

ОПТИЧЕСКИЕ И HI-СВОЙСТВА ИЗОЛИРОВАННЫХ ГАЛАКТИК КАТАЛОГА 2MIG. I. ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ

Ю.Н.КУДРЯ¹, В.Е.КАРАЧЕНЦЕВА², И.Д.КАРАЧЕНЦЕВ³

Поступила 22 июня 2011

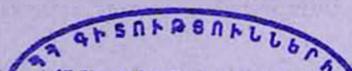
Мы анализируем эмпирические соотношения между характеристиками в оптическом, ближнем инфракрасном и HI диапазонах для изолированных галактик из каталога 2MIG, охватывающего все небо. Рассматриваются данные о морфологических типах, K_s - и B -величинах, линейных диаметрах, HI-массах и вращательных скоростях. Мы вычисляем параметры регрессий, дисперсии и коэффициенты корреляций для пар характеристик. Полученные соотношения могут быть использованы для проверки иерархической теории образования галактик путем многочисленных слияний холодной темной материи.

Ключевые слова: *галактики:изолированные галактики:общие свойства*

1. *Введение.* Согласно современным представлениям, морфология, процессы звездообразования, химический состав и другие характеристики галактик в сильной степени зависят от окружения. Изолированные галактики, находящиеся в областях с очень низкой плотностью вещества, не подвергались заметному воздействию окружения в течение последних нескольких миллиардов лет. Поэтому популяция изолированных галактик может служить опорной выборкой при изучении происхождения и эволюции галактик. Вышесказанное уже стало общим местом, и необходимость создания полной и однородной выборки таких галактик очевидна.

Однако на практике мы имеем дело с достаточно сложной задачей создания каталогов (списков) изолированных галактик. Разработаны разные способы выявления изолированных галактик в 2D и 3D-пространствах [1]. Эти способы применяются к различным обзорам неба, выполненным в разных диапазонах длин волн [2-4]. Методы отбора изолированных галактик часто относятся к небольшим участкам неба либо к разным объемам. Наконец, исследуются специфические выборки изолированных галактик - определенной морфологии [5,6], с активными ядрами [7] и т.д. Достаточно подробно разнообразие подходов и результатов при изучении изолированных галактик представлено в материалах конференции "Galaxies in Isolation: Nature vs Nurture" [1].

К настоящему времени наиболее полно изучен Каталог изолированных галактик КИГ [8]. При его составлении в качестве критерия изолированности были приняты эмпирически подобранные соотношения:



$$x_{1i} \geq 20 a_i, \quad (1)$$

$$1/4 a_i \leq a_i \leq 4 a_i, \quad (2)$$

где индексы "1" и "i" относятся, соответственно, к фиксированной и соседним галактикам. Иными словами, галактика с угловым диаметром a_i считается изолированной, если все "значимые" соседи с угловыми диаметрами a_j находятся на расстоянии от нее x_{1i} , не ближе, чем $20a_i$. После визуального просмотра на O, E-картах Паломарского обзора неба POSS-1 всех галактик из каталога Цвикки и др. CGCG [9] и их окрестностей критерий изолированности прошла 1051 галактика ($m \leq 15^m.7$, $\delta \geq -3^\circ$, $|b| \geq 20^\circ$), что составило около 3% полного числа галактик CGCG.

С начала 2000-х международная команда (Испания, США, Франция, Италия) осуществляет обширный проект AMIGA (<http://www.iaa.es/AMIGA.html>). Целью проекта является изучение физических свойств наиболее изолированных галактик каталога КИГ и межзвездной среды в них с учетом новых наблюдательных данных, появившихся за последнее время. При этом высокая эффективность критерия изолированности была проверена и подтверждена для большинства галактик КИГ.

Недавно был опубликован новый каталог изолированных галактик 2MIG [10] (электронную версию см. на <ftp://cdsarc.u-strasb.fr/pub/cats/YII/257>), при создании которого использованы преимущества фотометрически однородного обзора Two Micron All-Sky Survey (2MASS) [11], охватывающего все небо. Каталог 2MIG основан на автоматизированном отборе протяженных источников из 2MASS Extended Source Catalog (2MASS XSC) [12] и последующем их визуальном просмотре. Для выделения изолированных галактик 2MIG были применены модифицированные условия (1), (2) к объектам каталога 2MASS XSC. Значение безразмерного "расстояния" $x_{1i}/a_i \equiv x_{1i}/2r_i \equiv s_i$ в условии (1) было принято равным $s=30$, поскольку инфракрасные диаметры галактик в 2MASS систематически меньше, чем их стандартные оптические диаметры a_{25} . Галактика "1" с K -величиной K_{20K} и изофотным K -диаметром $a_K = 2r_{20Jc}$ считалась изолированной, если выполняются условия (1) и (2) для нее и соседней "значимой" галактики при $s=30$. Чтобы иметь значительный запас слабых галактик-соседей, при создании каталога 2MIG алгоритм выявления изолированных галактик был применен ко всем галактикам-кандидатам с видимыми величинами в интервале

$$4^m.0 < K \leq 12^m.0 \quad (3)$$

и угловыми диаметрами

$$a_K \geq 30". \quad (4)$$

Видимая предельная величина $K_s = 12^m.0$ была выбрана таким образом, чтобы она соответствовала пределу каталога КИГ для галактик с типичным показателем цвета $B-K_s = 3^m.5 \div 4^m.0$. Ограничение по звездной величине

на ярком конце обусловлено особенностями фотометрии в 2MASS самых протяженных ярких галактик. Поскольку в каталог 2MASS XSC не включались объекты с диаметрами $a_K < 10''$, то для выполнения условия (2) необходимо было ограничить предельным диаметром и галактики-кандидаты в изолированные. Значение минимального углового размера было для них выбрано равным $30''$.

Применение модифицированного условия (1) и условий (2)-(4), выделило в каталоге 2MASS XSC 4045 кандидатов в изолированные галактики, что составляет $4045/51572 = 7.8\%$ от числа галактик ярче $K_s = 12^m.0$ и больше $a_K = 30''$. Чтобы учесть соседние галактики с низкой поверхностной яркостью, обычно не видимые в обзоре 2MASS, были использованы также другие обзоры неба - DSS-1, DSS-2 и SDSS. Дополнительная проверка изолированности была выполнена с использованием сведений о лучевых скоростях из баз данных HyperLEDA и NED для объектов-кандидатов и их ближайших соседей. После исключения неизолированных галактик в каталог 2MIG вошло 3227 объектов, или 6.2% от числа галактик ярче $K_s = 12^m.0$ с диаметрами больше $a_K = 30''$ в 2MASS XSC. Подробно процедура выявления изолированных галактик и общие свойства каталога 2MIG описаны в работе [10].

В настоящей работе мы даем статистическое описание оптических и HI-свойств галактик каталога 2MIG, которые были отождествлены в базе данных HyperLEDA, и приводим соотношения между различными характеристиками галактик в зависимости от морфологического типа.

2. *Распределения основных наблюдаемых характеристик.* Из 3227 галактик каталога 2MIG с объектами базы данных HyperLEDA были отождествлены 3070 галактик. Их распределение по числовому коду морфологического типа представлено на рис.1. В каталоге всем эллиптическим

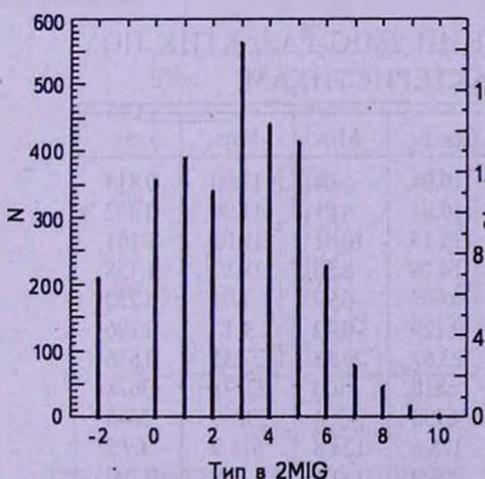


Рис.1. Распределение 3070 галактик по морфологическим типам.

