

УДК: 524.726

О СВЯЗИ ИНФРАКРАСНОГО И РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК

В.Г.МАЛУМЯН

Поступила 4 августа 1999

Принята к печати 15 ноября 1999

Исследована зависимость между ИК-светимостью в диапазоне 40-120 мкм и радиосветимостью на частотах 0.408; 1.49; 2.38; 5.0 и 10.7 ГГц спиральных галактик. На всех частотах существует тесная корреляция между радиосветимостью и инфракрасной светимостью спиральных галактик. Наклоны зависимостей радио и ИК-светимостей на всех частотах меньше единицы, но в пределах ошибок мало отличаются от нее. Тесная корреляция существует также между потоками радио и ИК-излучения. Для объектов всех морфологических подтипов коэффициенты корреляций высокие, а зависимости между радио- и ИК-светимостями близки к линейным. Они практически линейные и для спиральных галактик разных классов бюраканской классификации. Показано также, что для больших значений ИК-светимостей корреляция между радио- и ИК-светимостями ухудшается.

1. Введение. Связь инфракрасного (ИК) и радиоизлучения галактик очень интенсивно обсуждается в литературе. Ей посвящено несколько десятков статей, опубликованных за последнее десятилетие ([1-7], ссылки в них же).

Причина столь активных исследований в этой области заключается в том, что корреляция между ИК и радиоизлучением галактик в отличие от связи между излучательными способностями тех же галактик в других диапазонах спектра, очень тесная и носит всеобщий характер. Она имеет место не только в спиральных галактиках всех морфологических подтипов, но и в иррегулярных, голубых компактных карликовых галактиках и в эллиптических галактиках и квазарах.

Этот факт тем более интересен, что уже давно твердо установлено, что в нормальных галактиках ИК-излучение обусловлено тепловым механизмом - излучением межзвездной пыли, нагретой в основном ультрафиолетовым и оптическим излучением звезд. Между тем радиоизлучение галактик обусловлено нетепловым механизмом - синхротронным излучением релятивистских электронов в межзвездных магнитных полях. Для большинства галактик вклад тепловой составляющей радиоизлучения, обусловленной свободно - свободными переходами в межзвездном или в окружающих горячие звезды ионизованном газе, в общее радиоизлучение становится ощутимым только на частотах выше 10 ГГц [8-10].

Таким образом, на первый взгляд казалось бы, что нет оснований ожидать

тесной связи между ИК и радиоизлучением спиральных галактик (во всяком случае на частотах ниже 10 ГГц). В связи с этим, отметим, что корреляции между светимостями и потоками в разных интервалах спектра электромагнитных волн, например между радио- и оптическим, существуют. Но они слабые и объясняются, главным образом, зависимостью светимости галактик от их массы. Чем больше масса галактик, тем выше их светимость как в видимой, так и в других интервалах спектра. Это означает, что возможность корреляции между потоками излучения и светимостями галактик на частотах, принадлежащих разным диапазонам спектра не исключена, даже если механизмы излучения на этих частотах разные. Связь между ИК и радиоизлучением галактик не ослабляется при учете зависимости светимости от массы.

Таким образом, причина тесной корреляции между радио- и ИК излучением галактик кроется в физической связи процессов, рождающих ИК и радиоизлучение, несмотря на то, что, как уже было сказано выше, они разные.

До настоящего времени выдвинуты несколько теоретических моделей для объяснения тесной корреляции ИК и радиоизлучения спиральных галактик [1-7]. Во всех предложенных моделях принимается, что как ультрафиолетовое и оптическое излучение, нагревающее пыль, так и радиоизлучающие релятивистские электроны рождаются молодыми, горячими, массивными звездами, которые в конце своего эволюционного пути взрываются как сверхновые. Следовательно, как ИК-светимость, так и радиосветимость нормальных спиральных галактик должны быть пропорциональны темпу образования звезд в этих галактиках [11-13].

