

ДИНАМИКА ГРУПП ГАЛАКТИК В РАЗЛИЧНЫХ
МОДЕЛЯХ ГРАВИТАЦИИ

О.Б.БЕКЕТОВ, В.В.ОРЛОВ

Поступила 12 октября 2011

Принята к печати 23 ноября 2011

Проведена серия численных экспериментов по моделированию динамической эволюции групп галактик в рамках различных моделей гравитации. Результаты моделирования сравниваются с наблюдениями Местной Группы и групп галактик CenA/M83 и M81/M82. Было установлено, что Λ CDM -модель и модель с модифицированной ньютоновской динамикой (MOND) значительно лучше согласуются с наблюдениями, чем две другие рассмотренные модели. Дисперсия скоростей относительно закона Хаббла в рамках данных моделей невелика, но MOND-модель дает слегка завышенные значения. В случае начальных условий, близких к вириальному равновесию, среднеквадратичные отклонения скоростей галактик составляют ~ 30 км/с, что согласуется с наблюдательными оценками.

Ключевые слова: *галактики; группы; динамика*

1. *Введение.* Группой называется система галактик, насчитывающая от 3 до 50-100 членов. Таким образом, группы занимают промежуточное положение между одиночными галактиками и скоплениями. В отличие от скоплений выделить группы из фона не так просто. Активное исследование групп стало возможно только с появлением обширных трехмерных каталогов галактик, т.е. только в последние несколько десятилетий. В работе Макарова и Караченцева [1] указывается на широкую распространенность групп галактик малой кратности. По данным этих авторов в них содержится около 55% галактик. Как правило в группе имеется 2-4 массивных галактики, а остальные галактики значительно меньше. Типичным примером может служить Местная Группа, в которой имеются два ярко выраженных центра - Млечный Путь и Туманность Андромеды. Широкая распространенность групп позволяет использовать данные по ним для проверки различных теорий, в частности космологических моделей.

В данной работе рассматривалась динамическая эволюция групп галактик на временных промежутках, сравнимых с современными оценками возраста Вселенной. Сравнивались результаты численного моделирования динамики групп в рамках нескольких моделей гравитации с данными наблюдений близких групп галактик.

Рассматривались четыре модели. Стандартная на данный момент космологическая модель - Λ CDM, основанная на эффекте антитяготения,

вызываемого действием темной энергии (см. Чернин [2]). Во второй модели используется теория модифицированной ньютоновской динамики - MOND, разработанная Милгромом [3], которая в настоящее время является наиболее феноменологически успешной среди модифицированных теорий. Третья, используемая для сравнения, модель основывается на классической динамике Ньютона. Последняя модель была предложена в работе Райкова и Орлова [4]. Для гиперболических движений в эту модель вводится дополнительное ускорение, направленное против вектора скорости тела и постоянное по величине.

Подобное ускорение наблюдалось у космических аппаратов "Пионер-10" и "Пионер-11" (см. Турушев и др. [5]). Появление дополнительного ускорения объясняется в работе Райкова и Орлова [4] особым характером свободного движения внутри самогравитирующего фрактала и взаимодействием тела с переносчиками гравитационного поля - гравитонами. Авторы назвали это дополнительное ускорение диссипативным фрактальным ускорением (ДФУ). Также изучалось влияние на эволюцию групп различных вариантов начальных условий и наличия в группе общего гало из темной материи.

2. Модели.

2.1. *Выбор начальных данных.* Положения тел задавались равномерно случайно внутри сферы радиусом $R=1$ Мпк. Скорости выбирались изотропно внутри сферы единичного радиуса. Полученные координаты и скорости приводились к центру масс группы. После этого скорости перенормировались так, чтобы вириальный коэффициент был равен заданному значению (вириальный коэффициент k равен отношению кинетической энергии к модулю потенциальной энергии). Начальный вириальный коэффициент принимал четыре значения: $k=0.0$ (коллапс), 0.1, 0.3, 0.5 (вириальное равновесие).

2.2. *Спектр масс.* Массы тел задавались двумя способами:

- Все массы равны между собой (EM - equal masses). В данном случае все массы выбирались равными $10^{10} M_{\odot}$.

