Принята к печати 1 мая 1988

Проведено статистическое исследование галактик Маркаряна в оптическом и дальнем инфракрасном диапазонах. Результаты исследования сравниваются с данными, полученными для галактик из скопления Девы. Построены функции ИК-светимости галактик Маркаряна, учитывающие верхние границы измеренных потоков. Показано, что зарегистрированные и не зарегистрированные спутником IRAS сейфертовские галактики по своим светимостям в оптическом и дальнем ИК-диапазонах не различаются, тогда как H II-галактики, не зарегистрированные на IRAS, имеют в среднем меньшие светимости как в оптическом, так и в дальнем ИК-диапазонах. Галактики Маркаряна имеют большие температуры пыли, чем галактики в Деве. Скорость звездообразования в галактиках Маркаряна в несколько раз выше, чем в нормальных спиральных галактиках.

1. Введение. Галактики Маркаряна, характеризующиеся избытками излучения в ультрафиолетовом диапазоне, привлекают в последние годы внимание как объекты, в которых происходят процессы активного звездообразования. Некоторые из них содержат активные ядра и относятся к сейфертовским галактикам, однако большинство галактик имеют спектры с узкими эмиссионными линиями, характерными для зон ионизованного водорода. С появлением наблюдений, проведенных на инфракрасном спутнике IRAS, представилась возможность детального исследования галактик Маркаряна в дальнем ИК-диапазоне, наиболее удобном для изучения областей звездообразования.

Такие исследования свойств галактик Маркаряна в дальнем ИК-диапазоне проводились в ряде работ. В [1] показано, что светимость галактик Маркаряна со вспышками звездообразования в дальнем ИК-диапазоне L_{FIR} в ~ 5 раз больше светимости спиральных галактик из скопления Девы. Отношение светимости L_{FIR} к светимости в оптическом диапазоне L_V в сейфертовских галактиках в несколько раз больше, чем у нормальных

галактик из мини-обзора по каталогу Shapley-Ames [2, 3]. В [4] показано, что излучение сейфертовских галактик в дальнем ИК-диапазоне не связано с активным ядром, а обусловлено переработкой пылью излучения молодых массивных звезд в областях звездообразования. Галактики с активным звездообразованием (Н II-галактики) по своим свойствам в дальнем ИК-диапазоне не отличаются от сейфертовских галактик [2]. Однако в [5] показано, что галактики Sy 2 имеют большие, чем галактики типа Sy 1 и Н II, избытки инфракрасного излучения L_{FIR}/L_B , что, по-видимому, связано с экранированием активного ядра пылевым слоем. В [6] установлено, что излучение голубых компактных галактик в дальнем ИК-диапазоне, часть из которых входит в список Маркаряна, обусловлено излучением пыли в областях ионизованного водорода, а не в гигантских молекулярных облаках.

В работе [7] исследуются процессы формирования звезд в активных карликовых галактиках. Установлена тесная корреляционная связь $L_{FIR}-L_B$; сравниваются коротко- и долгопериодичная скорости звездообразования; показано, что эффективность звездообразования у активных карликовых галактик и Галактики сравнима.

В перечисленных работах исследования проводились для отдельных выборок из списка Маркаряна. В данной работе делается сравнительный анализ физических характеристик галактик из всего списка Маркаряна в оптическом и дальнем инфракрасном диапазонах, получены функции светимости в ИК-диапазоне. Более половины галактик Маркаряна не были зарегистрированы при наблюдениях на IRAS. Одной из задач данной работы является выяснение причины их ненаблюдаемости.

2. *Данные каталога точечных источников IRAS.* В каталоге точечных источников IRAS содержатся данные о потоках излучения для 622 галактик Маркаряна, зарегистрированных, по крайней мере, в одной из четырех полос на длинах волн 12, 25, 60 и 100 мкм. Информация об ИК-излучении галактик была предоставлена Центром астрономических данных Астрономического совета АН СССР. Результаты наблюдений в оптическом диапазоне содержатся в работах [8—23]. Формулы расчета абсолютных характеристик излучения галактик в оптическом и инфракрасном диапазонах приведены в приложении.

Для анализа характеристик галактик Маркаряна в настоящей работе отобраны объекты с уверенно измеренными потоками излучения на длинах волн 60 и 100 мкм. Все галактики в соответствии с [12] были разделены на две группы. К первой группе отнесены галактики Сейферта, условно обозначим их IRS (78 объектов), ко второй — IRE-галактики с узкими эмиссионными линиями в спектре, представляющие, в основном, Н II-галактики (271 объект).

