

УДК 524.7

А. В. Тугай, С. Л. Парновский

Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченко
04053 Киев, ул. Обсерваторная, 3**Моделирование крупномасштабных движений галактик,
вызванных одиночным аттрактором**

Проведено численное моделирование пекулярных скоростей галактик на масштабе 100 Мпк, вызываемых одиночным сферически-симметричным избытком распределения плотности (аттрактором). Показано, что направление дипольной составляющей потока галактик приблизительно соответствует положению только удаленных аттракторов, и может существенно отклоняться от положения близких аттракторов. Найдена нижняя граница расстояния до аттрактора, выше которой возможно определить его положение на небе с погрешностью не более 15°. Получены простые соотношения, позволяющие найти погрешность положения аттрактора на небе и расстояние до удаленного аттрактора. Подтверждено, что наблюдаемый дипольный поток галактик на масштабе 100 Мпк можно интерпретировать как результат совместного гравитационного влияния четырех аттракторов: скопления в Деве, сверхскопления Персей-Рыбы, Концентрации Шепли и Великого Аттрактора, причем влияние последнего преобладает. Влияние этих аттракторов на эффективное значение постоянной Хаббла не превышает 1 %.

МОДЕЛЮВАННЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ РУХІВ ГАЛАКТИК, ЩО СПРИЧИНЮЮТЬСЯ ОДИНОЧНИМ АТРАКТОРОМ, Тугай А. В., Парновський С. Л. — Було проведено чисельне моделювання пекулярних швидкостей галактик на масштабі 100 Мпк, які спричинюються одиночним сферично-симетричним надлишком розподілу густини (аттрактором). Показано, що напрямок дипольної складової потоку галактик приблизно відповідає положенню тільки віддалених аттракторів, і може істотно відхилитися від положення близьких аттракторів. Знайдено нижню межу відстані до аттрактора, вище якої можливо визначити його положення на небі з похибкою не більш ніж 15°. Отримано прості співвідношення, що дозволяють знайти похибку положення аттрактора на небі і відстань до віддаленого аттрактора. Підтверджено, що дипольний потік галактик, що спостерігається на масштабі 100 Мпк, можна інтерпретувати як результат спільного гравітаційного впливу чотирьох аттракторів: скупчення в Діві, надскупчення Персей-Риби, Концентрації Шеплі і Великого Атрактора, причому вплив останнього переважає. Вплив цих аттракторів на ефективне значення постійної Хаббла не перевищує 1 %.

SIMULATION OF LARGE-SCALE MOTIONS OF GALAXIES CAUSED BY AN INDIVIDUAL ATTRACTOR, by Tugai A. V., Parnovskii S. L. — We made a numerical simulation of peculiar velocities of galaxies' on a scale of 100 Mpc caused by an individual spherically symmetrical excess of density (an attractor). It is shown that the direction of the bulk motion of galaxies roughly agrees with the position of a distant attractor only and can deviate essentially from the position of a near attractor. We find a lower limit of distance to an attractor above which the position of the attractor can be found with an error no greater than 15° . We obtain simple relationships which allow one to estimate the zone of an attractor on the sky and the distance to a remote attractor. We confirm that galaxy bulk motion observed up to 100 Mpc can be considered as the result of the joint gravitational influence of four attractors: Virgo cluster, Perseus-Pisces supercluster, Shapley concentration, and Great Attractor, the influence of the last-named one being dominant. The influence of these attractors on the Hubble constant value is less than 1 %.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование коллективных движений галактик активно ведется с 1976 года, когда в своей пионерской работе [8] В. Рубин показала, что на фоне общего хаббловского разбегания галактик существует также упорядоченное движение. Небольшой объем используемой выборки позволил рассмотреть это движение как поток с постоянной скоростью и в одинаковом направлении (bulk motion). Подобное приближение часто используется до сих пор; мы будем называть его D-моделью. Для нахождения пекулярной скорости отдельной галактики необходимо знать ее красное смещение и иметь независимую оценку расстояния до галактики. Наиболее часто для оценки расстояния до спиральных и эллиптических галактик используются методы Талли—Фишера и $D_n - \sigma$. Есть также ряд других статистических критериев, которые дают оценку с точностью 8—15 %. Списки пекулярных скоростей галактик приведены в работах [5, 9, 10].

После сглаживания пекулярных скоростей отдельных галактик мы получаем усредненное поле радиальных составляющих скоростей движения галактик V_r . Есть ряд подходов, применяемых для дальнейшей его обработки. В рамках некоторой теории гравитационной неустойчивости можно по этому полю восстановить распределение плотности и тангенциальные компоненты скорости коллективного движения [4]. В работе [1] для исследования движения галактик выборки Disco применялось мультипольное разложение поля скоростей вплоть до октупольных членов.

Общепринято, что причиной пекулярных движений галактик являются локальные неоднородности плотности в пределах и за пределами выборки. При этом пустоты играют незначительную роль, а основной вклад в создание пекулярной скорости вносят компактные концентрации масс — аттракторы. Одной из основных целей обработки списков пекулярных скоростей является определение положения и параметров аттракторов в близлежащей Вселенной (до 200 Мпк). По своей сути этот процесс относится к обратной задаче, так как параметры определяются по характеристикам поля скоростей, вызванного аттракторами. Естественно, при решении этой задачи возможны существенные различия в параметрах реальных аттракторов и восстановленных методами решения обратной задачи. Причины этого связаны как с недостатками выборки галактик (неполнота, асимметрия, недостаточный объем), так и с ошибками методов восстановления поля плотности. Исследованию точности восстановления картины аттракторов и посвящена данная статья. Кроме того, рассмотрен вопрос о том, насколько

поле пекулярных скоростей выборки Disco, полученное в работе [1], может быть объяснено принятой в настоящее время картиной распределения аттракторов.

