

УДК 524.7

С. Л. Парновский, О. З. Гайдамака

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко  
04053 Киев, ул. Обсерваторная, 3**Определение параметров релятивистских моделей  
коллективного движения галактик  
по наблюдательным данным**

*Путем обработки наблюдательных данных 1493 плоских RFGC-галактик определены параметры релятивистских моделей их коллективного движения. К сожалению, результаты, полученные для полной релятивистской модели, оказались неудовлетворительными. Значение компонентов входящего в нее тензора  $\mathbf{S}$  завышаются на два порядка из-за особенностей обработки методом наименьших квадратов. От этого недостатка свободна полурелятивистская модель, получаемая отбрасыванием тензора  $\mathbf{S}$ . Она характеризуется небольшим модулем дипольной составляющей скорости  $D = 70...230$  км/с. Все параметры, характеризующие оценку расстояний до галактик и поле скорости их коллективного движения, рассчитаны для нерелятивистской и двух вариантов релятивистской и полурелятивистской моделей.*

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ МОДЕЛЕЙ КОЛЕКТИВНОГО РУХУ ГАЛАКТИК ЗА СПОСТЕРЕЖУВАНИМИ ДАНИМИ, Парновський С. Л., Гайдамака О. З.** — Шляхом обробки спостережуваних даних 1493 плоских RFGC-галактик визначені параметри релятивістських моделей їхнього колективного руху. На жаль, результати, отримані для повної релятивістської моделі, виявилися незадовільними. Значення компонентів тензора  $\mathbf{S}$ , що входить в неї, завищено на два порядки через особливості обробки методом найменших квадратів. Від цього недоліку вільна напіврелятивістська модель, котра утворюється при відкиданні тензора  $\mathbf{S}$ . Вона характеризується невеликим модулем дипольного компонента швидкості  $D = 70...230$  км/с. Усі параметри, що характеризують оцінку відстаней до галактик і поле швидкості їхнього колективного руху, розраховані для нерелятивістської і двох варіантів релятивістської і напіврелятивістської моделей.

**DETERMINATION OF PARAMETERS OF COLLECTIVE GALAXY MOTION FOR RELATIVISTIC MODELS FROM OBSERVATIONAL DATA**, by Parnovsky S. L., Gaydamaka O. Z. — Observational data for 1493 flat edge-on RFGC galaxies are processed to determine parameters of relativistic

*models of their collective motions. Unfortunately, the results for the complete relativistic model turned to be inadequate. Values of components of involved tensor  $\mathbf{S}$  are overestimated by two orders of magnitude due to peculiarities of least-squares method. The semirelativistic model obtained by discarding this tensor is free from this flaw and is characterized by the low bulk motion module  $D = 70...230$  km/s. All characteristic parameters for galaxies distances estimation and for their collective velocity field are calculated for nonrelativistic and for two variants of relativistic and semirelativistic models.*

## ВВЕДЕНИЕ

В нашей статье делается попытка использовать релятивистскую модель коллективного движения галактик, созданную в работах [2, 3], для обработки наблюдательных данных выборки плоских спиральных галактик из каталога RFGC [8]. Мы собираемся ответить на следующие вопросы.

1. Насколько отличаются оценки расстояний до галактик, полученные с применением релятивистской и нерелятивистской модели?

2. Как изменяются параметры дипольной, квадрупольной и октупольной составляющих поля скоростей коллективного движения галактик после перехода к релятивистской модели?

3. Возможно ли получение космологического параметра замедления по данным о движении плоских галактик, находящихся в основном при  $z < 0.03$ ?

4. Возможно ли связать новые слагаемые, появляющиеся в формулах для коллективного движения, с параметрами аттракторов, находящихся в близких к нам частях Вселенной?

Для расчетов мы использовали выборку из 1561 галактики каталога RFGC, для которых измерены лучевые скорости и ширины линий H I. Эти галактики равномерно распределены по небесной сфере, за естественным исключением плоскости Галактики. Среднее расстояние до галактик, переведенное в скорость разбегания и измеряемое в км/с, составляет 5800 км/с. К этому значению близка также медиана 5500 км/с и мода 5200 км/с выборки. Выборка полна до расстояний приблизительно 5600 км/с. После отбрасывания галактик, сильно отклоняющихся от зависимости Талли — Фишера, остается выборка из 1493 галактик, которая и будет использоваться ниже. Ранее данные этой выборки были описаны и обработаны в статье [5] с использованием описанной ниже нерелятивистской модели коллективного движения галактик.

## НЕРЕЛЯТИВИСТСКАЯ И РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МОДЕЛИ КОЛЛЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ГАЛАКТИК

Нерелятивистская модель коллективного движения галактик основана на мультипольном разложении скорости в плоском пространстве в ряд по степеням расстояния  $r$ . В работах [4, 5] для обработки наблюдательных данных применялись несколько модификаций данной модели, отличающиеся максимальной степенью разложения — дипольная, квадрупольная и октупольная (D-, DQ- и DQO-модели). Здесь нас интересует прежде всего октупольная модель, имеющая вид

$$V = R + V^{\text{dip}} + V^{\text{qua}} + V^{\text{oct}}, \quad (1)$$

где  $V$  — лучевая скорость галактики, приведенная к системе отсчета реликтового микроволнового излучения,  $R = Hr$  — расстояние, измеренное в км/с.

