

УДК: 524.74

ОЦЕНКА ФУНКЦИИ СВЕТИМОСТИ ГАЛАКТИК ТИПА M 51

С.А.КЛИМАНОВ

Поступила 8 января 2003

Принята к печати 25 февраля 2003

По новой выборке галактик типа M51, состоящей из 46 систем, произведена оценка функции светимости в цветовой полосе B . Для главных компонентов систем функция светимости может быть описана функцией Шехтера с параметрами $\phi_* = (1.4 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ Мпк}^{-3}$, $\alpha = -1.3^{+0.4}_{-0.3}$, $M_* = -20.3^{+0.2}_{-0.1}$. Значения последних двух параметров сравнимы с соответствующими значениями для изолированных пар галактик. Полученная оценка средней плотности галактик типа M51 составляет $(4 \pm 3)\%$ по сравнению со средней плотностью изолированных пар в диапазоне светимостей $-22^m.0 < M < -16^m.0$.

1. *Введение.* Галактики типа M51 представляют собой двойные системы, состоящие из большой спиральной галактики и относительно небольшого спутника, находящегося вблизи конца спиральной ветви главного компонента. Впервые подробно эти объекты были описаны Воронцовым-Вельяминовым [1] и Арпом [2]. Большая выборка галактик типа M51 [3] содержит примерно 160 систем. Выборка этих объектов, содержащая 32 системы, была составлена Климановым и Решетниковым [4]. В работе были рассмотрены различные характеристики галактик типа M51, в том числе была сделана попытка построить функцию светимости главных компонентов.

Основной целью данной работы является увеличение объема выборки [4] путем поиска новых систем в существующих каталогах двойных галактик и получение оценки функции светимости (ФС) галактик типа M51, что позволяет оценить степень распространенности рассматриваемых систем среди галактик других типов.

2. *Выборка галактик типа M51.* Чтобы расширить выборку [4], были использованы каталоги двойных галактик [5] и [6]. Первый из них охватывает все северное полушарие и небольшую часть южного (до склонения $\delta = -3^\circ$) и содержит 603 кандидата в изолированные пары. Каталог имеет предельную звездную величину $m_{\text{lim}} = 15^m.7$ и, согласно автору, полон до $15^m.5$. Второй каталог является расширением первого на южную небесную полусферу (начиная со склонения $\delta = -17^\circ$). Его авторы получили существенно полную (до $14^m.5$) выборку, содержащую 301 пару.

На первом этапе поиска кандидатов в расширенную выборку галактик типа M51 было отобрано 94 пары каталога [5] и 69 пар каталога [6], которые соответствуют критериям, сформулированным в [4]. Из этих систем были исключены пары, в которых главная галактика не имеет четкой спиральной структуры или спутник не находится вблизи конца ее спиральной ветви. Таким образом, из каталога [5] было отобрано 9 пар: KPG016, KPG064, KPG168, KPG186, KPG359, KPG381, KPG472, KPG542, KPG587, а из каталога [6] 5 пар: ESO-LV 2970110, ESO-LV 2050060, ESO-LV 3820100, ESO-LV 3830640, ESO-LV 2710250 (номера по каталогу ESO-LV [7]). Добавление этих систем к базовому списку [4] дало новую выборку, содержащую 46 кандидатов в галактики типа M51. Она и была использована для нахождения их ФС.

Основные характеристики галактик были найдены следующим образом. Интегральные видимые звездные величины (B_T) были взяты из внегалактической базы данных LEDA. Для 18 спутников, у которых видимые звездные величины в базе отсутствовали, они оценивались при помощи способа, описанного в [4]. Гелиоцентрические скорости галактик, приводимые в той же базе (для 6 систем они отсутствовали), были редуцированы за движение по отношению к центроиду Местной Группы, а также за движение Местной Группы по направлению к скоплению Девы по формулам, приведенным в [8]. При этом для 12 систем гелиоцентрические скорости были взяты из [9]. Абсолютные звездные величины были исправлены за межзвездное поглощение, величина которого для каждой из галактик была взята из базы данных LEDA. Вследствие пекулярной морфологии многих галактик внутреннее поглощение не учитывалось. Для главных компонентов были учтены $K(z)$ -поправки, значения которых, соответствующим образом проинтерполированные, были взяты из [10]. Здесь и далее использована

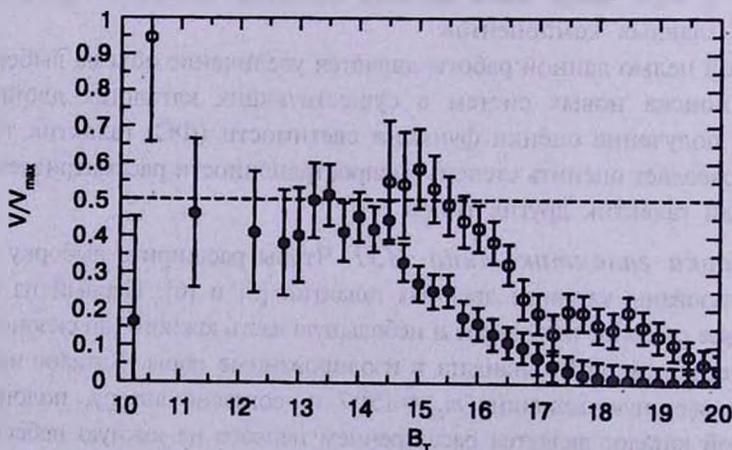


Рис.1. Результат применения $\langle V/V_{max} \rangle$ - теста к главным галактикам (закрытые кружки) и спутникам (открытые кружки) выборки. Штриховая линия соответствует однородному распределению.

величина постоянной Хаббла $H_0 = 75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$.

