

# ЭВОЛЮЦИЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК, ОБУСЛОВЛЕННАЯ ГРАВИТАЦИОННЫМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕМ И СЛИЯНИЯМИ ГАЛАКТИК В СКОПЛЕНИИ

В. М. Конторович<sup>1</sup>, С. И. Шеляг<sup>2</sup>

Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Краснознаменная, 4, 61002, г. Харьков, Украина

Обсуждается эволюция функции масс (и функции светимости) скоплений галактик, обусловленная гравитационным взаимодействием и слияниями галактик в скоплении. В качестве характеристики выбрано богатство скоплений и массы первых по массе галактик скопления. Данные об этих величинах содержатся в каталоге Эйбла. Слияния моделируются методом Монте-Карло. Вероятность слияния зависит от масс галактик. Роль временной шкалы играет отношение текущего числа галактик к начальному. Переход к действительному времени и красному смещению ( $\Omega = 1$ ) осуществляется с помощью решения уравнения Смолуховского, описывающего процесс слияний и позволяющего найти зависимость числа галактик в моделируемом скоплении от времени. В предположении независимости отношения массы к светимости от массы получены зависимости богатства моделируемого скопления и разности звездных величин первых по яркости галактик скопления от красного смещения. Прослеживается переход скопления в I тип по классификации Баутса-Моргана на малых красных смещениях (возникновение *cD*-галактики). Массы 2-й и последующих по массе галактик скопления вначале растут, а после образования *cD*-галактики начинают уменьшаться. Проведено сопоставление полученных результатов с данными каталогов скоплений галактик. Наблюдается качественное соответствие в перечисленных зависимостях.

## 1. Введение

Развитие астрономических средств наблюдения в последнее время позволило исследовать скопления и их эволюцию на достаточно большом интервале расстояний. Благодаря росту количества наблюдательных данных была подтверждена важная роль слияний галактик в эволюции как самих галактик [1], см. также обзор [2], так и их скоплений [3]. Роль слияний увеличивается с удалением в прошлое. Так, в далеком скоплении MS1054-03 ( $z = 0.83$ ), содержащем 81 галактику, наблюдалось 13 актов слияний [4].

Роль слияний при формировании крутого спектра на слабом конце функции масс (далее ФМ) обсуждалась в [5]. В данной работе рассматривается эволюция сильного края ФМ (светимости) скопления, обусловленная слияниями галактик в скоплении. В качестве эволюционных характеристик для скопления были выбраны богатство скопления по Эйблу и звездные величины самых массивных галактик. Данные о этих величинах содержатся в каталогах [6, 7].

## 2. Эволюция богатства скопления в модели слияний (метод Монте-Карло)

Скопление моделируется методом Монте-Карло [8]. Генерируется  $N_0$  частиц с функцией распределения, локализованной на малых ( $\sim M_*$ ) массах

$$f(M) = \frac{N_0}{M_*} \exp\left(-\frac{M}{M_*}\right). \quad (2.1)$$

Затем частицы попарно сливаются с вероятностью [9]

$$U \propto (M_1 + M_2)(M_1^\beta + M_2^\beta), \quad (2.2)$$

где  $\beta$  определяется зависимостью массы галактики от ее радиуса  $R = C_\beta M^\beta$ . При плотности галактики, не зависящей от ее массы,  $\beta = \frac{1}{3}$ , а как следствие законов Талли-Фишера и Фабера-Джексона,  $\beta = \frac{1}{2}$  [8]. При каждом акте слияния выполняется закон сохранения массы.

Богатство скопления - количество галактик скопления в промежутке от  $m_3$  до  $m_3 + 2$ , где  $m_3$  - звездная величина третьей по яркости галактики скопления, вводится как интеграл от образова-

<sup>1</sup>e-mail: vkont@ira.kharkov.ua

<sup>2</sup>e-mail: sergey\_shelyag@mail.ru

шейся в результате слияний ФМ:

$$R = \int_{M(m_3+2)}^{M(m_3)} f(M) dM. \quad (2.3)$$

Звездные величины галактик  $m$  рассчитываются по формуле Погсона, при этом отношение масс-светимость для галактики принимается не зависящим от массы:

$$\frac{M}{L} = const, \quad \frac{M_1}{M_2} = \frac{L_1}{L_2} = 2.512^{m_2 - m_1}. \quad (2.4)$$

Таким образом, можно вычислить зависимости богатства скопления, масс и разностей звездных величин старших галактик скопления от числа слияний  $N$ . Эти зависимости представлены на рис. 1, 2, 3.