Отдельные компоненты мультипольного разложения имеют следующий вид. Дипольная составляющая  $V^{\text{dip}} = D_1 n_1$  не зависит от  $R$  ( $D_1$  — компоненты

вектора  $\mathbf{D}$ , описывающего скорость коллективного движения в дипольном приближении,  $n_i$  — компоненты единичного вектора  $\mathbf{n}$  направления к галактике). По повторяющимся индексам здесь и далее предполагается суммирование. Направляющие косинусы  $(n_1, n_2, n_3)$  связаны с галактическими координатами  $l$  и  $b$ :

$$\begin{aligned} n_1 &\equiv n_z = \sin b, \\ n_2 &\equiv n_x = \cos l \cos b, \\ n_3 &\equiv n_y = \sin l \cos b. \end{aligned} \quad (2)$$

Дипольная составляющая определяется тремя независимыми параметрами — составляющими вектора  $\mathbf{D}$ . Квадрупольная составляющая  $V^{\text{qua}} = RQ_{ij}n_in_j$  пропорциональна расстоянию  $R$  и описывается бесследовым симметричным тензором  $\mathbf{Q}$ , содержащим пять независимых параметров  $q_i$ :

$$Q_{ij}n_in_j = q_1(n_1^2 - n_3^2) + q_2(n_2^2 - n_3^2) + q_3n_1n_2 + q_4n_1n_3 + q_5n_2n_3. \quad (3)$$

Октупольная составляющая пропорциональна  $R^2$ . Ее можно разложить на сумму двух частей, одна из которых описывается вектором  $\mathbf{P}$ , а вторая — бесследовым, симметричным по каждой паре индексов тензором  $\mathbf{O}$

$$\begin{aligned} V^{\text{oct}} &= R^2(P_in_i + O_{ijk}n_in_jn_k) = R^2(P_1n_1 + P_2n_2 + P_3n_3) + \\ &+ R^2\{d_1(3n_1n_2^2 - n_1^3) + d_2(3n_1n_3^2 - n_1^3) + d_3(3n_2n_1^2 - n_2^3) + \\ &+ d_4(3n_2n_3^2 - n_2^3) + d_5(3n_3n_1^2 - n_3^3) + d_6(3n_3n_2^2 - n_3^3) + d_7n_1n_2n_3\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Эта составляющая содержит 10 независимых параметров.

Нерелятивистское расстояние до галактики  $R_{\text{nr}}$  определялось по обобщенной зависимости Талли — Фишера в варианте «линейный размер — ширина линии H I» по формуле

$$R_{\text{nr}} = \frac{W}{a_r} (C_1 + C_2B + C_3BT) + C_4 \frac{W}{a_b} + C_5 \frac{1}{a_r} + C_6 \left(\frac{W}{a_r}\right)^2, \quad (5)$$

где  $W$  — ширина линии H I в км/с, измеренная на уровне 50 % максимального значения, скорректированная за космологическое расширение и за турбулентность,  $a_r$  и  $a_b$  — большие угловые диаметры галактики в угловых минутах соответственно на красных и синих репродукциях POSS и ESO/SERC, скорректированные за наклон оси к лучу зрения и за поглощение в зоне Млечного Пути,  $T$  — центрированный показатель морфологического типа галактики, получаемый из показателя типа в каталоге  $I_1$  вычитанием приближенного среднего значения  $T = I_1 - 5.35$ ,  $B$  — центрированный показатель поверхностной яркости галактики, получаемый из показателя поверхностной яркости в каталоге  $I_{\text{SB}}$  вычитанием приближенного среднего значения  $B = I_{\text{SB}} - 2$ . Формула (5) была получена эмпирически путем перебора возможных слагаемых и проверки их значимости по критерию Фишера. В работах [4, 5] использовался одноступенчатый метод обработки, при котором все 24 коэффициента в (1) определялись одновременно по методу наименьших квадратов (МНК).

Описанная выше нерелятивистская модель не учитывает, однако, несколько важных обстоятельств. Из-за кривизны пространства-времени вместо единого расстояния  $r$  до галактики в космологии вводятся несколько различных типов расстояний. Из обобщенной зависимости Талли — Фишера в варианте «линейный диаметр — ширина линии H I» получается расстояние  $r$ , определенное по угловым размерам. В однородных космологических моделях связь  $V = cz$  с  $R = Hr$  для небольших расстояний имеет вид [1]

$$V = R + \gamma R^2, \quad \gamma = \frac{3 + q}{2c} \approx 4.1 \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

( $q = -0.55$ ;  $c$  — скорость света). Входящая в это выражение величина параметра замедления  $q$  оценена по космологическим параметрам, полученным при обработке данных наблюдений спутника WMAP [11].

Таким образом, в зависимость (1) следует добавить член, квадратичный по расстоянию:

$$V = R + V^{\text{dip}} + V^{\text{qua}} + V^{\text{oct}} + \gamma R^2, \quad (7)$$

Его включение в (7) заставляет нас убрать подобный член из (5). При этом остается 5-параметрическая регрессия для релятивистского расстояния, включающая тип, поверхностную яркость, «красные» и «синие» размеры галактик:

$$R_{\text{rel}} = \frac{W}{a_r} (C_1 + C_2 B + C_3 B T) + C_4 \frac{W}{a_b} + C_5 \frac{1}{a_r}. \quad (8)$$

Полученная модель (3), (4), (7), (8) отличается от использованной в [4, 5] нерелятивистской модели, но не включает всех релятивистских эффектов. Мы будем называть ее полурелятивистской моделью.

Для построения релятивистской модели следует принять во внимание, что разложение по мультиполям надо вести не на плоскости, а на световом конусе прошлого. При этом, естественно, возникает новый тип расстояния, пропорциональный аффинному параметру. Однако для используемого приближения оно совпадает с расстоянием по угловым размерам. Релятивистская модель коллективного движения галактик, учитывающая эти два фактора, была построена в работах [2, 3]. Она имеет вид (7), где выражения для дипольной и квадрупольной составляющих остаются прежними, а в октупольную составляющую добавляется новый член:

$$V^{\text{oct}} = R^2 (P_i n_i + O_{ijk} n_i n_j n_k + S_{ij} n_i n_j). \quad (9)$$

В него входит симметричный бесследовый тензор  $\mathbf{S}$ , который может быть описан пятью параметрами  $s_i$ :

$$S_{ij} n_i n_j = s_1 (n_1^2 - n_3^2) + s_2 (n_2^2 - n_3^2) + s_3 n_1 n_2 + s_4 n_1 n_3 + s_5 n_2 n_3. \quad (10)$$

Всего релятивистская модель (3), (7)–(10) содержит 29 параметров. Ниже приводятся МНК-значения коэффициентов, входящие в описанные выше релятивистскую и полурелятивистскую модели. Однако при анализе полученного при этом параметра  $\gamma$  мы будем использовать также отличные от (8) формулы для  $R_{\text{rel}}$ . Это классическая зависимость Талли — Фишера в варианте «линейный размер — ширина линии H I», имеющая вид [12]

$$R_{\text{rel}} = C_1 \frac{W^\alpha}{a_r}. \quad (11)$$

Используется также зависимость, обобщающая как (8), так и (11):

$$R_{\text{rel}} = \frac{W^\alpha}{a_r} (C_1 + C_2 B + C_3 B T) + C_4 \frac{W^\alpha}{a_b} + C_5 \frac{1}{a_r}. \quad (12)$$

Заметим, что оценки (8), (11), (12) не являются частью релятивистской или полурелятивистской модели, а только дополняют ее зависимостью расстояний до галактик  $R$  от наблюдаемых величин.

