АСТРОФИЗИКА

ТОМ 18 НОЯБРЬ, 1982 ВЫПУСК 4

УДК 524.77—333—33

ВИРИАЛЬНАЯ МАССА И СВЕТИМОСТЬ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК В ДЕВЕ

И. Д. КАРАЧЕНЦЕВ

Поступила 22 февраля 1982
Принята к печати 27 июля 1982

Новые измерения лучевых скоростей и видимых величин галактик в скоплении Девы [2] использованы для определения основных динамических параметров системы. В пределах $r < 6°$ от центра скопления приведены зависимости дисперсии лучевых скоростей от радиуса r и от видимой величины галактик m_B. Функция светимости скопления определена в диапазоне $[-22^m < M < -13^m]$. Отношение вириальной массы к светимости у скопления в Деве составляет $f = 396 f_\odot$. Для поперечной компоненты скорости Галактики относительно скопления получена оценка $V_t = (530 \pm 980)$ км/с.

1. *Введение.* Наблюдательные данные для изучения кинематики ближайшего к нам скопления галактик в Деве пополнялись весьма медленными темпами, несмотря на видимую яркость многих его членов. Только в последние годы были предприняты целенаправленные усилия увеличить число измеренных лучевых скоростей у галактик в этом скоплении [1, 2]. Даже сейчас скопление в Деве уступает по количеству известных лучевых скоростей некоторым более далеким скоплениям. Сложившаяся ситуация вызывает удивление, частично она объяснима неопределенностью границ и, как считают некоторые авторы [3, 4], комплексной («облачной») структурой скопления в Деве. Согласно установившемуся мнению, скопление в Деве представляет собой наиболее плотную часть (ядро) Местного сверхскопления галактик. Подробное описание трехмерной структуры Местного сверхскопления содержится в недавней работе Тулли [5].

Подчеркнем, что исследование скопления в Деве открывает уникальную возможность проследить, как меняются кинематические параметры системы в зависимости от массы (светимости) ее членов в диапазоне почти четырех порядков.

В этой статье на более полном, чем ранее, наблюдательном материале сделаны оценки основных динамических характеристик скопления в Деве, в том числе дисперсии лучевых скоростей, профиля плотности, а также функции светимости скопления.

Динамический центр скопления Девы мы отождествляем с рентгеновской и радиогалактикой NGC 4486, а границей скопления считаем по Сэндеджу и Тамманну [6] круг радиусом $r = 6°$.

2. *Средняя лучевая скорость.* Указанная область содержит $n_0 = 293$ галактики с измеренными лучевыми скоростями. Данные о скоростях были взяты из следующих источников: 102 — из списка Караченцева и Караченцевой [2], 98 — из сводного каталога Рууда [7], 43 — из обзора эллиптических галактик Тонри и Дэвиса [8], 31 — из Реферативного каталога Вокулеров [9], 10 и 9, соответственно, из статей Сулентика [10] и Истмонда, Эйбелла [1]. Отметим, что некоторые измерения Сулентика отличаются от данных других авторов на $\Delta V \geqslant 1000$ км/с (см. [2]). Поэтому мы использовали оценки Сулентика лишь в случаях, когда отсутствовала информация из иных источников.

Среди 293 галактик 68 имеют лучевые скорости $V_0 > 4200$ км/с, что позволяет отнести их к объектам дальнего фона. Распределение остальных 225 галактик по значениям исправленной (за движение Солнца) лучевой скорости приведено на рис. 1. Полное отсутствие галактик в интервале $V_0 = (2500 \div 4200)$ км/с дает достаточно высокую гарантию того, что рассматриваемая ниже выборка не засорена объектами фона.

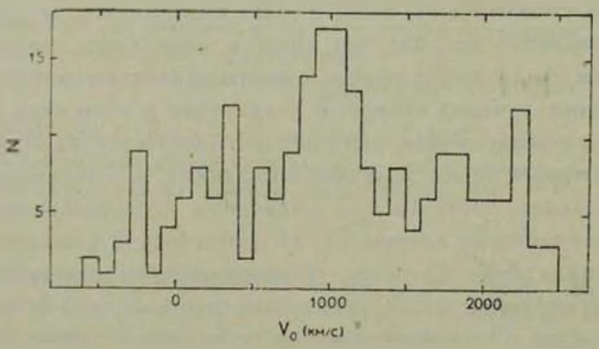

Рис. 1. Распределение 225 галактик в Деве по исправленным за движение Солнца лучевым скоростям.