2. МЕТОД

Для исследования точности восстановления параметров аттракторов мы используем компьютерное моделирование. Для того чтобы не вводить в качестве дополнительного параметра постоянную Хаббла, все величины с размерностью длины мы будем приводить в км/с. Будем использовать галактическую систему координат, в которой скорости отсчитываются относительно микроволнового реликтового излучения.

На первом этапе мы определяем величины V_r для заданной выборки галактик, вызванные распределением плотности в виде «постоянная плотность плюс один аттрактор с кинговским распределением избыточной плотности»:

$$\rho(r) = \rho_b \left[1 + \frac{A}{(1+x^2)^{1.5}} \right], \quad x = r/r_a, \quad (1)$$

где ρ_b — фоновая плотность вещества. Параметр A характеризует массу аттрактора, а r_a — его размер. Полученное поле является суммой чистого хаббловского разбегания, вызванного постоянной фоновой плотностью, и пекулярной скорости из-за притяжения к аттрактору, связанной с возмущением плотности формулой [2]

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}) = \frac{\beta}{4\pi} \int \left(\frac{\rho(\mathbf{r}')}{\rho_b} - 1 \right) \frac{\mathbf{r}' - \mathbf{r}}{|\mathbf{r}' - \mathbf{r}|^3} d^3\mathbf{r}', \quad \beta = \frac{\Omega^{0.6}}{b_c}. \quad (2)$$

Здесь Ω — космологический параметр плотности, b_c — линейный постоянный фактор сдвига, равный отношению флуктуации плотности скоплений к флуктуации плотности массы. Значение β существенно различно по разным данным. Так, в работе [7] используется значение $\beta = 0.21 \pm 0.03$ из [3]. В недавнем обзоре [10] приведена таблица современных оценок этого параметра, полученных разными методами. Их значения лежат в интервале от 0.42 ± 0.07 до 0.89 ± 0.12 . Большинство значений составляет 0.5—0.6.

Соответствующий интеграл (2) с распределением массы (1) взят в работе [7]. Вектор пекулярной скорости равен

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}) = -A\beta n \mathbf{Y}, \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = \frac{r_a}{x^2} \left[\ln(x + \sqrt{1+x^2}) - \frac{1}{\sqrt{1+x^2}} \right],$$

где \mathbf{n} — единичный вектор, направленный от аттрактора к галактике.

Как видно, модуль пекулярной скорости пропорционален параметру $\eta = A\beta$, а ее направление не зависит ни от A , ни от Ω . Поэтому пекулярные скорости, приведенные в п. 4, рассчитывались для случая $\eta = 1$; в дальнейшем полученные скорости потоков можно умножить на η . Они зависят от расстояния до аттрактора r и его положения на небе. Легко найти, что радиальная составляющая пекулярной скорости галактики, находящейся в точке с декартовыми координатами (x_g, y_g, z_g) , равна

$$V_r = V \frac{(x_0 - x_g)x_g + (y_0 - y_g)y_g + (z_0 - z_g)z_g}{\sqrt{[(x_0 - x_g)^2 + (y_0 - y_g)^2 + (z_0 - z_g)^2](x_g^2 + y_g^2 + z_g^2)}, \quad (4)$$

$$V = |\mathbf{V}|,$$

где x_0, y_0, z_0 — координаты центра аттрактора в той же декартовой системе координат, начало которой совпадает с положением земного наблюдателя.

По формуле (4) были вычислены радиальные пекулярные скорости галактик выборки для случая 200 расстояний до аттрактора r (с шагом 100 км/с до 20000 км/с), 26 его положений, равномерно распределенных по небесной сфере (направления на вершины, центры ребер и граней куба, параллельного осям галактической декартовой системы координат с центром в точке наблюдателя), и семи значений r_a : 100, 300, 600, 1000, 1500, 2000, 3000 км/с. Значение $r_a = 100$ км/с соответствует аттракторам с размерами, меньшими наблюдаемых, а $r_a = 3000$ км/с соответствует наибольшим из наблюдаемых аттракторов.

На втором этапе полученные пекулярные скорости галактик обрабатывались методами, почти тождественными примененным в [1]. Единственное различие заключается в том, что в [1] расстояния и пекулярные скорости вычислялись совместно из многопараметрической регрессии, а здесь расстояния считаются заданными (значения брались из работы [5]) и вычислялись только компоненты разложения поля скоростей. По методу наименьших квадратов определялись параметры регрессии для следующих трех моделей:

— дипольная (D) модель

$$V_r = D_1 n_i + \varepsilon r; \quad (5)$$

— квадрупольная (DQ) модель

$$V_r = D_1 n_i + \varepsilon r + Q_1(n_x^2 - n_z^2)r + Q_2(n_y^2 - n_z^2)r + Q_{xy}n_x n_y r + Q_{xz}n_x n_z r + Q_{yz}n_y n_z r; \quad (6)$$

— октупольная (DQO) модель

$$V_r = D_1 n_i + \varepsilon r + Q_1(n_x^2 - n_z^2)r + Q_2(n_y^2 - n_z^2)r + Q_{xy}n_x n_y r + Q_{xz}n_x n_z r + Q_{yz}n_y n_z r + O_{xyz}n_x n_y n_z r^2 + O_{xxx}n_x^3 r^2 + O_{yyy}n_y^3 r^2 + O_{zzz}n_z^3 r^2 + O_{xxy}n_x^2 n_y r^2 + O_{xxz}n_x^2 n_z r^2 + O_{yyx}n_y^2 n_x r^2 + O_{yyz}n_y^2 n_z r^2 + O_{zzx}n_z^2 n_x r^2 + O_{zzy}n_z^2 n_y r^2. \quad (7)$$

Здесь ε — изменение параметра Хаббла для нашей выборки, вызванное наличием аттрактора, D_1 — дипольная составляющая поля скорости, тензоры Q_{ik} и O_{ikl} характеризуют квадрупольную и октупольную составляющие поля скоростей и содержат соответственно 5 и 10 параметров. Все исходные и все получаемые величины приведены в системе отсчета реликтового излучения. Мы ограничимся рассмотрением только величин ε и D_1 .