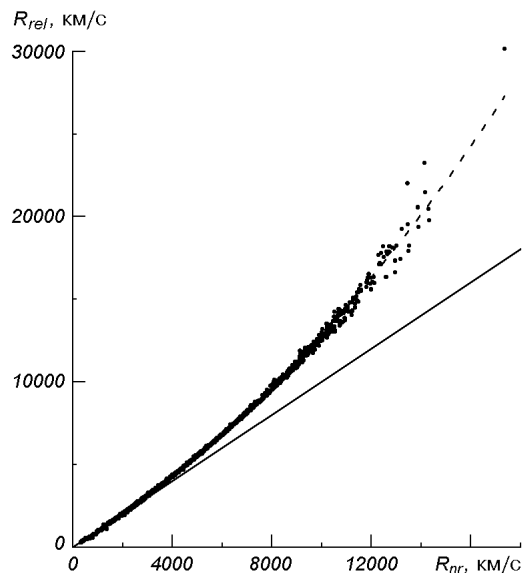
При обработке моделей вида (7), (11) и (7), (12) использовался одноступенчатый метод обработки, когда все коэффициенты регрессий определяются непосредственно по МНК. Технически из-за нелинейного

вхождения коэффициента  $\alpha$  его значение фиксируется, а величины и погрешности остальных коэффициентов определяются методами линейного регрессионного анализа. Затем значение  $\alpha$  подбирается путем минимизации СКО. При нахождении и анализе коэффициента  $\gamma$  дополнительно применялась также традиционная процедура обработки данных, состоящая из двух этапов. Вначале пренебрегаем вкладом всех членов, кроме первого, в разложении (7). Полагая  $R \approx V$ , формулу (11) приводим к виду  $\lg(aV) = \alpha \lg W + \lg C_1$ . После определения нуля-пункта и наклона этой линейной зависимости можно определить коэффициенты  $\alpha$  и  $C_1$ , затем по (11) или (12) рассчитать расстояние  $R$  для галактик этой же выборки. Эта процедура не требует использования какой-либо иной выборки для калибровки. На втором этапе определяются коэффициенты регрессии  $V - C_1 R = \gamma R^2 + V^{\text{dip}} + V^{\text{qua}} + V^{\text{oct}}$ . Ниже этот метод будет называться двухступенчатым.

При больших  $R$  возрастают эффекты неполноты и асимметрии используемой выборки. Для борьбы с ними мы рассматриваем подвыборки, ограниченные сверху по расстояниям  $R_{\text{nr}} \leq R_{\text{max}}$ . Ограничение именно нерелятивистских расстояний использовано для того, чтобы подвыборки совпадали с подвыборками, используемыми в [5].

**СРАВНЕНИЯ РАССТОЯНИЙ И ПОЛЕЙ СКОРОСТЕЙ  
КОЛЛЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ГАЛАКТИК, ПОЛУЧЕННЫХ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ**

В табл. 1 приводятся значения и погрешности коэффициентов, полученных по МНК для одноступенчатого метода обработки для подвыборок с  $R_{\text{max}} = 10000$  км/с и  $R_{\text{max}} = 8000$  км/с. В скобках приведены величины, характеризующие значимость отдельных регрессоров по критерию Фишера. При этом значениям  $F = 3.8, 6.6, 7.9, 10.8$  и  $12.1$  соответствуют уровни достоверности 95, 99, 99.5, 99.9 и 99.95 % соответственно. В первых трех столбцах приводятся данные для нерелятивистской модели, взятые из [5], релятивистской модели и полурелятивистской модели. Последние достаточно близки к коэффициентам нерелятивистской модели. При переходе от полурелятивистской модели к релятивистской, т. е. при введении в регрессию тензора  $\mathbf{S}$ , сильно изменяются прежде всего коэффициенты квадруполя.



Коррелятивная зависимость между расстояниями до галактик в нерелятивистской и релятивистской моделях

Рассмотрим, как изменяются отдельные составляющие поля скоростей при переходе к релятивистской модели. Общие коэффициенты в формулах регрессии расстояния (5) и (9) близки между собой для всех типов регрессий. Расстояния до галактик, рассчитанные по формулам (5) и (9), различаются между собой. На рисунке показана зависимость  $R_{\text{rel}}$  от  $R_{\text{nr}}$  для 1493 галактик выборки. Видно, что эти точки хорошо ложатся на параболу  $R_{\text{rel}} = 193 + 0.854R_{\text{nr}} + 4 \cdot 10^{-5}R_{\text{nr}}^2$  (штриховая линия). При этом для расстояний до 4000 км/с различия между  $R_{\text{rel}}$  и  $R_{\text{nr}}$  несущественны (сплошная линия соответствует  $R_{\text{rel}} = R_{\text{nr}}$ ). На больших же расстояниях различия усиливаются, и для самой далекой галактики выборки имеем  $R_{\text{rel}} = 30137$  км/с при  $R_{\text{nr}} = 17370$  км/с.

Дипольная составляющая близка для нерелятивистской и полурелятивистской моделей, для релятивистской модели она увеличивается по модулю и сдвигается по направлению. Квадрупольная составляющая сильно возрастает при переходе к релятивистской модели. Отличия в коэффициентах отполюсной составляющей менее выражены.