Среднее значение лучевой скорости у членов скопления Девы составляет $\langle V_0 \rangle = +1009 \pm 50$ (км/с). Распределение $N(V_0)$ является вполне симметричным относительно $\langle V_0 \rangle$, поэтому все галактики с отрицательными лучевыми скоростями следует считать реальными членами скопления. Это заключение согласуется с данными определения у галактик с $V_0 < 0$ модулей расстояния по полуширине линии 21 см [11].

Здесь мы не касаемся возможных различий в $\langle V_0 \rangle$ для галактик с разными морфологическими типами и разными наклонами плоскостей к лучу зрения. Указания на такие различия в литературе встречаются [3, 6, 12]. Соответствующий анализ будет сделан после уточнения морфологических типов галактик в скоплении Девы.

Таблица 1

r	n_v	$\langle V_0 \rangle$ км/с	$\pm\varepsilon$	$\langle \varepsilon_v^2 \rangle^{1/2}$ км/с
0 —0°5	7	+1350	±250	620
0.5—1.0	19	820	160	690
1.0—1.5	27	830	160	810
1.5—2.0	20	1000	200	880
2.0—2.5	13	1030	270	910
2.5—3.0	20	810	180	750
3.0—3.5	28	1120	150	760
3.5—4.0	23	850	150	690
4.0—4.5	22	1430	150	690
4.5—5.0	18	1300	220	880
5.0—5.5	12	1040	100	330
5.5—6.0	16	1240	140	520
6.0—7.0	10	1520	250	750

В табл. 1 приведены числа галактик с измеренными скоростями, n_v, и средние значения $\langle V_0 \rangle$ со стандартными ошибками среднего для кольцевых зон с шагом $\Delta r = 0°5$. Последняя строка относится к 10 галактикам в углах квадрата, в котором вписан круг $r = 6°$. Данные таблицы обнаруживают слабую тенденцию к возрастанию средней лучевой скорости галактик от центра к периферии. Эффект более отчетлив на рис. 2, где показано изменение среднего расстояния от центра для галактик с разными лучевыми скоростями. Для этой особенности мы не смогли найти достаточно очевидного объяснения.

3. Дисперсия лучевых скоростей. Распределение дисперсии лучевых скоростей галактик вдоль радиуса скопления приведено в последнем столбце табл. 1. На рис. 3 эти данные изображены прямоугольниками, высота которых соответствует стандартной ошибке среднего. Зависимость $\langle \varepsilon_v^2 | r \rangle^{1/2}$ позволяет в принципе определить преобладающий тип движений галактик в скоплении. Такая задача была решена Караченцевым, Зонном и Щербановским [13] для случаев строго круговых и строго радиальных движений у членов сферически симметричного скопления. Соот-

ветствующие регрессии $\langle \sigma_v^2 | r \rangle^{1/2}$ показаны на рис. 3 сплошной и пунктирной линиями. Сравнение их с данными наблюдений показывает, что движение галактик в скоплении Девы носит промежуточный характер между двумя крайними случаями.

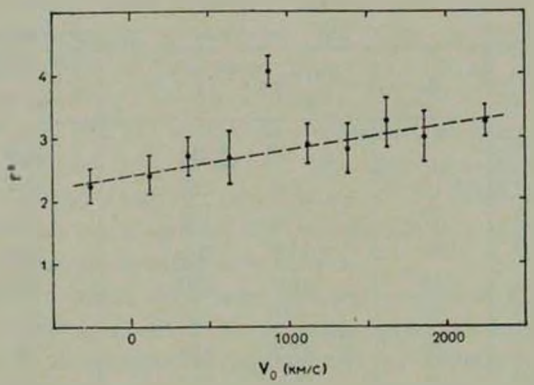

Рис. 2. Среднее угловое расстояние от центра для галактик с различными лучевыми скоростями.