- Аналог Местной Группы: две массы значительно превосходят все остальные (LG - Local Group). Значения масс для этих двух объектов выбирались равными $10^{12} M_{\odot}$ - аналог Галактики, и $2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ - аналог M31. Для остальных тел массы выбирались равными $10^{10} M_{\odot}$.

Полные массы групп составляли соответственно $0.5 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ и $3.5 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ для случая равных масс и аналога Местной Группы. Каждая группа состоит из $N=50$ галактик.

2.3. *Темная материя.* В моделях групп с общим темным гало распределение темной материи задавалось при помощи метода сферического избытка плотности (SO - spherical overdensity) (Лукич и др. [6]). Метод

SO определяет гало темной материи через задание сферического распределения с установленным избытком плотности. Основным недостатком данного метода является навязывание сферической симметрии, хотя в реальности гало могут иметь неправильную структуру (см. Лукич и др. [6]). Такое простое приближение было выбрано в связи с тем, чтобы модель имела, в первую очередь, качественный характер, а влияние различных распределений темного вещества на результат было не велико.

В качестве профиля плотности гало был выбран NFW - профиль (Navarro-Frenk-White) (см. Наварро и др. [7,8]):

$$\rho(r) = \frac{\rho_s}{\frac{r}{r_s} \left[1 + \frac{r}{r_s} \right]^2}, \quad (1)$$

где ρ_s и r_s - плотность ядра и масштабный радиус, соответственно. Эти параметры, в свою очередь, выражаются через массу M_Δ сферического избытка плотности и концентрацию c :

$$\rho_s = \frac{\Delta \rho_c c^3}{3[\ln(1+c) - c/(1+c)]}, \quad (2)$$

$$r_s = \frac{1}{c} \left[\frac{3 M_\Delta}{4\pi \Delta \rho_c} \right]^{1/3}, \quad (3)$$

где ρ_c - критическая плотность, Δ - сферический избыток плотности. Полная масса в пределах сферы радиуса r вычислялась как:

$$M(r) = \int_0^r 4\pi \xi^2 \frac{\rho_s}{\frac{\xi}{r_s} \left[1 + \frac{\xi}{r_s} \right]^2} d\xi = 4\pi \rho_s r_s^3 \left[\ln \left(1 + \frac{r}{r_s} \right) - \frac{r/r_s}{1 + r/r_s} \right]. \quad (4)$$

Для модели использовались следующие параметры $\Delta = 200$, $c = 20$, $M_\Delta = 6 \cdot 10^{12} M_\odot$ и $M_\Delta = 60 \cdot 10^{12} M_\odot$ (см. Лукич и др. [6]).

3. Уравнения движения.

3.1. Λ CDM - модель. В современной космологии стандартной является Λ CDM - модель (Λ CDM - Λ Cold Dark Matter), которая описывается решениями уравнений ОТО и содержит космологическую постоянную Λ в качестве свободного параметра (см. Чернин [2]).

Физический источник антитяготения - темная энергия. Темная энергия расталкивает любые два тела с силой, пропорциональной расстоянию между этими телами. Однако можно рассматривать ее влияние и как отталкивание всех тел от какой-то одной точки, т.к. относительные движения тел при этом не изменяются. В данной работе в качестве такой точки выбран центр масс группы. Движение каждой галактики описывается

системой уравнений:

$$\ddot{\mathbf{r}}_j = \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{GM_i \mathbf{r}_{ij}}{(r_{ij}^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_j^2)^{3/2}} + \Lambda \mathbf{r}_j \quad j = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Здесь первое слагаемое - векторная сумма сил притяжения, действующих со стороны других галактик, а второе определяет влияние темной энергии. В этом уравнении r_j - расстояние j -й галактики от центра масс группы, \mathbf{r}_{ij} - вектор от j -й галактики к i -й, M_i - масса i -й галактики, а ε_i и ε_j - стандартные добавки для смягчения потенциала, которые позволяют учесть протяженность галактик и избавиться от обращения знаменателя в ноль при тесных сближениях. Галактики представляют собой сферы Пламмера [9]. Константа Λ определяется следующим образом (см. Чернин [2]):

$$\Lambda = \frac{8\pi}{3} G \rho_V \approx 3.8 \cdot 10^{-36} \text{ с}^{-2}, \quad (6)$$

где ρ_V - плотность темной энергии.