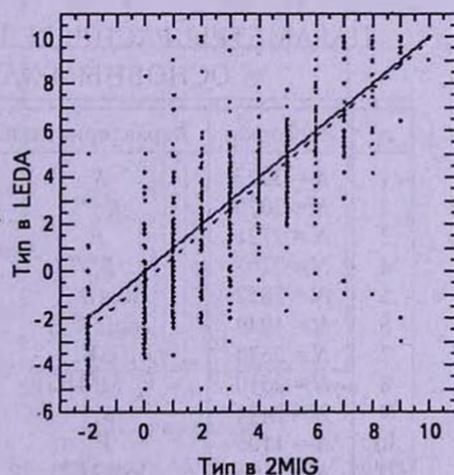


Рис.2. Сравнение морфологических типов галактик в каталоге 2MIG и в HyperLEDA.

галактикам присвоен код -2.

В данной выборке содержится 18% эллиптических и линзовидных галактик, 42% спиралей типов Sa-Sab-Sb с доминирующим балджем, 38% спиралей типов Sbc-Sc-Scd-Sd с доминирующим диском и всего 2% иррегулярных галактик.

Мы сравнили типы 1864 общих галактик в каталоге и в HyperLEDA. Результаты сравнения представлены на рис.2. Сплошная линия - диагональ, штрихованная - линия регрессии $Type(HyperLEDA) = 1.024 \cdot Type(2MIG) - 0.41$. Как видно, в среднем тип в HyperLEDA немного меньше типа в каталоге 2MIG (разница между пунктиром и сплошной линией). Стандартное отклонение от линии регрессии составляет 3.6. За пределы этого значения выходит 3% галактик, примерно поровну в обе стороны. Мы перепроверили все галактики, у которых разница в значениях кода по модулю была равна или превышала 5. В тех случаях, когда типы оценивались в 2MIG как более ранние, независимая классификация подтвердила правильность типов в 2MIG для 26 из 30 случаев (87%); в обратной ситуации оценка типа в 2MIG подтвердилась для 24 из 32 случаев (75%). Отметим, что 22 из рассмотренных 62 галактик находятся в зоне сильного Галактического поглощения ($A_B^G > 2$), где определение морфологического типа существенно затруднено. Далее в работе мы принимаем классификацию галактик согласно 2MIG как более точную.

Для 2850 2MIG-галактик в HyperLEDA приводятся значения угла наклона галактики к лучу зрения. Среди них 40 галактик имеют наклон $i=0^\circ$ и 450 видны практически с ребра ($i=85^\circ \div 90^\circ$). Заметной зависимости среднего угла наклона от типа мы не нашли, что говорит об отсутствии селекции по этому параметру.

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ 2MIG-ГАЛАКТИК ПО
ОСНОВНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

п	Выборка	Характеристика	Средн.	Min	Max	σ
1	$N = 3227$	K	10.94	5.04	12.00	0.814
2	$N = 3070$	K_{diff}^{corr}	10.84	4.81	11.99	0.832
3	$N = 2721$	B_i	15.15	10.41	19.05	1.161
4	$N = 2703$	B_i^{corr}	14.26	8.30	18.57	1.138
5	$N = 2852$	$\log(a_{25})$	0.007	-0.99	1.01	0.230
6	$N = 1849$	$\log(a_{25}^{diff})$	0.129	-0.72	1.15	0.196
7	$N = 2638$	SB	23.67	20.58	27.55	0.636
8	$N = 2510$	V_i (2MIG)	6818	-100	23773	3628
9	$N = 2494$	V_{LG}	6758	-304	23760	3645
10	$N = 1106$	V_{LG}^{rel}	175.6	12.68	613.9	69.5
11	$N = 1106$	$\log(2V_{rel})$	2.509	1.404	3.089	0.190
12	$N = 814,$ $i > 50^\circ$	$\log(2V_{rel})$	2.509	1.404	3.089	0.186

Параметры распределения основных наблюдаемых характеристик 2MIG-галактик представлены в табл.1. K_s -величины и лучевые скорости V_r взяты из 2MIG, остальные данные - из HyperLEDA. В таблице приведены: среднее, минимальное, максимальное значения и стандартное отклонение от среднего. В первой и второй строках табл.1 представлены параметры распределения по нескорректированным каталожным величинам K_s для полной выборки $N=3227$ и по скорректированным величинам K_s^{corr} для выборки $N=3070$ галактик, отождествленных в HyperLEDA. Мы исправили величины за поглощение в Галактике и за внутреннее поглощение: $K_s^{corr} = K_s - A_K^G - A_K^{in}$. Значения A_B^G , A_B^{in} брались из HyperLEDA для B -полосы и пересчитывались для K_s -величин с коэффициентом 0.084 в соответствии с результатами [13]. Внутреннее поглощение A_B^{in} имеется в HyperLEDA не для всех 3070 галактик, при его отсутствии оно считалось нулевым. Максимальное значение $K_s = 12^m$ соответствует пределу каталога 2MIG. Сравнение характеристик распределений по K_s и K_s^{corr} показывает лишь небольшие различия. В частности, среднее значение коррекции составляет $0^m.1$. Гистограммы распределения 3227 галактик по K_s и 3070 галактик по K_s^{corr} приведены на рис.3а.

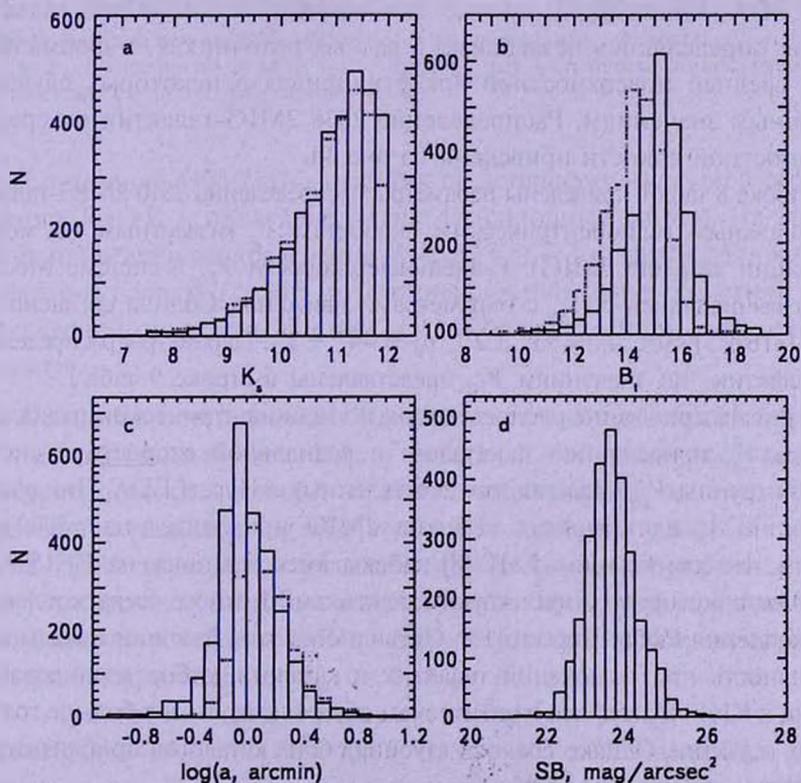


Рис.3. Распределения 2MIG-галактик: а) по величинам K_s (сплошная линия) и K_s^{corr} (пунктирная линия); б) по величинам B_s (сплошная линия) и B_s^{corr} (пунктирная линия); в) по $\log(a_{25})$ (сплошная линия) и $\log(a_{25}^{corr})$ (пунктирная линия); д) по поверхностной яркости в B -фильтре внутри изофоты 25 mag/arcsec^2 .