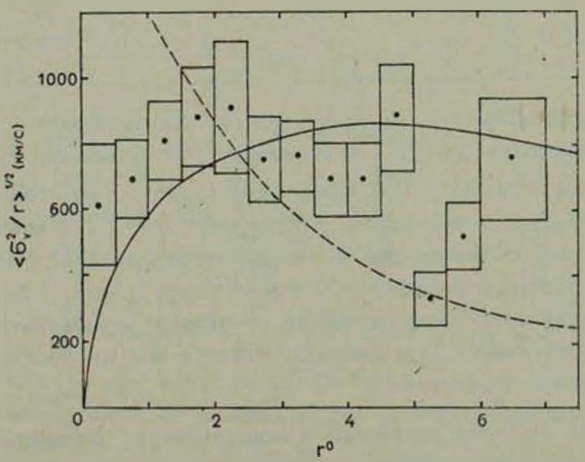

Рис. 3. Распределение дисперсии лучевых скоростей галактик вдоль радиуса скопления. Прямоугольники с точками — данные наблюдений, сплошная и пунктирная линии соответствуют регрессиям для строго круговых и строго радиальных движений галактик в скоплении.

Важную информацию о динамической истории скопления может содержать зависимость дисперсии скоростей галактик от их массы или видимой величины. Наблюдательные данные (рис. 4) обнаруживают тенден-

цию к возрастанию σ_v^2 при переходе от гигантских галактик к карликовым. По-видимому, скопление проявляет начальные признаки релаксации в иррегулярном поле, когда между членами системы разной массы устанавливается равнораспределение по энергиям.

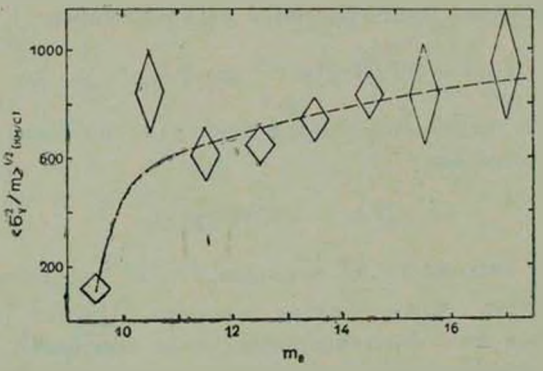

Рис. 4. Зависимость дисперсии лучевых скоростей от видимой величины галактики

Первая точка на рис. 4 с $\sigma_v = (117 \pm 46)$ км/с относится к трем ярчайшим эллиптическим галактикам: NGC 4472, 4486, 4649. Малое значение их пекулярных скоростей может отражать эффект слияния наиболее массивных членов скопления под воздействием динамического трения [14]. Однако для объяснения величины $\sigma_v = 117$ км/с необходимо предположить, что каждая из трех гигантских галактик испытала уже около 40 слияний. Если такое предположение правильно, то частые слияния массивных галактик, вероятно, происходили на ранней фазе формирования скопления.

Для оценки вириальной массы скопления важно знать полную дисперсию скоростей галактик. Усреднение по всем членам скопления дает величину $\sigma_v = 744$ км/с, а среднее взвешенное по светимости — $\langle \sigma_v \rangle_L = 717$ км/с.

4. *Профиль плотности скопления.* Потенциальную энергию скопления U удобно определять через распределение плотности, спроектированное на произвольную ось y, которая пересекает центр скопления [15]. В предположении сферической симметрии системы

$$U = -2\gamma \mathfrak{M}^2 \int_0^\infty [\varphi(y)]^2 dy, \qquad (1)$$

где $\mathfrak{M}$ — полная масса скопления, γ — постоянная тяготения, а $\varphi(y)$ — плотность распределения массы вдоль y.

Для определения $\varphi(y)$, были выполнены подсчеты числа галактик в полосах шириной 1° при ориентации оси y вдоль двух взаимно перпендикулярных направлений (по α и по δ). В подсчетах использовались только те галактики, чья принадлежность к скоплению подтверждена их лучевыми скоростями. Результаты приведены на рис. 5 точками. Данные подсчетов удовлетворительно представляются распределением

$$\varphi(y) = (\mathfrak{N}/2)\cdot \langle y \rangle^{-1} \exp\{-y/\langle y \rangle\}, \qquad (2)$$

где $\langle y \rangle = 2^{\circ}06$. При этом выражение для потенциальной энергии имеет весьма простой вид

$$U = -\gamma \mathfrak{N}^2/4 \langle y \rangle . \qquad (3)$$

5. *Функция светимости.* В границах $r < 6°$ скопление Девы насчитывает 575 галактик ярче предела каталога Цвикки [16] $m = 15^{m}7$. Разумеется, не все эти галактики принадлежат скоплению. Для определения функции светимости мы использовали переход от видимых величин Цвикки к системе m_B, выполненный Вокулером и Пенсе [17]. В табл. 2 приведено относительное число галактик, являющихся членами скопления

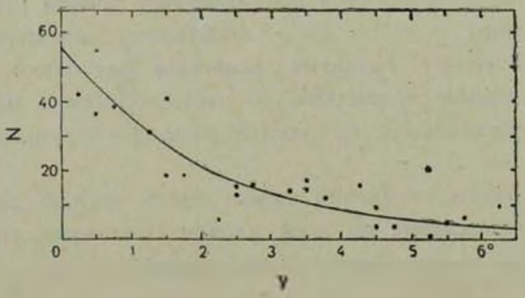

Рис. 5. Одномерное распределение плотности в скоплении Девы. Точками обозначены подсчеты числа галактик в полосах вдоль α и δ.

