

УДК 524.8

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАТАЛОГОВ ГАЛАКТИК

Ш. А. ГУБЕРМАН, А. Г. ДОРОШКЕВИЧ, Э. В. КОТОК, С. Ф. ШАНДАРИН

Поступила 25 декабря 1981

Принята к печати 6 ноября 1982

Предложен метод анализа каталогов, основанный на проведении линий уровня плотности $\rho = \rho_c$ (ρ_c — свободный параметр задачи), выделении областей высокой ($\rho > \rho_c$) и низкой ($\rho < \rho_c$) плотности и статистическом анализе геометрических параметров этих областей. Описан алгоритм выделения областей и алгоритм определения их параметров. В качестве примера изучены три модельных каталога галактик: R-каталог, полученный путем случайного разбрасывания частиц, A-каталог, соответствующий адиабатической теории образования галактик (картина «блинов») [1], S-каталог, соответствующий поздним стадиям сгущения системы гравитационно взаимодействующих точечных масс, а также реальный O-каталог распределения галактик в окрестности южного полюса [2] (рис. 1). Сравнительный анализ каталогов по геометрическим параметрам областей высокой и низкой плотности показывает, что: 1) сильно вытянутые плотные конфигурации и большие пустые области типичны для всех четырех каталогов, этот эффект слабо связан с методом построения каталога. 2) Площадь пустых областей S^- и их длина вдоль случайной прямой D^- сильно зависят от доли плотных областей в каталоге.

1. Введение. Одной из актуальнейших задач внегалактической астрономии является изучение особенностей распределения галактик во Вселенной. В многочисленных работах последних лет [3—10] подробно изучены большие скопления (Геркулес, Персей, Кома—A 1367) и их окрестности. Выявлен ряд четко ограниченных сверхскоплений, обнаружены области пространства, практически не содержащие галактик, собран богатейший материал по морфологии и ориентации галактик, входящих в скопления и сверхскопления.

Теоретическая разработка вопросов образования крупномасштабной структуры была начата работой Зельдовича [11], показавшей, что на нелинейной стадии эволюции возмущений с неизбежностью образуются уплощенные вытянутые плотные конфигурации — «блины». В дальнейшем с помощью двумерных численных расчетов было показано, что с течением времени отдельные «блины» смыкаются, образуя развитую ячеистую структуру ([12], там же ссылки на более ранние работы).

Исключительная трудоемкость наблюдательного исследования структуры — необходимо измерить сотни и тысячи лучевых скоростей слабых галактик — ограничивает область подробного изучения сравнительно близкой окрестностью нашей Галактики. Поэтому типичность результатов, относящихся к геометрическим характеристикам трехмерной структуры (размеры и форма пустых ячеек, размеры и форма перемычек — сверхскоплений), еще долго будет сомнительной. В связи с этим резко возрастает важность всестороннего анализа каталогов распределения галактик на небесной сфере.

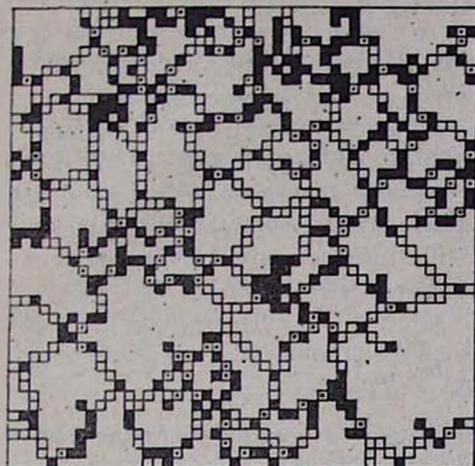
Обращаясь к анализу двумерного распределения галактик на небесной сфере, мы не используем информации о расстоянии до галактик вдоль луча зрения. В результате эффект проекции (особенно для каталогов, составленных по очень глубоким обзорам) в значительной мере маскирует реальную трехмерную структуру. Чем больше эффективная глубина каталога, тем более случайно видимое распределение галактик, и тем труднее составить правильное представление об объемной структуре на основании поверхностного распределения. Тем не менее, при некоторой оптимальной глубине каталога можно попытаться изучать типичные структуры в трехмерном распределении галактик, основываясь лишь на информации об угловом положении галактик и эффективной глубине каталога.