Характеристики распределений по B_i и B_i^{corr} указаны в 3 и 4 строках табл.1. Как видно, они достаточно сильно различаются. Различие средних B_i и B_i^{corr} , равное $0^m.89$, определяется средним значением коррекций и тем фактом, что 18 галактик без B_i^{corr} в HyperLEDA достаточно слабые, их средняя величина $B_i = 17^m.65$. Распределение галактик по величинам B_i и B_i^{corr} представлено на рис.3b.

Параметры распределений 2852 2MIG-галактик по логарифмам нескорректированных изофотных угловых диаметров до изофоты 25 mag/arcsec^2 , $\log(a_{25})$, и 1849 галактик по логарифмам скорректированных за поглощение в Галактике и внутреннее поглощение угловых диаметров, $\log(a_{25}^{corr})$, даны в 5 и 6 строках табл.1 и представлены на рис.3с.

Средняя поверхностная яркость внутри B -изофоты 25 mag/arcsec^2 (SB) вычислялась по B -величине усреднением в круге диаметром a_{25} с учетом поправки Ботгинелли, описанной в HyperLEDA. Параметры распределения по значению SB приведены в 7 строке табл.1. Отметим, что 61 объект (2.3%) имеет значение $SB > 25 \text{ mag/arcsec}^2$ (что противоречит определению средней поверхностной яркости в HyperLEDA). Мы предполагаем, что в HyperLEDA приводятся данные для величин и диаметров галактик, которые определялись независимо в разных источниках, и формальный расчет средней поверхностной яркости привел в некоторых случаях к ошибочным значениям. Распределение 2638 2MIG-галактик по средней поверхностной яркости приведено на рис.3d.

В строке 8 табл.1 приведены параметры распределения 2510 2MIG-галактик по радиальным гелиоцентрическим скоростям V_h (известным на момент публикации каталога 2MIG). Радиальные скорости V_{LG} в системе Местной группы вычислялись по V_h с параметрами движения Солнца согласно [14]: $V_{Sun} = (316 \pm 5) \text{ км/с}$, $l_0 = 93^\circ \pm 2^\circ$, $b_0 = -4^\circ \pm 2^\circ$. Параметры распределения 2494 галактик по значениям V_{LG} представлены в строке 9 табл.1.

На рис.4а приведены распределения по гелиоцентрической радиальной скорости V_h , приведенной в каталоге и радиальной скорости в системе Местной группы V_{LG} галактик, отождествленных в HyperLEDA. Пик распределения по V_h для галактик каталога 2MIG приходится на $\sim 5000 \text{ км/с}$. Отметим, что для галактик КИГ [8] наблюдаются два пика: на $V_h \sim 1500 \text{ км/с}$ и $\sim 6000 \text{ км/с}$, которые соответствуют галактикам Местного сверхскопления и сверхскопления Рыбы-Персей [15]. Очевидно на этих различиях сказывается селективность при включении галактик в каталоги: отбор изолированных галактик в КИГ проводился в оптическом обзоре, куда входит больше голубых близких галактик. Однако средняя глубина обоих каталогов приблизительно одинакова и составляет $\sim 6500 \text{ км/с}$.

Скорости вращения V_{rot} в HyperLEDA есть всего лишь для 34% от всех 3227 2MIG-галактик. Параметры распределения по V_{rot} даны в 10-й строке

табл.1. Семь галактик имеют $V_{rot} > 400$ км/с. Если для двух галактик из них значительная величина V_{rot} объясняется неточностью коррекции за наклон (13° и 20°), то у других возможны проблемы, связанные с условиями наблюдений (низкое отношение сигнал/шум и др.). Заметим, что среди HI наблюдений, проведенных группой ALFALFA [16], также имеются галактики со значениями ширин водородных линий $W_{50} \approx 700 - 1000$ км/с.

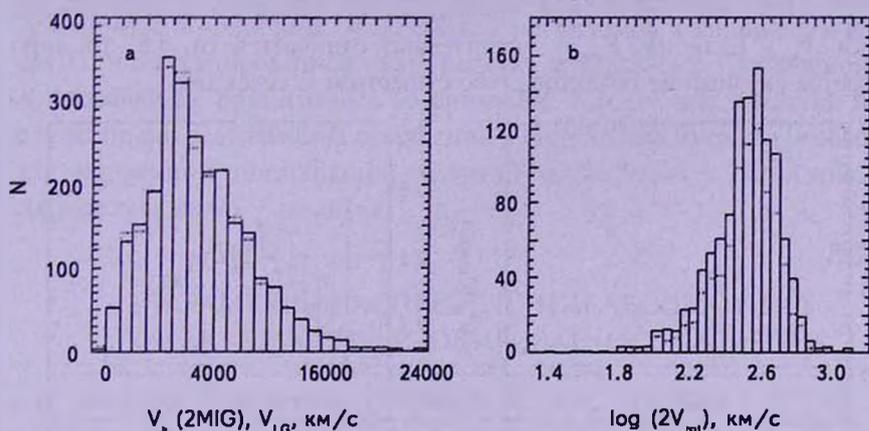


Рис.4. Распределения 2MIG-галактик: а) по радиальным скоростям V_r (сплошная линия) и V_{LG} (пунктирная линия); б) по $\log(2V_{rot})$: все - сплошная линия, галактики с углом наклона $i \geq 50^\circ$ - пунктирная линия.

Распределение 1106 2MIG-галактик по логарифму удвоенной скорости вращения, $\log(2V_{rot})$, приведено на рис.4б (сплошная линия). На этом же рисунке приведено распределение по $\log(2V_{rot})$ 814 галактик, для которых угол наклона больше $i \geq 50^\circ$ (пунктирная линия). Характеристики обоих распределений приведены в строках 11 и 12 табл.1. Видно, что они мало отличаются.

3. *Полнота каталога 2MIG.* Для исследования полноты каталога 2MIG мы применили тест "число галактик - видимая величина" для нескорректированных величин K_s в предположении об однородном 3D-распределении галактик, $\log N(K_s) = 0.6 K_s + \text{const}$, для всех 3227 галактик каталога. Полученная зависимость представлена на рис. 5 сплошной линией. Прямая с коротким штрихом имеет наклон 0.6 и произвольный нуль-пункт. Видно, что выборка 2MIG каталога является приближенно полной в интервале пяти величин K_s , от $6^m.5$ до $11^m.5$.

Мы проверили также полноту выборки $N = 3070$, используя скорректированные величины K_s^{corr} . Выборка $N = 3070$ оказалась полной примерно в тех же пределах величин. Загиб зависимости $\log N(K_s)$ в области $K_s = 11^m - 12^m$ обусловлен не только ограничением каталога 2MIG по K_s -величине, но также и тем обстоятельством, что в каталог 2MASS

XSC не включались компактные объекты с диаметрами $a_K = 2r_{20\%} < 10''$.

Для проверки однородности и полноты каталога мы используем также тест Шмидта [17]. Для этого вычисляется среднее значение величины V/V_{max} , где V - объем, определяемый расстоянием до данного объекта, а V_{max} - максимальный объем рассматриваемой выборки. При равномерном распределении галактик в пространстве и отсутствии селекции в каталоге $\langle V/V_{max} \rangle = 0.5$, где усреднение проводится по объектам внутри объема выборки V_{max} . Если $\langle V/V_{max} \rangle$ значительно отличается от 0.5, то либо сказывается скупивание объектов, либо существенна селекция.