Из наиболее часто обсуждаемых моделей – модель “колориметра” [11]. В этой модели считается, что оптическая толщина дисков галактик относительно ультрафиолетовых фотонов, нагревающих межзвездную пыль, много больше единицы, а релятивистские электроны, ответственные за радиоизлучение, свою энергию полностью теряют – из-за синхротронных потерь и потерь на обратное комптоновское излучение – в пределах дисков галактик, где они инжектируются. В модели “колориметра” требуется также пропорциональность между плотностью энергий межзвездного магнитного поля и межзвездного поля излучения. В работах [1,3,12] приводятся факты в пользу того, что чем выше частота радиоизлучения, тем должен быть ближе к единице наклон корреляции $L_r - L_{gr}$ (L_r – светимость на какой-нибудь частоте радиодиапазона, L_{gr} – светимость в далекой ИК-области). Это объясняется тем, что с повышением частоты увеличивается доля теплового радиоизлучения в общем радиоизлучении галактик. В [6] отличие наклона зависимости $L_r - L_{gr}$ от единицы объясняется вкладом в общее ИК-излучение немассивных звезд, вклад которых в радиоизлучение спиральных галактик практически неощутим.

В работе [13] показано, что тесную корреляцию между радиосветимостью и светимостью в далекой ИК-области можно объяснить двумя фундаментальными соотношениями: корреляцией горячего компонента

далекого ИК-излучения и теплового радиоизлучения, которые обусловлены массивными ($\geq 20 M_{\odot}$) ионизирующими звездами и корреляцией холодного компонента далекого ИК-излучения и нетепловой составляющей радиоизлучения, обусловленными звездами с промежуточными массами ($5-20 M_{\odot}$). Наконец, в некоторых работах, например, в [14], причиной универсальности связи ИК и радиоизлучения считается то, что отношение светимостей в далекой ИК-области и в радиодиапазоне почти не зависит от начальной функции масс галактик. Поэтому галактики разных типов и классов - от нормальных спиральных галактик до галактик со вспышечным звездообразованием - следуют одной и той же зависимости между L_r и $L_{\text{гр}}$. С другой стороны, зависимость светимости на далеких ИК-частотах от доли энергии, поглощенной межзвездной пылью, объясняет небольшие отклонения (рассеяние) в связи $L_r - L_{\text{гр}}$, обусловленные изменениями величины внутреннего поглощения в разных галактиках.

Тесную связь ИК и радиоизлучения в спиральных галактиках (и не только в них) можно рассматривать как доказательство продолжающегося звездообразования в этих галактиках.

Ни одна из выдвинутых до настоящего времени теоретических моделей не дает полностью удовлетворительного объяснения наблюдаемой связи ИК и радиоизлучения галактик. В частности, согласно обсуждаемым в литературе моделям, на которых мы вкратце остановились, для взаимодействующих галактик и галактик с активными ядрами корреляция должна быть слабой [2,12]. Однако для большинства таких галактик она столь же тесная, как и для галактик без таких признаков. Неясно также, какую роль в корреляции $L_r - L_{\text{гр}}$ играет холодный компонент $L_{\text{гр}}$. Связан ли этот компонент ИК-излучения с нетепловым радиоизлучением спиральных галактик [13] ?

В настоящей работе приведены результаты исследований связи далекого ИК и радиоизлучения спиральных галактик на пяти радиочастотах. Исследовалась также связь ИК и радиоизлучения для объектов разных морфологических подтипов и с разной степенью активности.

2. *Выборка спиральных галактик.* Для исследования характера зависимости ИК-светимость - радиосветимость спиральных галактик мы использовали выборку объектов, до этого неоднократно использованную нами для изучения зависимости их радиоизлучательных способностей от спектральных индексов радиоизлучения, принадлежности к разным морфологическим подтипам и к разным классам бюраканской классификации центральных частей галактик и т.д. [15-17]. Из этой выборки были исключены те объекты, плотности потоков которых на частоте 1.49 ГГц [18,19] или потоки, измеренные с помощью IRAS, определены неуверенно. После этого в выборке остался 61 объект. Морфологические подтипы брались из Второго справочного каталога ярких галактик [20], радиальные

скорости - из [21,22]. Для близких объектов использовались расстояния, приведенные в [23].

В подавляющем большинстве работ, посвященных проблеме связи ИК и радиоизлучения, обычно радиосветимость на какой-нибудь частоте сравнивают с интегральной ИК-светимостью в диапазоне 40-120 мкм [1-7]. Интегральная плотность потоков спиральных галактик в этом диапазоне практически нечувствительна к коррекциям, обусловленным различием цвета галактик, которые надо вводить в ИК-потоки, измеренные с помощью IRAS. Сравнивались светимости на частоте 1.49 ГГц и интегральные светимости в диапазоне 40-120 мкм. Для вычисления светимостей на 1.49 ГГц использовались плотности потоков из [18,19]. Плотности потоков в диапазоне 40-120 мкм вычислялись как [13]

$$S_{\text{гр}} = 1.26 \times 10^{-14} (258 S_{60} + S_{100}),$$

где S_{60} и S_{100} спектральные плотности потоков в янских на волнах 60 мкм и 100 мкм соответственно. Они брались из каталогов IRAS. $S_{\text{гр}}$ выражена в единицах Вт м⁻². Постоянная Хаббла принималась равной 75 км с⁻¹ Мпк⁻¹.