Полнота выборки была оценена путем использования так называемого $\langle V/V_{max} \rangle$ - теста, предложенного Шмидтом [11]. Результат применения этого теста для обоих компонентов показан на рис.1. Отношение $\langle V/V_{max} \rangle$ в случае однородного распределения объектов в евклидовом пространстве должно быть в пределах $0.5 \pm 1/\sqrt{12 \times N}$, где N - число галактик. Практически монотонное уменьшение величины $\langle V/V_{max} \rangle$, начинающееся примерно с $B_T = 14^m.0 - 14^m.5$ для главных галактик и с $B_T = 15^m.5 - 16^m.0$ для спутников, означает, что объекты теряются вследствие эффектов селекции. Полноту выборки можно оценить и другим способом - по зависимости числа галактик ярче данной видимой величины от соответствующей видимой звездной величины. Результат показан на рис.2. Видно, что отклонение от однородного распределения ($\log N \propto 0.6 B_T$) также начинается с указанных выше величин. Для них мы считаем выборку полной. Степень полноты выборки для других значений видимых звездных величин будет рассмотрена далее.

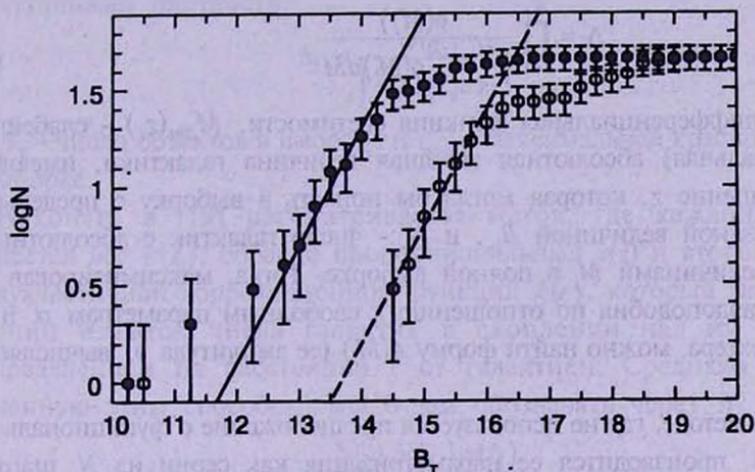


Рис.2. Интегральное распределение числа галактик в выборке по их видимой звездной величине. Закрытые кружки соответствуют главным галактикам, открытые - спутникам. Прямые линии соответствуют однородному распределению.

3. Два метода оценки ФС. Из предложенных различных способов вычисления ФС галактик ([12] и [13]) было использовано два. Первый метод, общепринятая аббревиатура которого SWML (Stepwise Maximum Likelihood), был разработан Эфстатиоу и др. [14] и основан на применении метода максимального правдоподобия. Он позволяет получить ФС, не делая предположения о какой-либо ее функциональной форме, но требует разбиения данных на интервалы (бины). Преимуществом в этом случае является независимость результатов от флуктуаций плотности, из-за чего нормализация ФС должна производиться отдельно. Другой способ, который будет обозначаться как $(1/V_{max})$ - метод, позволяет получить форму и плотность ФС одновременно, однако при этом используется предположение

об однородном распределении объектов в пространстве (см., например, [11,15]). Кроме того, применяя этот метод, можно достаточно просто учесть поправку за неполноту выборки, что будет сделано ниже.

3.1. *SWML-метод*. Этот метод основан на использовании параметрического метода вычисления ФС, предложенного Сэндиджэм и др. [16]. В литературе он обычно обозначается как STY-метод (по первым буквам фамилий авторов). В нем, для нахождения ФС, следует сделать предположение о ее параметрической форме, такой, например, как функция Шехтера [17]:

$$\phi(M) = 0.4 \ln 10 \phi_0 \cdot 10^{0.4(\alpha+1)(M.-M)} \exp(-10^{0.4(M.-M)}).$$

Считая, что светимость галактики не зависит от ее расположения, можно определить функцию правдоподобия, полученную перемножением индивидуальных вероятностей попадания галактик в полную выборку с предельной видимой звездной величиной B_{lim} :

$$\Lambda = \prod_{i=1}^{N_x} \frac{\phi(M_i)}{\int_{-\infty}^{M_{lim}(z_i)} \phi(M) dM}, \quad (1)$$

где $\phi(M)$ - дифференциальная функция светимости, $M_{lim}(z_i)$ - слабейшая (т.е. максимальная) абсолютная звездная величина галактики, имеющей красное смещение z_p , которая могла бы попасть в выборку с предельной видимой звездной величиной B_{lim} , и N_x - число галактик с абсолютными звездными величинами M_i в полной выборке. Тогда, максимизировав эту функцию правдоподобия по отношению к свободным параметрам α и M , функции Шехтера, можно найти форму $\phi(M)$ (ее амплитуда ϕ_0 вычисляется отдельно).

В SWML-методе, где не используется предположение о функциональной форме $\phi(M)$, производится ее параметризация как серии из N_p шагов:

$$\phi(M) = \phi_k, \quad M_k - \Delta M/2 < M < M_k + \Delta M/2, \quad k = 1, \dots, N_p.$$

Тогда, переписав соответствующим образом (1), из так называемого уравнения правдоподобия можно получить оценку параметров $\phi_k(M)$ (см. [14]). Их ошибки можно найти из диагональных элементов ковариационной матрицы так, как это описано в [18] и [14]. Здесь ковариационная матрица - это матрица, обратная к информационной, состоящей из вторых частиц производных функции правдоподобия.

Так как SWML-метод не дает никакой информации о нормировке ФС, среднюю плотность галактик в выборке $\langle n \rangle$ нужно находить отдельно. Это можно сделать, привлекая к рассмотрению функцию селекции $s(z)$, которая характеризует вероятность попадания галактики, имеющей красное смещение z , в рассматриваемую выборку (см., например, [19,14]).