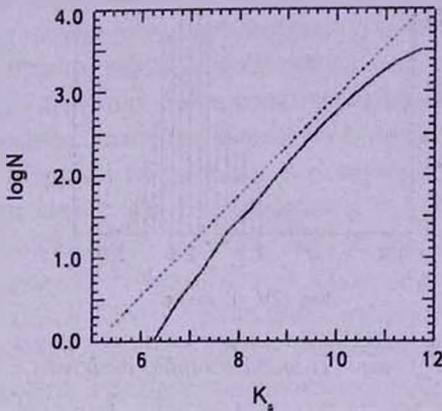


Рис.5. Зависимость "логарифм числа - звездная величина" для галактик каталога 2MIG по нескорректированной величине K_s .

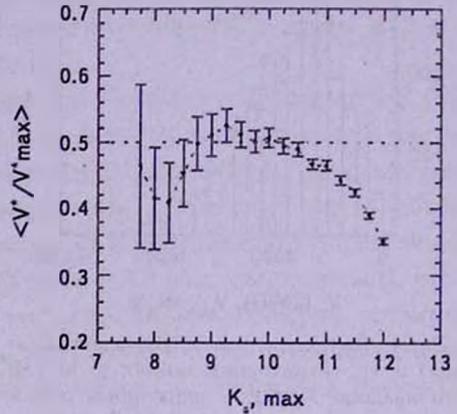


Рис.6. Тест Шмидта на полноту и однородность каталога 2MIG по нескорректированной величине K_s .

В грубом приближении меры расстояния до объекта мы используем звездную величину K_s , предполагая, что все объекты имеют одинаковую абсолютную светимость. Тогда

$$V/V_{max} = (r/r_{max})^3 = \text{dex}[0.6 \cdot (K_s - K_{s,max})]. \quad (5)$$

Для минимизации влияния существенной неоднородности распределения близких объектов мы их исключаем, начиная проводить усреднение с некоторого минимального объема (обозначая $V^* = V - V_{min}$), в нашем случае - начиная с некоторого минимального значения $K_{s,min}$.

На рис.6 представлена зависимость $\langle V^*/V_{max}^* \rangle$ от $K_{s,max}$ для всех 3227 галактик каталога 2MIG (при этом принималось $K_{s,min} = 7^m.0$). Если принять, следуя [15], показатель полноты $\langle V^*/V_{max}^* \rangle = 0.41$, то получается, что каталог 2MIG полон примерно на 80% до $K_s = 11^m.5$. Это примерно эквивалентно полноте 80-90% до $m = 15^m.2$ каталога изолированных галактик КИГ [8].

4. *Распределения основных абсолютных характеристик.* Для вычисления абсолютных характеристик 2MIG-галактик мы используем оценки расстояния d в Мпк в соответствии с линейной хаббловской

зависимостью $d = V_{LD}/H_0$ при $H_0 = \text{км/с/Мпк}$. В соответствующих строках табл.2 представлены параметры распределений абсолютных величин M_B и M_K в B - и K -фильтрах, линейных диаметров A (в кпк) и их логарифмов, логарифмов индикативных масс M_{25} , звездных масс M_* и водородных масс M_{III} (все массы в единицах массы Солнца). Абсолютная величина M_B взята из базы данных HyperLEDA. Там имеются данные для 2301 2MIG-галактики. Абсолютная K -величина определялась по видимой величине из каталога 2MIG, скорректированной, как указано в разделе 2. Эволюционная и K -поправки не принимались во внимание. Не для всех галактик из 2494 с известными радиальными скоростями в HyperLEDA имеются необходимые для коррекций поглощения, поэтому подвыборка с известными M_K сократилась до 2487 галактик.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ АБСОЛЮТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛИРОВАННЫХ ГАЛАКТИК

Выборка	Величина	Среднее	Min	Max	σ
$N = 2301$	M_B	-20.44	-23.84	-14.15	0.98
$N = 2487$	M_K	-23.71	-26.62	-16.76	1.18
$N = 1706$	$\log A$	1.44	0.23	1.99	0.22
$N = 1706$	A	30.9	1.68	97.2	13.7
$N = 978$	$\log M_{25}$	10.89	8.12	12.51	0.55
$N = 2487$	$\log M_*$	10.80	8.01	11.96	0.47
$N = 977$	$\log M_{III}$	9.70	7.15	11.21	0.50

Распределения 2MIG-галактик по M_B и M_K представлены на рис.7а и 7б.

Логарифм оптического линейного диаметра A вычислялся по величине логарифма скорректированного углового диаметра из HyperLEDA. Гистограмма распределения по $\log A$ представлена на рис.7с. Индикативную (полную) массу галактики в пределах изофоты 25 mag/arcsec^2 вычисляем обычным образом (см., например, [19]) по скорости вращения V_{rot} и величине скорректированного углового диаметра из HyperLEDA. Массу нейтрального водорода определяем по величине f радиопотока [19], связывая его со скорректированной радиовеличиной $m_{21c} = -2.5 \log f + 17.40$ из HyperLEDA. Гистограмма распределения по $\log M_{III}$ приведена на рис.7д. Для вычисления звездной массы M_* мы принимаем, что $M_*/L_K = 1 \cdot M_{\odot}/L_{K,\odot}$ [20]. Здесь и далее при переходе от абсолютных величин к светимостям мы используем значения $M_{K,\odot} = 3^m.28$ и $M_{B,\odot} = 5^m.40$.

Как нетрудно получить из данных табл.2, среднее значение отношения индикативной массе к звездной массе равно 1.2, а среднее значение отношения массы нейтрального водорода к звездной массе для галактик каталога 2MIG составляет $\sim 1/12$.

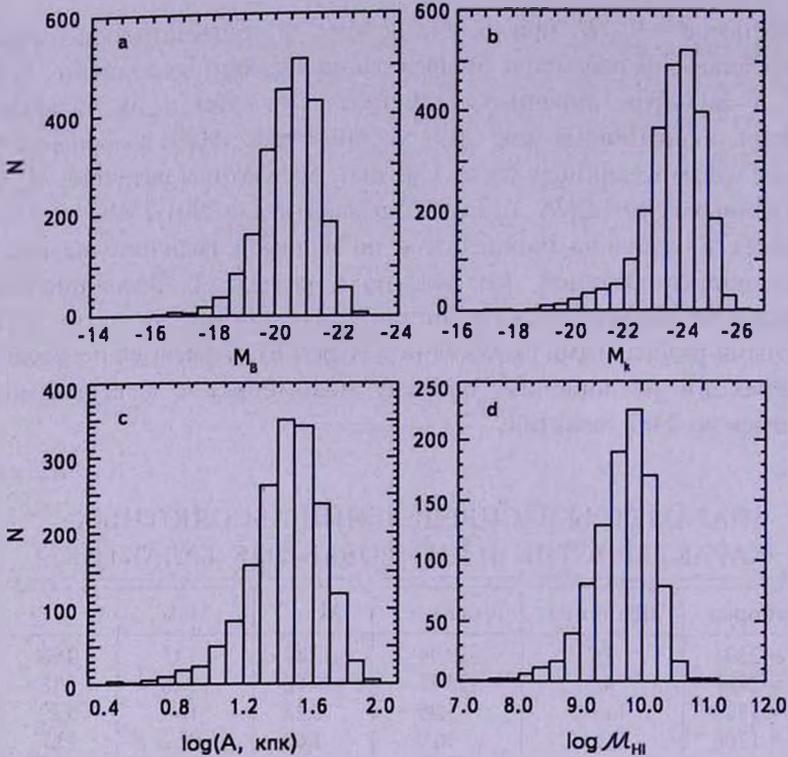


Рис.7. Распределение 2MIG-галактик: а) по абсолютным B -величинам; б) по абсолютным K_s -величинам; в) по логарифмам линейных диаметров; д) по водородным массам.