Корреляционный анализ каталогов, начатый Тотсуи и Кихара [13] и продолженный на более обширном материале в работах принстонской группы [14] (см. также обзор Фолла [15]), позволил получить ценную информацию о структуре Вселенной. В последнее время очень интересные работы выполнил Шанкс [16]. Используемые им методы отличаются от методов принстонской группы, но, по существу, также дают лишь информацию о существовании характерных масштабов в видимом распределении галактик во Вселенной.

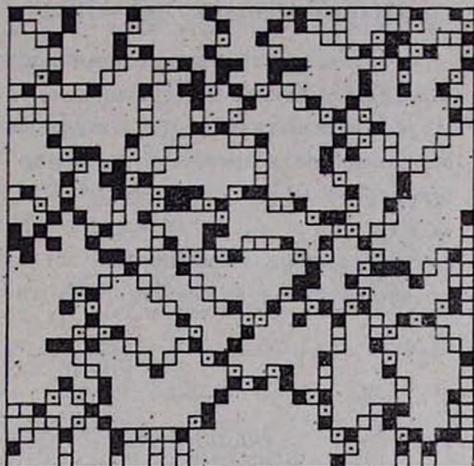
Между тем ячеистая структура четко видна на распределении галактик Ликского каталога [17]. Поэтому непосредственный анализ этой структуры вполне возможен и интересен. Необходимо лишь разработать адекватные методы анализа.

В настоящей статье описан один из возможных алгоритмов выделения областей высокой и низкой плотности и анализа их геометрических свойств. Предлагаемые методы позволяют получить численные характеристики геометрических параметров ячеистой структуры, что в свою очередь открывает пути как для теоретического анализа процессов образования структуры, так и для сравнения различных модельных каталогов с наблюдениями. Эти методы близки к методам, обсуждаемым в работе Розенфельда и Вестки [18], практическое использование обсуждаемых ниже методов рассмотрено в [19].

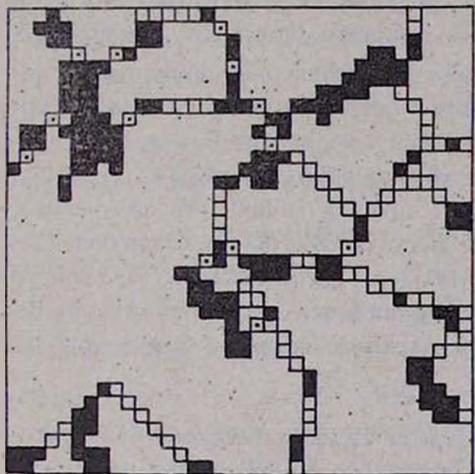
В настоящей работе изучаются и сравниваются между собой четыре каталога (рис. 1):



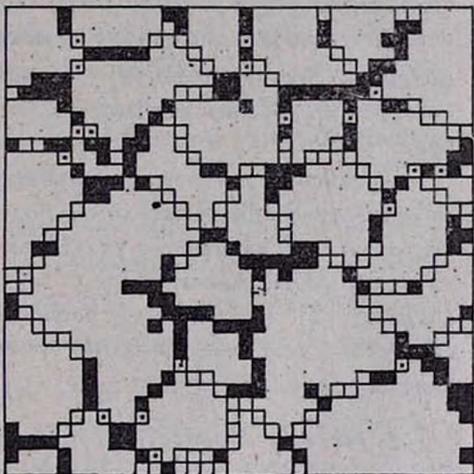
O-каталог



R-каталог



S-каталог



A-каталог

Рис. 1. Общий вид O, R, S и A-каталогов галактик. Черные клетки—заполненные клетки каталогов на выбранном уровне плотности, точками отмечены клетки, заполняемые при переходе к «дополненному» каталогу; обведенные клетки, заполняемые при переходе к «модифицированному» каталогу, который строится для выделения и анализа пустых областей.

1) Стохастический каталог (R-каталог), полученный путем случайного разбрасывания частиц.

2) А-каталог, соответствующий адиабатической теории образования галактик (картина «блинов»).

3) S-каталог, соответствующий поздним стадиям эволюции системы гравитационно-взаимодействующих точечных масс.

4) Реальный каталог распределения галактик в окрестности южного полюса (О-каталог) [2].