3. ВЫБОРКИ

Моделирование поля скоростей сферически-симметричных аттракторов существенно упрощается для идеализированного случая сферически-симметричной выборки, например для очень большого числа галактик, равномерно распределенных внутри сферы с центром в начале координат. Высокая симметрия задачи позволяет сделать вывод о том, что для любой модели аттрактора вектор \mathbf{D} всегда направлен вдоль линии, соединяющей наблюдателя и центр аттрактора, а его модуль не зависит от положения аттрактора на небесной сфере. Рассматривая аттрактор, лежащий на оси z , мы из тех же соображений симметрии находим, что тензор квадрупольной составляющей должен быть равен

$$Q = Q_0 \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Он имеет собственный вектор, направленный на аттрактор. В результате задача сводится к взятию интеграла (2) и нахождению зависимости величин D и Q_0 от параметров аттрактора.

Этот подход, естественно, не может дать ответы на интересующие нас вопросы о точности определения параметров реальных аттракторов и их положений. Поэтому в данной статье в качестве выборки мы используем выборку Disco, которая использовалась в работе [1]. Она содержит 1271 плоскую галактику из каталога RFGC [6], расстояния до которых были вычислены в работе [5]. Среднее расстояние до галактик выборки равно 5900 км/с, выборка полна до 5500 км/с. Эта выборка обладает всеми недостатками реальной выборки: асимметрией, неполнотой, неоднородностью. Для того чтобы отдельно рассмотреть влияние каждого из этих факторов, мы используем также выборки, полученные на ее основе. Для устранения эффекта асимметрии мы строим модельную симметризованную выборку из 10168 галактик. Каждой галактике выборки Disco соответствуют восемь галактик симметризованной выборки. Они расположены в вершинах куба с центром в начале координат. Координаты одной из вершин являются координатами галактики из Disco.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчеты показывают, что для всех параметров и положений аттрактора и всех выборок значение ε не превышало 0.1 %. Таким образом, чтобы заметно повлиять на постоянную Хаббла, определенную для галактик выборки, необходимы аттракторы с параметром A , на несколько порядков большим, чем у реальных. Учитывая аддитивность этой величины, можно сделать вывод, что реальные аттракторы практически не влияют на величину постоянной Хаббла.

Симметризованная выборка. Для симметризованной выборки вектор \mathbf{D} практически всегда направлен вдоль оси «наблюдатель — центр аттрактора». Во всех случаях аттрактор, находящийся в начале координат, дает равный нулю вектор \mathbf{D} . Зависимость модуля \mathbf{D} от расстояния до аттрактора r приведена на рис. 1. При $r_a < 2500$ км/с она имеет минимум в районе 2—5 тыс км/с. На меньших расстояниях направление диполя противоположно направлению на аттрактор. В минимуме угол отклонения диполя от аттрактора α принимает значение около 90° (малые компоненты вектора \mathbf{D} , перпендикулярные к направлению на аттрактор возникают за счет отклонений от идеальной симметрии), а значение модуля практически зануляется. На расстояниях, больших минимума, α резко уменьшается практически до нуля. Для $r_a > 2500$ км/с угол α близок к нулю для любых расстояний до аттрактора.

Эффекты несимметричности выборки Disco. Для реальной асимметричной выборки аттрактор, помещенный в начало координат, приведет к появлению не равного нулю вектора \mathbf{D} , направление и величина которого зависят от параметра r_a и модели. Назовем его нулевым потоком галактик. В D- и DQ-моделях максимальное значение нулевого потока равно 100 км/с при $r_a = 5000$ км/с. В DQO-модели максимальный поток характеризуется величиной $D = 320$ км/с при $r_a = 8000$ км/с. Нулевой поток становится сравнимым со скоростями пекулярных движений при $r_a > 3000$ км/с и использовании DQO-модели.

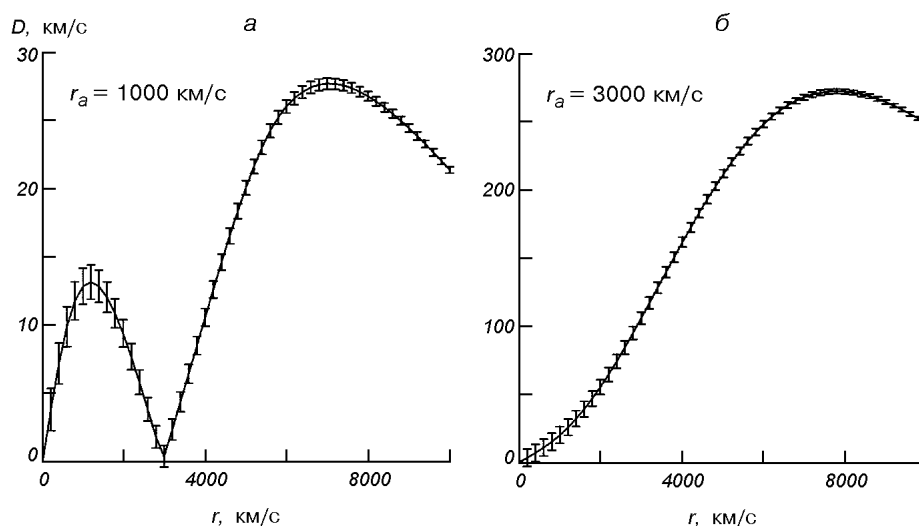


Рис. 1. Модуль вектора \mathbf{D} в зависимости от расстояния до аттрактора для симметризированной выборки. Аттрактор находится на оси z