5. *Некоторые двумерные распределения.* Параметры прямых и обратных регрессий, полученных методом наименьших квадратов (МНК),

Таблица 3

ПАРАМЕТРЫ ЛИНЕЙНЫХ МНК-РЕГРЕССИЙ $y = k \cdot x + b$ ДЛЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛИРОВАННЫХ ГАЛАКТИК

n	N	y	x	ρ	σ	$k \pm \Delta k$	$b \pm \Delta b$
1	1620	M_B	$\log A$	-0.853	0.506	-3.86 ± 0.06	-14.96 ± 0.09
		$\log A$	M_B				
2	1706	M_K	$\log A$	-0.826	0.705	-4.70 ± 0.08	-16.84 ± 0.11
		$\log A$	M_K				
3	921	M_B	$\log(M_{25})$	-0.761	0.643	-1.42 ± 0.04	-5.1 ± 0.4
		$\log(M_{25})$	M_B				
4	978	$\log(M_{25})$	$\log(M_*)$	0.814	0.319	0.81 ± 0.02	2.24 ± 0.20
		$\log(M_*)$	$\log(M_{25})$				
5	978	$\log(M_{25})$	$\log A$	0.842	0.296	1.99 ± 0.04	8.07 ± 0.06
		$\log A$	$\log(M_{25})$				
6	978	$\log A$	$\log(2 \cdot V_{rot})$	0.612	0.184	0.76 ± 0.03	-0.49 ± 0.08
		$\log(2 \cdot V_{rot})$	$\log A$				
7	1041	M_B	$\log(2 \cdot V_{rot})$	-0.549	0.838	-2.96 ± 0.14	-13.0 ± 0.4
		$\log(2 \cdot V_{rot})$	M_B				

для всех рассмотренных зависимостей даны в табл.3. Здесь ρ - коэффициент корреляции, σ - стандартное отклонение от линии регрессии. Массы M_{25} , M_* выражены в массах Солнца, линейный диаметр - в кпк, скорость вращения - в км/с. Зависимости водородной массы от других глобальных характеристик будут представлены в следующем разделе.

Как видно из табл.3, наиболее скоррелированы из рассмотренных здесь величин - абсолютная B -величина (M_B) с логарифмом линейного диаметра, наименее - M_B с логарифмом скорости вращения. В строке 7 представлен вариант зависимости Талли-Фишера.

В табл.4 представлены параметры ортогональных регрессий для пар величин из табл.3 как для полных выборок (Все), так и для трех подвыборок: ранних галактик типов E, S0, Sa, Sab; галактик средних типов Sb, Sbc; галактик поздних типов от Sc до Im. Тип взят из каталога 2MIG. Обозначения те же, что и в табл.3.

Линия ортогональной регрессии совпадает с большим диаметром эллипса, полученного в предположении двумерного гауссового распределения точек в плоскости пар выбранных характеристик со средними значениями, дисперсиями и коэффициентом корреляции, определяемых по данному распределению. Логарифмическая функция максимального правдоподобия для этого случая: $l = -\frac{N}{2} \{1 + \ln(2\pi M_1/N)\}$, где N - количество точек корреляционного поля зависимости и $M_1 \equiv N \sigma_r^2 = \sum_i (\Delta s_i)^2$. Мерой расстояния между точками есть $\Delta s^2 = (\Delta x/m_x)^2 + (\Delta y/m_y)^2$, где m_x, m_y - масштабы по осям. Параметры ортогональных регрессий вычислены при отношении масштабов $\xi \equiv m_x/m_y$, указанных в табл.4.

Таблица 4

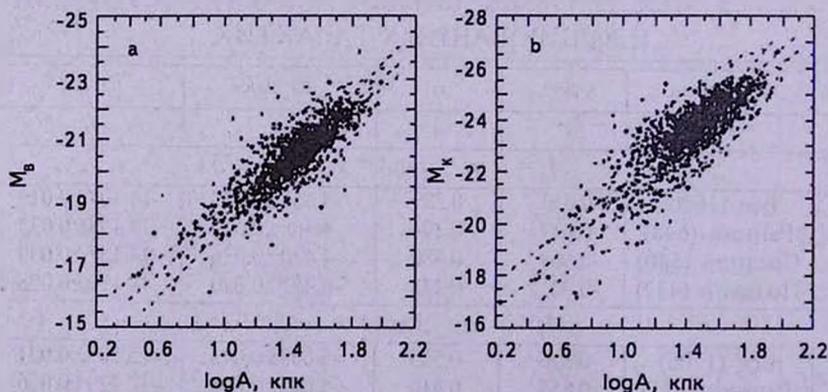
ПАРАМЕТРЫ ЛИНЕЙНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РЕГРЕССИЙ
 $y = k \cdot x + b$ МЕЖДУ ГЛОБАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ
 ИЗОЛИРОВАННЫХ ГАЛАКТИК

n	Выборка	ρ	σ	$k \pm \Delta k$	$b \pm \Delta b$
1	2	3	4	5	6
$M_B = y$ от $\log A = x$ ($\xi = 1/5$)					
1	Все (1620)	-0.853	0.389	-4.452 \pm 0.013	-14.107 \pm 0.019
	Ранний (648)	-0.819	0.394	-4.368 \pm 0.023	-14.138 \pm 0.033
	Средний (540)	-0.818	0.380	-4.470 \pm 0.026	-14.157 \pm 0.039
	Поздний (432)	-0.901	0.378	-4.421 \pm 0.020	-14.190 \pm 0.028
$M_* = y$ от $\log A = x$ ($\xi = 1/6$)					
2	Все (1706)	-0.826	0.535	-5.623 \pm 0.015	-15.503 \pm 0.021
	Ранний (671)	-0.853	0.410	-4.678 \pm 0.018	-17.229 \pm 0.026
	Средний (569)	-0.804	0.447	-4.663 \pm 0.023	-16.907 \pm 0.034
	Поздний (466)	-0.885	0.532	-5.899 \pm 0.023	-14.625 \pm 0.033

Таблица 4 (окончание)

1	2	3	4	5	6
$M_B = y$ от $\log M_{25} = x$ ($\xi = 5/9$)					
3	Все (921)	-0.761	0.476	-1.880 ± 0.027	-0.02 ± 0.30
	Ранний (217)	-0.639	0.568	-1.609 ± 0.065	-2.85 ± 0.70
	Средний (361)	-0.701	0.473	-1.800 ± 0.049	-0.95 ± 0.54
	Поздний (343)	-0.850	0.392	-2.040 ± 0.036	1.67 ± 0.39
$\log M_{25} = y$ от $\log M_c = x$ ($\xi = 1$)					
4	Все (978)	0.814	0.236	1.000 ± 0.022	0.27 ± 0.23
	Ранний (225)	0.770	0.240	1.289 ± 0.067	-3.00 ± 0.72
	Средний (381)	0.737	0.215	1.348 ± 0.059	-3.55 ± 0.63
	Поздний (372)	0.886	0.200	0.893 ± 0.024	1.48 ± 0.24
$\log M_{25} = y$ от $\log A = x$ ($\xi = 2/5$)					
5	Все (978)	0.842	0.224	2.333 ± 0.018	7.580 ± 0.026
	Ранний (225)	0.778	0.262	2.513 ± 0.051	7.385 ± 0.071
	Средний (381)	0.781	0.224	2.452 ± 0.038	7.407 ± 0.056
	Поздний (372)	0.899	0.190	2.163 ± 0.021	7.777 ± 0.029
$\log A = x$ от $\log(2 V_{rot}) = y$ ($\xi = 1$)					
6	Все (978)	0.612	0.128	1.42 ± 0.05	-2.14 ± 0.13
	Ранний (225)	0.518	0.148	1.17 ± 0.11	-1.56 ± 0.27
	Средний (381)	0.515	0.127	1.29 ± 0.09	-1.67 ± 0.22
	Поздний (372)	0.713	0.109	1.69 ± 0.08	-2.78 ± 0.20
$M_B = y$ от $\log(2 V_{rot}) = x$ ($\xi = 2/9$)					
7	Все (1041)	-0.549	0.606	-6.22 ± 0.06	-4.81 ± 0.14
	Ранний (255)	-0.387	0.711	-4.07 ± 0.10	-10.06 ± 0.26
	Средний (405)	-0.499	0.597	-5.88 ± 0.09	-5.75 ± 0.24
	Поздний (381)	-0.676	0.495	-7.55 ± 0.09	-1.62 ± 0.21

На приводимых ниже графиках зависимостей (рис.8-11) мы обозначаем линию ортогональной регрессии (жирная штриховая линия), эллипсы уровней функции максимального правдоподобия, соответствующие

Рис.8. Зависимости: а) M_B от $\log A$; б) M_K от $\log A$.