3. *Результаты сравнения.* Результаты сравнения логарифмов монохроматических светимостей на 1.49 ГГц и интегральных ИК-светимостей для 61 спиральной галактики показаны на рис.1.

Как видно из рис.1, между радио- и ИК-светимостями существует тесная корреляция, коэффициент корреляции $r=0.92$. На рис.1 показана прямая линейной регрессии зависимости $\log L(1.49\text{ГГц}) - m \log L_{\text{гр}}$, которая

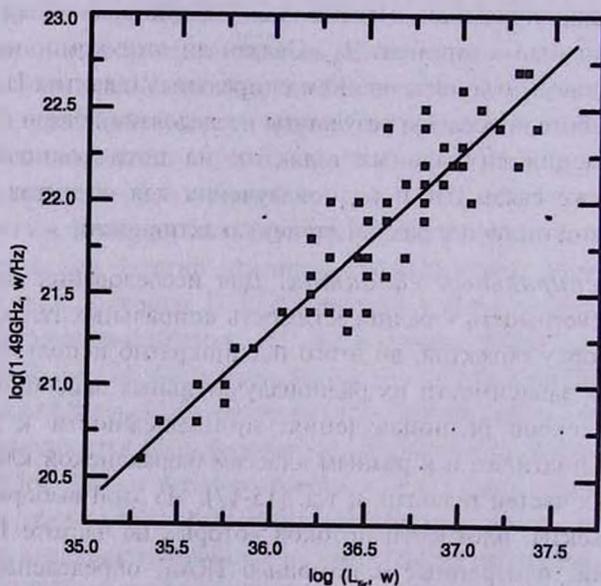


Рис.1. Зависимость светимостей на 1.49ГГц и в далекой ИК-области спиральных галактик. Прямая представляет линию линейной регрессии зависимости $\log L(1.49\text{ГГц}) - m \log L_{\text{гр}}$. Коэффициент корреляции $r = 0.92$, наклон $m = 0.96 \pm 0.06$.

удовлетворяет условию

$$\log L(1.49 \text{ ГГц}) = (0.96 \pm 0.06) \log L_{\text{гр}} - (13.35 \pm 2.13).$$

Мы разделили выборку по морфологическим подтипам на три подвыборки: Sa+Sab (10 объектов), Sb+Sbc (32 объекта) и Sc и более поздние подтипы (19 объектов). В них включены также галактики с перемычкой (SB) и промежуточного подтипа (SX). Для коэффициентов корреляций r и наклонов линий регрессий m для трех перечисленных выше групп получились: $r = 0.90$, $m = 0.95 \pm 0.16$; $r = 0.93$, $m = 0.91 \pm 0.07$ и $r = 0.95$, $m = 1.05 \pm 0.08$ соответственно. Как видно, коэффициенты корреляций для всех морфологических подтипов высокие, а наклоны линий регрессий практически одинаковы и в пределах ошибок не отличаются от единицы.

В этой связи интересно сравнить наши результаты с данными из [12]. Согласно [12], тесная корреляция между $\log L(1.49 \text{ ГГц})$ и $\log L_{\text{гр}}$ обуславливается за счет галактик морфологических подтипов Sb и более поздних. Там для коэффициента корреляции группы галактик подтипов Sa+Sab получено значение 0.50. Разницу в коэффициентах корреляций для Sa+Sab галактик вряд ли можно объяснить большим количеством объектов этих подтипов, использованных в [12].

Бюраканская классификация центральных частей 61 галактики дана в [24]. Коэффициенты корреляций и параметры зависимости $\log L(1.49 \text{ ГГц}) - m \log L_{\text{гр}}$ для спиральных галактик разных бюраканских классов указаны в табл.1. Из-за малого количества объектов классов 1 и 2s для получения статистически значимых результатов классы 1,3 и 2,2s мы рассматривали вместе. Пять сильно наклоненных к лучу зрения галактик классов 1 и 2 исключены из анализа, поскольку они могут быть ошибочно отнесены к этим классам [24].