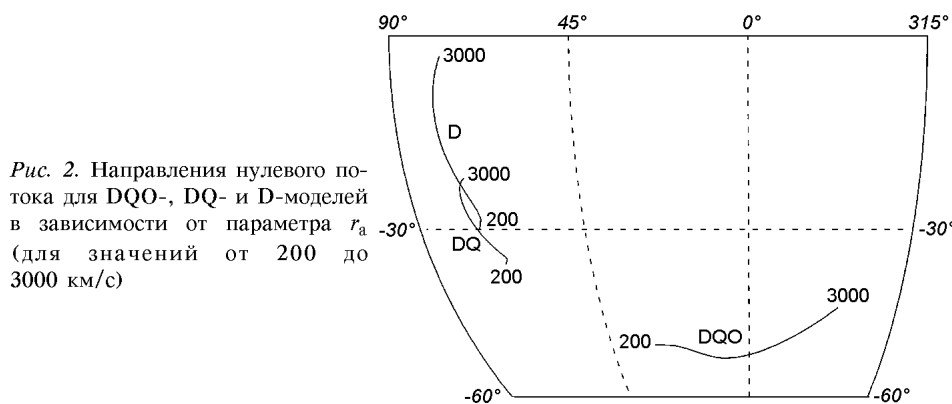


Рис. 2. Направления нулевого потока для DQO-, DQ- и D-моделей в зависимости от параметра r_a (для значений от 200 до 3000 км/с)

Направления потока для значений r_a от 200 до 3000 км/с и трех моделей представлены на рис. 2. В D- и DQ-моделях эти направления описывают дугу длиной 20° вдоль галактического меридиана $l = 90^\circ$. Дуга лежит на юг от галактического экватора. В DQO-модели направления изменяются от $l = 40^\circ$, $b = -50^\circ$ до $l = 330^\circ$, $b = -45^\circ$.

Углы отклонения между направлением вектора \mathbf{D} и направлением на аттрактор существенно отличаются от аналогичных углов для симметризированной выборки. Этот эффект особенно заметен для малых значений r , когда вектор \mathbf{D} близок к нулевому потоку. Незначительно сдвигая аттрактор из центра вдоль нулевого потока, мы получим $\alpha \approx 0^\circ$. При сдвиге в противоположном направлении $\alpha \approx 180^\circ$. При сдвиге в произвольном направлении можно получить любые промежуточные значения α . Для аттрактора, находящегося на больших расстояниях от нас, угол α невелик и уменьшается при увеличении расстояния (рис. 3). Заметим, что из топологической теоремы о неподвижной точке вытекает, что при любом заданном r можно найти такое положение аттрактора на небесной сфере, при котором $\alpha = 0^\circ$. Это значение, естественно, и определяет минимальный угол α . На рис. 3 приведены значения средних и максимальных углов отклонения для DQO-модели.

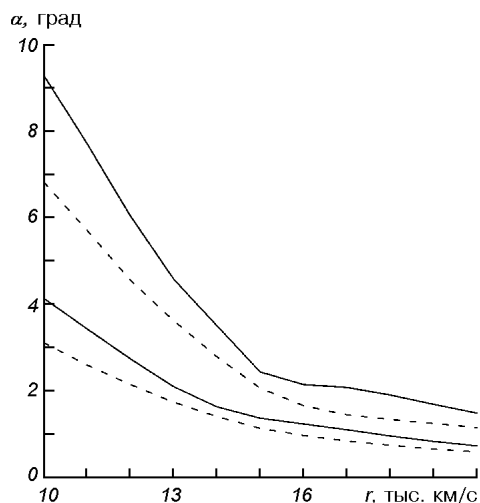


Рис. 3. Угол между направлением вектора \mathbf{D} и направлением на аттрактор. Сплошная линия соответствует значению $r_a = 1000$ км/с, штриховая — 3000 км/с. Верхние линии соответствуют максимальному значению угла среди 26 направлений, нижние — усредненному значению по направлениям

Зависимости $D(r)$ для выборки Disco различаются между собой при различных положениях аттрактора на небесной сфере. В зависимости от взаимной ориентации аттрактора и нулевого потока, составляющая D в направлении аттрактора $D_a(r)$ при малых расстояниях может быть как положительной, так и отрицательной. При больших расстояниях она всегда положительна и уменьшается при увеличении r .

При $D_a(r \rightarrow 0) < 0$ непрерывная функция $D_a(r)$ должна достигать максимума в некоторой точке. На расстояниях, меньших расстояния достижения максимума, эта функция также должна обращаться в ноль при некотором значении $r = r_1$. При этом $D_a = 0$, и угол отклонения α равен 90° . При $r > r_1$ величина $\alpha < 90^\circ$, а при $r < r_1$ имеем $\alpha > 90^\circ$.

Из-за несимметричности выборки есть ненулевая D_\perp -составляющая вектора \mathbf{D} , ортогональная направлению на аттрактор. Для любого направления на аттрактор зависимость $D_\perp(r)$ практически всегда монотонно уменьшается, только изредка встречаются плато, когда функция слабо колеблется около некоторого фиксированного значения. Поскольку $D^2 = D_a^2 + D_\perp^2$, то минимум модуля вектора \mathbf{D} достигается при $r = r_{\min} > r_1$ именно из-за уменьшения $D_\perp(r)$. Поэтому при $r > r_{\min}$ получаем $\alpha < 90^\circ$. В минимуме величина модуля вектора D равна $D_\perp > 0$, в отличие от симметризированной выборки.