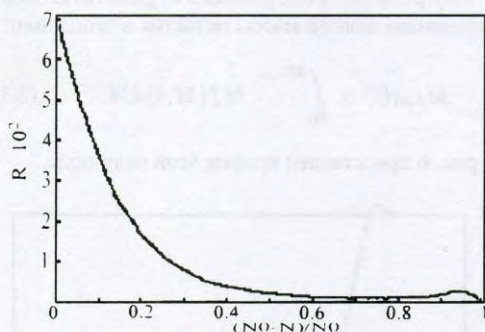


Рис. 1. Зависимость богатства скопления в модели слияний (метод Монте-Карло) от числа актов слияний.

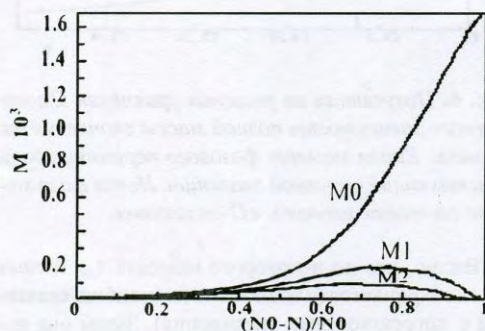


Рис. 2. Зависимость масс старших галактик скопления от числа актов слияний.

Величина  $(N_0 - N)/N_0$  равна 0 в начале и 1 в конце процесса слияний. Приведенные результаты соответствуют значению  $N_0 = 1000$ ; число

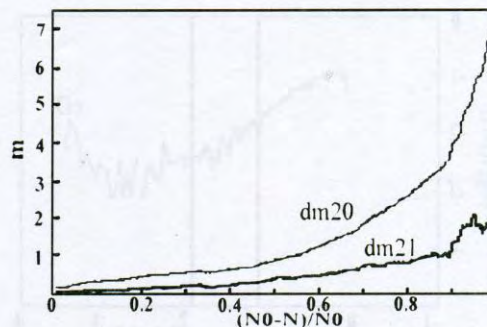


Рис. 3. Зависимость разности звездных величин старших галактик скопления от числа актов слияний.

реализаций, по которым проводилось усреднение, равно 100. Необходимо отметить, что, начиная с некоторого момента, масса самой крупной галактики скопления начинает резко расти, а массы последующих – падать. Этот момент можно сопоставить взрывной эволюции [9] и связать с образованием в скоплении гигантской эллиптической галактики –  $cD$ -галактики [10]. В это же время богатство скопления начинает расти из-за уменьшения массы третьей по яркости галактики, и, как следствие, перемещения промежутка, определяющего богатство скопления, в сторону меньших масс. Рост продолжается до тех пор, пока не наступит истощение скопления – значение богатства станет приблизительно равным численности скопления и далее будет падать вместе с каждым слиянием. На рис. 4, 5 приведены ФМ в начальный момент времени и в момент образования  $cD$ -галактики. Вертикальными линиями отмечен промежуток ФМ, определяющий богатство.

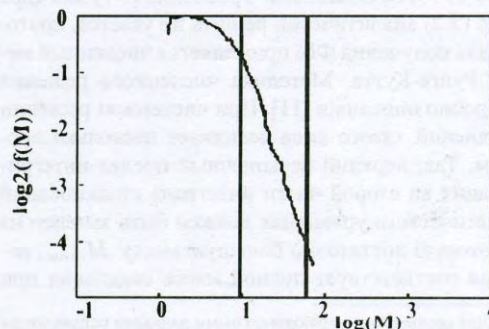


Рис. 4. Начальная функция масс галактик при моделировании методом Монте-Карло.

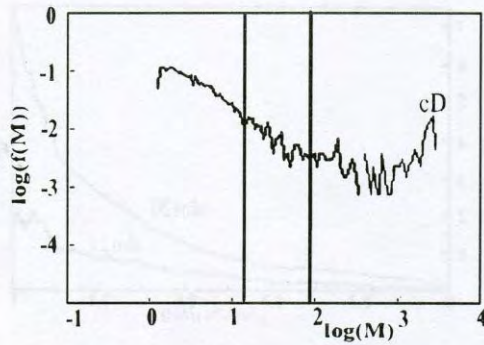


Рис. 5. Функция масс в момент образования cD - галактики.