А и S каталоги были построены путем численного моделирования эволюции возмущений в двумерной бесстолкновительной самогравитирующей среде [1]. Спектр начальных возмущений содержал дискретный набор гармоник со случайными амплитудами. Длины волн лежали в пределах от размера расчетной области до $1/10$ этого размера. Начальное среднеквадратичное возмущение плотности дается выражением

$$\overline{(\delta\rho/\rho)^2} = \sigma_0 \sum_{n_1, n_2}^{10} b_{n_1, n_2}^2 \quad (1)$$

где b_{n_1, n_2} — случайные числа с нормальным законом распределения, причем $\overline{b_{n_1, n_2}} = 0$; $\overline{b_{n_1, n_2}^2} = 1$. На ранних стадиях нелинейной эволюции (А-каталог $\overline{(\delta\rho/\rho)^2} = 0.5$) отчетливо видна ячеистая структура; для этой стадии типичны вытянутые плотные области (рис. 1). На поздних стадиях (S-каталог $\overline{(\delta\rho/\rho)^2} = 4$) возникает несколько компактных областей с малой вытянутостью, сетчатая структура не наблюдается (рис. 1).

Сравнение каталогов, полученных эволюционным методом (А и S), со стохастическим R-каталогом позволяет оценить типичность полученных результатов. Сравнение с результатами анализа О-каталога позволяет сделать некоторые заключения о действительном распределении галактик в каталоге [2]. В настоящей работе мы ограничимся изучением некоторых статистических свойств геометрической картины ячеистой структуры на разных уровнях плотности.

2. Методы обработки каталогов. Задача анализа каталога разбивается на следующие основные этапы: 1) Проведение линий уровня плотности $\rho = \rho_c$ и выделение отдельных областей высокой плотности $\rho \geq \rho_c$. 2) Определение и статистический анализ геометрических параметров этих областей. 3) Проверка каталога на устойчивость. 4) Переход к модифицированному каталогу, в котором выделены области низкой плотности. 5) Определение и статистический анализ геометрических параметров областей низкой плотности. 6) Анализ серии сечений каталога прямыми. 7) Проверка каталога на степень организованности (с использованием критерия Гельфанда—Цетлина [19]).

Области высокой плотности легко выделяются при $\rho_c \gg \bar{\rho}$ ($\bar{\rho}$ — средняя плотность по каталогу), тогда как области низкой плотности хорошо определяются при $\rho_c \leq \bar{\rho}$. Однако выделение и анализ областей низкой плотности возможны и интересны и при $\rho_c \gg \bar{\rho}$. В этом случае, как правило, есть одна многосвязная область низкой плотности весьма причудливой формы, причем визуально довольно легко выделить отдельные (одно-связные) подобласти существенно более простой формы. Описанный в [20] алгоритм модифицирует исходный каталог, выделяя из исходной области низкой плотности несколько более простых, причем неплохо имитирует при этом визуальное восприятие человека.

I. Решение первой задачи сводится к сравнению плотности в каждой клетке каталога с критическим значением ρ_c , после чего клетка считается пустой при $\rho < \rho_c$ и заполненной при $\rho \geq \rho_c$. Вслед за этим все заполненные клетки объединяются в плотные области, каждая из которых содержит лишь касающиеся друг друга заполненные клетки (допускается касание двух клеток стороной или углом). В дальнейшем плотность пустых клеток считается равной нулю, а заполненных — единице. Тем самым при анализе геометрических свойств мы отвлекаемся от распределения плотности внутри области. Подсчитывается коэффициент η — степень заполнения каталога на данном уровне $\rho = \rho_c$, определяемый как доля заполненных клеток. Зависимость $\eta = \eta(\rho_c)$ — существенная характеристика каталога. Сравнение различных каталогов проводится либо при одинаковом значении η , либо при одинаковом значении ρ_c .