При $D_a(r \rightarrow 0) > 0$ возможны два случая поведения $D(r)$ в зависимости от числа корней функции $D_a(r)$, которое должно быть четным. При отсутствии корней мы не имеем минимума в зависимости $D(r)$, а угол отклонения α меньше 90° . Максимум $D(r)$ теоретически мог бы достигаться и при $r = 0$, однако такое монотонное уменьшение не наблюдалось ни в одном из рассчитанных нами случаев. В случае двух корней r_1 и r_2 мы имеем $\alpha(r_1) = \alpha(r_2) = 90^\circ$. Если r лежит в интервале $r_1 \dots r_2$, то $\alpha > 90^\circ$. В противном случае $\alpha < 90^\circ$. Минимум $D(r)$ находится в точке $r_{\min} > r_2$, поэтому по-прежнему $\alpha(r > r_{\min}) < 90^\circ$. Заметим, что графики $D_a(r)$ для двух противоположных направлений на небесной сфере должны иметь четное и нечетное число нулей. Случай трех и более корней $D_a(r)$ наблюдается только для маленьких аттракторов с $r_a = 100$ км/с и $r_a = 300$ км/с. Поэтому для больших аттракторов возможны только варианты «1 корень плюс 2 корня» и «1 корень плюс 0 корней».

Проиллюстрируем сказанное примером, когда аттрактор лежит на галактической оси. На рис. 4 показана зависимость $D(z)$ для трех моделей

Рис. 4. Модуль вектора D в зависимости от положения аттрактора для выборки Disco. Аттрактор находится на оси z . Параметр размера аттрактора равен 1000 км/с. Кружками на зависимости показаны случаи $\alpha = 90^\circ$

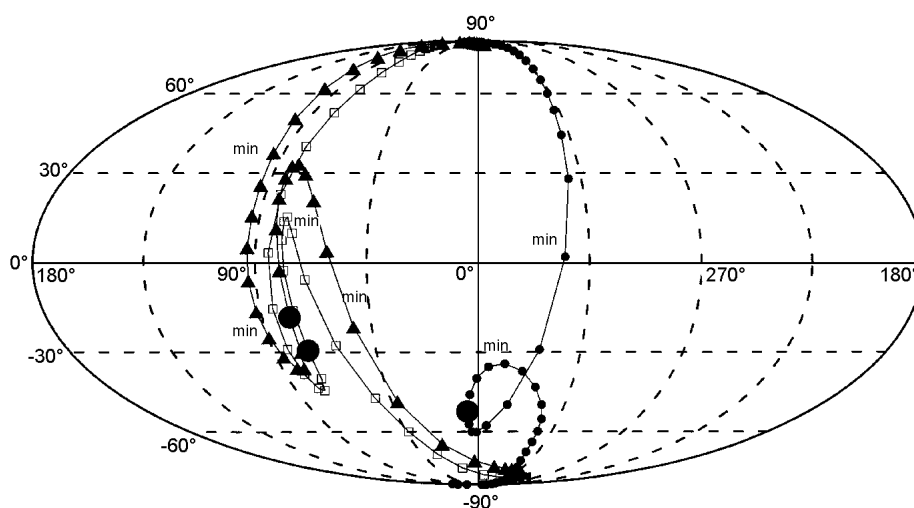
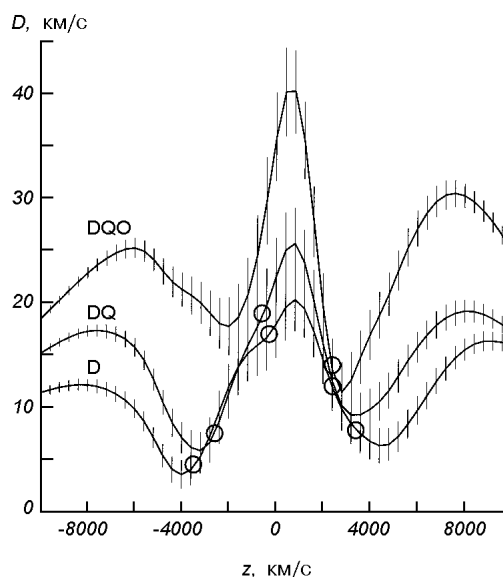


Рис. 5. Направления вектора D для различных положений аттрактора на оси z ; $r_a = 1000$ км/с. Кружки — направления для DQO-, квадратики — для DQ-, треугольники — для D-модели. Соседние отмеченные направления соответствуют разнице расстояния до аттрактора на 400 км/с. Большими черными кружками отмечены направления нулевого потока. Указаны положения минимумов на зависимости модуля вектора D от z

и $r_a = 1000$ км/с. Случай $z > 0$ соответствует аттрактору в северном галактическом полюсе, случай $z < 0$ — в южном. На рис. 5 показаны соответствующие направления вектора D на небесной сфере. Видно, что при изменении z вектор D описывает на небесной сфере сложную траекторию с петлями и зигзагами. Угол отклонения α равен углу между вектором D и северным (при $z > 0$) или южным (при $z < 0$) галактическим полюсом. Случай $D_a = 0$ соответствует пересечению вектором галактического экватора. Видно, что при $z > 0$ существует один корень, при $z < 0$ — два корня для D- и DQ-моделей и нет корней для DQO-модели. Из рис. 4 видно, что все они лежат между $r = 0$ и соответствующими минимумами.