### 3. Пересчет числа актов слияний в красное смещение с помощью уравнения Смолуховского

Для сравнения полученных зависимостей с наблюдательными данными необходимо вначале выполнить пересчет числа актов слияния в прошедшее с начала слияний время, а затем в красное смещение<sup>3</sup>. Пересчет осуществляется при помощи уравнения Смолуховского, описывающего процесс слияний:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(M, t)}{\partial t} = & \int_0^M U(M_1, M - M_1, t) \\ & \times f(M, t) f(M - M_1, t) dM_1 \\ & - 2f(M, t) \int_0^\infty U(M_1, M, t) f(M_1, t) dM_1, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $U(M_1, M_2, t)$  определяется выражением (2.2), а

$f(M, t)$  - ФМ скопления. Уравнение (3.1) для ядра вида (2.2) аналитически решить не удастся, поэтому для получения ФМ применяется численный метод Рунге-Кутты. Методика численного решения подробно описана в [11]. При численном решении уравнений такого вида возникает несколько проблем. Так, верхний бесконечный предел интегрирования во второй части интеграла столкновений кинетического уравнения должен быть заменен на некоторую достаточно большую массу  $M_{max}$ , которая соответствует полной массе скопления при

<sup>3</sup>Для сравнения с наблюдательными данными используется дополнительное предположение об "одновременности" возникновения скоплений при  $z = z_0$ , соответствующем началу слияний галактик в скоплениях. Этот момент может быть связан с отделением скоплений от общего расширения.

моделировании методом Монте-Карло. Чтобы получить ФМ в широком диапазоне вводится логарифмическая ось масс  $z = \lg(M + const)$ , где константа введена для исключения бесконечного нижнего предела интегрирования в обеих частях интеграла столкновений. Интерполяционная формула, являющаяся точной для функций вида (2.1), пропорциональных  $\exp(-x)$ ,

$$\ln f(M) \approx \ln f_i + \frac{\ln f_{i+1} - \ln f_i}{M_{i+1} - M_i} (M - M_i), \quad (3.2)$$

$$f_i = f(M_i), f_{i+1} = f(M_{i+1}), M_i \leq M \leq M_{i+1}$$

применяется для нахождения ФМ в точках, не совпадающих с узлами сетки, на которой строится решение. Для удобства время на рисунках нормируется на величину  $(n_{gal} M_0^{1+\beta})^{-1}$ .

Контроль точности решения осуществляется по сохранению полной массы галактик в скоплении:

$$M_{full}(t) \propto \int_0^{M_{max}} M f(M, t) dM. \quad (3.3)$$

На рис. 6 представлен график этой величины.

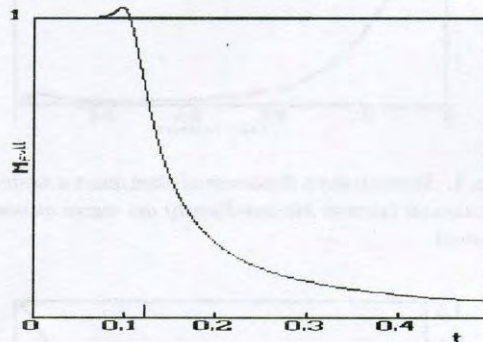
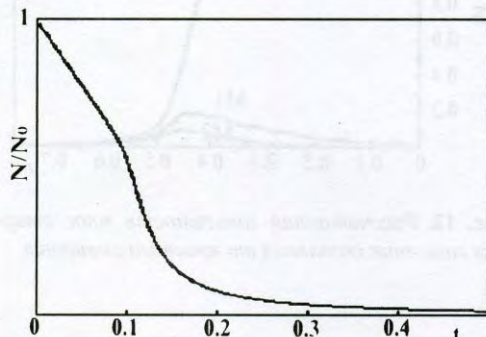


Рис. 6. Полученная из решения уравнения Смолуховского зависимость полной массы скопления от времени. Виден момент фазового перехода, соответствующий взрывной эволюции. Новая фаза может соответствовать cD-галактике.