Согласно некоторым работам (например, [12]), для галактик, где ролью активных процессов, протекающих в их ядрах (бюраканские классы 2, 2s, 4 и 5), уже нельзя пренебречь, связь $\log L_r - \log L_{\text{гр}}$ может быть нелинейной, так как ИК и радиоизлучение в них могут возникнуть не только из-за процессов звездообразования. Из табл.1 следует, что связь между $L(1.49 \text{ ГГц})$ и $L_{\text{гр}}$ для галактик всех бюраканских классов практически одинаково тесная и в пределах ошибок не отличается от линейной. Для всех галактик с признаками активности (классы 2+2s+4+5) табл.2 имеем $r = 0.93$, $m = 0.96 \pm 0.07$.

Таблица 1

СПИРАЛЬНЫЕ ГАЛАКТИКИ РАЗНЫХ БЮРАКАНСКИХ КЛАССОВ

Бюраканский класс	Количество объектов	r	m
1+3	16	0.86	1.01 ± 0.20
2+2s	14	0.95	0.87 ± 0.09
4	17	0.93	1.02 ± 0.10
5	9	0.92	0.94 ± 0.15

Из 61 галактики, использованной нами, 39 объектов – галактики с перемычкой SB или промежуточного типа SX. Для них имеем $r=0.93$, $m=0.96\pm 0.07$. (Только для 14 SB-галактик $r=0.93$, $m=0.82\pm 0.12$). Для 22 S-галактик без перемычек $r=0.90$, $m=1.04\pm 0.11$. Как для спиральных галактик с перемычкой, так и для объектов без перемычки связь между ИК и радиосветимостями в пределах ошибок не отличается от линейной. Разница $\Delta m=0.22$ в наклонах линий регрессий для S и SB галактик статистически незначима. Для более уверенных (статистически значимых) выводов необходимо увеличить число галактик как разных бюраканских классов, так и SB и S.

4. *Учет влияния зависимости светимости галактик от их массы.* Как уже было отмечено во введении, на связь $L_r - L_{\text{IR}}$ может повлиять зависимость светимости галактик от их массы. Для исключения этого эффекта мы исследовали зависимость между ИК и радиосветимостью с помощью нормированных по площади поверхности и по светимости в синих лучах L_B значений L (1.49 ГГц) и L_{IR} . Для вычисления площадей поверхностей галактик использовались угловые размеры больших и малых осей галактик из [20].

Для нормированных по площади поверхности зависимости $\log L$ (1.49 ГГц)/ $ab - \log L_{\text{IR}}/ab$ (где a и b линейные размеры больших и малых осей галактик в кпк) имеем $r=0.93$, $m=0.91\pm 0.06$. Как видим, и в случае, когда учитывается влияние зависимости светимости галактик от их массы, теснота корреляции и наклон зависимости между радиосветимостью и FIR-светимостью не меняются. Для связи $\log L$ (1.49 ГГц)/ $L_B - \log L_{\text{IR}}/L_B$ получается $r=0.81$, $m=0.79\pm 0.08$. И при нормировке по L_B связь между ИК и радиосветимостью остается тесной. Она остается тесной также для галактик разных морфологических подтипов.

Параметры связи $L_r - L_{\text{IR}}$ для галактик разных бюраканских классов, нормированных по площади поверхности и по светимости в синих лучах, приведены в табл.2.

В таблице в первых строках третьего и четвертого столбцов указаны параметры, относящиеся к нормированной по площади поверхности галактик зависимости $\log L$ (1.49 ГГц) - $\log L_{\text{IR}}$, во второй строке – нормированной по L_B . По сравнению с нормированными по L_B корреляциями, нормированные по площади поверхности корреляции более тесные как для галактик разных бюраканских классов и морфологических подтипов, так и для всех галактик вместе взятых. Однако в обоих случаях коэффициенты корреляций высокие. Поэтому тесная связь между ИК и радиосветимостями спиральных галактик обуславливается, главным образом, внутренними физическими причинами, а не влиянием зависимости светимости от массы.