II. Анализ геометрических параметров отдельной области (если ее площадь превышает 3 клетки) включает определение следующих величин: 1) площадь области S^+ , 2) длина области L^+ , определяемая расстоянием по прямой между наиболее удаленными клетками области, 3) криволинейная «длина» области \bar{L}^+ , подсчитанная лишь по клеткам области (при этом не учитывается различие стороны и диагонали отдельной клетки), 4) толщина области T^+ , определяемая максимальным диаметром вписанной в область окружности (при этом также не учитывается различие стороны и диагонали отдельной клетки), 5) четырьмя методами определяется степень сплюснутости области: а) для каждой области строится тензор $Q_{ik} = \sum (x_i - \bar{x}_i)(x_k - \bar{x}_k)$ и определяется отношение главных значений этого тензора $Q_1 \leq Q_2$; $\alpha^+ = Q_1/Q_2 \leq 1$; б) для каждой области строится накрывающий прямоугольник наименьшей площади и определяется отношение его сторон $\beta \leq 1$, в) определяется величина $\Delta^+ = T^+/L^+ \leq 1$; д) определяется величина $\Sigma^+ = S^+/L^{+2}$. Эти методы

дают несколько различающиеся оценки степени сплюснутости, но, в общем, согласуются между собой (рис. 2).

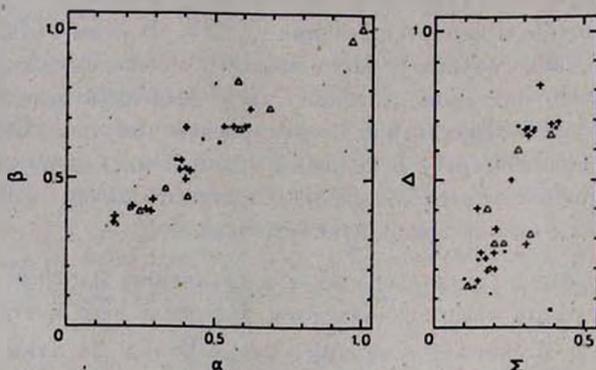


Рис. 2. Связь параметров α^+ , β^+ , Δ^+ и Σ^+ для R, A, S-каталогов (A-каталог —, R-каталог +, S-каталог Δ).

III. Проверка устойчивости каталога может быть выполнена сравнением исходного с «дополненным», который может быть построен двумя путями: либо 1) значение плотности в каждой клетке заменяется на плавное гауссово распределение на площади 3×3 клетки [21], либо, более грубо, 2) объединением заполненных областей, расстояние между которыми не превосходит 1 клетки, после чего проводится переопределение областей и анализ их геометрических параметров согласно II.

IV. Осуществляется переход к «модифицированному» каталогу, в котором заполненные области объединены по определенным правилам и тем самым выделяются отдельные пустые области. При модификации каталога используются максимальные кривизны границы плотных областей, определяемые взаимным расположением проверяемой и соседних с ней заполненных клеток [20].

Модификация каталога проводится в 4 приема:

А) Точки максимальной кривизны, принадлежащие различным областям и отстоящие одна от другой на расстояние $d=1, 2, \dots, k$ клеток, последовательно соединяются «прямыми» (по дискретной сетке) из плотных клеток. После соединения двух областей они объединяются в одну общую. Максимальная длина соединения k является свободным параметром задачи. Оптимальное значение k близко к среднему значению размера \bar{L}^+ плотной области.

Б) Последовательно соединяются «прямыми» из плотных клеток (по дискретной сетке) точки максимальной кривизны, принадлежащие одной

«области и отстоящие на расстояние $d = 1, 2, \dots, k$ клеток при дополнительном условии, что криволинейное расстояние между точками максимальной кривизны L^+ , определенное по клеткам, принадлежащим области, превосходит расстояние d не менее, чем в f раз (f — свободный параметр задачи; обычно принималось $f = 3 + 4$).

В) Области, отстоящие от края каталога не более, чем на 2 клетки, соединяются с краем горизонтальными (вертикальными) прямыми.

Г) Пустым клеткам присваивается плотность 1, заполненным — 0. Все заполненные клетки объединяются в области, однако в этом случае учитывается лишь касание клеток сторонами (но не углами!).

V. Проводится анализ модифицированного каталога в соответствии с пунктом II.

VI. На каталоге с выделенными плотными областями проводится серия случайных прямых (на дискретной сетке). Подсчитывается толщина плотных D^+ и пустых D^- областей вдоль этих прямых.

VII. Проводится анализ каталога методом, описанным в работе [19] с использованием критерия организованности Гельфанда—Цетлина, который в данном случае реализован в следующем виде:

а) последовательно производится расширение плотных областей на 1 слой примыкающих клеток. На каждом шаге подсчитываем число плотных N^+ и пустых N^- областей.