вероятности 95%, а также линии прямой и обратной МНК-регрессий (тонкие штриховые линии), которые соединяют крайние точки указанного эллипса вдоль осей абсцисс и ординат соответственно.

Соотношение между M_B и $\log A$ для полной выборки $N=1620$ представлено на рис.8а. Отметим следующие особенности этих распределений для полной выборки и подвыборок: коэффициент корреляции имеет наибольшее значение для выборки поздних типов галактик, $\rho = 0.90$, по сравнению с выборками ранних и средних типов, $\rho = 0.82$. Величина наклона ортогональной зависимости мало зависит от морфологического типа. Для ортогональной регрессии степенная зависимость L_B от A у разных выборок имеет показатель в диапазоне $p = -0.4 k = (1.75 \div 1.79)$. Отсюда, в частности, следует, что средняя поверхностная яркость в B -полосе слабо падает с ростом светимости галактики.

На рис.8б представлено соотношение между M_K и $\log A$ для полной выборки $N=1706$. Коэффициент корреляции для этого соотношения получился наибольшим для подвыборки галактик поздних типов. Дисперсия относительно линии ортогональной регрессии возрастает от ранних типов к поздним, что может быть вызвано ненадежной фотометрией периферийных областей галактик без балджей. Наклон ортогональной зависимости - наибольший у поздних типов, а у средних и ранних типов галактик наклоны неразличимы. Показатель степенной зависимости L_K от A лежит в диапазоне $p = (1.87 \div 2.36)$ для ранних, средних и поздних типов, в среднем ($p=2.25$) показывая слабый рост поверхностной яркости с увеличением ИК-светимости галактики.

Зависимость между $\log M_{25}$ и $\log M_*$ для полной выборки $N=978$ представлена на рис.9а. Сплошной линией обозначена диагональ. Для 152 галактик из 978 (15.5%) звездная масса M_* оказалась больше индикативной массы M_{25} (точки лежат ниже диагонали). По-видимому, это объекты низкой поверхностной яркости, для которых значительная доля звезд находится вне изофоты 25 mag/arcsec^2 .

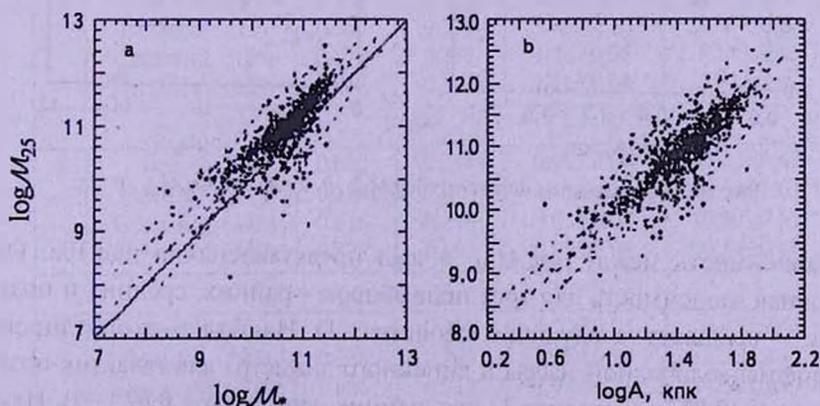


Рис.9. Зависимости между а) $\log M_{25}$ и $\log M_*$; б) $\log M_{25}$ и $\log A$.

В среднем для выборки индикативная масса оказывается в 1.8 раза больше звездной. Наиболее тесная корреляция между M_{25} и M имеет место для галактик поздних типов ($\rho = 0.89$). Хотя в целом для 2MIG-галактик мы получили простую пропорциональность между M_{25} и M ($k = 1.0$), но для поздних галактик наклон наименьший ($k = 0.89$) и для двух остальных подвыборок он малоразличим ($k \approx 1.3$).

Зависимость $\log M_{25}$ от $\log A$ для полной выборки $N = 978$ представлена на рис.9б. Как следует из данных табл.4, коэффициент корреляции между индикативной массой и линейным диаметром 2MIG галактик возрастает от ранних типов к поздним, а наклон ортогональной регрессии уменьшается в сторону поздних типов. Средний наклон ортогональной регрессии, $k = 2.33 \pm 0.02$, показывает, что средняя поверхностная плотность массы растет, а средняя объемная плотность падает с увеличением линейного размера галактик.

6. *Оптические и инфракрасные корреляторы водородной массы.* Рассмотрим корреляции водородной массы с другими глобальными характеристиками изолированных галактик: линейным диаметром, скоростью вращения, B -светимостью, индикативной и звездной массами. В табл.5 представлены параметры линейных ортогональных регрессий $y = k \cdot x + b$ между логарифмом водородной массы и вышесказанными характеристиками для четырех выборок Все, Ранний, Средний, Поздний. Ортогональные регрессии вычислялись при отношениях масштабов ξ , указанных в табл.5.

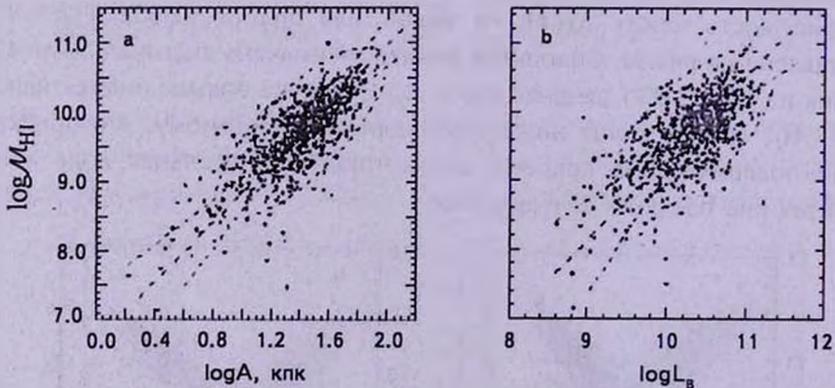


Рис.10. Зависимости между а) $\log M_{HI}$ и $\log A$; б) $\log M_{HI}$ и L_B .

Зависимость между $\log M_{HI}$ и $\log A$ представлена на рис.10а. Ортогональная зависимость для трех подвыборок - ранних, средних и поздних типов - выявляет следующие свойства. 1) Наиболее скоррелированы логарифмы водородной массы и линейного диаметра для галактик поздних типов ($\rho = 0.86$), наименее - для ранних типов ($\rho = 0.62$). 2) Наклон линии ортогональной регрессии систематически убывает от ранних типов

к поздним. 3) Выборки галактик с доминирующим диском (Средний + Поздний) характеризуются постоянством средней поверхностной плотности водородной массы независимо от размеров галактики. Отметим также, что логарифм линейного диаметра галактики оказался наилучшим из всех шести рассмотренных здесь корреляторов водородной массы по значению коэффициента корреляции ($\rho = 0.76$) для всей выборки.