Таблица 1. Параметры нерелятивистской (НР), релятивистской (Р) и полурелятивистской (ПР) моделей, рассчитанные методом наименьших квадратов, для подвыборок с  $R_{\text{max}} = 10000$  и 8000 км/с; D, l, b — модуль скорости и координаты апекса дипольной составляющей

Модель	НР	Р	ПР	Р ( $\gamma=4.1 \cdot 10^{-6}$ )	ПР ( $\gamma=4.1 \cdot 10^{-6}$ )
$R_{\text{max}} = 10000$ км/с					
$\sigma$	1128.7	1120.2	1124.5	1141.3	1156.2
$C_1$	20.2±1.5(193)	18.7±1.4(185)	19.2±1.4 (195)	14.9±1.3(134)	14.6±1.3(126)
$C_2$	1.75±0.2(77)	2.3±0.2(122)	2.4±0.2 (132)	1.8±0.2(80)	1.8±0.2(78)
$C_3$	-0.6±0.1(24)	-0.8±0.1(45)	-0.9±0.1(48)	-0.7±0.1(34)	-0.8±0.1(36)
$C_4$	4.6±1.3(13)	6.9±1.3(30)	6.9±1.3 (30)	6.0±1.3(22)	5.8±1.3(20)
$C_5$	-867±90(93)	-1068±106(102)	-1112±106(111)	-605±84(52)	-534±83(41)
$C_6 \cdot 10^3$	-8.3±1.1(52)	—	—	—	—
$\gamma \cdot 10^6$	—	-16.1±2.7(36)	-18.4±2.4(57)	4.1	4.1
$D_1$ , км/с	13.7±78.6	91.7±78.5	15.9±72.8	199±80	129±75
$D_2$ , км/с	214.7±100	303.6±96.5	234±93	217±99	96±96
$D_3$ , км/с	-124.8±99.4	-22.7±97.5	-150±91	141±99	-23±95
$D$ , км/с	248.7±95.1	318.0±91.8	278.7±87.6	326.5±97.8	162.6±78.7
$l$ , град	329.8	355.7	327.4	33.0	346.6
$b$ , град	3.2	16.8	3.3	37.4	52.6
$q_1 \cdot 100$	6.5±1.7(14)	2.5±4.3(0.3)	5.8±1.5(15)	9.1±5.1(3.2)	6.2±1.8(12)
$q_2 \cdot 100$	-2.4±1.8(1.8)	8.4±4.5(3.4)	-2.1±1.5(2)	10.5±5.4(3.8)	-4.7±1.9(6.3)
$q_3 \cdot 100$	0.6±2.2(0.1)	-1.9±5.7(0.1)	0.8±1.9(0.2)	-1.0±6.8(0.0)	0.6±2.4(0.1)
$q_4 \cdot 100$	3.1±2.7(1.3)	-17.0±6.0(7.5)	2.6±2.3(1.3)	-31.7±7.3(19)	5.0±2.8(3.1)
$q_5 \cdot 100$	0.6±3.0(0.0)	3.9±7.4(0.3)	0.4±2.5 (0)	3.5±8.9(0.2)	-1.0±3.1(0.1)
$d_1 \cdot 10^6$	4.7±1.6(8.3)	5.0±1.2(16.6)	3.6±1.1(9.1)	7.2±1.7(17)	4.6±1.7(7.6)
$d_2 \cdot 10^6$	0.9±1.9(0.2)	-1.4±1.5(0.8)	1.2±1.3(0.8)	-4.4±2.1(4.2)	2.0±1.9(1.1)
$d_3 \cdot 10^6$	3.1±2.0(2.5)	1.8±1.4(1.6)	2.3±1.4(2.9)	2.3±2.0(1.3)	4.3±2.0(4.5)
$d_4 \cdot 10^6$	-5.0±2.4(4.3)	-3.0±1.8(2.8)	-3.8±1.7(5.2)	-3.9±2.6(2.3)	-5.8±2.5(5.4)
$d_5 \cdot 10^6$	5.4±2.1(6.7)	3.2±1.6(4.1)	3.8±1.4(6.8)	3.9±2.2(3.1)	3.8±2.1(3.1)
$d_6 \cdot 10^6$	-1.0±2.1(0.2)	0.7±1.6(0.2)	-0.5±1.4(0.1)	3.9±2.2(3.1)	1.9±2.2(0.8)
$d_7 \cdot 10^6$	16.1±7.7(4.3)	11.5±5.6(4.1)	9.4±5.2(3.2)	16.1±7.9(4.1)	9.6±7.8(1.5)
$P_1 \cdot 10^6$	-0.6±2.3(0.1)	-3.5±1.8(3.7)	-0.5±1.5(0.1)	-9.8±2.5(16)	-5.6±2.2(6.9)
$P_2 \cdot 10^6$	-1.8±2.7(0.5)	-3.3±1.9(3.2)	-1.9±1.7(1.3)	-2.1±2.7(0.6)	1.1±2.6(0.2)
$P_3 \cdot 10^6$	-4.8±3.2(2.2)	-7.4±2.6(8.0)	-2.5±2.1(1.5)	-21.6±3.4(42)	-12.7±3.0(18)