Аналогично, незарегистрированные в дальнем ИК-диапазоне галактики Маркаряна также разделены на 2 группы: галактики Сейферта ndS (78 объектов) и Н II-галактики ndE (381).

Для расчета верхних пределов светимостей L_{FIR} галактик, не зарегистрированных в дальнем ИК-диапазоне, были приняты, согласно [3], пороговые значения плотностей потоков на 60 и 100 мкм, равные соответственно 1 и 2 Ян.

3. *Функции светимости галактик Маркаряна в оптическом диапазоне.* Данные о звездных величинах галактик Маркаряна неоднородны и включают фотозлектрические, фотографические значения, а также грубые оценки для слабых объектов. Поэтому для выяснения причины ненаблюдаемости ndS и ndE-галактик аппаратурой IRAS были исследованы только галактики с фотозлектрическими звездными величинами.

Таблица 1

СРЕДНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛАКТИК МАРКАРЯНА С ИЗВЕСТНЫМИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЗВЕЗДНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ

Тип	T_d K	B-V	U-B	$\lg L_B$ врг с ⁻¹	$\lg L_{FIR}$ врг с ⁻¹	$\lg \frac{L_{FIR}}{L_B}$	m_B
IRS	39.9(64)	0.75(63)	-0.07(63)	44.9(58) 44.4(80)*	44.2(58)	-0.7(58) - .2*	13.9
IRE	37.0(70)	0.60(70)	-0.13(70)	44.2(70) 43.3(97)	43.8(70)	-0.5(70) + .5	13.9
ndS		0.74(53)	-0.23(53)	44.7(53) 44.0(55)	44.0(53)	-0.7(55) 0	14.9
ndE		0.56(55)	-0.14(55)	43.3(55) 41.9(55)	42.9(55)	-0.5(55) +1.0	15.1

*Среднее значение с учетом селекции наблюдений.

Средние характеристики галактик с известными фотозлектрическими звездными величинами m_B приведены в табл. 1. В среднем незарегистрированные галактики Маркаряна на одну звездную величину слабее, что может быть вызвано двумя причинами: либо большей удаленностью, либо меньшей светимостью. Средние величины, приведенные в табл. 1, из-за эффектов селекции, обусловленных ограниченной чувствительностью наблюдений, не совсем отражают истинную картину. Необходимо получить функцию светимости (ФС), учитывающую эффекты селекции наблюдений. Детальное исследование функции светимости сейфертовских галактик проведено в работах [24—26]. Для определения функции светимости в настоящей работе использован метод Неймана и Скотт [27], усовершенствованный и подробно описанный Терезижем [24].

В данной работе по методу, использованному в [24], исследована полнота выборки галактик Маркаряна. Получено, что выборки для IRS и IRE-галактик полные до $m \leq 13.5$, для ndS и ndE-галактик — до $m \leq 14.5$.

