

УДК 524.7

О. В. Мельник<sup>1, 2</sup>, А. А. Элыив<sup>2</sup>, И. Б. Вавилова<sup>2</sup><sup>1</sup>Астрономическая обсерватория Киевского национального университета им. Тараса Шевченко  
04053 Киев, ул. Обсерваторная 3<sup>2</sup>Главная астрономическая обсерватория НАН Украины  
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27**Отношение масса/светимость пар и триплетов галактик  
в различном окружении**

*Оценено содержание темной материи в парах и триплетах галактик, отобранных из SDSS DR5 методом мозаики Вороного высших порядков, а именно: медианные оценки отношения масса/светимость  $M_{vir}/L$  составляют  $12M_{\odot}/L_{\odot}$  для изолированных пар,  $44M_{\odot}/L_{\odot}$  для изолированных триплетов;  $7(8)M_{\odot}/L_{\odot}$  для компактных пар (триплетов) галактик с характерным расстоянием между галактиками  $R < 50$  (100) кпк соответственно. Показано, что чем менее изолирована система, тем больше для нее отношение масса/светимость, что свидетельствует о том, что в более плотном окружении группы имеют более высокую дисперсию скоростей.*

**ВІДНОШЕННЯ МАСА/СВІТНІСТЬ ПАР І ТРИПЛЕТІВ ГАЛАКТИК У РІЗНОМУ ОТОЧЕННІ**, Мельник О. В., Елиїв А. А., Вавилова І. Б. — Оцінено вміст темної матерії у парах і триплетах галактик, відібраних з огляду SDSS DR5 методом мозаїки Вороного вищих порядків, а саме: медіанні оцінки відношення маса/світність  $M_{vir}/L$  складають  $12M_{\odot}/L_{\odot}$  для ізольованих пар,  $44M_{\odot}/L_{\odot}$  для ізольованих триплетів;  $7(8)M_{\odot}/L_{\odot}$  для компактних пар (триплетів) галактик із характерною відстанню між галактиками  $R < 50$  (100) кпк відповідно. Показано, що чим менш ізольованою є система, тим більшим для неї є відношення маса/світність, що свідчить про те, що у більш щільному оточенні групи галактик мають вищу дисперсію швидкостей.

**MASS-TO-LUMINOSITY RELATION FOR GALAXY PAIRS AND TRIPLETS IN THE DIFFERENT ENVIRONMENT**, by Melnyk O. V., Elyiv A. A., Vavilova I. B. — We estimated the dark matter content in galaxy pairs and triplets selected from SDSS DR5 by the high order Voronoi tessellation method. The median mass-to-luminosity relations  $M_{vir}/L$  are the following:  $12M_{\odot}/L_{\odot}$  for isolated pairs,  $44M_{\odot}/L_{\odot}$  for isolated triplets;  $7(8)M_{\odot}/L_{\odot}$  for compact pairs (triplets) with the characteristic distance between galaxies  $R < 50$  (100) kpc, respectively. It is shown that the less isolated is a system, the larger is the mass-to-luminosity relation. This points to the fact that in a more dense environment galaxy groups have larger velocity dispersion.

## ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью систем галактик разной населенности является избыток массы над светимостью, например, в работе [9] приводится оценка  $M \sim L^{1.34 \pm 0.03}$ . Для галактик значения отношений масса/светимость  $M/L$ , оцененные независимыми методами по радио-, оптическим и рентгеновским измерениям в зависимости от морфологического типа галактик составляет от  $1...5 M_{\odot}/L_{\odot}$  для активных и нормальных галактик до  $75 M_{\odot}/L_{\odot}$  для карликовых галактик низкой поверхностной яркости [4, 6, 16]. Есть и исключения: для карликовой сфероидальной галактики Скульптор в Местной группе оно составляет  $150 M_{\odot}/L_{\odot}$  [18]. Поскольку группы галактик по численности и масштабам находятся между индивидуальными галактиками и скоплениями, они имеют и промежуточные значения  $M/L$ . Например, оценки отношения  $M/L$ , полученные для семи самых близких групп галактик, находятся в диапазоне от 8 до  $88 M_{\odot}/L_{\odot}$  [10]. Для скоплений и сверхскоплений оценки составляют от  $(50-100) M_{\odot}/L_{\odot}$  до  $300 M_{\odot}/L_{\odot}$  и даже больше [12, 19, 20].