Влияние остального вещества во Вселенной здесь не учитывается. Это связано с предположением, что вещество распределено вне рассматриваемой области примерно равномерно, а также, что группа достаточно изолирована, чтобы действием на нее соседних группировок галактик можно было пренебречь.

3.2. Модифицированная ньютоновская динамика (MOND).

Во многих системах, таких как спиральные галактики или группы галактик, наблюдается несоответствие между наблюдаемой кинематикой внешних частей систем и предсказанной на основе ньютоновской динамики с учетом светящейся материи. Чтобы объяснить эти аномалии, было предложено ввести небарионную, слабовзаимодействующую материю (Cold Dark Matter - CDM) (см., например, Халилл, Мунос [10]). Найти физический носитель темной материи пока не удалось.

В качестве альтернативного решения было предложено модифицировать законы Ньютона на определенных масштабах ускорений. Одной из наиболее успешных модификаций является Модифицированная ньютоновская динамика (Modified Newtonian Dynamics - MOND), предложенная Милгромом в 1983 году [3].

Милгром предложил изменить второй закон Ньютона, приведя его к форме:

$$m \mu \left(\frac{a}{a_0} \right) \mathbf{a} = \mathbf{F}, \quad (7)$$

или, если перейти к ускорениям,

$$a_N = a \mu \left(\frac{a}{a_0} \right), \quad (8)$$

где a_N - ньютоновское ускорение, a - модифицированное ускорение,

a_0 - новая константа размерности ускорения, определяющая границу, ниже которой ньютоновская динамика нуждается в модификации. Для предельного ускорения было принято значение $a_0 = 1.17 \cdot 10^{-8}$ см/с² (см. Ангус и др. [11]). Функция $\mu(x)$ - некоторая интерполяционная функция, позволяющая переходить между режимами. Она должна обладать следующими свойствами:

$$\mu(x) \approx \begin{cases} 1 & \text{при } x \gg 1, \\ x & \text{при } x \ll 1. \end{cases}$$

В качестве $\mu(x)$ использовалась функция (см. Милграм [3]):

$$\mu(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}. \quad (9)$$

Используя соотношения (9) и (8), получаем выражение для модифицированного ускорения

$$a^2 = a_N^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4a_0^2}{a_N^2}} \right). \quad (10)$$

Таким образом, уравнения движения примут вид:

$$\ddot{r}_j = \sqrt{1 + \frac{4a_0^2}{a_N^2}} \cdot \left(\sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{GM_i r_{ij}}{(r_{ij}^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_j^2)^{3/2}} \right) \quad j = 1, \dots, N. \quad (11)$$

3.3. Ньютоновская модель. Для сравнения была рассмотрена модель, в которой объекты взаимодействуют по классическим законам Ньютона. Уравнения движения для нее имеют вид:

$$\ddot{r}_j = \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{GM_i r_{ij}}{(r_{ij}^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_j^2)^{3/2}} \quad j = 1, \dots, N. \quad (12)$$

3.4. Модель с диссипативным фрактальным ускорением (ДФУ).

Стандартная космологическая модель сталкивается с рядом трудностей:

- Из-за значительных неоднородностей распределения вещества закон Хаббла не должен выполняться в пределах Местного Объема.
- Метод стыковок значений постоянной Хаббла, полученных для Местного Объема и на космологических масштабах, неопределен.
- Дисперсия скоростей галактик в пределах Локального Хаббловского потока является аномально низкой.

В связи с этим в работе Райкова и Орлова [4] был предложен новый вариант фрактальной модели. Суть ее заключается в особом характере свободного движения объектов внутри самогравитирующего фрактала на хаббловских масштабах. Уравнения движения в данном случае будут иметь вид (см. Райков и Орлов [4]):

$$\ddot{r}_j = \sum_{i=1, i \neq j}^N \frac{GM_i r_{ij}}{(r_{ij}^2 + \varepsilon_i^2 + \varepsilon_j^2)^{3/2}} - a \frac{V_j}{V_j} \quad j = 1, \dots, N. \quad (13)$$

Здесь $a = H_{dis}c = \text{const} \approx 8 \cdot 10^{-8} \text{ км/с}^2$ - константа, определяющая модуль ускорения, направленного против вектора скорости и действующего до тех пор, пока орбита галактики является гиперболической, c - скорость света. Физическая природа этого эффекта не выяснена до конца, однако наблюдения космических аппаратов "Пионер-10" и "Пионер-11" (см. Турушев и др. [5]) демонстрируют, что он может иметь место.