Окончание табл. 1

Модель	НР	Р	ПР	Р ( $\gamma=4.1 \cdot 10^{-6}$ )	ПР ( $\gamma=4.1 \cdot 10^{-6}$ )
$R_{\max} = 8000$ км/с					
$\sigma$	996.7	985.8	996.9	992.0	1007.7
$C_1$	$17.8 \pm 1.7(113)$	$16.1 \pm 1.5(109)$	$16.4 \pm 1.5(113)$	$13.8 \pm 1.4(94)$	$13.5 \pm 1.4(88)$
$C_2$	$2.1 \pm 0.2(98)$	$2.6 \pm 0.2(123)$	$2.7 \pm 0.2(132)$	$2.2 \pm 0.2(108)$	$2.2 \pm 0.2(106)$
$C_3$	$-0.7 \pm 0.1(30)$	$-0.9 \pm 0.1(52)$	$-0.9 \pm 0.1(50)$	$-0.8 \pm 0.1(44)$	$-0.8 \pm 0.1(40)$
$C_4$	$7.3 \pm 1.5(25)$	$9.0 \pm 1.4(39)$	$9.4 \pm 1.4(42)$	$8.1 \pm 1.4(32)$	$8.3 \pm 1.4(33)$
$C_5$	$-915 \pm 89(106)$	$-1016 \pm 108(88)$	$-1077 \pm 110(96)$	$-755 \pm 84(80)$	$-732 \pm 84(76)$
$C_6 \cdot 10^3$	$-7.5 \pm 1.7(20)$	—	—	—	—
$\gamma \cdot 10^6$	—	$-13.5 \pm 4.4(9.6)$	$-16.2 \pm 3.9(17)$	4.1	4.1
$D_1$ , км/с	$-63 \pm 80$	$19.4 \pm 78.9$	$-49 \pm 77$	$76 \pm 79$	$34.3 \pm 76.5$
$D_2$ , км/с	$140 \pm 106$	$174 \pm 103$	$132 \pm 100$	$114 \pm 104$	$61 \pm 102$
$D_3$ , км/с	$-7.4 \pm 102$	$35.1 \pm 100$	$-20 \pm 96$	$57 \pm 102$	$-11.4 \pm 98.3$
$D$ , км/с	$154.1 \pm 99.8$	$178.9 \pm 105.2$	$142.1 \pm 95.4$	$148.3 \pm 102.8$	$70.8 \pm 90.4$
$l$ , град	357.0	11.4	351.6	26.3	349.4
$b$ , град	-24.3	6.2	-20.0	30.6	29.0
$q_1 \cdot 100$	$4.0 \pm 1.7(5.4)$	$-5.2 \pm 5.5(0.9)$	$3.7 \pm 1.6(5.5)$	$-0.4 \pm 6.1(0.0)$	$3.5 \pm 1.8(3.9)$
$q_2 \cdot 100$	$0.9 \pm 1.9(0.2)$	$6.7 \pm 6.3(1.1)$	$0.8 \pm 1.7(0.2)$	$3.8 \pm 7.0(0.3)$	$0.9 \pm 2.0(0.2)$
$q_3 \cdot 100$	$0.2 \pm 2.5(0.0)$	$-6.7 \pm 7.8(0.7)$	$0.2 \pm 2.2(0.0)$	$-7.9 \pm 8.8(0.8)$	$0.4 \pm 2.6(0.0)$
$q_4 \cdot 100$	$2.4 \pm 2.7(0.8)$	$-23.8 \pm 8.4(8.1)$	$2.3 \pm 2.4(0.9)$	$-34.6 \pm 9.3(14)$	$3.8 \pm 2.7(2.0)$
$q_5 \cdot 100$	$-0.1 \pm 3.0(0.0)$	$-36.2 \pm 10.0(13)$	$0.2 \pm 2.7(0.0)$	$-45.7 \pm 11.6(16)$	$-0.7 \pm 3.1(0.0)$
$d_1 \cdot 10^6$	$2.9 \pm 2.3(1.6)$	$3.6 \pm 1.9(3.6)$	$2.2 \pm 1.8(1.6)$	$4.3 \pm 2.4(3.3)$	$2.8 \pm 2.4(1.5)$
$d_2 \cdot 10^6$	$-5.7 \pm 2.2(6.5)$	$-5.8 \pm 1.9(9.5)$	$-4.3 \pm 1.7(6.1)$	$-8.4 \pm 2.4(13)$	$-5.9 \pm 2.3(6.6)$
$d_3 \cdot 10^6$	$3.3 \pm 2.6(1.6)$	$2.4 \pm 2.1(1.3)$	$2.8 \pm 2.0(1.9)$	$2.5 \pm 2.6(0.9)$	$3.2 \pm 2.7(1.4)$
$d_4 \cdot 10^6$	$-3.3 \pm 3.0(1.2)$	$-3.3 \pm 2.4(2.0)$	$-2.5 \pm 2.3(1.2)$	$-5.0 \pm 3.0(2.8)$	$-4.0 \pm 3.1(1.7)$
$d_5 \cdot 10^6$	$5.0 \pm 2.7(3.6)$	$2.8 \pm 2.2(1.6)$	$4.1 \pm 2.1(3.9)$	$3.1 \pm 2.7(1.3)$	$4.8 \pm 2.7(3.0)$
$d_6 \cdot 10^6$	$-8.1 \pm 2.8(8.3)$	$-6.2 \pm 2.3(7.1)$	$-6.5 \pm 2.2(8.9)$	$-7.1 \pm 2.9(5.8)$	$-7.7 \pm 2.9(7.0)$
$d_7 \cdot 10^6$	$34.9 \pm 10.4(11.2)$	$19.1 \pm 8.6(5.0)$	$26.7 \pm 8.1(11)$	$22.2 \pm 10.8(4.2)$	$32.7 \pm 10.7(9.3)$
$P_1 \cdot 10^6$	$4.3 \pm 3.1(1.9)$	$-0.7 \pm 2.5(0.1)$	$2.8 \pm 2.3(1.5)$	$-4.1 \pm 3.1(1.8)$	$-0.6 \pm 2.9(0.0)$
$P_2 \cdot 10^6$	$2.8 \pm 3.9(0.5)$	$-0.1 \pm 3.2(0.0)$	$2.5 \pm 2.9(0.7)$	$2.3 \pm 4.0(0.3)$	$6.3 \pm 3.8(2.7)$
$P_3 \cdot 10^6$	$-12.4 \pm 3.9(10.2)$	$-12.4 \pm 3.2(15)$	$-9.6 \pm 2.9(11)$	$-19.0 \pm 4.0(23)$	$-15.5 \pm 3.8(17)$

Из табл. 1 видно, что квадратичный коэффициент  $\gamma$  (а для нерелятивистской модели — коэффициент  $C_6$ ) во всех случаях отрицательный и явно отличается от космологического значения  $4.1 \cdot 10^{-6}$ . Это свойство сохраняется для всех использованных вариантов регрессий расстояния. Так, при МНК-аппроксимации расстояния зависимостью (12) мы получаем значения  $\alpha = 1.08$  и  $\gamma = (-16.7 \pm 2.7) \cdot 10^{-6}$ . Заметим, что близость полученного значения  $\alpha$  к единице дает возможность использования линейной регрессии (8). При оценке расстояния классической формулой Талли — Фишера (11) мы получаем значения  $\alpha = 1.24$  и  $\gamma = (-19.4 \pm 2.2) \cdot 10^{-6}$ . При этом двухступенчатый метод обработки для той же регрессии дает  $\alpha = 1.17$  и существенно отличающуюся величину  $\gamma = (-1.3 \pm 1.2) \cdot 10^{-6}$ . Для того чтобы объяснить различие результатов при одно- и двухступенчатых методах обработки, С. Л. Парновским и А. С. Парновским путем компьютерного моделирования по методу Монте-Карло исследовалось влияние ошибок наблюдений на получаемые значения параметров, прежде всего  $\gamma$ . Было показано, что данное отличие связано с 10—15 % погрешностью измерения  $W$ . При этом

можно оценить корректное значение  $\gamma$ , которое лежит в интервале от  $-2.5 \cdot 10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-6}$ . С использованием формулы (6) это дает оценку  $-4.5 < q < 0$ . В этот интервал попадает и текущая оценка  $q = -0.55$ . Статья с подробным описанием этих результатов будет направлена в печать в ближайшее время.