Для вычисления средней плотности $\langle n \rangle$ было предложено несколько

способов, некоторые из которых были подробно рассмотрены в [19] и часто используются. Один из них позволяет найти плотность, обозначаемую в [19] через n_1 и в нашем случае сводимую к формуле, предложенной в [14], следующим образом:

$$n_1 = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{N_f} \frac{1}{s(z_i)},$$

где V - объем сферы с радиусом, соответствующим максимальному красному смещению выборки. Как отмечается в [19], в этой процедуре придаются слишком большие веса галактикам, находящимся на больших z , где $s(z)$ мала и менее точна, поэтому из вычисления следует исключить те точки, в которых $s(z)$ меньше некоторого минимального значения, которое мы выбрали равным 0.1.

В другом способе нахождения средней плотности (в [19] она обозначается через n_2) галактикам придаются одинаковые веса и не требуется ограничения $s(z)$, однако результаты могут быть искажены флуктуациями плотности:

$$n_2 = \frac{N_T}{\int_0^{z_{\max}} s(z) dV},$$

где N_T - число объектов в выборке и z_{\max} - максимальное красное смещение в выборке.

Наконец, в [19] рассматривается метод, где каждой галактике придается вес $w(z_i)$, обратно пропорциональный $s(z)$ и второму моменту J_2 двухчастичной корреляционной функции $\xi(r)$, который характеризует средний избыток числа галактик в скоплении над их случайным распределением на расстоянии r от галактики. Среднюю плотность, найденную этим способом, мы будем обозначать через \bar{n} :

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=1}^{N_f} N(z_i) w(z_i)}{\int_0^{z_{\max}} s(z) w(z) dV},$$

где

$$w(z_i) = \frac{1}{1 + \bar{n} J_3 s(z)}, \quad J_3 = 4\pi \int_0^r r^2 \xi(r) dr$$

и $N(z_i)$ - число галактик, имеющих красное смещение z_i . Уравнение для \bar{n} можно решить итерациями. Отметим, что в случае $w(z_i) = 1$ выражение для плотности \bar{n} переходит в выражение для n_2 .

Для J_3 принято значение 4030 Мпк^3 [20]. Такая оценка, однако, была получена лишь до расстояния $D = 40 \text{ Мпк}$. Тем не менее, варьирование этой величины дает лишь небольшой вклад в изменение \bar{n} . Так, увеличение или уменьшение J_3 в 2 раза изменяет значение \bar{n} лишь на несколько процентов [21].

Параметр ϕ в функции Шехтера связан со средней плотностью следующим образом [12]:

$$\phi = \frac{\langle n \rangle}{\int_{M_1}^{M_2} \phi_1(M) dM},$$

где $\phi_1(M)$ - функция Шехтера с $\phi = 1$ и M_1 и M_2 - самая яркая и самая слабая абсолютные звездные величины в рассматриваемой выборке.

3.2. $(1/V_{max})$ -метод. Этот метод содержит предположение об отсутствии флуктуаций плотности в пространстве, однако он достаточно прост в вычислениях и удобен тем, что позволяет получить форму и амплитуду ФС одновременно. Если же интервалы для абсолютных звездных величин очень малы, то оба рассматриваемых метода становятся идентичными [22].

Для получения дифференциальной функции светимости $\phi(M)$ используется выражение:

$$\phi(M) = \frac{4\pi}{\Omega} \frac{\xi}{\Delta M} \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{V_{max}(M_i)}.$$

Вклад каждого объекта в ФС определяется V_{max} - объемом сферы, чей радиус равен максимальному расстоянию галактики с абсолютной звездной величиной M_i , при котором она могла бы попасть в выборку с предельной величиной B_{lim} , Ω - телесный угол на небесной сфере, покрываемый выборкой, и ξ - параметр, используемый для исправления ФС за неполноту выборки. Ошибки $\phi(M)$ можно оценить, используя следующую формулу (см. [23]):

$$\sigma^2 = \left(\frac{4\pi}{\Omega} \frac{\xi}{\Delta M} \right)^2 \sum_{i=1}^{N_1} \frac{1}{V_{max}^2(M_i)}.$$

Простой и удобный способ нахождения параметра ξ был предложен в [24]. Выборка с увеличением ее предельной видимой звездной величины B_{lim} становится неполной, а величина $\langle V/V_{max} \rangle$, имеющая значение ~ 0.5 для полной выборки, начинает уменьшаться (см. рис.1). Тогда, учитывая, что (см. [25])

$$\frac{V}{V_{max}} = 10^{0.6(B_T - B_{lim})},$$

можно найти число галактик, которое необходимо добавлять в выборку каждый раз для того, чтобы вновь сделать величину $\langle V/V_{max} \rangle = 0.5$ при последовательно увеличивающихся B_{lim} с шагом $\Delta B = 0^m.1$. Таким образом, параметр ξ , выражающий степень неполноты выборки, находится как отношение $(N_{add} + N_{sam})/N_{sam}$, где N_{add} - число добавленных галактик, а N_{sam} - число галактик в выборке с данной B_{lim} . Результат этой процедуры для главных галактик при некоторых значениях B_{lim} приводится в табл.1.

Полученную таким образом ФС можно аппроксимировать функцией Шехтера и найти тем самым оценки параметров ϕ , α и M .

Таблица 1

ИСПРАВЛЕНИЕ ВЫБОРКИ ЗА НЕПОЛНОТУ

B_{lim}	N_{sum}	N_{add}	V/V_{max}	ξ
14 ^m .0	18	6	0.45	1.33
14.5	30	16	0.45	1.53
15.0	33	52	0.27	2.58
15.5	41	117	0.25	3.85
16.0	43	248	0.16	6.77
16.5	45	489	0.11	11.87
17.0	46	934	0.04	21.30

4. *Результаты и обсуждение.* Из-за сравнительно небольшого статистического объема нашей выборки полученные результаты не обладают большой устойчивостью. Для увеличения степени их надежности была исследована зависимость решений от задаваемого изначально значения B_{lim} - предельной величины выборки. SWML-метод в том виде, в котором он применен, пригоден только для полных выборок. Поэтому, используя его, мы варьировали B_{lim} в диапазоне 14^m.0-14^m.5 (с шагом $\Delta B = 0^m.1$), т.е. в области, где возможная неполнота выборки еще невелика и ею можно пренебречь. В ($1/V_{max}$) - методе учитывается поправка за неполноту и поэтому при его применении мы имели возможность варьировать B_{lim} в гораздо более широких пределах, увеличивая как число вовлеченных в рассмотрение галактик, так и число полученных точек ФС.