На рис. 6 показан график, аналогичный рис. 4, но для аттрактора с $r_a = 3000$ км/с. Направления вектора D при этом существенно проще, чем

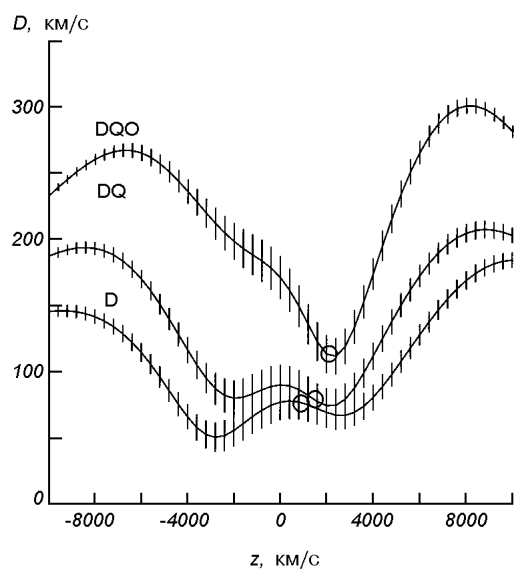


Рис. 6. То же, что на рис. 4, но для случая $r_a = 3000$ км/с

показанные на рис. 5. Нет петель и зигзагов, график для каждой из моделей пересекает галактический экватор только один раз. Этот пример соответствует случаю «1 + 0 корней». На рис. 4—6 ясно виден нулевой поток. Видны также явные отличия между поведением D- и DQ-моделей с одной стороны и DQO-модели — с другой стороны.

На рис. 7 изображены зависимости модуля вектора \mathbf{D} от расстояния до аттрактора для трех моделей и значений $r_a = 1000$ и 3000 км/с. Средние линии на каждом из шести графиков соответствуют значениям модуля, усредненным по 26 направлениям. На верхних и нижних линиях отмечены наибольшие и наименьшие значения модуля D среди всех положений аттрактора для 26 рассмотренных направлений. Видно, что качественные выводы, сделанные выше, остаются справедливыми и для произвольного расположения аттрактора на небесной сфере.

Полезные статистические соотношения. Целью предпринятого моделирования является среди прочего получение статистических зависимостей, помогающих оценить величину α и параметры аттракторов для реальных наблюдений. После обработки наблюдательных данных мы получаем три вектора дипольной составляющей для трех моделей. Значения их модулей не несут существенной информации, так как они пропорциональны параметру η . Более ценную информацию мы можем получить из трех углов отклонения между направлениями вектора \mathbf{D} для разных моделей: γ_1 для D- и DQ-моделей, γ_2 для D- и DQO-моделей и γ_3 для DQ- и DQO-моделей. Если среди этих величин встречаются большие углы, то аттрактор находится на небольшом расстоянии, и угол α также может быть очень большим. В этом случае направление любого из векторов \mathbf{D} не указывает даже приблизительно на положение аттрактора на небесной сфере, и мы бессильны найти его. При удалении аттрактора на расстояние, существенно большее, чем максимум на графиках, уменьшаются угол α и все три угла γ . Отметим, что любой из углов $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ может быть весьма мал по случайным причинам. Это следует из вышеупомянутой теоремы о неподвижной точке. Поэтому в качестве основной величины мы используем максимальный из трех углов отклонения $\gamma = \max(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$.

Статистический анализ зависимости α от γ и параметров аттракторов показал следующее.

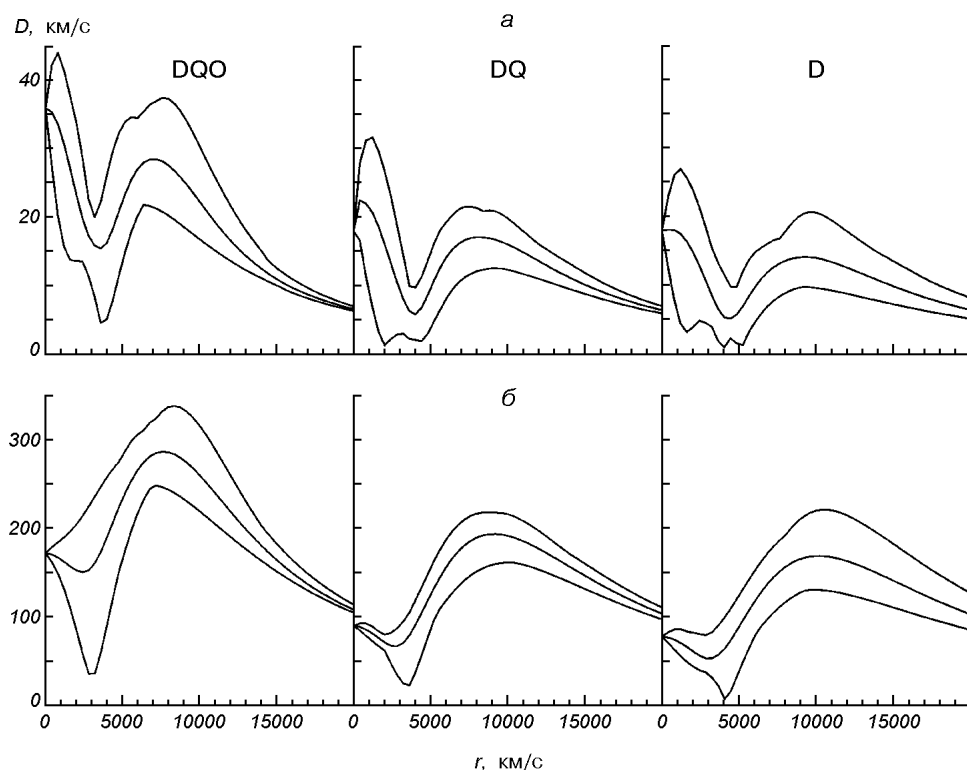


Рис. 7. Модуль вектора \mathbf{D} в зависимости от расстояния до аттрактора для трех моделей и значений $r_a = 1000$ км/с (а) и 3000 км/с (б). Три кривые соответствуют максимальным, минимальным и средним по 26 направлениям значениям модуля

1. Из трех возможных углов отклонения направления вектора \mathbf{D} от направления на аттрактор наименьшим в среднем является угол α для DQO-модели. Поэтому именно эту модель следует использовать для поиска направления на аттрактор.