Следует отметить, что есть ряд эффектов, которые могут повлиять на оценку  $\gamma$ . Это — изменение со временем линейных размеров галактики при ее эволюции, зависимость внутреннего поглощения от размеров галактик и эффекты селекции при построении каталога плоских галактик. Кроме того, в релятивистской модели на  $\gamma$  влияет и тензор  $Q$ :

$$\gamma = \frac{q + 3}{2c} + \frac{Q_{\alpha\beta} Q^{\alpha\beta}}{3c}, \quad (13)$$

где пространственная часть четырехмерного тензора  $Q_{\alpha\beta}$  совпадает с трехмерным тензором  $Q_{ik}$ , а его временная и смешанные составляющие малы по сравнению с пространственными [2, 3]. Из табл. 1 видно, что это слагаемое пренебрежимо мало.

Если все эти эффекты несущественны, и величина  $\gamma$  определяется только значением фактора замедления (6), то мы можем зафиксировать значение  $\gamma$  и определить величину и погрешность прочих параметров регрессии. В табл. 1 в двух правых столбцах приведены результаты подобного расчета для релятивистской и полурелятивистской моделей.

#### СРАВНЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЕНЗОРА S С ПАРАМЕТРАМИ БЛИЗЛЕЖАЩИХ АТТРАКТОРОВ

Значения и погрешности составляющих тензора  $S$  приводятся в табл. 2. Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что изменение величин  $q_i$  при переходе от полурелятивистской к релятивистской модели противоположны по знаку и приблизительно пропорциональны величинам  $s_i$ . Это можно объяснить следующим обстоятельством: в нерелятивистской и полурелятивистской моделях при равномерном распределении галактик в объеме выборки не ортогональными на множестве точек являются только векторы  $D$  и  $P$ . Ковариация вектора  $D$  и тензоров  $Q$  и  $O$  возможна только из-за неполноты и несимметричности выборки. В тоже время тензоры  $Q$  и  $S$  имеют одинаковую зависимость от положения объекта на небесной сфере. Естественно, что вклады в регрессию этих тензоров будут взаимосвязанными.

Таблица 2. Параметры тензора  $S$  для релятивистской модели

$R_{\max}$ , км/с	$s_1 \cdot 10^6$	$s_2 \cdot 10^6$	$s_3 \cdot 10^6$	$s_4 \cdot 10^6$	$s_5 \cdot 10^6$
8000	14.1±8.4 (2.8)	-10.4±9.6 (1.2)	12.5±12.1 (1.1)	42.8±13.2 (10.6)	59.5±15.4 (15)
10000	3.6±5.5 (0.4)	-14.6±5.4 (7.2)	4.1±6.7 (0.4)	28.3±8.0 (12)	-4.4±9.1 (0.2)

Для того чтобы понять, являются ли приведенные в табл. 2 составляющие артефактами, возникающими при статистической обработке, или реальными величинами, обратимся к работе [3]. В ней показано, что должно выполняться соотношение

$$C_{\alpha\beta\gamma\delta} V^\beta V^\delta = \frac{H^2}{c^2} [-2cS_{\alpha\gamma} + 6Q_{\alpha\gamma} - 3Q_\alpha^\epsilon Q_{\epsilon\gamma} - (V_\alpha V_\gamma - g_{\alpha\gamma})Q_{\epsilon\eta} Q^{\epsilon\eta}]. \quad (14)$$



Здесь греческими индексами обозначены четырехмерные составляющие,  $g_{\alpha\beta}$  — метрический тензор,  $C_{\alpha\beta\gamma\delta}$  — тензор Вейля, а  $H$  — постоянная Хаббла. Пространственные части четырехмерных тензоров  $Q_{\alpha\beta}$  и  $S_{\alpha\beta}$  совпадают с используемыми в данной статье трехмерными тензорами  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{S}$ , а их временные и смешанные составляющие малы по сравнению с пространственными. Четырехмерный тензор скорости  $V^\alpha$  можно принять равным  $(g_{00}^{-1/2}, 0, 0, 0)$ . Для однородной и изотропной Вселенной тензор Вейля зануляется, как и тензоры  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{Q}$ . Их возникновение связано с неоднородностями распределения плотности, например, аттракторами и войдами. Левая часть формулы (14) получается путем суммирования вкладов отдельных неоднородностей. Для сферически-симметричного аттрактора с избыточной массой  $M$ , находящегося на расстоянии  $L$ , пространственная часть тензора  $C_{\alpha\beta\gamma\delta}V^\beta V^\delta$  после приведения к собственным осям приобретает вид

$$C_{\alpha\beta\gamma\delta}V^\beta V^\delta = \xi \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \xi = \frac{GM}{c^2 L^3}. \quad (15)$$

Поскольку коэффициент  $\xi$  уменьшается обратно пропорционально кубу расстояния до аттрактора, основной вклад вносит близкие к нам аттракторы. В табл. 3 приведены параметры четырех таких аттракторов (взяты основанные на данных каталога Mark III значения из [10]) и рассчитанные для них величины  $\xi$ . Видно, что подавляющий вклад в эту величину вносит скопление в созвездии Девы. В правой части (14) наибольший вклад вносит первый член. Сравнив порядок величин в левых и правых частях (14), мы видим, что составляющие тензора  $\mathbf{S}$  оказываются приблизительно в 200 раз больше рассчитанных по влиянию аттракторов, и вдобавок имеют противоположный знак. Даже при использовании полной массы аттракторов, взятых из работ [6, 7, 9], сохраняется различие на два порядка. Все это подтверждает вывод о том, что составляющие тензора  $\mathbf{S}$ , полученные методом наименьших квадратов и приведенные в табл. 3, являются всего лишь артефактами.