Пары и триплеты галактик являются наименее населенными системами. Многие из них могут быть вириализованы, поскольку наблюдаются следы взаимодействий, а также общие гало. Кроме того, такие системы встречаются в разном окружении — как в скоплениях, так и в общем поле [1—4, 11]. Это дает возможность рассмотреть их свойства, в частности отношение масса/светимость в зависимости от окружения, с тем, чтобы оценить и исследовать характер распределения и вклад темной материи на малых масштабах (до 1 Мпк).

## ВЫБОРКА ПАР И ТРИПЛЕТОВ И ПАРАМЕТРЫ ИЗОЛИРОВАННОСТИ

Мы использовали выборку галактик, созданную на основе северной части SDSS DR5 (Sloan Digital Sky Survey Data Release Five — www.sdss.org.). Выборка содержит 6786 галактик, ограниченных в объеме от  $3000 \text{ км/с} < V_{LG} < 9500 \text{ км/с}$ ,  $V_{LG}$  — лучевая скорость, приведенная за центроид Местной группы,  $H_0 = 75 \text{ км/с/Мпк}$ .

К данной выборке были независимо применены разработанные нами геометрические методы мозаики Вороного высших порядков, а именно второго (рис. 1, а) и третьего (рис. 1, б) порядков для выявления пар и триплетов соответственно. Отметим, что метод мозаики Вороного высших порядков принципиально отличается от обычной мозаики Вороного, которая широко используется для выделения групп и скоплений разной населенности [5, 7].

В результате были получены не только списки пар и триплетов галактик, но и степени изолированности каждой системы, выражающейся значением параметра  $p$  для пар и параметра  $t$  для триплетов

$$p_{ij} = \frac{\sqrt[3]{V_{ij}}}{d_{ij}}, \quad (1)$$

где  $V_{ij}$  — объем ячейки;  $d_{ij}$  — пространственное расстояние между соседними галактиками  $i$  и  $j$ . Две галактики, которые имеют общую область в мозаике Вороного второго порядка и равные максимальные параметры  $p_{\max}(1) = p_{\max}(2) = p$ , где  $p_{\max}(i) = \max(p_{ij})$ , считаются парой.

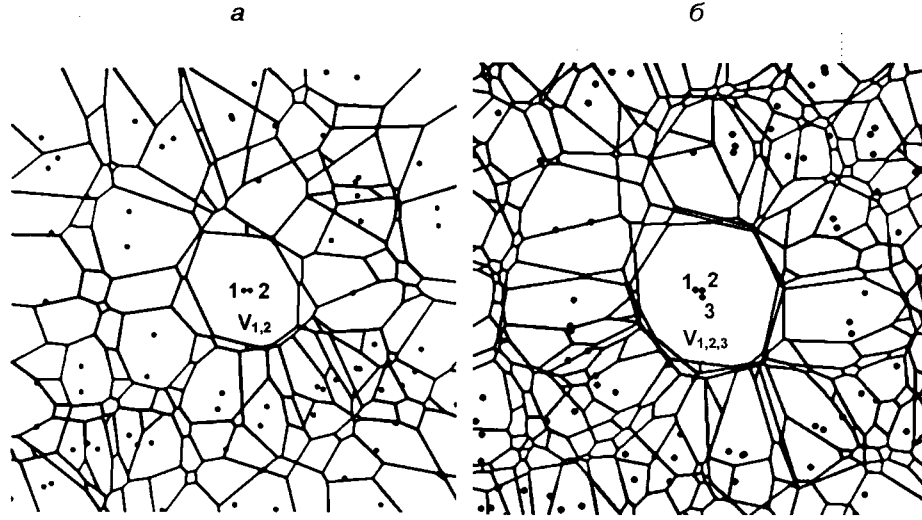


Рис. 1. Мозаика Вороного (на плоскости) второго порядка (а) и третьего порядка (б). В центре — изолированная пара (а), триплет (б)