Зависимость между $\log M_{HI}$ и $\log L_g$, представленная на рис.10b, показывает следующие свойства. 1) Наилучшая корреляция ($\rho = 0.77$)

Таблица 5

ПАРАМЕТРЫ ЛИНЕЙНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РЕГРЕССИЙ
МЕЖДУ ЛОГАРИФМОМ ВОДОРОДНОЙ МАССЫ И ДРУГИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

<i>n</i>	Выборка	ρ	σ	$k \pm \Delta k$	$b \pm \Delta b$
$\log M_{HI} = y, \quad \log A = x \quad (\xi = 22/45)$					
1	Все (877)	0.761	0.241	2.15 ± 0.03	6.68 ± 0.04
	Ранний (211)	0.617	0.303	2.77 ± 0.11	5.71 ± 0.15
	Средний (326)	0.728	0.212	2.08 ± 0.05	6.80 ± 0.07
	Поздний (340)	0.855	0.201	1.96 ± 0.03	7.00 ± 0.04
$\log M_{HI} = y, \quad \log L_g = x \quad (\xi = 8/9)$					
2	Все (916)	0.651	0.279	1.19 ± 0.04	-2.6 ± 0.4
	Ранний (232)	0.481	0.321	1.79 ± 0.16	-8.9 ± 1.6
	Средний (344)	0.621	0.262	1.15 ± 0.06	-2.2 ± 0.6
	Поздний (340)	0.765	0.240	1.07 ± 0.04	-1.3 ± 0.4
$\log M_{HI} = y, \quad \log(2V_{rot}) = x \quad (\xi = 4/9)$					
3	Все (974)	0.514	0.321	2.95 ± 0.06	2.34 ± 0.15
	Ранний (242)	0.382	0.390	3.02 ± 0.16	1.98 ± 0.40
	Средний (362)	0.421	0.310	2.71 ± 0.11	2.94 ± 0.27
	Поздний (370)	0.679	0.257	3.05 ± 0.07	2.20 ± 0.17
$\log M_{HI} = y, \quad \log(V_{rot}A) = x \quad (\xi = 7/9)$					
4	Все (876)	0.732	0.257	1.33 ± 0.03	4.91 ± 0.11
	Ранний (211)	0.580	0.329	1.61 ± 0.10	3.76 ± 0.38
	Средний (326)	0.679	0.233	1.26 ± 0.05	5.17 ± 0.20
	Поздний (339)	0.856	0.198	1.26 ± 0.03	5.23 ± 0.11
$\log M_{HI} = y, \quad \log M_{25} = x \quad (\xi = 4/3)$					
5	Все (876)	0.685	0.254	0.99 ± 0.04	-1.03 ± 0.47
	Ранний (211)	0.527	0.320	1.21 ± 0.15	-3.65 ± 1.67
	Средний (326)	0.615	0.235	0.93 ± 0.08	-0.39 ± 0.85
	Поздний (339)	0.829	0.193	0.93 ± 0.04	-0.34 ± 0.47
$\log M_{HI} = y, \quad \log M_c = x \quad (\xi = 4/3)$					
6	Все (977)	0.643	0.268	1.00 ± 0.04	-0.95 ± 0.48
	Ранний (242)	0.538	0.263	1.66 ± 0.20	-8.30 ± 2.13
	Средний (362)	0.606	0.212	1.34 ± 0.11	-4.59 ± 1.19
	Поздний (373)	0.798	0.220	0.84 ± 0.04	0.98 ± 0.43

этих характеристик отмечена для поздних типов. 2) Наклон ортогональной регрессии систематически уменьшается от ранних типов к поздним. 3) Рассеяние галактик относительно ортогональной регрессии систематически уменьшается при переходе от ранних типов к поздним. 4) Средние значения как светимостей, так и водородных масс имеют максимум для галактик средних типов.

Для зависимости между $\log M_{\text{HI}}$ и $\log(2V_{\text{rot}})$ коэффициент корреляции наихудший ($\rho = 0.51$). Причина слабой корреляции между количеством газа и амплитудой его вращения у галактик с развитыми балджами выглядит не вполне очевидной.

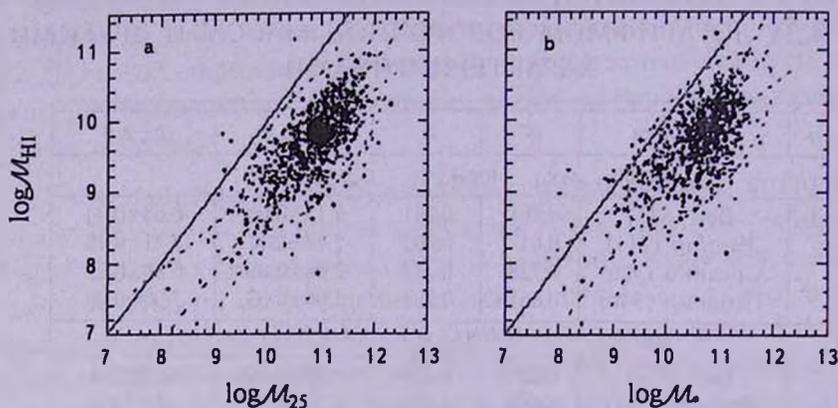


Рис.11. Зависимости между: а) $\log M_{\text{HI}}$ и $\log M_{25}$; б) $\log M_{\text{HI}}$ и $\log M$.

Зависимость между $\log M_{\text{HI}}$ и $\log M_{25}$ представлена на рис.11а. Сплошная линия на рис.11а - диагональ. Как видим, водородная и динамическая (индикативная) массы следуют почти линейной зависимости. Для пяти галактик оценка индикативной массы оказалась меньше оценки водородной массы. Разнице между средними значениями ($\langle \log M_{25}/M_{\odot} \rangle = 10.86$ и $\langle \log M_{\text{HI}}/M_{\odot} \rangle = 9.70$) соответствует 7% части массы нейтрального водорода от массы M_{25} . При этом у карликовых галактик с массой $M_{25} = 10^8 M_{\odot}$ доля водорода в три раза больше, чем у галактик с массой $10^{12} M_{\odot}$.

Зависимость между $\log M_{\text{HI}}$ и $\log M$ представлена на рис.11б. Для 20 галактик водородная масса больше звездной (они находятся выше диагонали - сплошной линии), для двух из них водородная масса оказалась также больше индикативной, что подсказывает возможную ошибочность данных о водородных потоках этих галактик.

Разнице между средними значениями логарифмов масс ($\langle \log M/M_{\odot} \rangle = 10.61$ и $\langle \log M_{\text{HI}}/M_{\odot} \rangle = 9.70$) во всей выборке соответствует 11% доли водорода от суммы масс звездной и водородной компоненты. Наклон ортогональной регрессии систематически уменьшается

от ранних типов к поздним, причем это изменение оказывается значимым на уровне $\sim 10\sigma$.

7. *Заключительные замечания.* Исследованию масштабных соотношений между глобальными параметрами галактик: светимостью, размером, амплитудой вращения, массой нейтрального водорода и т.д. посвящено большое количество работ, в том числе [4,20-24]. Данные различных авторов о параметрах масштабных соотношений нередко существенно расходятся. Причинами таких различий могут быть: а) эффекты селекции при формировании выборки галактик в зависимости от их окружения (члены скоплений, галактики поля); б) использование различных фотометрических полос (B, g, i, K) или систем размеров галактик (R_{25}, R_{90}, R_{90}); в) различия в морфологическом составе выборок и ошибки классификации, возрастающие с расстоянием до галактик; г) учет или игнорирование карликовых галактик из близкого объема, где лучевая скорость является ненадежным индикатором расстояния; д) использование ортогональной или МНК-регрессий, расхождения между которыми возрастают с уменьшением коэффициента корреляции; е) учет или игнорирование статистических весов, пропорциональных светимости или массе галактик, а также другие факторы.

В настоящей работе мы отмечаем следующие закономерности, которые характеризуют масштабные соотношения параметров у изолированных галактик каталога 2MIG [10].