Таблица 2

m_B	q_{Virgo}
$<13^{m}$	1.0
13.0—13.5	0.93
13.5—14.0	0.94
14.0—14.5	0.80
14.5—15.0	0.57
15.0—15.5	0.45
15.5—16.0	0.50
16.0—16.5	0.33
16.5—17.0	0.37
17.0—17.5	0.25
17.5—18.0	0.22
18.0—20.0	0.16

в Деве, в зависимости от их видимой величины m_B. Оценки $q_{Virgo}(m)$ сделаны по выборке объектов с измеренными лучевыми скоростями. Для галактик слабее $15^{m}7$ значения m_B были взяты из [2]. С учетом множителя $q_{Virgo}(m)$ распределение интегрального числа галактик в Деве ярче видимой величины m_B изображено на рис. 6. Ромбиком

при $m_B = 18^m6$ обозначена оценка населенности $N = 1445$, полученная из Ликских подсчетов [18].

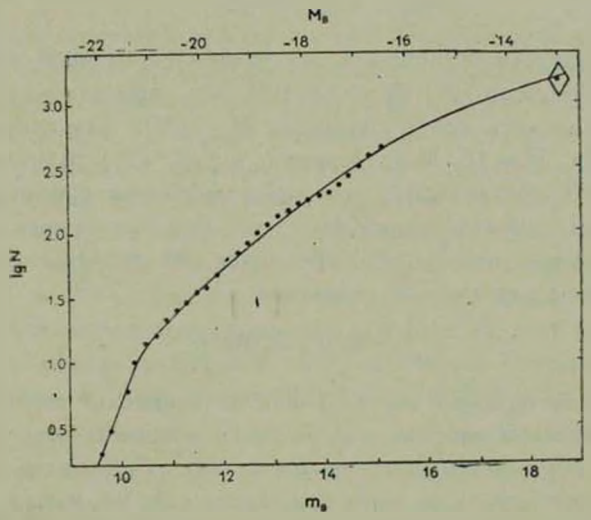

Рис. 6. Функция светимости скопления в Деве. Точки — интегральные числа галактик ярче видимой величины m_B из каталога Цвикки, ромбик — данные Ликских подсчетов. Шкала абсолютных величин соответствует расстоянию до скопления $D = 19$ Мпс.

Расстояние до скопления в Деве $D = 19$ Мпс определялось Кенникутом [19] по размерам H II областей. Принимая поправку за межзвездное поглощение 0^m22 и $D = 19$ Мпс, мы вычислили интегральную светимость скопления: $L_B = 2.42 \cdot 10^{12} L_\odot$. Отсутствие надежных данных о числе карликовых членов скопления с $m > 18^m6$ (или $M > -13^m0$) не должно сильно влиять на оценку L_B, так как более половины интегральной светимости скопления приходится на галактики ярче 12^m0.

6. *Отношение вириальной массы к светимости.* Из теоремы о вириале для стационарной системы имеем с учетом (3):

$$3 \langle \sigma_V^2 \rangle \mathfrak{M} = \gamma_1 \mathfrak{M}^2 / 4 \langle y \rangle , \qquad (4)$$

откуда полная вириальная масса скопления

$$\mathfrak{M} = 12 \gamma_1^{-1} \langle \sigma_V^2 \rangle \langle y \rangle . \qquad (5)$$

При расстоянии до скопления $D = 19$ Мпс его эффективный размер составляет $\langle y \rangle = 2^\circ06 = 0.683$ Мпс. Принимая во внимание ошибки измерения лучевых скоростей ($\sim$ 100 км/с), для взвешенной по светимости

дисперсии лучевых скоростей имеем $\sigma_V = 710$ км/с, что дает значение вириальной массы.