Соответственно для триплетов галактик

$$t_{i,j,k} = \frac{\sqrt[3]{V_{i,j,k}}}{\max(d_{i,j}, d_{i,k}, d_{j,k})}, \quad (2)$$

где  $V_{i,j,k}$  — объем ячейки;  $d_{i,j}$ ,  $d_{i,k}$ ,  $d_{j,k}$  — попарные расстояния между галактиками триплета. Триплет в мозаике Вороного третьего порядка содержит три галактики, которые имеют общую ячейку и равные максимальные параметры  $t_{\max}(1) = t_{\max}(2) = t_{\max}(3) = t$ , где  $t_{\max}(i) = \max(t_{i,j,k})$ . Из уравнений (1), (2) и рис. 1 видно, что более изолированная система будет иметь большее значение параметра  $p$  или  $t$ .

#### ОТНОШЕНИЕ МАССА/СВЕТИМОСТЬ И ОКРУЖЕНИЕ

Под изолированными системами здесь и далее будем иметь в виду четверть выборки наших геометрических систем (пар и триплетов), которые имеют наибольшие значения  $p$  или  $t$ . Другими словами, изолированными будем называть такие системы, значение параметра изолированности которых больше третьего квартиля ( $Q_3$ ):  $p > 10.17$  и  $t > 3.90$  для пар и триплетов соответственно. В таблице представлены медианные значения и квартили отношения масса/светимость для систем разных выборок пар и триплетов: всех — геометрических, изолированных и компактных.

Отметим, что величины  $M_{vir}/L$  хорошо согласуются с соответствующими величинами межквартильного диапазона для групп, которые были выбраны динамическим методом. Величины  $M_{vir}/L$  для пар и триплетов из [14] равны  $18_{-14}^{+39} M_{\odot}/L_{\odot}$  и  $32_{-22}^{+34} M_{\odot}/L_{\odot}$  соответственно, а для триплетов из [1] —  $35_{-23}^{+30} M_{\odot}/L_{\odot}$ . Медиана более компактных триплетов хорошо согласуются с медианами  $M_{vir}/L = 13_{-11}^{+16} M_{\odot}/L_{\odot}$ , полученными для взаимодействующих триплетов, где возможен высокий темп звездообразования [4]. Медиана изолированных триплетов хорошо согласуются с медианой  $M_{vir}/L =$

Отношение масса/светимость для пар и триплетов галактик (в единицах  $M_{\odot}/L_{\odot}$ )

Выборка	Пары		Триплеты	
	$N$	$M_{vir}/L$	$N$	$M_{vir}/L$
Геометрические	2196	$85^{+404}_{-73}$	1182	$150^{+434}_{-111}$
Изолированные $p, t > Q_3$	519	$12^{+37}_{-10}$	297	$44^{+60}_{-28}$
Компактные $R^* < 50$ кпк (для пар) $R^* < 100$ кпк (для триплетов)	133	$7^{+28}_{-6}$	16	$8^{+16}_{-3}$

\* Здесь и далее  $R$  — проекционное расстояние между галактиками пары и максимальное расстояние между галактиками триплета