2. Величина α при заданном γ практически не зависит от параметра r_a .

3. Зададимся ограничением $\alpha < 20^\circ$. Оно всегда выполняется при $\gamma < 15^\circ$. После обрезания точек на зависимости $\alpha(\gamma)$ при всевозможных параметрах аттрактора и его положениях на небе величиной $\gamma < 15^\circ$ (обрезание именно по γ использовано для устранения эффекта Малмквиста) мы получаем простое соотношение

$$\alpha \approx 0.4\gamma. \quad (9)$$

Чуть большее значение мы получаем для угла α в DQ-модели. Наименее пригодна D-модель, для которой коэффициент в формуле, аналогичной (9), приблизительно равен единице.

Итак, мы получили метод оценки α . Ту же величину γ можно использовать также для оценки расстояния до аттрактора, поскольку она явным образом зависит от r . Есть также слабая монотонная зависимость γ от r_a при постоянном r . Среднее значение γ уменьшается приблизительно на четверть при увеличении параметра r_a с 300 до 3000 км/с. Однако разброс значений γ при одинаковом r и для разных положений аттрактора на небесной сфере существенно больше. Используя данные для всех направле-

ний на аттрактор, 81 значение расстояния до аттрактора от 8000 до 40000 км/с с шагом в 400 км/с и шесть значений r_a , мы получаем статистическую оценку

$$r \approx \frac{110000 \text{ км/с}}{\gamma, \text{ град}}$$

для значений $\gamma < 15^\circ$. Заметим, что корреляция между r и γ не очень сильная, и расстояния, полученные по формуле (10), могут отличаться от истинных в два раза.

Естественно, что в реальной Вселенной мы имеем дело более чем с одним аттрактором, и форма этого аттрактора может существенно отличаться от кинговского профиля. Тем не менее, возможна ситуация, когда один аттрактор оказывает существенно большее влияние на вектор \mathbf{D} , чем остальные. Тогда мы можем воспользоваться соотношениями (9)—(10) для грубой оценки его параметров.

Потоки галактик в 4-аттракторной модели. В качестве упрощенной модели распределения материи на расстояниях до 200 Мпк можно рассматривать модель четырех аттракторов. Это Великий Аттрактор, скопление галактик в созвездии Девы, сверхскопление Персей — Рыбы и Концентрация Шепли, точнее эквивалентные им кинговские распределения плотности. Параметры этих аттракторов (r_a , параметр A/b_c , обозначенный в таблицах в [7] просто как A) и их положение в пространстве взяты из работы [7]. Дополнительно в работе [7] определялось также значение космологического параметра Ω_m , который оказался равен 0.4 ± 0.3 . Это значение мы и использовали при расчетах по формуле (3).

Все перечисленные параметры определялись по данным коллективного движения галактик каталога Mark III [8], его предыдущей версии Mark II и ряда их подвыборок. Среди полученных девяти наборов параметров мы использовали набор полученных для наиболее полной выборки, приведенный в табл. 1. Сравнение полученных значений вектора \mathbf{D} для остальных восьми вариантов показало, что разброс лежит в разумных пределах. Для полученной 4-аттракторной модели мы вычислили значения поправки к параметру Хаббла и вектор дипольной составляющей потока галактик. Как и следовало ожидать, поправка параметра Хаббла оказалась значительно меньше 1%. Ее значения приведены в табл. 1. В табл. 2 приведены направления диполя и соответствующие углы отклонения от направлений на аттракторы. Видно, что наиболее точной также является DQO-модель. Рассмотрим на примере 4-аттракторной модели, насколько применимы к ней оценки (9) и (10).

В работе [1] были найдены компоненты вектора \mathbf{D} : $l = 320.8^\circ$, $b = -0.4^\circ$, $D = 335.7$ км/с для D-модели; $l = 326.7^\circ$, $b = -5.8^\circ$, $D = 316.2$ км/с для

Таблица 1. Параметры аттракторов из работы [8] и значения вычисленной для них поправки параметра Хаббла ε

Объект	l , град	b , град	Расстояние, км/с	r_a , км/с	A/b_c	ε_{DQO} , 10^{-5}	ε_{DQ} , 10^{-5}	ε_D , 10^{-5}
Великий Аттрактор	309	18	4200	1806	2.4 ± 1.0	-940 ± 20	-600 ± 20	-620 ± 20
Дева	284	74	1349	498	3.1 ± 1.6	-120 ± 7	-81 ± 6	-81 ± 6
Концентрация Шепли	120	-30	5000	1415	3.3 ± 1.4	-318 ± 7	-161 ± 9	-230 ± 10
Персей — Рыбы	308	4	14000	3004	2.6 ± 1.1	-510 ± 20	-470 ± 20	-455 ± 15

Таблица 2. Значения углов отклонения α

Модель	Аттрактор	l , град	b , град	α , град
DQO	Великий Аттрактор	308.60	3.45	14.6 ± 2.5
	Дева	40.43	-64.24	156.8 ± 6.0
	Концентрация Шепли	307.53	3.21	0.92 ± 0.3
DQ	Персей-Рыбы	116.10	-49.94	20.2 ± 3.8
	Великий Аттрактор	329.99	14.46	20.5 ± 8.7
	Дева	85.20	-45.60	150.4 ± 6.6
	Концентрация Шепли	307.41	2.69	1.44 ± 0.49
D	Персей-Рыбы	119.08	-33.93	4.0 ± 7.4
	Великий Аттрактор	333.89	13.20	24.4 ± 9.2
	Дева	90.49	-38.02	143.4 ± 7.2
	Концентрация Шепли	307.94	-2.11	6.11 ± 0.79
	Персей-Рыбы	122.30	-1.51	28.6 ± 9.1