Как видно из рис.1, для больших значений $\log L_{\text{IR}}$, начиная примерно с $\log L_{\text{IR}} = 36.5$, степень рассеяния точек вокруг линии регрессии, увеличивается, поэтому мы выборку (ненормированную) разделили на две подвыборки по

Таблица 2

СВЯЗЬ НОРМИРОВАННЫХ ПО ПЛОЩАДИ ПОВЕРХНОСТИ И ПО СВЕТИМОСТИ В СИНИХ ЛУЧАХ ИК И РАДИОСВЕТИМОСТЕЙ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК РАЗНЫХ БЮРАКАНСКИХ КЛАССОВ

Бюраканские классы	Количество объектов	r	m
1+3	16	0.90	0.91±0.15
		0.85	0.99±0.17
2+2s	14	0.93	0.95±0.13
		0.84	0.87±0.16
4	17	0.89	0.92±0.14
		0.80	0.88±0.19
5	9	0.98	0.88±0.09
		0.86	0.50±0.11

величине $\log L_{\text{IR}}$, и в отдельности для каждой из них определили коэффициенты корреляции r и угловые коэффициенты регрессии m . Значения r и m , а также интервалы значений $\log L_{\text{IR}}$ приведены в табл.3.

Таблица 3

ЗАВИСИМОСТЬ $\log L(1.49 \text{ ГГц}) - \log L_{\text{IR}}$ ДЛЯ РАЗНЫХ ИНТЕРВАЛОВ $\log L_{\text{IR}}$

Интервалы	Число объектов	r	m
$\log L_{\text{IR}} \leq 36.5$	30	0.86	0.89±0.10
$\log L_{\text{IR}} > 36.5$	31	0.67	0.77±0.16

Как видно из табл.3, (а также из рис.1) для больших значений $\log L_{\text{IR}}$ корреляция между $\log L(1.49 \text{ ГГц})$ и $\log L_{\text{IR}}$ ухудшается. Разница в коэффициентах корреляций для вышеупомянутых двух интервалов $\log L_{\text{IR}}$ сохраняется также для нормированных по площади поверхности галактик или по L_{B} значений ИК и радиосветимостей. Ухудшение корреляции для больших значений L_{B} согласуется с замеченным ранее фактом, что для галактик с мощным ИК-излучением, обнаруженных с помощью IRAS, коэффициент корреляции между $\log L_{\text{r}}$ и $\log L_{\text{IR}}$ не превышает 0.70 – 0.75 [25]. Как будет показано ниже, тесная связь существует также между радио и ИК-потоками спиральных галактик. Коэффициент корреляции этой связи уменьшается для больших значений ИК-потоков (см.рис.2). Для проверки зависимости связи $L(1.49 \text{ ГГц}) - L_{\text{IR}}$ от спектрального индекса радиоизлучения мы нашу выборку разделили на две части: объекты с $\alpha \leq 0.75$ (35 галактик) и с $\alpha > 0.75$ (26 галактик), ($S - \nu^{-\alpha}$, где S - плотность потока на частоте ν). Для объектов с $\alpha \leq 0.75$ имеем $r = 0.95$, $m = 0.93 \pm 0.05$. Для объектов с $\alpha > 0.75$, $r = 0.85$, $m = 1.02 \pm 0.13$. Полученные данные

свидетельствуют, что характер связи $L_r - L_{\text{fir}}$ не зависит от значений спектрального индекса радиоизлучения спиральных галактик.

Тесная корреляция существует не только между нормированными по площади поверхности или по светимости в синих лучах радио- и ИК-светимостями. Такая же тесная корреляция наблюдается между плотностями потоков на 1.49 ГГц S (1.49 ГГц) и в диапазоне 40 - 120 мкм S_{fir} . В случае ненормированных потоков для связи S (1.49 ГГц) - S_{fir} имеем $r = 0.86$, $m = 0.87 \pm 0.07$. (Плотности потоков выражены в мЯн). При нормировании по площади поверхности получается $r = 0.94$, $m = 0.95 \pm 0.03$. Для нормированных S (1.49 ГГц) и S_{fir} параметры связи между потоками почти такие же, как и для связи нормированных светимостей. Связь нормированных по площади поверхности $\log S$ (1.49 ГГц) и $\log S_{\text{fir}}$ показана на рис.2. Из рисунка видно, что для больших значений нормированных $\log S_{\text{fir}}$ (начиная с $\log S_{\text{fir}} \geq -14.1$) корреляция между радио и FIR-потоками ухудшается ($r=0.60$).

Тесная корреляция между S_r и S_{fir} , в свою очередь, также может служить доказательством, что связь между ИК и радиоизлучением спиральных галактик обусловлена внутренними причинами.