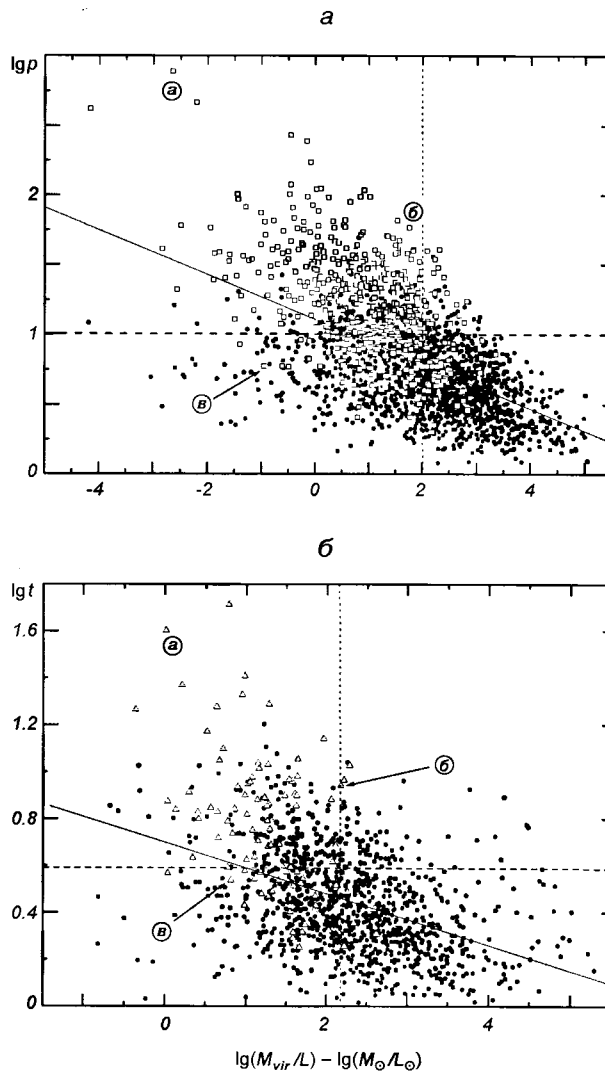


Рис. 2. Зависимость параметра изолированности пар и триплетов от отношения масса/светимость: а — параметр  $p$  (квадратики соответствуют парам с  $R < 150$  кпк, параметры регрессии:  $\lg(p) = -0.16 \lg(M_{vir}/L) + 1.11$ ,  $r = -0.57$ ,  $SD = 0.30$ ); б — параметр  $t$  (треугольники соответствуют триплетам с  $R < 250$  кпк, параметры регрессии:  $\lg(t) = -0.11 \lg(M_{vir}/L) + 0.70$ ,  $r = -0.45$ ,  $SD = 0.21$ )

$= 47_{-33}^{+48} M_{\odot}/L_{\odot}$ , которая соответствует выборке изолированных Северных [3] и Южных [11] триплетов.

На рис. 2 показаны зависимости параметров окружения пар  $p$  и триплетов  $t$  от отношения масса/светимость. Горизонтальные пунктирные линии соответствуют  $p, t = Q_3$ . Выше этих линий находятся изолированные системы. Оптические ложные пары можно отличить от физических по значению отношения  $M_{vir}/L$ . В работе [2] показано, что наибольшее число ложных пар встречается при  $M_{vir}/L > 100 M_{\odot}/L_{\odot}$ . Вертикальные линии на рис. 2 соответствуют  $M_{vir}/L = 100 M_{\odot}/L_{\odot}$  для пар и  $M_{vir}/L = 150 M_{\odot}/L_{\odot}$  для триплетов, отделяя область вероятно физических систем (слева) от вероятно ложных (справа). В нижних областях (тяготея к правой части) скорее всего содержатся ложные системы — широкие геометрические пары и триплеты, находящиеся в общем поле, галактики которых «встретились» в них случайно.

На рис. 3 изображены пары, которые характеризуются разными значениями  $M_{vir}/L$  и находятся в различном окружении (на рис. 2,  $a$  они обозначены как  $a, б, в$ ). Пара на рис. 3,  $a$  — это взаимодействующие галактики CGCG 249-018,  $V_{LG} \sim 8100$  км/с. Пара имеет высокую степень изолированности и экстремально низкое значение отношения масса/светимость, очевидно вследствие высокой светимости ( $2 \cdot 10^{10} L_{\odot}$ ), которая может свидетельствовать об активном звездообразовании, характерном для взаимодействующих пар [15]. Пара галактик на рис. 3,  $б$  — это SDSS J140937.08+560448.0 и SDSS J140954.58+560526.5,  $V_{LG} \sim 8900$  км/с,  $M_{vir}/L = 34 M_{\odot}/L_{\odot}$ , расстояние между галактиками  $R = 88$  кпк, средняя квадратичная скорость  $S_v = 16$  км/с. Недостаточно изолированная ( $p = 5.93$ ) пара галактик IC709/708 ( $1$  и  $2$  на рис. 3,  $в$ ),  $V_{LG} \sim 8900$  км/с,  $S_v = 6$  км/с,  $R = 100$  кпк. Пара находится в скоплении Abell 1314. Кроме этой пары, на рис. 3,  $в$  можно видеть еще две соразмерные галактики, галактика  $3$  имеет разность лучевых скоростей с галактиками пары  $\Delta V_{LG} = 500$  км/с, а галактика  $4$  —  $\Delta V_{LG} = 80$  км/с.