Видно, что до некоторого момента  $t_{cr}$  полная масса сохраняется (с точностью до ошибки, связанной с погрешностями округления). Затем она начинает быстро падать. Последнее происходит при взрывной эволюции и связывается с образованием cD-галактики [8, 9, 10, 11]. На требуемую для выполнения пересчета функцию  $N(t)$  (рис. 7)

$$N(t) \propto \int_0^{M_{max}} f(M, t) dM \quad (3.4)$$

это заметным образом не влияет, так как области ФМ, со времени  $t_{cr}$  выходящей за предел интегрирования  $M_{max}$  при вычислении интеграла столкновений, соответствует всего одна галактика скопления.

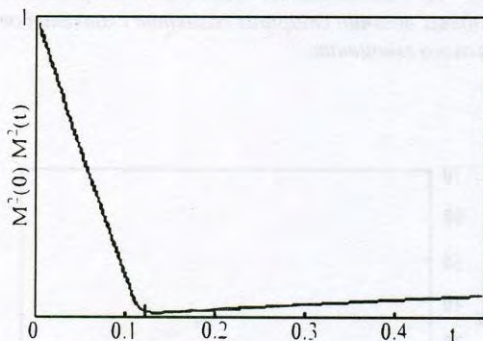


**Рис. 7.** Зависимость числа галактик скопления от времени, полученная из решения уравнения Смолуховского. Эта зависимость используется для пересчета числа актов слияний во время  $t$ , прошедшее с начала слияний.

Момент  $t_{cr}$  может быть вычислен по стремлению к нулю величины, обратной второму моменту ФМ [11]

$$\mu^{(2)}(t) \propto \int_0^{M_{max}} M^2 f(M) dM \quad (3.5)$$

График функции  $(\mu^{(2)}(t))^{-1}$  приведен на рис. 8.



**Рис. 8.** Полученная из решения уравнения Смолуховского зависимость величины, обратной второму моменту распределения ФМ, от времени. Эта величина должна стремиться к нулю в момент  $t_{cr}$ .

Момент времени  $t_{cr} \approx 0.12$  в величинах, указанных выше, находится как точка пересечения касательной к графику с осью времени.

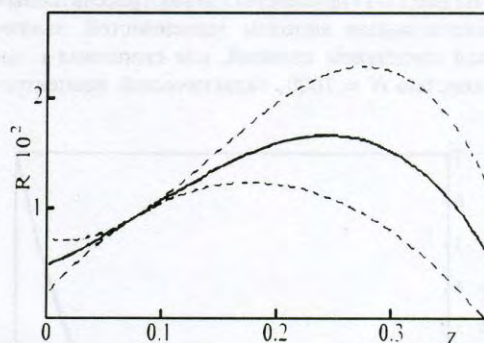
Пересчет к красному смещению  $z$  производится по известным формулам для плоского мира:

$$z = \left[ (z_0 + 1)^{-3/2} - \frac{\tau}{\tau_H} \right]^{-2/3} - 1, \quad (3.6)$$

$$\tau_H = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0},$$

где  $\tau = t/c_{1+\beta}$ ,  $c_{1+\beta} = 2\sqrt{3}\pi \frac{G}{v_*} C_\beta$  [8],  $v_*$  - средняя скорость движения галактик в скоплении,  $C_\beta$  - см. (2.2).

Величина  $z_0$ , соответствующая моменту образования скопления, определяется ниже косвенно из наблюдательных данных. По расширенным каталогам Эйбла [6, 7] с использованием данных о красных смещениях скоплений [12] построены гистограммы зависимостей усредненного богатства скоплений Эйбла, разности звездных величин третьей и первой галактик скоплений и относительного количества  $cD$ -скоплений от красного смещения (см. рис. 9). Для определения  $z_0$  кривая, полученная методом наименьших квадратов по гистограмме богатства от красного смещения, экстраполируется в сторону больших  $z$  до пересечения с осью  $z$ . Полученный минимум богатства  $z_{cr} \approx 0.4 \div 0.5$  мы сопоставим минимуму богатства в момент времени  $t_{cr}$ , вычисленному из решения уравнения Смолуховского. В свою очередь,  $z_0$  определяется из выражения (3.6) по соответствию  $t_{cr}$  и  $z_{cr}$ . Полученный момент образования скопления  $z_0 \approx 0.9$  не противоречит наблюдательным данным [13].



**Рис. 9.** Гистограмма зависимости богатства скоплений от красного смещения по данным каталогов Эйбла. Кривая, построенная методом наименьших квадратов по гистограмме, с некоторого момента начинает падать в сторону больших  $z$ . Минимум, полученный экстраполяцией кривой, ставится в соответствие минимуму богатства в момент времени  $t_{cr}$ .