5. *Учет эффекта Малмквиста (эффекта селекции)*. Важно также выяснить, насколько связь между L_r и L_{fir} подвержена эффекту Малмквиста [26]. Упомянутый эффект связан с тем, что по причине ограниченной чувствительности телескопов на больших расстояниях обнаруживаются только те объекты, светимость которых превосходит

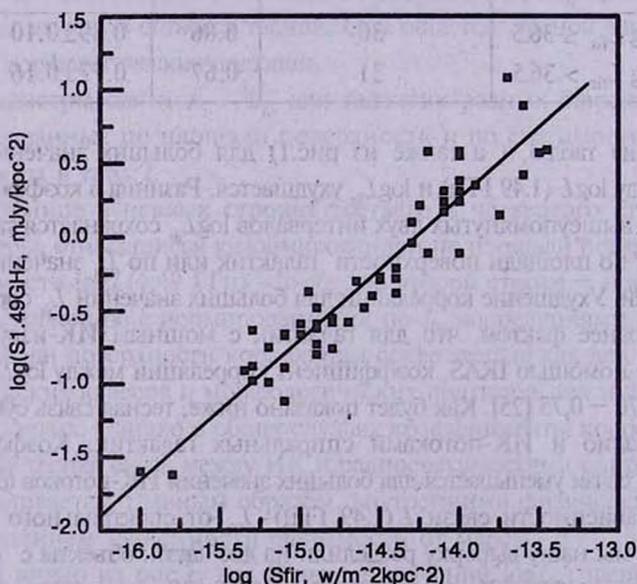


Рис.2. Зависимость нормированных по площади поверхности галактик плотности потока на частоте 1.49 ГГц от плотности потока в далекой ИК-области. Прямая - линия линеинной регрессии зависимости $\log S(1.49 \text{ ГГц}) - m \log S_{\text{fir}}$. $r = 0.94$, $m = 0.95 \pm 0.07$.

предельное значение чувствительности телескопа. Из-за этого может возникнуть искусственная связь между исследуемыми параметрами выборок различных объектов, что приводит к увеличению коэффициента корреляции.

Эффект селекции можно учесть различными способами [26]. Мы воспользовались методом частных коэффициентов корреляции [27]. Частный коэффициент корреляции между ненормированными значениями $\log L(1.49 \text{ ГГц})$ и $\log L_{\text{гр}}$, то есть коэффициент корреляции после учета зависимости $L(1.49 \text{ ГГц})$ и $L_{\text{гр}}$ от расстояния вследствие эффекта селекции, получается равным 0.86. То есть, после учета селекции теснота корреляции почти не ухудшается. Для нормированных по площади поверхности галактик $L(1.49 \text{ ГГц})$ и $L_{\text{гр}}$ частный коэффициент корреляции равен 0.93. Как видим, и в этом случае теснота корреляции практически не меняется.

6. Зависимость $L_r - L_{\text{гр}}$ на разных частотах радиоизлучения.

Как известно, радиоизлучение галактик состоит из теплового и нетеплового компонентов. На метровых, дециметровых и длинных сантиметровых волнах доминирует нетепловая составляющая. На этих волнах доля тепловой составляющей для подавляющего большинства галактик составляет не более нескольких процентов. Вклад тепловой составляющей может стать ощутимым на коротких сантиметровых волнах (на частотах выше 10 ГГц). Поэтому можно ожидать, что на этих частотах зависимость $L_r - L_{\text{гр}}$ будет близка к линейной. Согласно теоретическим моделям, обсуждаемым в литературе, на низких частотах она может быть нелинейной из-за преобладания нетепловой составляющей радиоизлучения [12].

С целью проверки зависимости углового коэффициента линейной регрессии m связи $\log L_r - m \log L_{\text{гр}}$ от частоты радиоизлучения эту связь мы исследовали также на частотах 0.408; 2.38; 5.0 и 10.7 ГГц. Плотности потоков излучения на перечисленных выше частотах брались из радиобозоров галактик [10, 28-35]. Коэффициенты корреляции r и значения коэффициентов m на разных частотах указаны в табл.4. Для сравнения в таблице указаны также значения r и m на частоте 1.49 ГГц.

В первых строках третьего и четвертого столбцов табл.4 указаны r и m для ненормированной зависимости $\log L_r - \log L_{\text{гр}}$. Во вторых и третьих строках - для нормированных по площади поверхности и по L_b зависимостей соответственно.