На рис. 4 приведены триплеты галактик (на рис. 2,  $б$  они обозначены как  $a, б, в$ ). Триплет (рис. 4,  $a$ ) образуют галактика NGC2796 и два ее менее массивных спутника:  $V_{LG} \sim 6970$  км/с,  $S_v = 9$  км/с,  $R = 32$  кпк. Триплет хорошо изолирован и имеет низкое отношение  $M_{vir}/L$ . Триплет галактик (рис. 4,  $б$ ) располагается на рис. 2,  $б$  как раз на границе «вероятно физических систем», поскольку его отношение масса/светимость равно

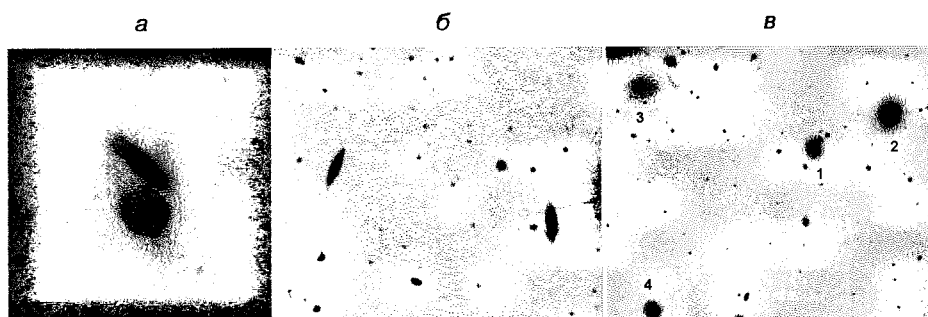


Рис. 3. Пары галактик, показанные на рис. 2,  $a$ . Изображения SDSS

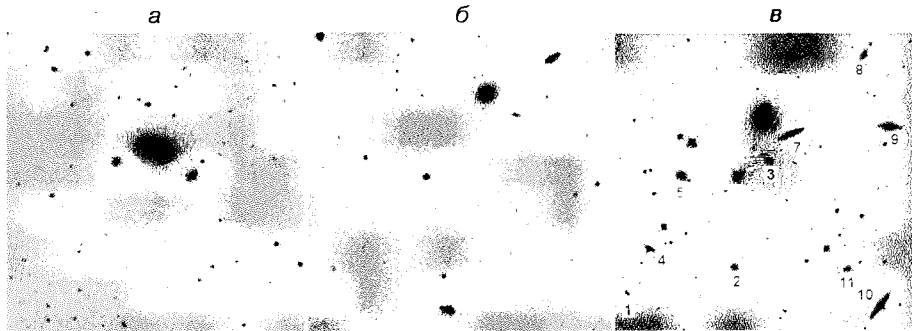


Рис. 4. Триплеты, показанные на рис. 2, б. Изображения SDSS

$150M_{\odot}/L_{\odot}$ . Средняя лучевая скорость триплета составляет  $V_{LG} \sim 7200$  км/с, средняя квадратичная скорость галактик 48 км/с, максимальное расстояние между галактиками 65 кпк. Высокое отношение  $M_{vir}/L$  может говорить о том, что триплет является «ложным», т. е. является случайной проекцией галактик, находящихся в общем поле [2]. С другой стороны, триплет достаточно изолирован  $t = 8.73$  и, возможно, вириализован — время пересечения системы  $\tau = 0.20 1/H_0$  говорит о том, что галактики системы уже могли сделать несколько пересечений за время существования Вселенной. В таком случае большое значение  $M_{vir}/L$  — это индивидуальная характеристика этой системы, одна из галактик которой является галактикой Маркаряна (MRK229). Поскольку более точный вывод сделать не представляется возможным на данном этапе исследования, мы рассматриваем особенности подобных системы по статистике.