В данном случае необходимо также учитывать действие диссипативного ускорения на фотоны, а следовательно и на красные смещения галактик. Фотоны теряют энергию при взаимодействии с гравитонами - переносчиками гравитационного поля, совокупность которых подобна вязкой среде, поэтому торможение частицы является диссипативным процессом (детали этого взаимодействия пока не исследованы) (см. Райков и Орлов [4]). Для учета данного эффекта использовалась обобщенная формула Маттига (см. Райков, Орлов [4]) для космологического красного смещения:

$$z_{\text{cис}} = z_{\text{Dop}} + z_{\text{grav}} + z_{\text{dis}} = \frac{v}{c} + \frac{\Delta\phi}{c^2} + \frac{H_{\text{dis}}r}{c}, \quad (14)$$

где $\Delta\phi$ - гравитационный потенциал. Первый член обусловлен внутренними движениями галактик в системе, второй член дает гравитационное красное смещение, а третий обусловлен диссипативными эффектами.

3.5. Численное моделирование. Уравнения интегрировались во всех моделях методом Рунге-Кутты 4-го порядка с постоянным шагом в течение 13.7 млрд лет. Шаг был выбран равным 10 млн лет. Для контроля точности рассматривалась система из двух пробных тел. Уравнения движения интегрировались вперед в течение 13.7 млрд лет, после этого скорости тел менялись на противоположные и уравнения движения интегрировались в обратном направлении. Вычислялись отклонения параметров относительно значений в начальный момент. Ошибка составила порядка 10^{-3} км/с для скоростей и 10^{-3} Мпк для расстояний. Шаг выбирался так, чтобы отклонения параметров были минимальными при разумном процессорном времени.

4. Наблюдательные данные. В качестве наблюдательного материала для тестирования моделей использовались данные для трех близких групп галактик:

- Местная Группа галактик;
- группа, сосредоточенная вокруг двух гигантских галактик CenA (NGC5128) и M83 (NGC5236);
- группа галактик, связанных с M81 и M82.

Эти группы обладают сходными свойствами. Все они имеют гантелеобразную структуру. Общая масса каждой группы составляет $\sim 10^{12} M_{\odot}$, причем около 90% массы содержится в двух центральных галактиках, превосходящих остальные по массе на 1-2 порядка. Максимальное удаление

галактик от центра группы не превышает 3 Мпк, а радиальные составляющие скоростей галактик по отношению к центру масс группы не превышают 260 км/с.

По результатам численного моделирования были построены зависимости $V_r(R)$, где V_r - радиальная составляющая скорости галактики по отношению к центру масс группы, а R - расстояние от галактики до центра масс. Подобные зависимости были также построены для наблюдаемых групп. Расстояния были получены по светимостям звезд из вершины ветви красных гигантов, а скорости, в основном, по радионаблюдениям нейтрального водорода HI (см. Чернин и др. [12], Караченцев и др. [13]).