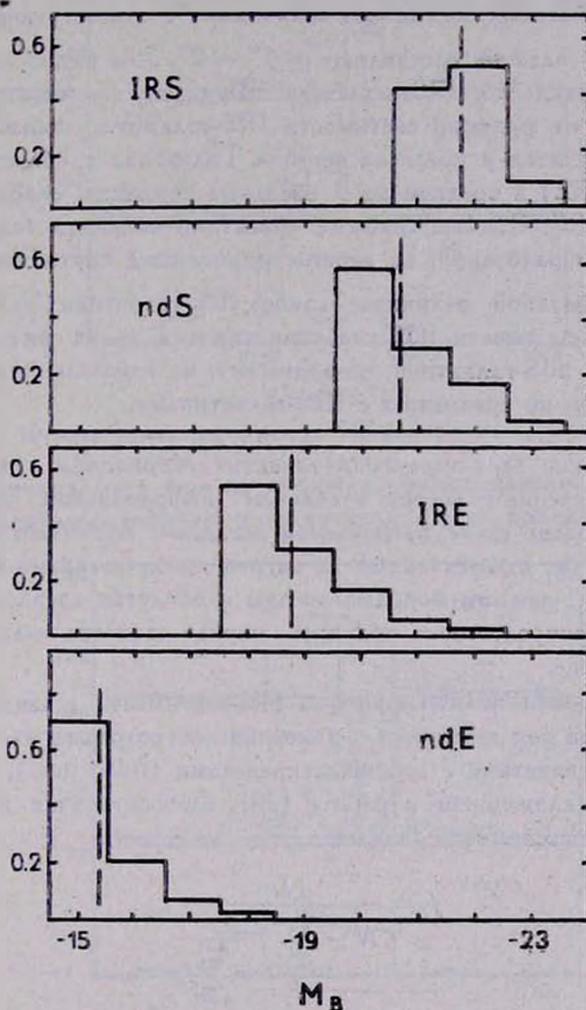


Рис. 1. Дифференциальные функции оптической светимости галактик Маркаряна.

На рис. 1 приведены дифференциальные функции светимости в интервале $-15.5 \geq M_B \geq -24.5$ и средние значения M_B для всех типов галактик. Вид функции светимости существенно зависит от распределения галактик низкой светимости и может быть подвержен случайным ошибкам. Поэтому при расчете функции светимости не учитывались те интервалы с галактиками низкой светимости, в которых

число галактик меньше 5. Сравнение результатов с учетом и без учета наблюдательной селекции показывает, что среднее значение M_V для всех IRE-галактик, входящих в каталог Маркаряна, без учета селекции занижено на 2—3^m, для IRS-галактик — на ~ 1^m. Для галактик с известными фотоэлектрическими звездными величинами соответствующие значения для IRE и IRS-галактик составляют ~ 1^m — 2^m. Как видно из рис. 1, самыми яркими являются IRS-галактики. Функция светимости pdS -галактик отличается от функции светимости IRS-галактик, однако различия невелики и находятся в пределах ошибок. Галактики с областями звездообразования (IRE) в среднем на 3 звездные величины слабее сейфертовских галактик IRS. Самыми слабыми объектами являются галактики с областями звездообразования, не зарегистрированные спутником IRAS, которые на 3^m5 звездной величины слабее IRE-галактик. Таким образом, причина ненаблюдаемости pdE -галактик связана с их низкой светимостью, тогда как pdS -галактики, по-видимому, не наблюдаются из-за большей удаленности, по сравнению с IRS-галактиками.

4. *Физические характеристики галактик Маркаряна в инфракрасном диапазоне.* Излучение галактик в дальнем инфракрасном диапазоне обусловлено свечением пыли, нагреваемой звездами. Возникает вопрос — являются ли звезды, ответственные за нагрев пыли, звездами старого населения галактики, или это молодые звезды в областях звездообразования? Ответ на этот вопрос можно получить, изучая свойства галактик в дальнем ИК-диапазоне.

Для построения полной функции ИК-светимости галактик Маркаряна, учитывающей как галактики с измеренными потоками излучения (IRS и IRE), так и галактики с верхними пределами (pdS , pdE), воспользуемся методом, предложенным в работе [28]. Относительная доля галактик в i -ом интервале светимости равна

$$f_i = \frac{I_i}{N - \sum_{j=1}^i \frac{U_j}{1 - \sum_{k=0}^j f_k}}, \quad (1)$$

где $f_0 = 0$, I_i — количество галактик в i -ом интервале ИК-светимости, U_j — количество галактик, у которых верхние пределы светимостей попадают в j -й интервал, N — полное количество галактик. Полные функции светимостей L_{FIR} сейфертовских IRS + pdS и галактик с областями звездообразования IRE + pdE приведены на рис. 2. Здесь же дана функция светимости галактик из скопления Девы с измеренными потоками излучения в дальнем ИК-диапазоне. Как следует из рис. 2, светимость галак-

тик Сейферта в ИК-диапазоне заключена в более узком интервале и в ~ 5 раз выше, чем у галактик с областями звездообразования, которые, в свою очередь, в среднем в ~ 3 раза ярче галактик из скопления Девы.

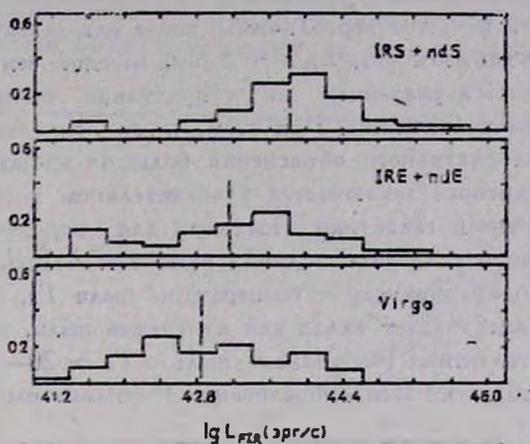


Рис. 2. Дифференциальные функции ИК-светимости галактик Маркаряна.