Таблица 3. Направление и модуль диполя для выборки с ограничением по расстояниям до 10000 км/с, DQO-модель

Аттрактор	l , град	b , град	Погрешность угла, град	Модуль, км/с
Великий Аттрактор	308.5	8.6	1.9	177.6 ± 6.0
Дева	40.3	-64.2	6.3	21.5 ± 2.4
Концентрация Шепли	308.4	3.4	0.2	327.4 ± 1.3
Персей-Рыбы	120.5	-38.1	2.3	113.9 ± 4.6
Суммарный вектор	311.4	-6.0		416.2

DQ-модели; $l = 295.9^\circ$, $b = 7.0^\circ$, $D = 277.5$ км/с для DQO-модели. Им соответствуют значения $\gamma_1 = 8.0^\circ$, $\gamma_2 = 25.9^\circ$, $\gamma_3 = 33.3^\circ$. Тогда согласно формуле (9) $\alpha \approx 13^\circ$, что находится в хорошем соответствии со значением угла отклонения 14.6° , полученным для Великого Аттрактора. Заметим, что такая погрешность определения направления на Великий Аттрактор как раз соответствует разбросу на небе направлений различных оценок bulk motion [10]. Оценка расстояния до Великого Аттрактора по формуле (10) равна 3000 км/с. Это меньше, чем в работе [7], приблизительно на 30 %. В этом же направлении находится другой аттрактор, существенно влияющий на коллективные движения галактик на масштабе 100 Мпк — Концентрация Шепли, однако оценки (9) и (10) относятся только к Великому Аттрактору. Табл. 2 подтверждает сформулированный выше результат о том, что направление дипольного потока хорошо согласуется с направлением на очень удаленный аттрактор (Концентрация Шепли) и совсем далеко от направления на близкий аттрактор (скопление в Деве).

Имеет смысл сравнить приведенные выше параметры вектора D для реальной выборки Disco с величиной полученной для 4-аттракторной модели. Поскольку в работе [1] применялась выборка галактик, расстояния до которых не превышают 10000 км/с, в табл. 3 приводятся результаты, полученные для той же подвыборки для каждого из четырех аттракторов и их суммарного влияния. Видно, что направление дипольной составляющей хорошо согласуется с наблюдаемым, а модуль несколько его превышает. Последнее может быть связано с неправильным определением параметров аттракторов в работе [7]. Величины, аналогичные приведенным в табл. 3, были вычислены для девяти других выборок с ограничением по расстоянию от 3 до 12 тыс. км/с. Разность направлений и модулей диполя недалеко выходит за границы погрешностей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате моделирования поля пекулярных скоростей галактик, вызванного одиночным аттрактором, было установлено следующее.

1. Эффективные поправки к постоянной Хаббла малы при любых разумных параметрах аттрактора.

2. Вектор дипольного момента характеризует положение аттрактора, только если последний находится на большом расстоянии, превышающем размеры выборки. В этом случае характерный угол отклонения может быть оценен по формуле (9). С меньшей точностью по формуле (10) может быть оценено также расстояние до аттрактора.

3. Для близких аттракторов направление дипольного момента может отличаться от направления на аттрактор весьма значительно. Даже в искусственно симметризированной выборке вектор \mathbf{D} может быть ориентирован в направлении, противоположном аттрактору.

4. Четырехаттракторная модель реального распределения масс предсказывает дипольную составляющую скорости, близкую по направлению и несколько превышающую по модулю реально полученные результаты. При этом оценки (9) и (10) хорошо соответствуют параметрам наиболее значимого из аттракторов — Великого Аттрактора.

Авторы выражают благодарность В. Е. Караченцевой и Ю. Н. Кудре за критические замечания при обсуждении статьи.

1. 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. 1—11.
2. Пиблс Ф. Дж. Э. Структура Вселенной в больших масштабах. — М.: Мир, 1983.—408 с.
3. Branchini E., Plionis M. Reconstructing positions and peculiar velocities of galaxy clusters within 25,000 kilometers per second: the cluster real space dipole // *Astrophys. J.*—1996.—460, N 2.—P. 1.—P. 569—583.
4. Dekel A., Eldar A., Kolatt T., et al. POTENT reconstruction from Mark III velocities // *Astrophys. J.*—1999.—522, N 1.—P. 1—38.
5. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Yu. N., et al. A list of peculiar velocities of RFGC galaxies // *Bull. SAO.*—2000.—50.—P. 5—38.
6. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Kudrya Yu. N., et al. The revised Flat Galaxy Catalogue // *Bull. SAO.*—1999.—47.—P. 5—185.
7. 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.
8. Rubin V. C., Thonnard N., Ford W. K., Roberts M. S. Motion of the Galaxy and the local group determined from the velocity anisotropy of distant SC I galaxies. II. The analysis for the motion // *Astron. J.*—1976.—81, N 9.—P. 719—737.
9. Willick J. A., Courteau S., Faber S. M., et al. Homogeneous velocity-distance data for peculiar velocity analysis. III. The Mark III catalog of galaxy peculiar velocities // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1997.—109.—P. 333—391.
10. Zaroubi S. Cosmic flows: Review of recent developments // Invited talk at the XIII Rencontres de Blois «Frontiers of the Universe» 17—23, June 2001, MPA, Garshing (astro-ph/0206052).

Поступила в редакцию 02.04.03