Из табл.4 следует, что нет ожидаемой зависимости наклона m линейной регрессии от частоты радиоизлучения. На всех частотах он практически одинаков. Анализ данных табл.4 показывает также, что на всех частотах связь $\log L_r - \log L_{\text{гр}}$ почти одинаково тесная. (Меньший коэффициент корреляции на частоте 10.7 ГГц по сравнению с низкими частотами объясняется большими ошибками измерений плотностей потоков на этой частоте [28]).

Как и на частоте 1.49 ГГц, на других частотах, указанных в табл.4, также существует тесная корреляция между радио- и FIR-потоками. Корреляция

Таблица 4

ЗАВИСИМОСТЬ $\log L_r - \log L_{\text{нр}}$ НА РАЗНЫХ РАДИОЧАСТОТАХ

Частота (ГГц)	Количество объектов	r	m
0.408	61	0.89	0.96 ± 0.07
		0.90	0.83 ± 0.06
		0.80	0.79 ± 0.08
1.49	61	0.92	0.96 ± 0.06
		0.93	0.91 ± 0.06
		0.81	0.79 ± 0.08
2.38	61	0.92	0.95 ± 0.05
		0.92	0.94 ± 0.05
		0.85	0.89 ± 0.08
5.0	61	0.90	0.87 ± 0.05
		0.91	0.85 ± 0.05
		0.78	0.80 ± 0.08
10.7	51	0.81	0.73 ± 0.08
		0.84	0.80 ± 0.07
		0.75	0.92 ± 0.12

между L_r и $L_{\text{нр}}$ для галактик разных морфологических подтипов и разных бюраканских классов на всех частотах тесная, а угловые коэффициенты линейной регрессии в пределах ошибок не отличаются от единицы.

7. *Обсуждение результатов и выводы.* Результаты, полученные нами на основании анализа связи между радиосветимостью на ряде частот и ИК-светимостью в диапазоне 40 - 120 мкм для выборки из 61 спиральной галактики, согласуются со сделанными ранее в ряде работ [1-7,10-14] заключением об универсальности связи $L_r - L_{\text{нр}}$.

Основные выводы настоящей работы следующие.

1. В широком интервале частот радиоизлучения (по крайней мере в диапазоне 0.408 - 10.7 ГГц) имеется тесная корреляция между светимостью на этих частотах и $L_{\text{нр}}$ спиральных галактик. Такая же тесная корреляция существует между потоками на этих радиочастотах и потоком излучения в далекой ИК-области. Корреляция остается тесной и после учета влияния связи между массой и светимостью галактик, а также эффекта Малмквиста.

Наклоны зависимостей $L_r - L_{\text{нр}}$ на всех частотах меньше единицы, хотя в пределах ошибок они мало отличаются от единицы.

2. Для больших значений $L_{\text{нр}}$ корреляция связи $L_r - L_{\text{нр}}$ ухудшается.

3. Теснота корреляции не зависит от морфологического подтипа галактик. Корреляция тесная также для всех классов бюраканской классификации.

4. Характер связи $L_r - L_{\text{нр}}$ не зависит от значения спектрального индекса радиоизлучения.

5. Наличие перемигчек в галактиках (SB-галактики), по-видимому, не влияет на характер связи. Связь радио- и ИК-излучения в отдельности для спиральных галактик с перемигчкой и без перемигчки подробно обсуждается в работах [36,37].

В работе [3], где собраны результаты исследований связи $L_r - L_{\text{fir}}$ на нескольких радиочастотах, делается вывод о том, что с уменьшением частоты радиоизлучения наклон линии регрессии зависимости $\log L_r - m \log L_{\text{fir}}$ увеличивается. Однако величина наибольшего изменения m на крайних частотах 0.151 – 10.7 ГГц составляет 0.14 на уровне 2.8 σ . Кроме того, там рассматриваются не исправленные за зависимость светимости от массы галактик L_r и L_{fir} . В выборке, использованной в [3], кроме нормальных спиральных галактик содержатся также иррегулярные и голубые компактные, карликовые галактики. У последних, как известно, доля теплового радиоизлучения составляет заметную часть общего радиоизлучения [38]. По этим причинам сравнивать наши данные, приведенные в табл.4, с результатами [3] затруднительно.