Отметим, что полученное значение  $z_{cr}$  совпадает с красным смещением, на котором в ряде скоплений наблюдается эффект Батчера-Оемлера - изменение цвета галактик в скоплениях [3], который может быть связан с интенсивными слияниями, происходящими во время взрывной эволюции скопления. Дополнительным свидетельством в пользу сценария слияний может служить резкий рост количества  $cD$ -скоплений в области малых красных смещений (см. рис. 10).

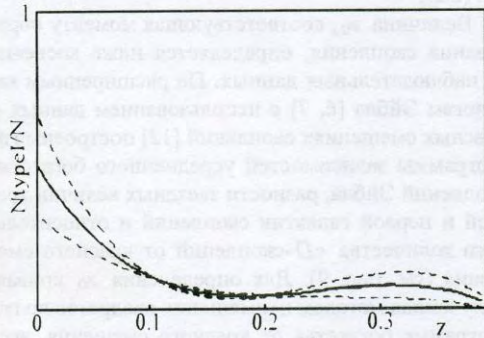


Рис. 10. Зависимость относительного числа  $cD$ -скоплений от красного смещения, построенная по каталогам Эйбла.

#### 4. Сравнение модели слияний с данными наблюдений

На рис. 11-17 приведены графики рассчитанных вышеописанным методом зависимостей, являющихся следствием слияний, для скопления с численностью  $N = 1000$ , галактической концентра-

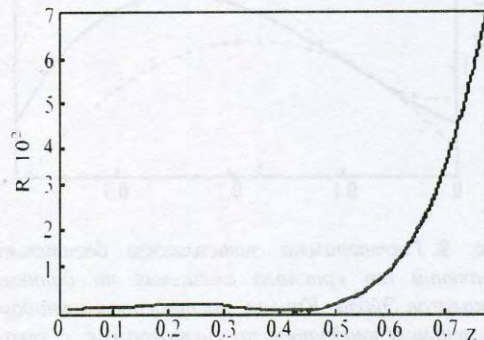


Рис. 11. Полученная из описанного выше расчета зависимость богатства скоплений от красного смещения.

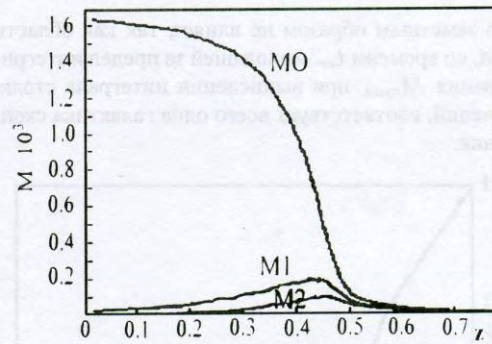


Рис. 12. Рассчитанная зависимость масс старших галактик скопления от красного смещения.

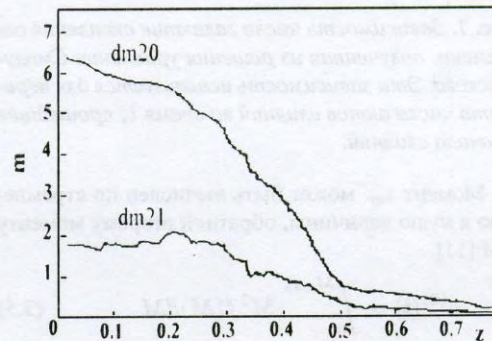


Рис. 13. Рассчитанная зависимость разности звездных величин старших галактик скопления от красного смещения.

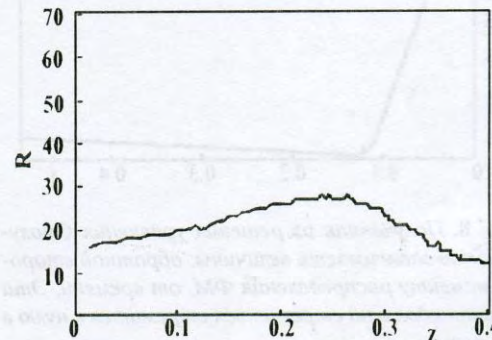


Рис. 14. Рассчитанная зависимость богатства скопления в интервале красных смещений каталога Эйбла.