Малое число галактик в выборке сказывалось также на выборе оптимального шага по абсолютной звездной величине. Для того, чтобы избежать присутствия интервалов с одной-двумя галактиками, при расчетах либо ограничивался диапазон рассматриваемых светимостей галактик, либо такие интервалы укрупнялись.

Рассмотрим сначала результаты, которые дал SWML-метод в применении к главным галактикам нашей выборки. Диапазон абсолютных

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ ФС ГЛАВНЫХ ГАЛАКТИК, ПОЛУЧЕННЫЕ SWML-МЕТОДОМ

B_{lim}	N_g	N_p	$\langle n \rangle$ ($\times 10^{-5}$, Мпк ⁻³) -22 ^m .0 < M < -19 ^m .0	$\phi_*(n_1)$	$\phi_*(n_3)$	$\phi_*(\bar{n})$	α (STY)	M (STY)	α (LS)	M (LS)
				$\times 10^{-5}$, Мпк ⁻³						
14 ^m .2	19	5	2.4	2.0	2.5	2.4	-0.4	-19.8	-1.1	-20.5
14.3	20	5	1.5	1.4	1.4	1.3	-0.4	-19.9	-1.0	-20.6
14.4	22	5	1.3	1.1	1.0	0.9	-0.1	-19.7	-1.1	-20.8
14.5	25	5	1.7	1.2	1.1	1.0	-0.1	-19.8	-1.3	-20.9

звездных величин составлял $-21^m.8 < M < -19^m.3$ (в нем сосредоточены практически все галактики полной выборки), размер бина $\Delta M = 0^m.5$, а диапазон изменения B_{lim} был ограничен величинами $14^m.2-14^m.5$. При таких условиях число галактик, попавших в бин, варьировалось от 3 до 10, а число плученных точек ФС равнялось 5. Результаты представлены в табл.2 на рис.3.

Ошибки $\phi_x(M)$, приведенные на рис.3 для значения $B_{lim} = 14^m.5$ в качестве примера, дают представление о числе галактик, попавших в соответствующий интервал. Как и следовало ожидать, чем меньше это число, тем больше неопределенность $\phi_x(M)$. Ошибки $\phi_x(M)$, найденные при значении $B_{lim} = 14^m.2$, имеют тот же порядок величин. Таким образом, как это можно видеть на рис.3, результаты, полученные для крайних значений рассматриваемого диапазона B_{lim} , находятся в пределах оцениваемых ошибок.

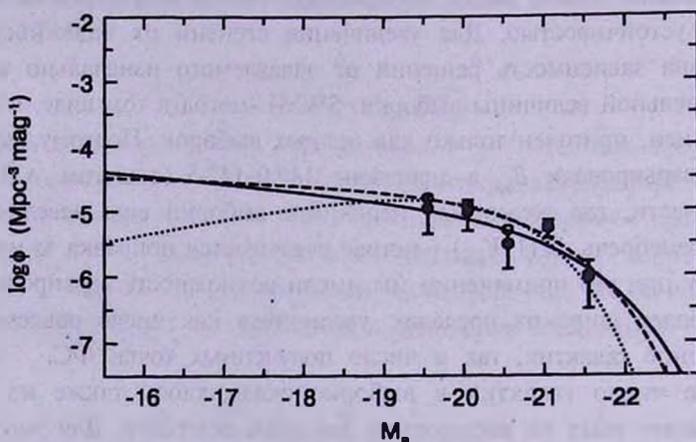


Рис.3. ФС главных галактик типа M51, полученная SWML-методом для $B_{lim} = 14^m.2$ (открытые кружки) и $B_{lim} = 14^m.5$ (закрытые кружки). Соответствующие приближения функции Шехтера с параметрами, найденными методом наименьших квадратов, показаны штриховой ($B_{lim} = 14^m.2$) и сплошной ($B_{lim} = 14^m.5$) линиями. Функция Шехтера, полученная методом STY, показана точками (для случая $B_{lim} = 14^m.2$).

Приведенные в табл.2 величины нормировки ФС, найденные с использованием различных способов вычисления средней плотности галактик, достаточно хорошо согласуются друг с другом. Взяв в качестве модельной функцию Шехтера, оценки двух других ее параметров мы находили как методом STY (см. предыдущий раздел), так и приближением полученных точек ФС методом наименьших квадратов (две последние колонки в табл.2). На рис.3 результаты первого способа приведены для случая $B_{lim} = 14^m.2$, а второго - для $B_{lim} = 14^m.2$ и $B_{lim} = 14^m.5$. Как видно из рис.3 и табл.2, функция Шехтера, полученная вторым способом, дает лучшее приближение к данным, найденным SWML-методом (который

не зависит от принятой модели). Следует отметить, что, поскольку здесь рассматривается полная выборка, основное внимание мы обращаем на амплитуду полученной ФС. Ее форму можно уточнить при рассмотрении $(1/V_{max})$ -метода, в котором за счет увеличения предельной величины выборки возрастает как число галактик, так и число точек ФС.

Рассмотрим применение $(1/V_{max})$ -метода для оценки ФС главных галактик выборки. При получении результатов мы использовали диапазон B_{lim} от $14^m.5$ до $17^m.0$ с шагом $0^m.5$. При возрастании B_{lim} в слабый конец ФС (диапазон $-19^m.4 < M < -16^m.0$) попадало от 2 до 5 галактик, поэтому они были объединены в один большой интервал, величина которого, таким образом, составила $\Delta M = 3^m.4$. Размер бина на ярком конце диапазона светимостей составил $\Delta M = 0^m.6$, размер бинов в центральной части ФС - $0^m.4$. Центрами укрупненных интервалов являлись средние значения абсолютных звездных величин попавших в них галактик. Таким образом, число галактик в интервалах (не принимая во внимание бин на слабом конце ФС) варьировалось от 3 до 11.