Однако величина L_{FIR} еще не является исчерпывающей характеристикой скорости звездообразования в галактиках. Более показательным, как от-

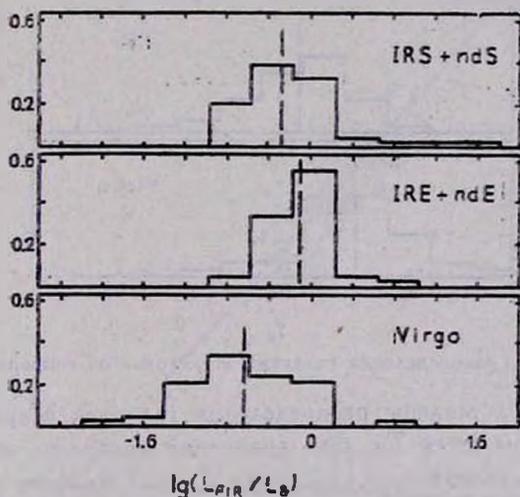


Рис. 3. Гистограммы распределения галактик Маркаряна по инфракрасным избыткам L_{FIR}/L_B .

мечается в ряде работ, является отношение инфракрасной светимости к оптической L_{FIR}/L_B . На рис. 3 приведены распределения галактик IRS + ndS и IRE + ndE по избыткам инфракрасного излучения L_{FIR}/L_B .

Здесь так же, как и в случае полных функций ИК-светимостей, учтены галактики с верхними пределами с использованием формулы (1). Несмотря на большие различия в функциях светимостей сейфертовских галактик и галактик с областями звездообразования, их распределения по L_{FIR}/L_B на уровне значимости $q = 0.01$ неразличимы, тогда как галактики из скопления Virgo имеют избытки L_{FIR}/L_B в ~ 3 раза меньше, чем IRE + pdE галактики, что является указанием на существенно более высокий темп звездообразования у последних. При этом, однако, не следует забывать о возможности альтернативного объяснения больших избытков инфракрасного излучения, которое заключается в значительном поглощении пылью оптического излучения галактики. Поэтому для определения скорости звездообразования в галактике одной величины L_{FIR}/L_B недостаточно. Необходим еще один параметр — температуры пыли T_d , поскольку в инфракрасную светимость дает вклад как излучение пыли, нагреваемой старым населением галактики («холодная» пыль с $T_d \sim 20-30$ K), так и излучение пыли в областях звездообразования («теплая» пыль с $T_d \sim 40$ K).

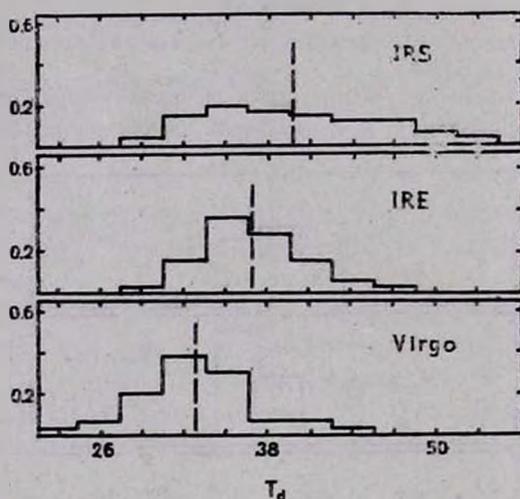


Рис. 4. Гистограммы распределения галактик Маркьярина по температурам пыли T_d .

На рис. 4 представлены распределения галактик Маркьярина по значениям температуры пыли T_d . Для сравнения приведено соответствующее распределение для галактик из скопления Девы. Обращает внимание большой диапазон изменения T_d для сейфертовских галактик, что, по-видимому, может объясняться значительным вкладом в инфракрасное излучение сейфертовских галактик «горячего» компонента пыли с $T_d \sim 10^2$ K в окрестной области, нагреваемой нетепловым излучением ядра [29]. Значения температуры пыли в IRE-галактиках заключены в более узком интервале, для которых среднее значение равно 36.7 K.