Галактики 1, 2, 3 (рис. 4, в) образуют неизолированный триплет ( $t = 2.69$ ) с  $V_h \sim 6700$  км/с, который находится в скоплении Abell 779 вместе с галактиками 4—10). Средняя квадратичная скорость триплета  $S_v = 26$  км/с, максимальное расстояние между галактиками  $R = 198$  кпк, отношение масса/светимость  $M_{vir}/L = 9M_{\odot}/L_{\odot}$ . Наименьшая разность скоростей с галактикой 10 — около 250 км/с.

Из рис. 2 можно видеть, что компактные пары ( $R < 150$  кпк — квадраты на рис. 2, а) и триплеты ( $R < 250$  кпк — треугольники на рис. 2, б) могут быть как изолированными системами, так и находиться в более плотном окружении (см. также рис. 3 и 4). Зависимость параметра изолированности от отношения масса/светимость для этих систем проявляется четче:  $\lg(p) = -0.20\lg(M_{vir}/L) + 1.40$ ,  $r = -0.60$ ,  $SD = 0.31$  для пар и  $\lg(t) = -0.23\lg(M_{vir}/L) + 1.06$ ,  $r = -0.48$ ,  $SD = 0.26$  для триплетов. Тот факт, что для менее изолированных пар и триплетов характерны большие значения  $M_{vir}/L$ , говорит о том, что у них также больше средняя квадратичная скорость ( $M_{vir} \sim S_v^2$ ), что не удивительно, поскольку в скоплениях вириальные скорости могут достигать значений 1000 км/с. Этот результат согласуется с результатами Ейнасто и др. [8], согласно которым группы, находящиеся вблизи богатых скоплений, в 2.5 раза массивнее и в 1.6 раза ярче, чем группы в среднем. Такие группы также имеют в среднем большую дисперсию скоростей. Широкие геометрические системы в основном недостаточно изолированные и находятся в общем поле (для того чтобы выделяться над фоном, им не хватает «пустого пространства»). Как мы уже

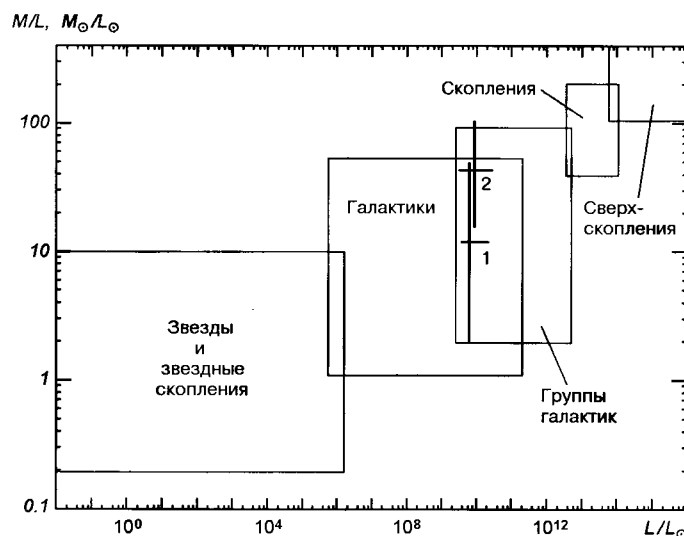


Рис. 5. Зависимость отношения масса/светимость в широком диапазоне светимости для различных объектов Вселенной от звезд до сверхскоплений. Кресты 1 и 2 соответствуют медианному значению и квартилям, полученным для пар и триплетов соответственно

отмечали, высокое значение  $M_{vir}/L$  для этих систем свидетельствует лишь об их нефизичности.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 5 приведены отношения масса/светимость для различных объектов Вселенной от звезд до сверхскоплений. Значения  $M/L$  для галактических систем взяты из работ [6, 10, 12, 16, 18—20], описанных во введении, а для звездных — из [13, 17]. Показаны также медианные значения и квартили для пар и триплетов, полученные нами выше для выборки галактик Северного неба SDSS DR5. Можно видеть, что даже на таких малых масштабах как пары и триплеты (до 300 кпк), прослеживается тенденция к увеличению массы над светимостью с ростом населенности системы.