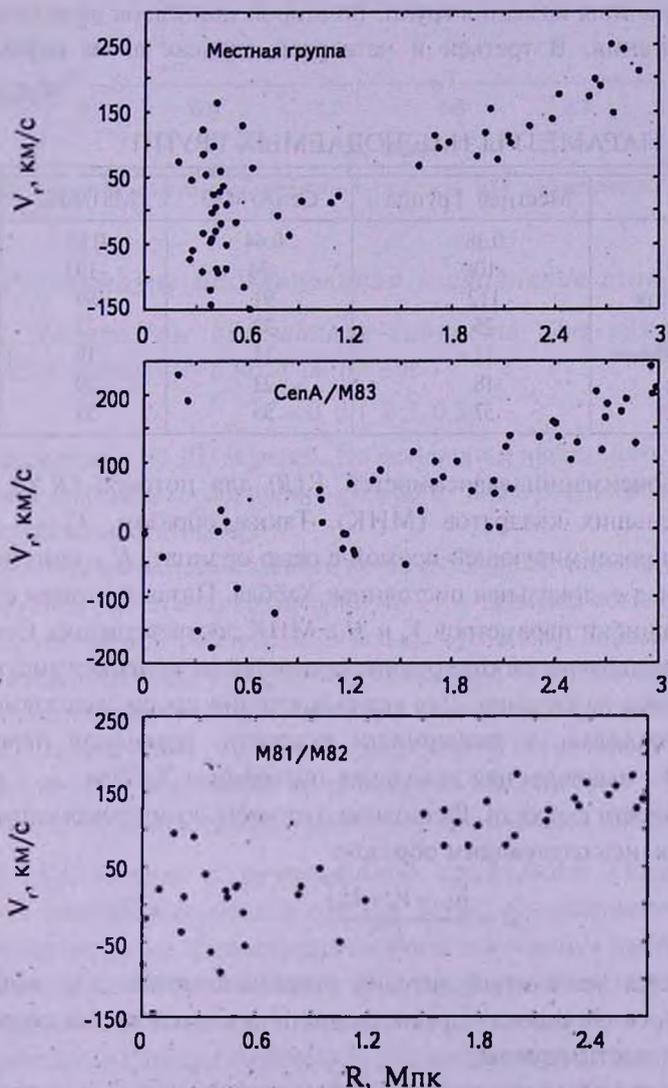


Рис.1. Зависимости $V_r(R)$ для наблюдаемых групп.

На рис.1 для каждой группы видны две четко различающиеся структуры:
 - гравитационно связанная центральная часть группы,
 - поток разбегания галактик.

Галактики внутренней части группы занимают объем радиусом до 1.0-1.2 Мпк и движутся как к центру группы, так и от него. Галактики потока находятся вне этой части группы, на расстояниях до 3 Мпк и систематически удаляются от центра группы. Скорости убегания возрастают с увеличением расстояния, в соответствии с законом Хаббла.

В табл.1 дана сводка параметров рассматриваемых групп, вычисленных по данным Чернина и др. [12], (см. также Караченцев и др. [13]). В первой строке указаны названия групп. Во второй приведена доля галактик в потоке разбегания. В третьей и четвертой строках даны параметры

Таблица 1

ПАРАМЕТРЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ГРУПП

Параметр	Местная Группа	СепА/М83	М81/М82
v_f	0.38	0.44	0.54
V_0 , км/с	-108	-74	-105
H , км/с/Мпк	112	91	99
δ_{V_0} , км/с	25	32	22
δ_H , км/с/Мпк	11	15	10
σ_{VF} , км/с	18	23	29
σ_{VG} , км/с	57	55	58

линейной аппроксимации зависимостей $V_f(R)$ для потоков ($R > 1$ Мпк) методом наименьших квадратов (МНК). Таким образом, V_0 - точка пересечения аппроксимирующей прямой с осью ординат, H - тангенс угла наклона прямой, т.е. локальная постоянная Хаббла. Пятая и шестая строки - формальные ошибки параметров V_0 и H в МНК соответственно. Седьмая строка - среднеквадратичное отклонение скоростей от аппроксимирующей прямой для потока разбегания. Для его вычисления шкала расстояний на диаграмме приводилась к размерности скорости, уравнение перехода: $v_c \equiv HR$, где H - вычисленная локальная постоянная Хаббла, v_c - новая величина размерности скорости. Расстояния d от точек до аппроксимирующей прямой вычислялись следующим образом:

$$d = \frac{|v_c - V_c + V_0|}{\sqrt{2}}$$

Далее вычислялся начальный момент второго порядка для выборки расстояний d . Восьмая строка - среднеквадратичное отклонение скоростей для внутренней части группы.

Так как группы обладают сходными характеристиками, и параметры диаграмм расстояние-скорость согласуются в пределах ошибок, было решено

для увеличения статистики объединить три диаграммы в одну сводную диаграмму для всех трех групп. Эта зависимость $V_d(R)$ представлена на рис.2.