Таблица 3. Параметры ближайших аттракторов и рассчитанные по ним значения  $\xi$

Аттрактор	l, град	b, град	$M/10^{15}M_\odot$	L, Мпк	$\xi \cdot 10^9$ Мпк <sup>2</sup>
Great attractor	307	9	$4.4h^{-1}$	$43.5h^{-1}$	1.3
Perseus-Pisces	120	-30	$4.7h^{-1}$	$50h^{-1}$	0.9
Shepley supercluster	308	4	$57h^{-1}$	$140h^{-1}$	0.5
Virgo	284	74	$0.22h^{-1}$	$13.5h^{-1}$	2.2

### КОЛЛЕКТИВНОЕ ДВИЖЕНИЕ ГАЛАКТИК В ПОЛУРЕЛЯТИВИСТСКОЙ МОДЕЛИ

Как видно из предыдущего раздела, использование релятивистской модели для обработки данных методом наименьших квадратов нецелесообразно из-за возникающих аномально больших составляющих тензора  $\mathbf{S}$ . В тоже время применение полурелятивистской модели оправдано как по получаемым результатам, так и с точки зрения физической интерпретации модели пекулярной скорости. По сравнению с нерелятивистской моделью среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  остается на том же уровне, либо даже несколько уменьшается. Несущественно изменяются и вектор дипольной составляю-

щей коллективного движения. Квадрупольная составляющая поля пекулярных скоростей характеризуется величиной и направлением осей тензора  $Q$ . При  $R_{\max} = 10000$  км/с он характеризуется отчетливым максимумом  $(6.0 \pm 1.4) \%$  в направлении  $l = 249^\circ$ ,  $b = -82^\circ$  (созвездие Скульптора) и противоположном (Гончие Псы, Волосы Вероники). Показатель значимости этой величины по критерию Фишера  $F$  для этой величины равен 16.6. Минимум  $(-3.9 \pm 1.4) \%$ ,  $F = 7.8$ , связан с направлением  $l = 275^\circ$ ,  $b = 7^\circ$  (Паруса, Насос) и противоположным (Лебедь). Третья ось характеризуется собственным значением  $-2.1 \%$  и направлена в сторону  $l = 184^\circ$ ,  $b = 4^\circ$  (Близнецы, Возничий, Телец) и противоположную (Стрелец). Практически так же ориентированы оси и при  $R_{\max} = 8000$  км/с. Максимум в  $(3.8 \pm 1.5) \%$ ,  $F = 6.0$ , связан с направлением  $l = 255^\circ$ ,  $b = -82^\circ$  и противоположным ему. Минимум в  $(-4.6 \pm 1.4) \%$ ,  $F = 10.0$ , связан с направлением  $l = 271^\circ$ ,  $b = 8^\circ$ . Третья ось для этой подвыборки характеризуется положительным значением  $0.8 \%$  и направлена в сторону  $l = 181^\circ$ ,  $b = 2^\circ$ . Сравнение с работой [5] показывает, что ориентация тензора квадруполья практически совпадает для нерелятивистской и полурелятивистской моделей. При переходе к полурелятивистской модели слегка уменьшается амплитуда квадруполья. Это связано, по-видимому, с различием релятивистских и нерелятивистских расстояний.

В процессе обработки можно зафиксировать величину коэффициента  $\gamma$ , положив ее равной космологическому значению  $4.1 \cdot 10^{-6}$ . Это приводит к существенному уменьшению модуля дипольной составляющей коллективного движения. Особенно это видно для подвыборки с  $R_{\max} = 8000$  км/с, в которой значение модуля  $D$  меньше, чем его погрешность. Ориентация собственных осей тензора  $Q$  очень близка к приведенной выше ориентации осей для полурелятивистской модели с нефиксированным значением  $\gamma$ . Неизменным остается направление максимума. Это  $(7.0 \pm 1.8) \%$ ,  $F = 14.7$ ,  $l = 87^\circ$ ,  $b = 74^\circ$ , Гончие Псы — Феникс, Печь, Скульптор для  $R_{\max} = 10000$  км/с и  $(4.0 \pm 1.8) \%$ ,  $F = 4.9$ ,  $l = 80^\circ$ ,  $b = 77^\circ$ , Гончие Псы — Скульптор, Печь, Феникс для  $R_{\max} = 8000$  км/с. Для подвыборки с  $R_{\max} = 10000$  км/с поменялись местами направления минимума и третьей оси квадруполья. Для  $R_{\max} = 10000$  км/с мы получаем минимум  $(-4.8 \pm 1.8) \%$ ,  $F = 7.2$ ,  $l = 12^\circ$ ,  $b = -4^\circ$ , Стрелец — Близнецы, Орион, для  $R_{\max} = 8000$  км/с — это  $(-4.9 \pm 1.6) \%$ ,  $F = 9.1$ ,  $l = 86^\circ$ ,  $b = -13^\circ$ , Лебедь — Насос. Собственное значение и направление для третьей оси при  $R_{\max} = 10000$  км/с описываются значениями  $-2.2 \%$ ,  $l = 283^\circ$ ,  $b = 16^\circ$ , Паруса, Центавр, Насос — Телец, а при  $R_{\max} = 8000$  км/с — значениями  $-0.9 \%$ ,  $l = 176^\circ$ ,  $b = 1^\circ$ , Скорпион — Возничий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных наблюдений мы рассчитали параметры релятивистской и полурелятивистской модели коллективного движения галактик. Анализ показал, что величина дополнительного тензора  $S$ , получающаяся в релятивистской модели при расчетах методом наименьших квадратов, завышается на два порядка. Это связано с одинаковой зависимостью от координат  $l$ ,  $b$  этого слагаемого и тензора квадрупольной составляющей  $Q$ . Мы не видим способа получить корректные значения  $S$ . Даже при значительном увеличении объема и глубины выборки этот эффект не исчезнет из-за влияния на крупномасштабное разложение поля скоростей (7) более мелкомасштабных потоков, вызванных локальными вариациями плотности вещества на масштабах менее  $50h^{-1}$  Мпк. По-видимому, корректное разделение вкладов тензоров  $Q$  и  $S$  возможно только при существенном повышении точности

наблюдательных данных и введении в (7) дополнительных членов, описывающих подобные вариации плотности, определенные, например, с помощью метода POTENT.