1) Соотношение между B -светимостью и стандартным изофотным диаметром $A \equiv A_{25}$ галактик таково, что их средняя поверхностная яркость слабо уменьшается с ростом размера галактики как $\sim A^{-0.2}$, независимо от ее морфологического типа. Однако в K -полосе (при $M_* / L_K = 1 \cdot M_\odot / L_{K,\odot}$) средняя поверхностная плотность звездной массы падает с размером галактики ($\sim A^{-0.17}$) только у морфологических типов E-Sb, а у Sc-, Sd-галактик растет как $\sim A^{0.25}$.

2) Отношение индикативной массы галактики к ее синей светимости, M_{25}/L_B , слабо растет с ростом светимости как $\sim (L_B)^{0.25}$, причем для галактик и ранних, и поздних типов.

3) В среднем индикативная (динамическая) масса галактики пропорциональна ее звездной массе, $M_{25}/M_* \approx \text{const}$, хотя у галактик ранних типов это отношение слабо растет с ростом звездной массы (т.е. K -светимости).

4) Динамическая масса галактики M_{25} в пределах стандартной изофоты зависит от ее диаметра как $\sim A^{2.3}$. Отметим, что в стандартной космологической модели полная масса темного гало пропорциональна кубу его линейного размера, т.е. средняя плотность темного гало M_{tot}/A^3 предполагается примерно одинаковой как для мелких, так и для массивных гало.

5) Корреляция между амплитудой вращения и диаметром для всех галактик нашей выборки имеет вид $V_{\text{rot}} \sim A^{0.70}$, причем показатель степени

заметно меньше (0.59) у галактик поздних типов, не имеющих балджей. Отметим, что для темных гало ожидаемое соотношение должно быть линейным, $V_{rot}/A = \text{const}$. Интересно, что именно такое линейное соотношение мы получили ранее для плоских спиральных галактик, видимых с ребра [25].

6) Если исключить галактики с развитыми балджами (E, S0, Sa), то изолированные галактики типов Sb, Sc, Sd демонстрируют постоянство средней поверхностной плотности водородной массы, $M_{HI}/A^2 = \text{const}$ - закономерность, установленная в [20,21].

7) Отношение водородной массы к синей светимости показывает слабый рост $M_{HI}/L_B \sim (L_B)^{0.2}$ для всех морфологических типов. Эта тенденция не распространяется на карликовые галактики, относительное число которых в нашей выборке составляет всего 2%.

8) Масса водорода и амплитуда вращения следуют зависимости $M_{HI} \sim (V_{rot})^3$, причем коэффициент корреляции увеличивается с 0.38 до 0.68 при переходе от ранних типов к поздним.

9) В целом для выборки 2MIG-галактик выполняются соотношения $M_{HI}/M_{25} = \text{const}$ и $M_{HI}/M_* = \text{const}$. Однако для галактик ранних типов эти зависимости оказываются более крутыми, чем для поздних.

Поскольку изолированные галактики нашей выборки располагаются в областях экстремально низкой плотности материи, мы можем полагать, что эволюционные эффекты слияния галактик мало влияли на характер обнаруженных корреляций между глобальными параметрами 2MIG- галактик.

В работе были использованы сведения из баз данных HyperLEDA (<http://leda.univ-lyon1.fr>) и NED (<http://nedwww.ipac.caltech.edu>), обзоры неба DSS-1, DSS-2 (<http://archive.eso.org/dss/dss>), SDSS (<http://www.sdss.org>). Работа частично поддержана грантами РФФИ 11-02-90449-Укр-ф-а и Государственного фонда фундаментальных исследований Украины (проект Ф040.2/049).

¹ Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко, Украина, e-mail: yukudrya@ukr.net

² Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Украина, e-mail: valkarach@gmail.com

³ Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия, e-mail: ikar@sao.ru

OPTICAL AND HI PROPERTIES OF ISOLATED GALAXIES FROM 2MIG CATALOG. I. GENERAL RELATIONS

YU.N.KUDRYA¹, V.E.KARACHENTSEVA², I.D.KARACHENTSEV³

We analyze empirical relations for optical, NIR and HI properties of isolated galaxies from the 2MIG catalog, which covers the entire sky. Data on morphological types, K_i and B magnitudes, linear diameters, HI masses and rotational velocities are considered. We calculate regression parameters, dispersions and correlation coefficients for pairs of the properties. The derived relations can be used to verify the hierarchical theory of galaxy formation through numerous mergers of cold dark matter.

Key words: galaxies: isolated galaxies: general properties.

ЛИТЕРАТУРА

1. *D.J.Croton*, In: "Galaxies in Isolation: Nature versus Nurture". ASP Conf. Ser., 421, 35, 2010.
2. *S.S.Allam, D.L.Tucker, B.C.Lee, J.A.Smith*, *Astron. J.*, 129, 2062, 2005.
3. *H.M.Hernandes-Toledo, J.A.Vazquez-Mata, L.A.Martinez-Vazquez et al.*, astro-ph 0807.0243.
4. *M.C.Toribio, J.V.Solanes, R.Giovanelli et al.*, astro-ph 1103.0990.
5. *F.M.Reda, D.A.Forbes, M.A.Beasley et al.*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 354, 851, 2004.
6. *В.Е.Караченцева, И.Д.Караченцев, М.Е.Шарипа*, *Астрофизика*, 53, 513, 2010.
7. *J.Sabaier, S.Leon, L.Verdes-Montenegro et al.*, *Astron. Astrophys.*, 486, 73, 2008.
8. *В.Е.Караченцева*, *Сообщения САО*, вып. 8, 3, 1973.
9. *F.Zwicky, E.Herzog, P.Wild et al.*, *Catalogue of galaxies and of clusters of Galaxies*, v. I-YI, California Institute of Technology, 1961-1968.
10. *В.Е.Караченцева, С.Н.Митронова, О.В.Мельник, И.Д.Караченцев*, *Бюлл. Спец. Астрофиз. Обс. САО РАН*, 65, 1, 2010 (<ftp://cdsarc.u-strasb.fr/pub/cats/Y11/257>)
11. *M.F.Skrutskie, S.E.Schneider, R.Steining et al*, In: *The Impact of Large Scale Near-IR SkySurveys*, ed. F.Garzon et al. (Netherlands: Kluwer), ASSL, 210, 25, 1997.
12. *T.N.Jarrett, T.Chester, R.M.Cutri et al.*, *Astron. J.* 119, 2498, 2000.
13. *D.J.Schlegel, D.P.Finkbeier, M.Davis*, *Astrophys. J.*, 500, 525, 1998.
14. *I.D.Karachentsev, D.I.Makarov*, *Astron. J.*, 111, 794, 1996.
15. *L.Verdes-Montenegro, J.Sulentic, U.Lisenfeld et al.*, *Astron. Astrophys.*,

436, 443, 2005.

16. *M.C.Toribio, J.M.Solanes, R.Giovanelli, M.P.Haynes*, astro-ph/1103.0900.
17. *M.Schmidt*, *Astrophys. J.*, **151**, 393, 1968.
18. *В.Е.Караченцева*, *Астрон. ж.*, **57**, 1153, 1980.
19. *I.D.Karachentsev, V.E.Karachentseva, W.K.Huchtmeier, D.I.Makarov*, *Astron. J.*, **127**, 2031, 2004.
20. *I.D.Karachentsev, A.M.Kut'kin*, *Astron. Lett.*, **31**, 299, 2005
21. *M.S.Roberts, M.P.Haynes*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **32**, 115, 1994.
22. *M.P.Haynes, R.Giovanelli*, *Astron. J.*, **89**, 758, 1984.
23. *E.E.Salpeter, G.L.Hoffman*, *Astrophys. J.*, **465**, 595, 1996.
24. *M.J.Disney, J.D.Romano, D.A.Garcia-Appadoo et al.*, *Nature*, **455**, 1082, 2008.
25. *И.Д.Караченцев, В.Е.Караченцева, Ю.Н.Кудря*, *Письма в Астрон. ж.*, **25**, 3, 1999.