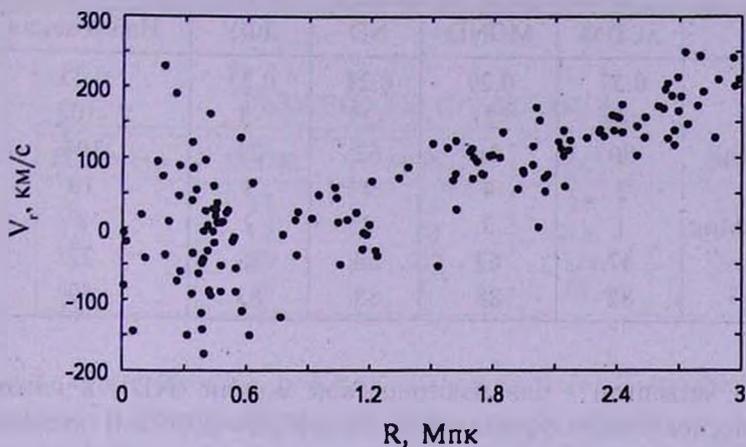


Рис.2. Сводная диаграмма расстояние-скорость для наблюдаемых групп галактик.

5. Результаты моделирования и сравнение с наблюдениями.

5.1. *Диаграмма расстояние-скорость.* Для каждого значения начального вириального коэффициента:

$$k = 0, 0.1, 0.3, 0.5$$

было рассмотрено по 100 моделей. По результатам численного моделирования строились диаграммы расстояние-скорость. Затем результаты объединялись для составления статистики.

Для диаграмм можно выделить поток разбегания галактик и внутреннюю часть группы, но четкого разделения нет, т.к. размеры потока и внутренней части меняются при различных начальных условиях. Значения параметров смоделированных групп зависят от положения границы между потоком и внутренней частью группы. Параметры изменяются в пределах нескольких ошибок. Следовательно, подобные изменения не могут качественно повлиять на результат. Для разделения было выбрано значение $R_0 = 1.0$ Мпк, которое приблизительно соответствует положению границы для наблюдаемых групп.

5.2. *Критерии и результаты сравнения.* Поток разбегания галактик аппроксимировался прямой МНК. Относительно полученной прямой вычислялось среднеквадратическое отклонение выборки скоростей (см. выше). Для внутренней части группы среднеквадратическое отклонение вычислялось относительно горизонтальной прямой $V_r = 0$.

В табл.2 дана сводка параметров рассматриваемых групп. Обозначения те же, что и в табл.1. Во втором столбце даны результаты для Λ CDM - модели, в третьем - для модифицированной ньютоновской динамики

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАННЫХ ГРУПП

Параметр	Λ CDM	MOND	ND	ДФУ	Наблюдения
v_f	0.37	0.29	0.28	0.23	0.45
V_0 , км/с	-49	-21	-25	-8	-102
H , км/с/Мпк	80	91	62	29	104
δ_{V_0} , км/с	2	4	4	3	16
δ_H , км/с/Мпк	1	3	3	2	8
σ_{VF} , км/с	47	62	58	38	27
σ_{VG} , км/с	82	88	88	83	59

(MOND), в четвертом - для ньютоновской модели (ND), в пятом - модели с диссипативным фрактальным ускорением (ДФУ). В последнем столбце даны сводные результаты для трех наблюдаемых групп галактик.

Видно, что ни одна модель не даст полного согласия с наблюдениями. Дисперсии скоростей как во внутренней части группы, так и в потоке значительно превышают величины для наблюдаемых групп галактик. По дисперсиям скоростей в потоке и внутренней части группы лучше согласуются группы, моделированные в рамках Λ CDM -модели и модели с диссипативным фрактальным ускорением, но для ДФУ-модели локальная постоянная Хаббла получается заниженной более чем в три раза.