В настоящее время имеет смысл ограничиться полурелятивистской моделью коллективного движения, имеющей ряд преимуществ по сравнению с релятивистской моделью. При этом возможно также применение варианта такой модели, в котором зафиксировано значение  $\gamma$ , полученное по оценке космологических параметров. Оба варианта полурелятивистской модели допускают упрощение путем отбрасывания слагаемых, описывающих октупольную и, возможно, также квадрупольную составляющую. Таким образом, мы получаем по три варианта полурелятивистских моделей (D-, DQ- и DQO-модели) для нефиксированного и фиксированного значений  $\gamma$ . Их можно использовать при обработке новых выборок, получаемых при увеличении объема наблюдательных данных.

Применение полурелятивистской D-модели к используемой выборке позволяет определить дипольную составляющую коллективного движения (bulk motion). Без фиксации величины  $\gamma$  она имеет значение  $289 \pm 57$  км/с и апекс  $l = 313^\circ$ ,  $b = 12^\circ$  для выборки с  $R_{\max} = 10000$  км/с и  $306 \pm 54$  км/с,  $l = 307^\circ$ ,  $b = 12^\circ$  для выборки с  $R_{\max} = 8000$  км/с. Полученные при этом значения  $\gamma = (-17.2 \pm 2.2) \cdot 10^{-6}$  и  $\gamma = (-13.6 \pm 3.9) \cdot 10^{-6}$  также существенно отклоняются от космологического значения (6). Причина этого отклонения была указана выше. Значительный прогресс при определении величины  $\gamma$ , а с ней и параметра замедления, мог бы быть достигнут при понижении ошибок определения  $W$  хотя бы до уровня 5 %.

В заключение ответим на четыре вопроса, сформулированных во введении.

1. Из рисунка видно, что для лучевых скоростей менее 4000 км/с различия между релятивистскими и нерелятивистскими расстояниями несущественны. Но для скоростей около 12000 км/с они отличаются в полтора раза.

2. Параметры поля скоростей (табл. 1) определялись для двух значений максимальной глубины подвыборки в рамках всех рассмотренных моделей. Для малых глубин  $R_{\max} \leq 4000$  км/с они практически совпадают для нерелятивистской и полурелятивистской моделей из-за близости расстояний до галактик для этих моделей.

3. Возможна оценка параметра замедления по данным о движении RFGC-галактик, однако следует учесть статистический эффект, связанный с погрешностью измерения  $W$ . Существенное повышение точности оценки возможно только при понижении погрешностей измерения ширины линии H I хотя бы до 5 %.

4. Компоненты тензора  $\mathbf{S}$ , полученные в релятивистской модели, существенно превысили оценку этой величины, следующую из параметров ближайших аттракторов. Очевидно, мы имеем дело с артефактом, связанным с сильной корреляцией составляющих тензоров  $\mathbf{S}$  и  $\mathbf{Q}$ . Эта корреляция столь сильна, что ни повышение выборки в 2-3 раза, ни повышение точности измерений не позволят надежно разделить вклады этих тензоров. Только существенное увеличение глубины выборки позволит использовать релятивистскую модель коллективного движения галактик. В настоящее время целесообразно ограничиться полурелятивистской моделью.

Авторы благодарны Ю. Н. Кудре за идею работы и помощь в ее выполнении.

1. Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Релятивистская астрофизика. — М.: Наука, 1967.—656 с.

2. Кудря Ю. М., Александров О. М. Релятивистские моделирование великомасштабного руху галактик // Журн. фіз. досл.—2002.—6, № 4.—С. 472—475.

3. Кудря Ю. М., Александров О. М. Релятивістська поліноміальна модель великомасштабного руху галактик // Вісн. Київ. ун-та. Сер. астрон.—2004.—39-40.—С. 130—135.
4. Парновский С. Л., Кудря Ю. Н., Караченцева В. Е., Караченцев И. Д. Коллективные движения плоских галактик на масштабах 100 Мпк в квадрупольном и октупольном приближениях // Письма в Астрон. журн.—2001.—27, № 12.—С. 890—900.
5. Парновский С. Л., Тугай А. В. Коллективные движения плоских галактик на масштабе 100 Мпк с использованием новых данных // Письма в Астрон. журн.—2004.—30, № 6.—С. 403—413.
6. Fouque P., Solanes, J., Sanchis T., Balkowski C. Structure, mass and distance of the Virgo cluster from a Tolman-Bondi model // Astron. and Astrophys.—2001.—375, N 3.—P. 770—780.
7. Hanski M., Theureau G., Ekholm T., Teerikorpi P. Kinematics of the local universe IX. The Perseus—Pisces supercluster and the Tolman—Bondi model // Astron. and Astrophys.—2001.—378, N 2.—P. 345—360.
8. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Yu. N., et al. The revised Flat Galaxy Catalogue // Bull. SAO.—1999.—47.—P. 5—185.
9. Lynden-Bell D., Faber S. M., Burstein D., Davies R. L., et al. Spectroscopy and photometry of elliptical galaxies. V — Galaxy streaming toward the new supergalactic center // Astrophys. J.—1988.—326.—March 1.—part 1.—P. 19—49.
10. Marinoni C., Monaco P., Giuricin G., Costantini B. Galaxy distances in the nearby universe: corrections for peculiar motions // Astrophys. J.—1998.—505, N 2.—P. 484—505.
11. Spergel D. N., Verde L., Peiris H. V., et al. First-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: Determination of cosmological parameters // Astrophys. J. Suppl.—2003.—148, N 1.—P. 175—194.
12. Tully R. B., Fisher J. R. A new method of determining distances to galaxies // Astron. and Astrophys.—1977.—54, N 3.—P. 661—673.

Поступила в редакцию 29.04.04