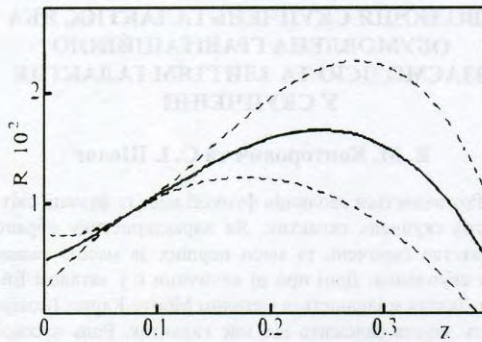


Рис. 15. Гистограмма богатства скоплений Эйбла от красного смещения.

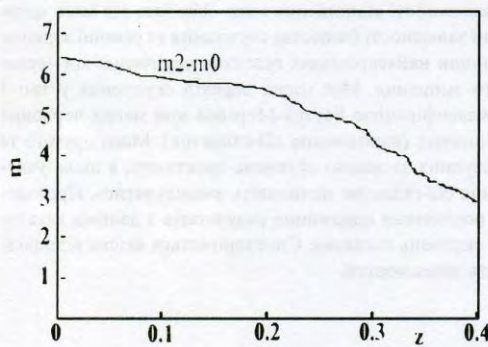


Рис. 16. Рассчитанная зависимость разности звездных величин старших галактик скопления в интервале красных смещений каталога Эйбла.

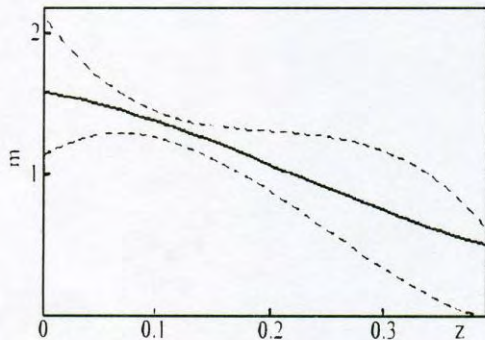


Рис. 17. Гистограмма разности звездных величин 1-й и 3-й галактик скоплений Эйбла от красного смещения.

шей  $n_{gal} = 100 \text{ Мпс}^{-3}$ , величиной  $M_* = 2 \times 10^{11} M_{\odot}$ , среднеквадратичной скоростью движе-

ния галактик в скоплениях  $v_* = 10^7 \text{ см/с}$ . Из приведенных графиков видно качественное соответствие между рассчитанными и наблюдаемыми зависимостями.

## 5. Возможные возражения

Основная трудность использования данной модели состоит в том, что взрывная эволюция приводит к слишком крутому наклону степенного участка спектра на сильном краю ФМ  $f(M) \propto M^{-\alpha}$ .

Шехтеровский индекс  $\alpha$  расположен между значениями  $(u+3)/2$  и  $(u+2)/2$ , соответствующими постоянным потокам массы и числа массивных галактик по спектру, где  $u$  - показатель однородности коэффициента коагуляции  $U \propto M^u$ . Более

пологий спектр (на участке степенной промежуточной асимптотики) должен соответствовать значениям  $u$  меньшим единицы, что противоречит условиям взрывной эволюции.<sup>4</sup> Возможности преодоления этой трудности в рамках сценария слияний связаны, по-видимому, с существенным усложнением модели. Еще одно упрощение связано с введением независимости отношения масса-светимость от массы. Плавная космологическая зависимость, действительно, не очень велика (см. интересное обсуждение в [14]). Но для нашего подхода могут быть существенны детали зависимости этого отношения от  $z$ .

## Список литературы

- [1] R. C. Kennicutt, Jr., F. Schweizer, J. E. Barnes, *Galaxies: Interactions and Induced Star Formation*. Saas-Fee Advance Course 26, Springer, (1998).
- [2] В. М. Конторович, *Кинематика и физика небесных тел*, Приложение, 2, 47 (1999)
- [3] A. Dressler, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **22**, 185 (1984)
- [4] P. G. van Dokkum, M. Franx, D. Fabricant, D. D. Kelson, G. D. Illingworth, *Ap. J.*, **520**, L95 (1999)
- [5] V. Kontorovich, *Small Galaxy Groups. Proceedings of IAU Colloquium 174*, **209**, 423 (1999)

<sup>4</sup>Отметим, что, хотя мы и использовали терминологию взрывной эволюции, наш анализ с ней кардинально не связан. Что же касается ФМ, то здесь эта связь более существенна. Так, уже отмечалось, что  $\alpha$ , лежащее между 1 и 3/2, соответствует  $u$ , близкому к нулю ([5]), если считать, что, как и при взрывной эволюции, индекс Шехтера формируется потоковыми спектрами. Малые значения  $u$  могут отражать наличие конкуренции между массивными притягивающими центрами.