Для количественного сравнения моделированных групп с наблюдаемыми использовались следующие параметры:

$$\Delta = \frac{|H_{obs} - H_{mod}|}{\sqrt{\delta_{H_{obs}}^2 + \delta_{H_{mod}}^2}}, \quad (15)$$

где H_{obs} - локальная постоянная Хаббла, полученная по данным наблюдений; H_{mod} - локальная постоянная Хаббла, полученная по результатам численного моделирования; $\delta_{H_{obs}}$ и $\delta_{H_{mod}}$ - формальные ошибки этих параметров в МНК;

$$\chi = \left| V_0^{mod} - V_0^{obs} \right| + \left| v_c^{mod} - v_c^{obs} \right| + \left| \sigma_{VF}^{mod} - \sigma_{VF}^{obs} \right| + \left| \sigma_{VG}^{mod} - \sigma_{VG}^{obs} \right|, \quad (16)$$

где V_0^{mod} и V_0^{obs} - параметры линейной МНК - аппроксимации потока для моделируемых групп и наблюдений соответственно, σ_{VF}^{mod} и σ_{VF}^{obs} - среднеквадратичные отклонения скоростей галактик в потоке относительно аппроксимирующей прямой для моделируемых и наблюдаемых групп, σ_{VG}^{mod} и σ_{VG}^{obs} - среднеквадратичные отклонения скоростей галактик в основных частях групп.

В табл.3 представлены значения параметров (15)-(16), а также их ошибки, вычисленные по формулам переноса ошибок.

Из таблицы видно, что лучше с наблюдениями согласуются Λ CDM -

модель и MOND-модель. Модифицированная динамика дает лучшие результаты для локальной постоянной Хаббла. В целом Λ CDM -модель дает лучшее согласие, хотя сделать выбор из двух этих моделей затруднительно.

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ

Параметр	Λ CDM	MOND	ND	ДФУ
Δ	3.1	1.5	5.4	9.8
δ_{Δ}	1.2	1.3	1.3	1.3
χ	119	157	177	204
δ_{χ}	26	30	29	28

5.3. *Зависимость от начальных условий.* Параметры формирующегося потока разбегания галактик зависят от холодности группы в начальный момент. Количество галактик, выбрасываемых в поток, больше при более высоких начальных вириальных коэффициентах. Лучше других согласуются с наблюдениями доли галактик в потоке при $k=0.3$ и $k=0.5$. Доля галактик в потоке для групп, моделированных в рамках Λ CDM -модели, лучше согласуется со значением для наблюдаемых групп при начальном вириальном коэффициенте, равном 0.3. Значение локальной постоянной Хаббла в целом убывает с ростом k . Лучшие результаты дает модель Λ CDM при малых значениях начального вириального коэффициента $k=0.0$ и $k=0.1$. Дисперсии скоростей в потоке и внутренней части группы уменьшаются с увеличением начального вириального коэффициента. Более горячие группы формируются из более холодных начальных распределений. Таким образом, по среднеквадратичным отклонениям скоростей галактик с наблюдениями лучше согласуются модели с начальными вириальными коэффициентами $k=0.3$ и $k=0.5$. В целом результаты эволюции групп галактик, формирующихся при более горячих начальных условиях, лучше согласуются с данными по наблюдаемым группам.

5.4. *Темная материя.* Для групп с общим темным гало поток разбегания и внутренняя часть группы становятся холоднее. Дисперсии скоростей уменьшаются, однако для всех моделей полученные значения среднеквадратичных отклонений в потоке несколько превышают наблюдаемые. Холодность внутренней части хорошо согласуется с наблюдениями. Значения локальной постоянной Хаббла изменяются различным образом для моделей. В случае ДФУ она практически не изменяется. Для групп в рамках MOND значение H уменьшается, что ухудшает согласованность с наблюдениями. Для остальных моделей происходит увеличение локальной постоянной Хаббла, значение которой в рамках Λ CDM -модели приближается к наблюдаемой величине. Формирующийся поток разбегания в группах

становится более четко выраженным. Доля галактик в потоке хорошо согласуется с наблюдениями.

Группы с заданным гало темной материи в результате эволюции приходят в состояние, более близкое к наблюдаемому, для всех моделей кроме MOND. Но ND-модель и ДФУ-модель по-прежнему хуже согласуются с данными наблюдений. В табл.4 приведены параметры (15) и (16) для моделей MOND и Λ CDM, которые лучше других согласуются с наблюдениями. Использовались данные по группам с темным гало и без него.