Бюраканская астрофизическая обсерватория,
им В.А.Амбарцумяна, Армения

ON THE RELATIONSHIP OF INFRARED AND RADIO EMISSION OF SPIRAL GALAXIES

V.H.MALUMYAN

The dependence of infrared luminosity in the range 40 -120 μm and radio luminosity at frequencies 0.408, 1.49, 2.38, 5.0 and 10.7 GHz among spiral galaxies has been investigated. The tight correlation exists between radio luminosities at all frequencies and FIR luminosity among spiral galaxies. The slopes of the linear regression of the relationship between luminosities at all frequencies and FIR luminosity are close to one. A tight correlation exists between radio and FIR fluxes of spiral galaxies as well. For all morphological sybtypes of spiral galaxies the correlation coefficients are high and dependences of radio and FIR luminosities are close to linear. They are practically linear for all classes of the Byurakan classification. It is shown also that for large FIR luminosities the correlations are weakened.

ЛИТЕРАТУРА

1. X.Chi, A.W.Wolfendale, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **245**, 101, 1990.
2. H.M.Sopp, P.Alexander, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **251**, 14p, 1991.
3. R.Price, N.Duric, Astrophys. J., **401**, 81, 1992.

4. *G.Helou, M.D.Bicay*, *Astrophys. J.*, **415**, 93, 1993.
5. *C.Xu, U.Lisenfeld, H.Volk*, *Astron. Astrophys.*, **285**, 19, 1994.
6. *C.Xu, U.Lisenfeld, H.Volk, E.Wunderlich*, *Astron. Astrophys.*, **282**, 19, 1994.
7. *U.Lisenfeld, H.Volk, C.Xu*, *Astron. Astrophys.*, **306**, 677, 1996.
8. *I.M.Gioia, L.Gregorini, U.Klein*, *Astron. Astrophys.*, **116**, 164, 1982.
9. *F.P.Israel, J.M. van der Hulst*, *Astrophys. J.*, **88**, 1736, 1983.
10. *S.Niklas et al.*, *Astron. Astrophys.*, **293**, 56, 1995.
11. *H.Volk*, *Astron. Astrophys.*, **218**, 67, 1989.
12. *S.Niklas*, MPFIR prep., N 686, 1996.
13. *A.Fitt, P.Alexander, M.Cox*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **233**, 907, 1988.
14. *E.Hummel*, *Astron. Astrophys.*, **160**, L4, 1986.
15. *В.Г.Малумян*, *Астрофизика*, **40**, 39, 1997.
16. *В.Г.Малумян*, *Астрофизика*, **41**, 35, 1998.
17. *В.Г.Малумян*, *Астрофизика*, **41**, 647, 1998.
18. *J.J.Condon*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **65**, 485, 1987.
19. *J.J.Condon, Q.F.Yin*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **65**, 543, 1987.
20. *G.de Vaucouleurs, A.de Vaucouleurs, H.G.Corvin*, *Second Reference Catalogue of Bright Galaxies*. University of Texas Press. Austin, 1976.
21. *J.Huchra, V.Davies, D.Latham, J.Tonry*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **52**, 89, 1983.
22. *M.P.Haynes, R.Giovanelli*, *Astron. J.*, **89**, 758, 1984.
23. *E.Hummel*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **41**, 151, 1980.
24. Классификация центральных частей 711 галактик, *Сообщ. Бюраканской обсерв.*, **47**, 43, 1975.
25. *C.J.Lonsdale, H.E.Smith*, *Astrophys. J.*, **405**, L9, 1993.
26. *F.Verter*, *Astrophys. J.*, **402**, 141, 1993.
27. *В.Иванова и др.*, *Математическая статистика*, Высшая школа, М., 1975.
28. *S.Niklas et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **114**, 21, 1995.
29. *I.M.Gioia, L.Gregorini*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **41**, 329, 1980.
30. *J.J.Harnet*, *Austr. J. Phys.*, **35**, 321, 1982.
31. *J.Pfleiderer, C.Durst, K.H.Gebler*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **192**, 635, 1980.
32. *J.Pfleiderer*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **28**, 313, 1977.
33. *R.Sramek*, *Astron. J.*, **80**, 771, 1975.
34. *J.Pfleiderer, H.Boden, K.H.Gebler*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **40**, 351, 1980.
35. *L.L.Dressel, J.J.Condon*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **36**, 53, 1978.
36. *Р.А.Кандалян, А.Т.Каллоглян*, *Астрофизика*, **41**, 349, 1998.
37. *Р.А.Кандалян, А.Т.Каллоглян*, *Астрофизика*, **41**, 599, 1998.
38. *U.Klein, H.Weiland, E.Brinks*, *Astron. Astrophys.*, **246**, 323, 1991.