Спиральные галактики из скопления Девы имеют самые низкие значения температур (среднее значение ~ 32 К).

Распределения по T_d галактик скопления Девы и IRE-галактик на уровне значимости $q = 0.01$ статистически различаются, что в сочетании с малыми значениями L_{FIR}/L_B указывает на низкий уровень звездообразования у первых.

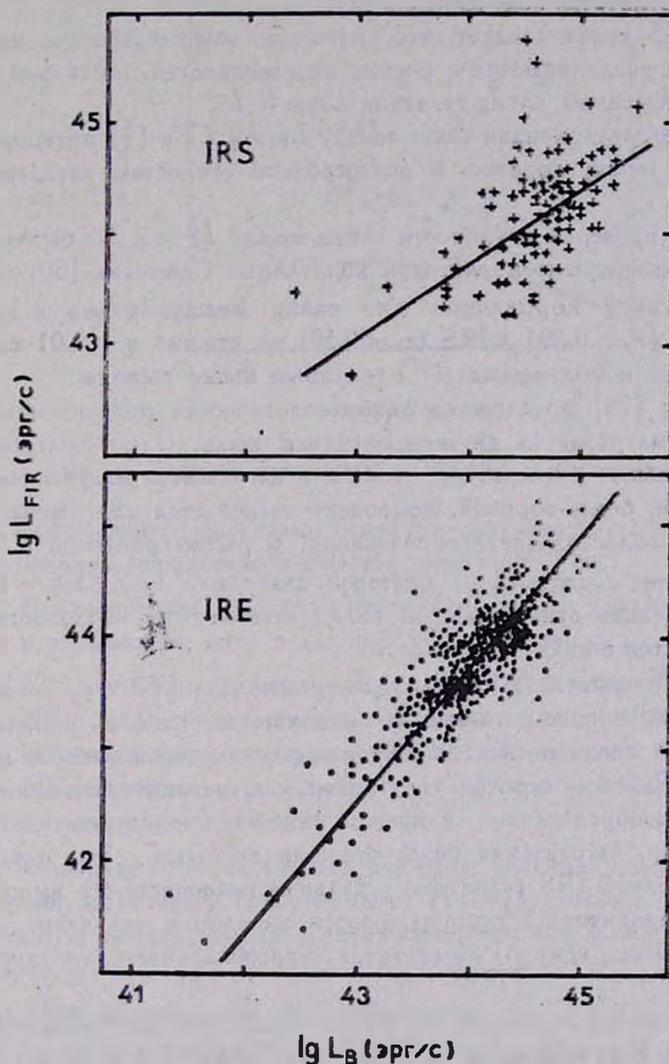


Рис. 5. Зависимость между инфракрасной L_{FIR} и оптической L_B светимостями для IRS и IRE-галактик.

Рассмотрим еще ряд отличий между галактиками Сейферта и II-галактиками в дальнем ИК-диапазоне. На рис. 5 представлены зависимо-

сти инфракрасной светимости от оптической светимости для обоих типов объектов. Для H II-галактик линейная корреляционная связь между L_{FIR} и L_B очень тесная (коэффициент линейной корреляции $r \approx 1$), тогда как для галактик Сейферта связь значительно слабее ($r = 0.59$). Это различие объясняется тем, что в сейфертовских галактиках оптическое излучение слабо связано с областями звездообразования. Такой вывод подтверждает результаты, полученные в [4].

Из рис. 5 также следует, что избытки инфракрасного излучения IRE-галактик увеличиваются с ростом их светимостей, поскольку $L_{FIR} \sim \sim L_B^{1.28}$, и для самых ярких галактик $L_{FIR} \approx L_B$.

Тесная корреляционная связь между L_{FIR} и L_B в [7] интерпретируется как связь между коротко- и долгосрочной скоростью звездообразования.

С целью проверки истинности связи между L_{FIR} и L_B был использован метод коэффициентов ранговой корреляции Спирмена [30]. Коэффициенты ранговой корреляции для связи между $\lg L_{FIR}$ и $\lg L_B$ для H II-галактик ($r_s = 0.79$) и IRS ($r_s = 0.50$) на уровне $q = 0.01$ статистически значимы и подтверждают сделанные выше выводы.