Таблица 4

ПАРАМЕТРЫ СРАВНЕНИЯ МОДЕЛИРОВАННЫХ ГРУПП С НАБЛЮДЕНИЯМИ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ С ТЕМНЫМ ГАЛО (DH) И БЕЗ НЕГО

Параметр:	Λ CDM	Λ CDM DH	MOND	MOND DH
Δ	3.1	1.7	1.5	5.1
δ_{Δ}	1.2	1.1	1.3	1.1
χ	119	68	157	160
δ_{χ}	26	24	30	25

Таким образом, из рассмотренных моделей лучшее согласие с наблюдениями показывают MOND и Λ CDM-модели, причем лучше согласуются с наблюдениями модели Λ CDM с общим темным гало, окружающим группу, и модели MOND без темного гало.

6. *Заключение.* Λ CDM-модель и модель с модифицированной динамикой значительно лучше согласуются с наблюдениями, чем две другие рассмотренные модели. Дисперсия скоростей относительно закона Хаббла в рамках данных моделей невелика, но MOND-модель дает слегка завышенные значения. В случае начальных условий, близких к вириальному равновесию, среднеквадратичные отклонения скоростей галактик составляют ~ 30 км/с, что согласуется с наблюдательными оценками.

Основные результаты:

- смоделирована динамическая эволюция групп галактик, аналогичных Местной Группе, в рамках четырех космологических моделей;
- использование моделей без общего темного гало не позволяет добиться низкой дисперсии скоростей во внешних частях групп, которую можно было бы согласовать с наблюдаемыми оценками (~ 30 км/с);
- модифицированная динамика дает наиболее близкое к наблюдениям значение локальной постоянной Хаббла;
- из рассмотренных моделей с наблюдениями лучше других согласуется Λ CDM-модель с темным гало.

В дальнейшем планируется использовать данные по скоплениям галактик

для сравнения с результатами моделирования, а также провести моделирование динамики нескольких групп с учетом их взаимодействия.

Санкт-Петербургский государственный университет,
Россия, e-mail: jkt_05@mail.ru

GALAXY GROUP'S DYNAMICS IN DIFFERENT GRAVITY MODELS

O.V.BEKETOV, V.V.ORLOV

We have carried out series of numerical experiments by simulation of galaxy group's dynamical evolution in frameworks of different gravity models. We compared results with observational data of Local Galaxy Group and CenA/M83, M81/M82 galaxy groups. We have established that Λ CDM and MOND (Modified Newtonian Dynamics) models are in better agreement with observations with respect to two other models under consideration. Velocity dispersion within the local Hubble flow in these models is small, apart from slightly overestimated values in case of MOND. When initial conditions are close to virial equilibrium, velocity rms deviations are about 30 km/s that is in good agreement with estimates from observational data.

Key words: *galaxies:groups:dynamics*

ЛИТЕРАТУРА

1. *D.I.Makarov, I.D.Karachentsev*, astro-ph/9909343v1, 1999.
2. *А.Д.Чернин*, Успехи физ. наук, 178, 267, 2008.
3. *M.Milgrom*, arXiv0801.3133M, 2008.
4. *A.A.Raikov, V.V.Orlov*, Problems of Practical Cosmology, Proc. Inter. Conf., 1, 110, 2008.
5. *S.G.Turyshv, M.M.Nieto, J.D.Anderson*, Adv. Space Res., 39, 291, 2007.
6. *Z.Lukic, D.Reed, S.Habib, K.Heitmann*, arXiv.0803.3624, 2006.
7. *J.F.Navarro, C.S.Frenk, S.D.M.White*, Astron. J., 462, 563, 1996.
8. *J.F.Navarro, C.S.Frenk, S.D.M.White*, Astron. J., 490, 493, 1997.
9. *H.C.Plummer*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 71, 460, 1910.
10. *S.Khalil, S.Munos*, Contemporary Phys., 43, 51, 2002.
11. *G.W.Angus, B.Famaey, D.A.Buote*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 387, 1470, 2008.
12. *А.Д.Чернин, И.Д.Караченцев, О.Г.Кашибадзе и др.*, Астрофизика, 50, 493, 2007.
13. *I.D.Karachentsev, D.I.Makarov, M.E.Sharina et al.*, Astron. Astrophys., 398, 49, 2003.