$$\mathfrak{M} = 9.60 \cdot 10^{14}\ \mathfrak{M}_\odot. \tag{6}$$

В литературе нам встретились две оценки вириальной массы скопления в Деве. Согласно [20] $\mathfrak{M} = 9.8 \cdot 10^{14}\ \mathfrak{M}_\odot$, при этом границы скопления предполагались более широкими ($r \leqslant 10°$). Для стандартной области $r \leqslant 6°$ и $D = 19$ Мпс Хофман и др. [21] получили значение $\mathfrak{M} = 7.6 \cdot 10^{14}\ \mathfrak{M}_\odot$, моделируя эволюцию скопления с помощью набора концентрических гравитирующих оболочек. Все три оценки, как видим, хорошо согласуются друг с другом. Величине (6) соответствует отношение вириальной массы к светимости скопления

$$f_{\text{вир}} \equiv \mathfrak{M}/L_B = 396\, f_\odot. \tag{7}$$

Независимую оценку f мы получили по ансамблю двойных галактик в Деве [22]. Двойные системы в Деве имеют взаимные расстояния между компонентами заметно меньшие, чем пары вне скопления. Приписывая этот эффект воздействию на пары приливных сил, мы нашли для скопления отношение «приливной» массы к светимости

$$f_{\text{прил.}} \leqslant 55 f_\odot{}^*. \tag{8}$$

Другое определение приливной массы скопления в Деве было сделано Хартвиком [23]. Из предположения о том, что размеры ближайших к Деве стабильных групп галактик (M 96, M 101 и NGC 1023) ограничены приливными силами скопления, Хартвик получил при $D = 19$ Мпс значение

$$f_{\text{прил.}} \lesssim 174\, f_\odot. \tag{9}$$

Оценки (7)—(9) обнаруживают значительное взаимное расхождение. Различие между вириальной и приливной массой может быть обусловлено неучетом мелкомасштабных систем в скоплении или же неприменимостью условия стационарности скопления, если система галактик в Деве испытывает глобальное сжатие или расширение.

Следует отметить, что отношение массы к светимости, определяемое как по орбитальным движениям двойных галактик в скоплении Девы, так и по кривым вращения отдельных его членов, дает нормальную величину $f \simeq 10 f_\odot$. Следовательно, отношение интегральной массы скопления к сумме индивидуальных масс ее членов характеризуется фактором

* Эта величина редуцирована к принятым здесь значениям $D = 19$ Мпс и $L_B = 2.42 \cdot 10^{12} L_\odot$.

$\mu \leqslant (5 \div 40)$. Для уточнения величины избытка массы в Деве необходим тщательный анализ предпосылок, используемых при вычислении вириальной и приливной массы скопления.

7. *Взаимная скорость Галактики и скопления.* В этом разделе мы хотим обратить внимание на новую возможность определения тангенциальной составляющей скорости Галактики относительно скопления в Деве. Измерению движения Галактики относительно реликтового излучения и относительно различных выборок галактик посвящено немалое число исследований. Среди последних отметим работы [24—26]. Согласно этим данным наша Галактика падает на скопление в Деве со скоростью $\sim (200 \div 500)$ км/с. По Вокулеру [24, 25] апекс движения Галактики расположен на $\sim 20°$ к северо-востоку от скопления Девы.

Наличие тангенциальной скорости Галактики V_t относительно невращающегося скопления приводит к тому, что члены скопления с отрицательными лучевыми скоростями будут чаще встречаться в направлении апекса. Разделив галактики в Деве на две выборки: с $V > \langle V_0 \rangle$ и с $V < \langle V_0 \rangle$, мы получили для их центроидов величину взаимного углового смещения $\Delta y = 0^{\circ}11$ (или $\Delta\alpha = 0^{\circ}09$, $\Delta\delta = 0^{\circ}06$). Этому соответствует значение тангенциальной скорости

$$V_t \simeq \Delta y \cdot \sigma_V \cdot \langle y^2 \rangle^{-1}, \qquad (10)$$

где $\langle y^2 \rangle$ — средний квадратичный угловой размер скопления в проекции на ось, а σ_V^2 — дисперсия лучевых скоростей. При $\sigma_V = 744$ км/с и $\langle y^2 \rangle^{1/2} = 2^{\circ}92$ имеем $V_t = 530$ км/с. Направление поперечной компоненты скорости приблизительно отвечает удалению нашей Галактики от скопления Coma. Однако полученная оценка V_t имеет низкую надежность. При числе галактик с измеренными лучевыми скоростями $n_V = 225$ ошибка определения V_t составляет $\sigma(V_t) \simeq \sigma_V \cdot n_V^{-1/2} \cdot \langle y^2 \rangle^{-1/2} =$ $= 980$ км/с.