В работе [23] предложена феноменологическая модель галактики, в которой рассматривается двухкомпонентная пыль. Один пылевой компонент имеет низкую температуру ~ 30 К и нагревается излучением старых звезд. Второй, более горячий, компонент нагревается излучением массивных звезд в областях звездообразования. В рассматриваемой в [23] модели положение галактики на цветовой диаграмме $\lg S_{80}/S_{100} - \lg S_{12}/S_{25}$ позволяет оценить относительный вклад «теплого» и «холодного» пылевых компонентов в излучение галактик.

На рис. 6 приведена цветовая диаграмма для IRS и IRE-галактик с надежно измеренными потоками во всех четырех полосах. IRE-галактики располагаются вдоль последовательности нормальных галактик, приведенной в [23]. В левом верхнем углу диаграммы находятся галактики с активным звездообразованием, в правом нижнем — галактики, в которых излучает пыль, нагреваемая более старыми звездами. За исключением двух IRE и одной IRS галактики остальные располагаются выше кривой, отделяющей галактики с преобладающим вкладом в излучение «теплого» компонента (выше кривой) от галактик с преобладанием «холодного» компонента.

Сейфертовские галактики на рис. 6 находятся систематически выше H II-галактик и их излучение не может быть объяснено в рамках двухкомпонентной модели, поскольку эти галактики имеют менее крутые наклоны в спектрах и содержат «горячий» компонент пыли с $T_d \sim 10^2$ К, нагреваемый активным ядром [29].

Наконец, следуя работе [3], оценим скорость звездообразования в галактиках Маркаряна. В IRE-галактиках на образование O-звезд в среднем расходуется $3.3 M_{\odot}$ в год, в сейфертовских галактиках — $5.9 M_{\odot}$ в год. Для сравнения отметим, что в спиральных галактиках в среднем O-звезды преобразуется $1 M_{\odot}$ в год [3].

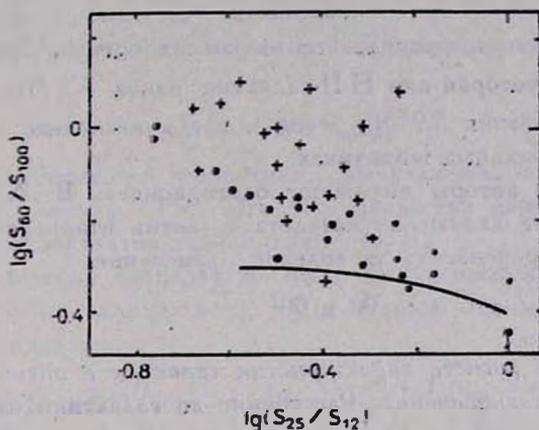


Рис. 6. Цветовая диаграмма для IRS (+) и IRE-галактик (•).

5. **Заключение.** Перечислим основные результаты исследования галактик Маркаряна, проведенного в настоящей работе:

1) Сейфертовские галактики относятся к числу ярчайших галактик не только в оптическом, но и в дальнем ИК-диапазонах.

2) Незарегистрированные аппаратурой IRAS сейфертовские галактики по своим оптическим характеристикам не отличаются от галактик Сейферта, наблюдавшихся спутником IRAS. Отсутствие зарегистрированного ИК-излучения у pdS-галактик объясняется их большей, чем IRS-галактики, удаленностью.

3) Обнаружено статистически значимое различие между зарегистрированными и незарегистрированными H II-галактиками. Последние имеют меньшую светимость как в оптическом, так и в дальнем инфракрасном диапазоне.

4) Инфракрасные избытки сейфертовских и H II-галактик слабо различаются между собой, что в сочетании с высокими значениями температуры пыли T_d в них свидетельствует о сравнимой активности звездообразования в обоих типах галактик.

5) Галактики Маркаряна имеют большие температуры пыли, чем галактики в скоплении Девы. Температура пыли в последних заключена в

узком интервале и ее нагрев производится не в областях звездообразования, а старым населением галактик.

6) Найдена тесная корреляционная связь между оптической и инфракрасной светимостью IRE-галактик. Инфракрасные избытки IRE-галактик увеличиваются с ростом светимости L_B и для самых ярких объектов $L_{FIR} \approx L_B$.

7) По мощности инфракрасного излучения оценена скорость образования O -звезд, которая для II-галактик равна $3.3 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, а для сейфертовских галактик $5.9 M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, что в несколько раз выше, чем в нормальных спиральных галактиках.