Полученные данные суммированы в табл.3. Они приведены как для широкого диапазона светимостей, т.е. с учетом интервала на слабом конце ФС (верхняя часть таблицы), так и для узкого, в котором точка, соответствующая этому интервалу, отбрасывалась (нижняя часть таблицы).

Таблица 3

ПАРАМЕТРЫ ФС ГЛАВНЫХ ГАЛАКТИК, ПОЛУЧЕННЫЕ $(1/V_{max})$ - МЕТОДОМ

$-22^m.0 < M < -16^m.0$							
B_{lim}	N_g	N_p	$\langle n \rangle (x10^{-5}, \text{Мпк}^{-3})$ $-22^m.0 < M < -19^m.0$	$\langle n \rangle (x10^{-5}, \text{Мпк}^{-3})$	$\phi. (x10^{-5}, \text{Мпк}^{-3})$	α	$M.$
$14^m.5$	28	6	2.2	17.3	1.3	-1.5	-20.7
15.0	31	7	2.1	14.7	1.7	-1.4	-20.4
15.5	37	7	1.9	12.5	1.6	-1.4	-20.4
16.0	38	7	1.7	12.1	1.5	-1.4	-20.4
16.5	39	7	1.5	11.3	1.3	-1.4	-20.4
17.0	40	7	1.4	11.7	1.1	-1.5	-20.4
$-22^m.0 < M < -19^m.4$							
B_{lim}	N_g	N_p	$\langle n \rangle (x10^{-5}, \text{Мпк}^{-3})$ $-22^m.0 < M < -19^m.0$	$\langle n \rangle (x10^{-5}, \text{Мпк}^{-3})$	$\phi. (x10^{-5}, \text{Мпк}^{-3})$	α	$M.$
$14^m.5$	26	5	2.2	18.1	1.2	-1.5	-20.7
15.0	29	6	2.4	34.0	1.0	-1.8	-20.8
15.5	34	6	1.7	4.9	2.2	-0.8	-20.1
16.0	35	6	1.6	8.7	1.7	-1.2	-20.3
16.5	35	6	1.4	7.7	1.5	-1.2	-20.3
17.0	35	6	1.3	6.9	1.3	-1.2	-20.3

Как видно из этих данных, наиболее стабильные результаты наблюдаются при больших значениях предельных видимых звездных величин. В большей степени это касается формы ФС и в меньшей - амплитуды. Вероятно, это объясняется тем, что при больших B_{lim} почти все галактики выборки с известными абсолютными звездными величинами дают вклад в ФС. Кроме того, флуктуации плотности галактик с увеличением рассматриваемого объема уменьшаются, поэтому рассмотрение галактик в большем объеме (т.е. при больших B_{lim}) дает лучшие результаты [26].

Для сравнения данных, полученных при использовании разных методов нахождения ФС, были определены средние плотности галактик в одном и том же диапазоне светимостей: $-22^m.0 < M < -19^m.0$ (4-е колонки в табл.2 и 3). Этот выбор объясняется тем, что в SWML-методе галактики вне этого интервала не рассматривались. Средняя величина этой плотности, найденная из табл.2 для всех B_{lim} , равна $(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-5}$ Мпк $^{-3}$ и $(1.5 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ Мпк $^{-3}$ без учета случая $B_{lim} = 14^m.2$, где неопределенности - это дисперсии соответствующих значений. Как видно из табл.3, к этим величинам ближе всего находятся результаты при больших B_{lim} . При дальнейшем рассмотрении мы останавливаемся на данных, полученных для $B_{lim} = 16^m.5$, которые достаточно хорошо согласуются как с приведенными значениями плотностей главных галактик, так и со значениями плотностей, полученных при рассмотрении спутников (см. ниже).

ФС для величины $B_{lim} = 16^m.5$ изображена на рис.4. Для сравнения на нем также приводятся точки, полученные SWML-методом при $B_{lim} = 14^m.3$. На рис.4 также показана функция Шехтера с оценками параметров, взятыми

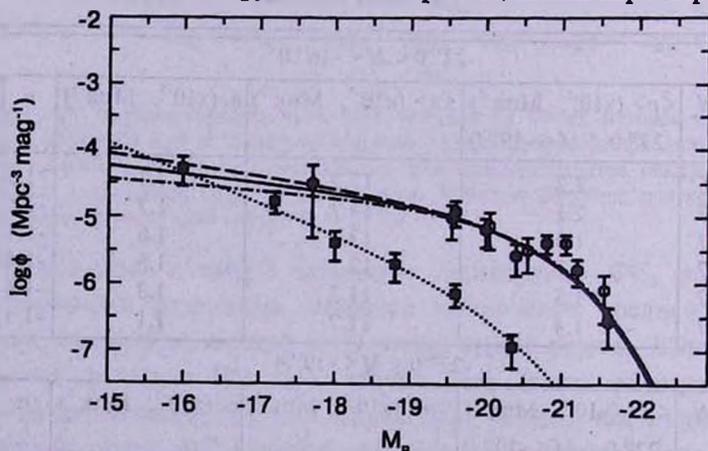


Рис.4. ФС главных галактик типа M51, полученная $(1/V_{max})$ -методом для $B_{lim} = 16^m.5$ (закрытые кружки). Для сравнения приведена ФС главных галактик, полученная SWML-методом при $B_{lim} = 14^m.3$ (открытые кружки). Функция Шехтера для значения $B_{lim} = 16^m.5$ с учетом точки с $M = -17^m.70$ показана штриховой линией, без ее учета - линией штрих-точка. Функция Шехтера со значениями параметров $\phi_0 = 1.45 \times 10^{-5}$ Мпк $^{-3}$, $\alpha = -1.3$, $M_c = -20^m.3$ показана сплошной линией. Закрытые квадраты соответствуют ФС спутников при $B_{lim} = 18^m.5$. Функция Шехтера для нее показана линией из точек.