8. *Заключение.* Задача более детального динамического исследования скопления в Деве остается актуальной. Для уточнения интегральной массы скопления необходимы новые измерения лучевых скоростей. Подчеркнем, что около 300 галактик в Деве с $m \leqslant 15^{m}7$ и $r < 6^{\circ}$ еще не имеют оценок лучевой скорости. Определение их скоростей, дополненное данными о морфологии галактик, позволит более полно изучить особенности структуры и динамики самого близкого скопления галактик. Важные сведения о динамической эволюции скопления и параметрах газовой среды в нем может дать подробное исследование карликовых членов скопления в Деве, ожидаемое число которых превышает тысячу.

Автор признателен А. И. Копылову за ценные замечания.

Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

VIRIAL MASS AND LUMINOSITY OF THE VIRGO CLUSTER OF GALAXIES

I. D. KARACHENTSEV

New measurements of radial velocities and of apparent magnitudes of galaxies in the Virgo cluster [2] are used to determine the basic dynamical parameters of the system. Dependences of the radial velocity dispersion on a radii r and on an apparent magnitude m_B are presented inside $r < 6°$ from the cluster centrum. The luminosity function of the cluster is determined for the interval $(-22^m < M < -13^m)$. The virial mass-to-luminosity ratio for the Virgo cluster is equal to $f = 396 f_\odot$. For a tangential velocity component of the Galaxy relative to the cluster an estimate $V_t = (530 \pm 980)$ km/s has been obtained.

ЛИТЕРАТУРА

1. *T. S. Eastmond, G. O. Abell*, P. A. S. P., 90, 367, 1978.
2. *И. Д. Караченцев, В. Е. Караченцева*, Письма АЖ, 8, 198, 1982.
3. *G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs*, Astron. Astrophys., 28, 109, 1973.
4. *А. Л. Щербановский*, Сообщ. САО, 31, 23, 1981.
5. *R. B. Tully*, The Local Supercluster, Ap. J., 257, 389, 1982.
6. *A. Sandage, G. A. Tammann*, Ap. J., 207, L1, 1976.
7. *H. J. Rood*, A Catalogue of Galaxy Redshifts (in press).
8. *J. L. Tonry, M. Davis*, Ap. J., 246, 666, 1981.
9. *G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, H. G. Corwin*, Second Reference Catalogue of Bright Galaxies, Univ. of Texas Press, Austin, 1976.
10. *J. W. Sulentic*, Ap. J., 241, 67, 1980.
11. *G. Helou, E. E. Salpeter, N. Krumm*, Ap. J., 228, L1, 1979.
12. *C. Ftaclas, M. N. Funelli, M. F. Strulle, M. T. Zuber*, Ap. J., 245, L5, 1981.
13. *И. Д. Караченцев, В. Зонн, А. Л. Щербановский*, Астрон. ж., 49, 998, 1972.
14. *J. Ostriker*, in "The Large Scale Structure of the Universe", IAU Symp. No. 79 Reidel, Dordrecht, 1978.
15. *В. А. Амбарцумян*, ДАН СССР, 24, 875, 1939.
16. *F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild*, Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies, I—II, California Institute of Technology, 1961—1963.
17. *G. de Vaucouleurs, W. D. Pence*, Ap. J., Suppl. ser., 40, 425, 1979.
18. *C. D. Shane, C. A. Wirtanen*, Publ. Lick Obs., 22, part 1, 1967.
19. *R. C. Kennicutt*, Ap. J., 247, 9, 1981.

20. *И. Д. Караченцев*, Астрофизика, 1, 303, 1965.
21. *G. L. Hoffman, D. W. Olson, E. E. Salpeter*, Ap. J., 242, 861, 1980.
22. *И. Д. Караченцев*, Астрофизика, 17, 633, 1981.
23. *F. D. Hartwick*, Ap. J., 208, L13, 1976.
24. *G. de Vaucouleurs, W. L. Peters*, Ap. J., 248, 395, 1981.
25. *G. de Vaucouleurs, W. L. Peters, L. Bottinelli, L. Gouguenheim, G. Paturel*, Ap. J., 248, 408, 1981.
26. *J. L. Tonry, M. Davis*, Ap. J., 246, 680, 1981.