В заключение авторы выражают благодарность В. А. Липовецкому за предоставленные данные из каталога галактик Маркаряна [12] до их опубликования и рецензенту за полезные замечания.

Приложение

Формулы для расчета характеристик галактик в оптическом и дальнем инфракрасном диапазонах. Расстояние до галактики определяется по формуле

$$d = v/H_0, \quad (\text{П1})$$

где d — выражено в Мпк, v — лучевая скорость в км с^{-1} , H_0 — постоянная Хаббла, принятая равной $50 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Светимости в оптическом и дальнем инфракрасном диапазонах равны соответственно

$$\lg \frac{L_B}{L_{\odot}} = 0.4 (30.4 - m_B + 5 \lg d), \quad (\text{П2})$$

$$L_{FIR} = 4\pi d^2 \Delta\nu_{80} S_{80}, \quad (\text{П3})$$

где m_B — видимая звездная величина в полосе B ,

$$S_{80} = \frac{\nu_{60} S_{60} + \nu_{100} S_{100}}{2\nu_{80}} \quad (\text{П4})$$

— плотность потока на длине волны 80 мкм, ν_{60} , S_{60} , ν_{100} , S_{100} — соответственно частоты и плотности потоков излучения на длинах волн 60 и 100 мкм, ν_{80} — частота излучения с длиной волны 80 мкм.

Из (П4) находим

$$S_{80} = 0.4 (S_{100} + 1.67 S_{60}), \quad (\text{П5})$$

где S_{60} , S_{80} и S_{100} выражены в Янских. В формуле (П3) $\Delta\nu_{80}$ — полоса, в которой регистрировалось излучение, принята равной

$$\Delta \nu_{90} = \frac{c \Delta \lambda_{90}}{\lambda_{90}^2} = \frac{c (\lambda_{100} - \lambda_{60})}{\lambda_{90}^2} = 1.88 \cdot 10^{12} \text{ Гц.}$$

Тогда окончательно получим

$$\frac{L_{FIR}}{L_{\odot}} = 6 \cdot 10^5 d^2 S_{90}, \quad (\text{П6})$$

где d выражено в Мпк, S_{90} — в Янских.

В работе [3] светимость галактик в ИК-диапазоне вычислялась по формуле

$$L_{FIR} = 4\pi d^2 \nu_{90} S_{90}. \quad (\text{П7})$$

В среднем светимость галактики, вычисляемая по (П7), в 1.8 раза выше, чем по формуле (П3). Это обстоятельство необходимо учитывать при сравнении результатов данной работы с [3].

При определении температуры пыли использовалось отношение плотностей потоков на длинах волн 100 и 60 мкм, S_{100}/S_{60} в предположении чернотельного излучения:

$$\frac{S_{100}}{S_{60}} = \frac{\kappa_{100} B_{100}}{\kappa_{60} B_{60}} = \left(\frac{\nu_{100}}{\nu_{60}} \right)^4 \exp \left[\frac{h(\nu_{60} - \nu_{100})}{kT_d} \right], \quad (\text{П8})$$

где κ_{60} и κ_{100} — непрозрачности на пыли, которые для „загрязненных“ силикатов равны $\kappa_{\lambda} = 2.4 \cdot 10^4 \lambda^{-1}$ [6], где λ выражена в мкм, B_{60} и B_{100} — значения функции Планка на длинах волн 60 и 100 мкм. Подставляя численные значения, находим

$$T_d = \frac{41.7}{\lg \left(\frac{S_{100}}{S_{60}} \right) + 0.89}. \quad (\text{П9})$$

Главная астрономическая
обсерватория АН УССР
Киевский государственный
университет

STUDY OF FAR INFRARED EMISSION OF MARKARIAN GALAXIES. I. COMPARISON OF THE GALAXY CHARACTERISTICS IN OPTICAL AND FAR INFRARED RANGES