- [6] J. Osborne, [ftp://ftp.legacy.gsfc.nasa.gov/heasarc/dbase/db\\_files/abelldb.dat.z](ftp://ftp.legacy.gsfc.nasa.gov/heasarc/dbase/db_files/abelldb.dat.z)
- [7] <http://www.asc.rssi.ru/Fstar/7/7004a/abell.dat>
- [8] D. S. Krivitsky, V. M. Kontorovich, *Astr. & Astrophys. Trans.*, **18**, 43 (1999)
- [9] V. M. Kontorovich, D. S. Krivitsky, A. V. Kats, *Physica D*, **87**, 290 (1995)
- [10] A. Cavaliere, S. Colfrancesco, N. Menci, *Ap. J.*, **392**, 41 (1992)
- [11] D. S. Krivitsky, *J. Phys. A: Math. Gen.*, **28**, 2025 (1995)
- [12] M. F. Struble, H. J. Rood, *Ap. J.*, **125**, 35 (1999)
- [13] П. Д. Даркесаманский, М. В. Конюков, Исследование скоплений и внегалактических источников радиоизлучения. Труды ФИАН, **189**, 5, М. Наука (1988)
- [14] M. Franx, P. G. van Dokkum, D. Kelson, D. G. Fabrikant, G. D. Illingworth, *Phyl. Trans. R. Soc. Lond. A.*, **358**, 2109 (2000)

#### EVOLUTION OF GALAXIES CLUSTERS CAUSED BY GRAVITATIONAL INTERACTION AND MERGING GALAXIES AND CLUSTERS

V. M. Kontorovich and S. I. Sheliag

The evolution of the galaxy mass function (and luminosity functions), depending on gravitational interaction and merging of galaxies in cluster, is discussed. The richness and masses of the first by mass and luminosity galaxies of cluster is chosen as its characteristic. The data about these magnitudes is taken in the Abell catalogue. Mergings are simulated by Monte-Carlo method. The probability of merging depends on the masses of galaxies. The ratio of the current number of galaxies to initial plays the role of the time scale. The transition to the real time and redshift realized with help of the Smoluchowsky equation solution describing the merging process and making possible to find the time-dependence of the galaxy number in the simulated cluster. The dependencies of richness, masses and magnitude differences of the first by mass and brightness galaxies of cluster on redshift have been obtained. The transition of the cluster to type I by Bautz-Morgan classification has been retraced on small redshifts (creation of cD-galaxy). The masses of 2-nd and the following cluster galaxies grow but after the creation of cD-galaxy they begin to decrease. The obtained results are compared with data of the catalogues of galaxies clusters. A correspondence in the mentioned dependencies is observed.

#### ЕВОЛЮЦІЯ СКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК, ЯКА ОБУМОВЛЕНА ГРАВІТАЦІЙНОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ ТА ЗЛИТТЯМ ГАЛАКТИК У СКУПЧЕННІ

В. М. Конторович та С. І. Шеляг

Розглядається еволюція функції мас (та функції світності) скупчень галактик. Як характеристику обрано багатство скупчень та маси перших за масою галактик скупчення. Дані про ці величини є у каталозі Ейбла. Злиття моделюється методом Монте-Карло. Імовірність злиття залежить від мас галактик. Роль часової шкали виконує відношення існуючої кількості галактик до початкової. Перехід до існуючого часу та червоного зміщення здійснюється за допомогою рішення Смолюховського, що описує злиття та дозволяє знайти залежність числа галактик у скупченні від часу. У припущенні незалежності відношення маса-світність від маси одержані залежності багатства скупчення та різниці зоряних величин найяскравіших галактик скупчення від червоного зміщення. Має місце перехід скупчення у тип I за класифікацією Баутса-Моргана при малих червоних зміщеннях (народження cD-галактик). Маси другого та наступних за масою скупчень зростають, а після утворення cD-галактик починають зменшуватись. Проведено порівняння одержаних результатів з даними каталогів скупчень галактик. Спостерігається якісна відповідність залежностей.