из табл.3, как с учетом точки на слабом конце ФС (формальное значение $\chi^2 = 4.5$ для $df=4$ степеней свободы), так и без нее ($\chi^2 = 4.5$ для $df=3$).

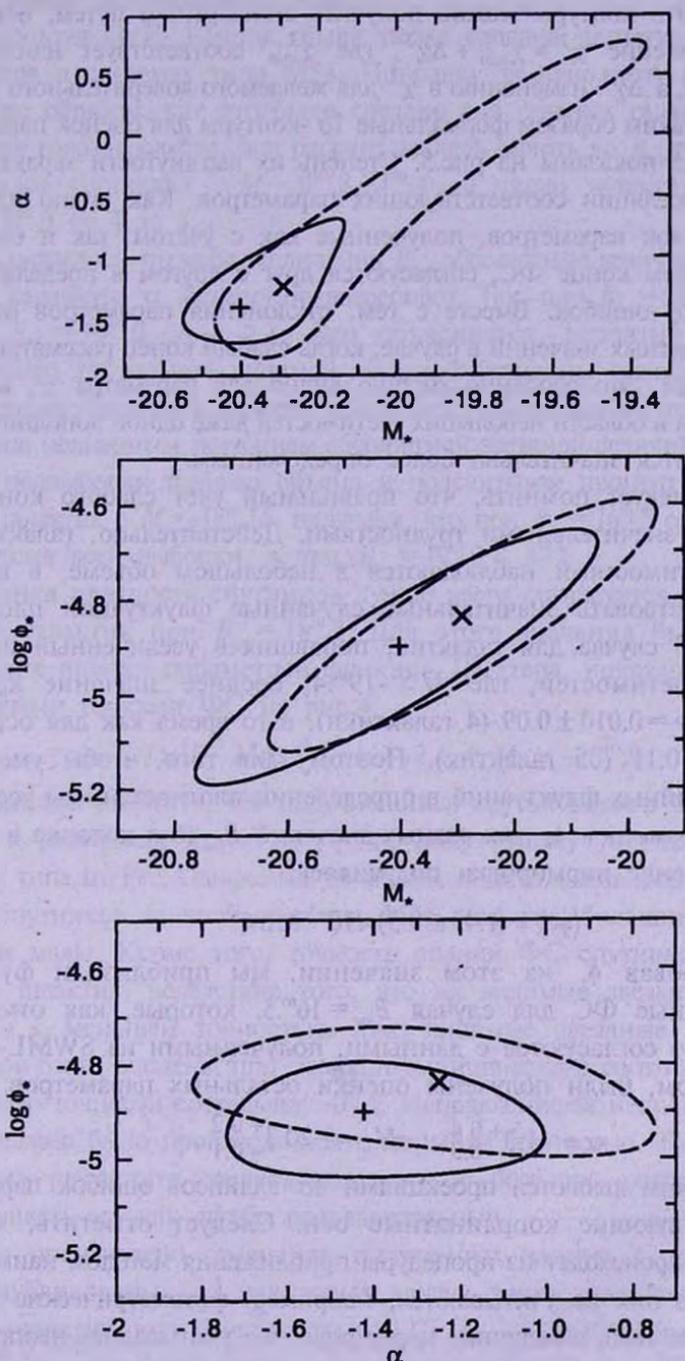


Рис.5. Формальные 1σ -контуры ошибок параметров функции Шектера, полученные ($1/V_{max}$)-методом для значения $V_{max} = 16^{m.5}$ с учетом точки на слабом конце ФС (сплошная линия) и без ее учета (штриховая линия). Наиболее вероятные значения оценок параметров показаны крестом и косым крестом соответственно.

Распределение формальных ошибок параметров функции Шехтера можно проиллюстрировать в виде контуров ошибок в двумерном пространстве параметров. Эти контуры можно получить стандартным путем, используя для них уравнение $\chi^2 = \chi_{min}^2 + \Delta\chi^2$, где χ_{min}^2 соответствует наилучшему приближению, а $\Delta\chi^2$ изменению в χ^2 для желаемого доверительного уровня. Полученные таким образом формальные 1σ -контуры для оценок параметров при $B_{lim} = 16^m.5$ показаны на рис.5. Степень их вытянутости характеризует величину корреляции соответствующих параметров. Как видно из рис.5, значения оценок параметров, полученные как с учетом, так и без учета точки на слабом конце ФС, согласуются друг с другом в пределах своих совместных 1σ -ошибок. Вместе с тем, отклонения параметров от своих наиболее вероятных значений в случае, когда слабый конец рассматривается, гораздо больше. Это особенно хорошо видно для параметра α , который при появлении в области небольших светимостей даже одной дополнительной точки становится значительно более определенным.

Однако следует помнить, что правильный учет слабого конца ФС сопряжен со значительными трудностями. Действительно, галактики со слабыми светимостями наблюдаются в небольшом объеме, в котором могут присутствовать значительные случайные флуктуации плотности. Так, в нашем случае для галактик, попавших в увеличенный интервал в области светимостей, где $M > -19^m.4$, среднее значение красного смещения $\langle z \rangle = 0.010 \pm 0.09$ (4 галактики), в то время как для остальных $\langle z \rangle = 0.021 \pm 0.11$ (35 галактик). Поэтому для того, чтобы уменьшить влияние случайных флуктуаций в определении плотностей, мы усреднили величины параметров ϕ для разных значений B_{lim} (6-я колонка в табл.3). Среднее значение нормировки получилось:

$$\langle \phi_* \rangle = (1.45 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ Мпк}^{-3}.$$