YU. I. IZOTOV, I. YU. IZOTOVA

The statistical study of Markarian galaxies in the optical and far infrared ranges is carried out. The obtained results are compared with the data for sample of the Virgo cluster galaxies. IR-luminosity functions

for Markarian galaxies incorporating both flux measurements and flux upper limits are obtained. Detected and undetected by IRAS Seyfert galaxies are shown to be undistinguished with their optical and far infrared luminosities. But undetected HII-galaxies have on the average lesser optical as well as far infrared luminosities in comparison with detected ones. The Markarian galaxies have dust temperature slightly greater than that of the Virgo galaxies. The star formation rate in the Markarian galaxies is shown to be several times larger than in the normal (non-active) spiral galaxies.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. K. Deutsch, S. P. Willner, *Astrophys. J.*, 386, L11, 1986.
2. J. M. R. Espinosa, R. J. Rudy, B. Jones, *Astrophys. J.*, 312, 555, 1987.
3. T. de Jong, P. E. Clegg, B. T. Soifer, M. Rowan-Robinson, H. J. Habing, J. R. Houck, H. H. Aumann, E. Raymond, *Astrophys. J.*, 278, L67, 1984.
4. J. M. R. Espinosa, R. J. Rudy, B. Jones, *Astrophys. J.*, 309, 76, 1986.
5. J. M. Mazzarella, V. A. Balzano, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 62, 751, 1986.
6. D. Kanth, F. Sevre, *Inst. Astrophys. Prepr. N114*, Paris, 1985.
7. H. A. Thronson, C. M. Telesco, *Astrophys. J.*, 311, 98, 1986.
8. Б. Е. Маркарян, *Астрофизика*, 3, 55, 1967; 5, 443, 581, 1969.
9. Б. Е. Маркарян, В. А. Липовецкий, *Астрофизика*, 7, 511, 1971; 8, 155, 1972; 9, 487, 1973; 10, 307, 1974; 12, 389, 657, 1976.
10. Б. Е. Маркарян, В. А. Липовецкий, Дж. А. Степанян, *Астрофизика*, 13, 225, 397, 1977; 15, 201, 363, 549, 1979; 17, 619, 1981; 16, 5, 609, 1980; 19, 221, 1983; 20, 419, 1984.
11. Б. Е. Маркарян, Л. К. Ерастова, В. А. Липовецкий, Дж. А. Степанян, А. И. Шаповалова, *Астрофизика*, 22, 215, 1985.
12. Б. Е. Маркарян, В. А. Липовецкий, Л. К. Ерастова, Дж. А. Степанян, А. И. Шаповалова, *Сообщ. САО*, 1987 (в печати).
13. М. А. Аракелян, Э. А. Дибай, В. Ф. Есипов, *Астрофизика*, 6, 39, 1970.
14. М. А. Аракелян, Э. А. Дибай, В. Ф. Есипов, Б. Е. Маркарян, *Астрофизика*, 6, 357, 1970; 7, 177, 1971.
15. М. А. Аракелян, Э. А. Дибай, В. Ф. Есипов, *Астрофизика*, 8, 33, 1972; 8, 325, 329, 1972; 9, 325, 1973.
16. Э. К. Денисюк, В. А. Липовецкий, *Астрофизика*, 10, 315, 1974; 19, 229, 1983.
17. Э. К. Денисюк, В. А. Липовецкий, В. Л. Афанасьев, *Астрофизика*, 12, 665, 1976.
18. И. М. Копылов, В. А. Липовецкий, В. И. Проник, К. К. Чуваев, *Астрофизика*, 10, 483, 1974; 12, 189, 1976.
19. G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin, *Second Reference Catalogue of Bright Galaxies*, Texas, 1976.
20. M. Dennefeld, F. Sevre, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 57, 253, 1984.
21. M.-P. Veron-Cetty, P. Veron, *Sci. Rep. Eur. South. Observ.*, N4, 1985.
22. M.-P. Veron-Cetty, P. Veron, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 65, 241, 1986.
23. G. Helou, *Astrophys. J.*, 311, L33, 1986.
24. В. Ю. Теребиж, *Астрофизика*, 16, 45, 1980.
25. Р. А. Кандалян, *Астрофизика*, 18, 580, 1982; 28, 301, 1987.
26. В. П. Решетников, *Астрофизика*, 24, 33, 1986.

27. *J. Neyman, E. L. Scott, Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data, Symp. No63 IAU, ed. Longair, 1974 (Русск. пер. Космология. Теория и наблюдения, Мир, М., 1978, стр. 173).*
28. *Y. Aouf, A. Soltan, H. Tananbaum, G. Zamorani, Astrophys. J., 238, 800, 1960.*
29. *M. H. K. de Grijs, G. K. Miley, J. Lub, T. de Jong, Nature, 314, 240, 1985.*
30. *М. Дж. Кендалл, А. Стюарт, Статистические выводы и связи, Наука, М., 1973.*