Работа выполнена в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Исследование ранней Вселенной, скрытой массы и темной энергии».

1. Вавилова И. Б., Караченцева В. Е., Макаров И. Д., Мельник О. В. Триплеты галактик Местного сверхскопления. I. Кинематические и вириальные свойства // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—21, № 1.—С. 3—20.
2. Караченцев И. Д. Двойные галактики. — М.: Наука, 1987.—248 с.
3. Караченцев И. Д., Караченцева В. Е., Лебедев В. С. Триплеты галактик и проблема скрытой массы // Изв. Спец. астрофиз. обсерватории.—1989.—27.—С. 67—82.
4. Мельник О. В. Взаимодействующие галактики в малонаселенных группах // Письма в Астрон. журн.—2006.—35, № 5.—С. 302—307.
5. Мельник О. В., Эльшв А. А., Вавилова И. Б. Структура Местного сверхскопления галактик, выявленная трехмерным методом мозаики Вороного // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—22, № 4.—С. 283—296.
6. Chakrabarty D., Raychaudhury S. The distribution of dark matter in the halo of the early-type galaxy NGC 4636 // Astron. J.—2008.—135.—P. 2350—2357.

7. Cooper M. C., Newman J. A., Madgwick D. S., et al. Measuring galaxy environments with deep redshift surveys // *Astrophys. J.*—2005.—634, N 2.—P. 833—848.
8. Einasto M., Einasto J., Muller V., et al. Environmental enhancement of loose groups around rich clusters of galaxies // *Astron. and Astrophys.*—2003.—401.—P. 851—862.
9. Girardi M., Manzato P., Mezzetti M., et al. Observational mass-to-light ratio of galaxy systems: from poor groups to rich clusters // *Astrophys. J.*—2002.—569, N 2.—P. 720—741.
10. Karachentsev I. D. The Local Group and other neighboring galaxy groups // *Astron. J.*—2005.—129, N 1.—P. 178—188.
11. Karachentseva V. E., Karachentsev I. D. Southern isolated galaxy triplets // *Astron. Reps.*—2000.—44, N 8.—P. 501—522.
12. Khosroshahi H. G., Maughan Ben J., Ponman T. J., Jones L. R. A fossil galaxy cluster: an X-ray and optical study of RX J1416.4+2315 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—369.—P. 1211—1220.
13. Korchagin V. I., Girard T. M., Borkova T. V., et al. Local Surface Density of the Galactic Disk from a Three-Dimensional Stellar Velocity Sample // *Astron. J.*—2003.—126.—P. 2896—2909.
14. Makarov D. I., Karachentsev I. D. A new catalogue of multiple galaxies in the Local Supercluster // *ASP Conf. Ser.*—2000.—209.—P. 40—46.
15. Nikolic B., Cullen H., Alexander P. Star formation in close pairs selected from the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—355.—P. 874—886.
16. O'Sullivan E., Sanderson A. J. R., Ponman T. J. The dark haloes of early-type galaxies in low-density environments: XMM-Newton and Chandra observations of NGC 57, 7796 and IC 1531 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—380.—P. 1409—1421.
17. Rejkuba M., Dubath P., Minniti D., Meylan G. Masses and M/L ratios of bright globular clusters in NGC 5128 // *Dynamical Evolution of Dense Stellar Systems: Proc. IAU Symp.* 246.—2008.—P. 418—422.
18. Salvadori S., Ferrara A., Schneider R. Life and times of dwarf spheroidal galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2008.—386.—P. 348—358.
19. Sheldon E. S., Johnston D. E., Masjedi M., et al. Cross-correlation weak lensing of SDSS galaxy clusters III: Mass-to-light // *astro-ph:0709.1162*.
20. Trimble V. Dark matter: Past, Present, and Future // *Neutrinos and explosive events in the Universe* / Eds M. M. Shapiro, T. Stanev, J. P. Wefel. — Netherlands: Springer, 2005.—P. 181—199.

Поступила в редакцию 30.09.08