Зафиксировав ϕ на этом значении, мы приблизили функцией Шехтера данные ФС для случая $B_{lim} = 16^m.5$, которые, как отмечалось выше, хорошо согласуются с данными, полученными из SWML-метода. Таким образом, были получены оценки остальных параметров:

$$\alpha = -1.3_{-0.3}^{+0.4}, \quad M_* = -20.3_{-0.1}^{+0.2},$$

где погрешности являются проекциями 1σ -эллипсов ошибок параметров на соответствующие координатные оси. Следует отметить, что эти погрешности происходят из процедуры приближения методом наименьших квадратов и в них не учитываются, например, фотометрические ошибки данных. Кроме того, в величине нормировки не учитывались неопределенности, которые возникают при изменении остальных параметров вдоль их эллипсов ошибок (см., например, [21]). Поэтому приведенные значения характеризуют лишь нижнюю границу ошибок и могут недооценивать их

действительные величины. Функция Шехтера с приведенными параметрами показана на рис.4. Как видно из рисунка, она хорошо согласуется с результатами, полученными выше.

Используя $(1/V_{\text{max}})$ -метод, была также сделана попытка оценить ФС спутников в системах типа M51. Поправку за неполноту можно учесть таким же образом, как это было сделано для главных галактик. Так как спутники гораздо слабее, она рассчитывалась вплоть до $B_{\text{lim}} = 19^{\text{m}}.0$. Размер интервалов составлял $\Delta M = 0^{\text{m}}.8 - 1^{\text{m}}.4$, а число галактик в них при $B_{\text{lim}} \geq 18^{\text{m}}.0$ от 4 до 8.

Как оказалось, по мере увеличения B_{lim} , абсолютные величины найденных оценок параметра α монотонно возрастают. Так, при $B_{\text{lim}} = 16^{\text{m}}.5$, $\alpha = -1.6$, а при $B_{\text{lim}} = 19^{\text{m}}.0$, $\alpha = -2.1$. Это объясняется, вероятно, тем, что с увеличением предельной видимой звездной величины относительная доля более слабых галактик в выборке возрастает. Действительно, разбив выборку спутников медианным значением абсолютной звездной величины $M = -18^{\text{m}}.15$ на две подвыборки равного объема и подсчитывая процент относительно слабых галактик с $M > -18^{\text{m}}.15$, получаем, что при $B_{\text{lim}} = 16^{\text{m}}.5$ они составляют 27% объема всей выборки, а при $B_{\text{lim}} = 19^{\text{m}}.0$ - 47%.

Средняя плотность спутников лучше всего согласуется с плотностью главных галактик при $B_{\text{lim}} = 18^{\text{m}}.5$. Для этого значения были получены следующие оценки параметров функции Шехтера, показанной вместе с найденными точками ФС на рис.4:

$$\phi = 8.7 \times 10^{-7} \text{ Мпк}^{-3}, \quad \alpha = -2.1, \quad M_0 = -20^{\text{m}}.0.$$

Интересно отметить, что получившийся крутой наклон ФС спутников близок к результату $\alpha = -1.81 \pm 0.24$, полученному Марцке в [26] для галактик типа Ir/Рес. Однако мы не можем сказать, каков морфологический состав спутников в системах типа M51, так как большинство из них слишком малы. Кроме того, точность оценки ФС спутников ниже, чем главных галактик, вследствие того, что их видимые звездные величины известны с меньшей точностью. Так, видимые звездные величины 18 спутников были оценены при помощи эмпирического соотношения из [4]. Оценка его точности составляет $\sim 0^{\text{m}}.5$. Исправление за неполноту выборки также должно было производиться с меньшей точностью. Таким образом, к нашему результату следует подходить с большой осторожностью и рассматривать его как сугубо предварительный.

Было произведено сравнение полученных данных с теми, которые были опубликованы для некоторых других типов галактик. Параметры ФС для галактик поля были взяты из [27]: $\phi = 6.7 \times 10^{-3} \text{ Мпк}^{-3}$, $\alpha = -1.23$, $M_0 = -20^{\text{m}}.34$, а для спиральных галактик поля из [26]: $\phi = (3.4 \pm 0.6) \times 10^{-3} \text{ Мпк}^{-3}$, $\alpha = -1.11 \pm 0.07$, $M_0 = -20^{\text{m}}.05 \pm 0.08$ (для принятого значения $H_0 = 75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$). Отсюда видно, что параметры, определяющие форму

этих ФС, достаточно близки к параметрам ФС главных компонентов в системах типа M51. Сравнивая значения средних плотностей в диапазоне светимостей $-22^m.0 < M < -16^m.0$, находим, что главные галактики в системах типа M51 могут составлять $(0.3 \pm 0.2)\%$ среди галактик поля и $(0.7 \pm 0.5)\%$ среди спиральных галактик. Было также произведено сравнение ФС галактик типа M51 и других двойных галактик. Параметры функции Шехтера для компонентов изолированных пар каталога Караченцева [5] приводятся в [23]: $\phi = 6.51 \times 10^{-4} \text{ Мпк}^{-3}$, $\alpha = -1.2$, $M_s = -20^m.1$. Кроме того, мы приводим параметры функции Шехтера, взятые из [28] для выборки южных изолированных пар из каталога ESO-LV [7]: $\phi = (2.36 \pm 0.57) \times 10^{-4} \text{ Мпк}^{-3}$, $\alpha = -1.36 \pm 0.07$, $M_s = -20^m.19 \pm 0.16$ (для $H_0 = 75 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$). Таким образом, параметры, определяющие форму ФС, хорошо согласуются с соответствующими значениями наших параметров. В диапазоне светимостей $-22^m.0 < M < -16^m.0$ доля главных галактик систем типа M51 среди компонентов пар каталога Караченцева составляет 0.03 ± 0.02 , а среди южных изолированных пар 0.06 ± 0.04 . Усреднив оба результата, находим, что галактики типа M51 могут составлять $(4 \pm 3)\%$ от двойных галактик.

5. Заключение. Получена новая выборка галактик типа M51, содержащая 46 систем. Стандартные тесты, примененные к ней, показывают, что она полна для главных компонентов до $B_{lim} = 14^m.0 - 14^m.5$ и для спутников до $B_{lim} = 15^m.5 - 16^m.0$.

На основе этой выборки была произведена оценка функции светимости галактик в цветовой полосе B двумя методами. Полученная путем сравнения их результатов, ФС может быть описана функцией Шехтера с параметрами для главных галактик $\phi = (1.4 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ Мпк}^{-3}$, $\alpha = -1.3_{-0.3}^{+0.4}$, $M_s = -20.3_{-0.1}^{+0.2}$. Значения параметров, определяющих ее форму, сравнимы с соответствующими значениями для других типов галактик. Среди двойных галактик доля галактик типа M51 может составлять $(4 \pm 3)\%$, среди спиральных $(0.7 \pm 0.5)\%$ и среди всех галактик поля $(0.3 \pm 0.2)\%$ в диапазоне светимостей $-22^m.0 < M < -16^m.0$. Вследствие относительно небольшого статистического объема выборки, эти результаты следует рассматривать как предварительные. Дальнейший поиск кандидатов в системы типа M51 и включение их в выборку, особенно в области небольших светимостей, может значительно повысить точность полученных результатов.

В отличие от главных галактик, наклон ФС спутников оказался гораздо более крутым с величиной параметра $\alpha \sim -2.0$. Однако, из-за того, что светимости спутников известны с большими погрешностями, этот результат также должен рассматриваться как предварительный.

Автор выражает глубокую благодарность В.П.Решетникову за полезное обсуждение проблем, рассмотренных в статье, и замечания, сделанные при ее подготовке. В работе были использованы данные базы LEDA (<http://leda.univ-lyon1.fr>). Работа была выполнена при финансовой поддержке программы "Астрономия" (N40.022.1.1.1101).

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, e-mail: serg@future.astro.spbu.ru

AN ESTIMATION OF THE LUMINOSITY FUNCTION FOR M51-TYPE GALAXIES

S.A.KLIMANOV

The *B* band luminosity function of M51-type galaxies is estimated on the basis of a new sample of 46 systems. The luminosity function for the primary components can be described by a Schechter function with parameters: $\phi_0 = (1.4 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$, $\alpha = -1.3^{+0.4}_{-0.3}$, $M_* = -20.3^{+0.2}_{-0.1}$. The values of the two last parameters are comparable with those of isolated pairs. An estimate of the mean density accounts for $(4 \pm 3)\%$ of that for isolated pairs within the range $-22^m.0 < M < -16^m.0$.

Key words: *galaxies:luminosity function - galaxies:M51 type*

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.А.Воронцов-Вельяминов, *Астрон. ж.*, **34**, 8, 1957.
2. H.Arp, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **14**, 1, 1966.
3. Б.А.Воронцов-Вельяминов, *Астрон. ж.*, **52**, 692, 1975.
4. С.А.Климанов, В.П.Решетников, *Astron. Astrophys.*, **378**, 428, 2001.
5. И.Д.Караченцев, *Двойные галактики*, Наука, М., 1987.
6. L.Reduzzi, R.Rampazzo, *Astrophys. J. Lett.*, **30**, 1, 1995.
7. A.Lauberts, E.A.Valentijn, *The Surface Photometry Catalogue of the ESO-Uppsala Galaxies*, Garching: European Southern Observatory, 1989.
8. G.Paturel, H.Andernach, L.Bottinelli, H. di Nella, N.Durand, R.Garnier, L.Gouguenheim, P.Lanoix, M.C.Marthinnet, C.Petit, J.Rousseau, G.Theureau, J.Vaughlin, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **124**, 109, 1997.

9. С.А.Климанов, В.П.Решетников, А.Н.Буренков, Письма в Астрон. ж., 28, 643, 2002.
10. B.M.Poggianti, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 122, 399, 1997.
11. M.Schmidt, Astrophys. J., 151, 393, 1968.
12. C.N.A.Willmer, Astron. J., 114, 898, 1997.
13. T.T.Takeuchi, K.Yoshikawa, T.T.Ishii, Astrophys. J. Suppl. Ser., 129, 1, 2000.
14. G.Efstathiou, R.S.Ellis, B.A.Peterson, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 232, 431, 1988.
15. J.E.Felten, Astrophys. J., 207, 700, 1976.
16. A.Sandage, G.A.Tammann, A.Yahil, Astrophys. J., 232, 352, 1979.
17. P.Schechter, Astrophys. J., 203, 297, 1976.
18. W.T.Eadie, D.Drijard, F.James, M.Roos, B.Sadoulet, Statistical Methods in Experimental Physics, North-Holland, Amsterdam, 1971.
19. M.Davis, J.Huchra, Astrophys. J., 254, 437, 1982.
20. R.O.Marzke, J.P.Huchra, M.J.Geller, Astrophys. J., 428, 43, 1994.
21. C.Marinoni, P.Monaco, G.Giuricin, B.Costantini, Astrophys. J., 521, 50, 1999.
22. R.S.Ellis, M.Colless, T.Broadhurst, J.Heyl, K.Glazebrook, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 280, 235, 1996.
23. C.Xu, J.W.Sulentic, Astrophys. J., 374, 407, 1991.
24. J.Huchra, W.L.W.Sargent, Astrophys. J., 186, 433, 1973.
25. A.J.Wasilewski, Astrophys. J., 272, 68, 1983.
26. R.O.Marzke, L.N. da Costa, P.S.Pellegrini, C.N.A.Willmer, M.J.Geller, Astrophys. J., 503, 617, 1998.
27. J.Liske, D.J.Lemon, S.P.Driver, N.J.G.Cross, W.J.Couch, 2002, <http://babbage.sissa.it/abs/astro-ph/0207555>.
28. D.S.L.Souares, R.E. de Souza, R.R. de Carvalho, T.C.Couto da Silva, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 110, 371, 1995.