б) Строится зависимость числа областей N^+ и N^- от номера шага. Резкий спад кривой $N^+(n)$, или максимум на кривой $N^-(n)$ указывают на существование характерного масштаба в исходном каталоге. Этот масштаб определяет типичное расстояние между плотными областями. Описанные методы во многом близки к изложенным в [18].

3. *Результаты анализа каталогов.* Некоторые результаты обработки четырех описанных выше каталогов приведены в табл. 1. Наряду с величинами, характеризующими рассматриваемую картину в целом, приведены средние значения и среднеквадратичные отклонения параметров, характеризующих плотные и пустые области. Используются следующие обозначения:

η — суммарная площадь плотных областей на заданном уровне плотности, отнесенная к общей плотности площади каталога.

μ^+ — доля массы, заключенная в плотных областях.

	R-каталог		A-каталог	
		дополненный		дополненный
η	0.138	0.195	0.141	0.155
μ^+	—	—	0.54	—
N^+	99	23	41	23
ν_4^+	0.15	0.39	0.34	0.49 ²
$S^+ \cdot 10^3$	3.8 \pm 1	20 \pm 20	7.4 \pm 4.9	-14 \pm 10
$L^+ \cdot 10$	1.5 \pm 0.3	3.6 \pm 2.8	2 \pm 1	2.7 \pm 1.2
$T^+ \cdot 10$	0.4 \pm 0.14	0.5 \pm 0.11	0.5 \pm 0.1	0.5 \pm 0
$D^+ \cdot 10$	0.4 \pm 0.3	—	0.5 \pm 0.22	—
α^+	0.38 \pm 0.15	0.5 \pm 0.2	0.35 \pm 0.18	0.46 \pm 0.16
β^+	0.52 \pm 0.12	0.65 \pm 0.22	0.51 \pm 0.2	0.62 \pm 0.25
Δ^+	0.41 \pm 0.2	0.2 \pm 0.12	0.4 \pm 0.2	0.29 \pm 0.2
Σ^+	0.24 \pm 0.08	0.17 \pm 0.07	0.22 \pm 0.09	0.19 \pm 0.09
N^-	61	—	31	—
$S^- \cdot 10^4$	1.48 \pm 1.11	—	2.4 \pm 1.7	—
$L^- \cdot 10$	1.9 \pm 0.85	—	2.4 \pm 0.8	—
$T^- \cdot 10$	0.92 \pm 0.33	—	1.3 \pm 0.8	—
$D^- \cdot 10$	1.5 \pm 0.8	—	2.2 \pm 1.6	—
α^-	0.62 \pm 0.14	—	0.66 \pm 0.15	—
β^-	0.7 \pm 0.15	—	0.75 \pm 0.16	—
Δ^-	0.6 \pm 0.14	—	0.65 \pm 0.11	—
Σ^-	0.37 \pm 0.07	—	0.4 \pm 0.05	—
$l_{GC}^+ \cdot 10$	0.5	—	1.1	—
$l_{GC}^- \cdot 10$	0.5	—	0.5	—

S-каталог		O-каталог	
	дополненный		дополненный
0.133	0.143	0.15	0.19
0.84	—	0.26	—
28	15	122	30
0.5	0.535	0.2	0.43
8.2 ± 6.9	16.6 ± 15	9.8 ± 3	14.5 ± 33
1.7 ± 1	2.5 ± 1.6	1.25 ± 0.4	2.2 ± 2.6
0.65 ± 0.17	0.72 ± 0.2	0.37 ± 0.1	0.38 ± 0.11
0.7 ± 0.4	—	0.37 ± 0.15	—
0.58 ± 0.27	0.6 ± 0.25	0.46 ± 0.2	0.52 ± 0.15
0.68 ± 0.22	0.68 ± 0.22	0.59 ± 0.18	0.62 ± 0.11
0.6 ± 0.25	0.46 ± 0.26	0.37 ± 0.16	0.27 ± 0.11
0.33 ± 0.12	0.27 ± 0.12	0.24 ± 0.07	0.2 ± 0.04
15	—	67	—
5.3 ± 7.7	—	1.06 ± 1.08	—
3.2 ± 2.0	—	1.5 ± 0.64	—
1.6 ± 0.9	—	0.8 ± 0.37	—
2.7 ± 2	—	1.4 ± 1.2	—
0.63 ± 0.12	—	0.62 ± 0.16	—
0.72 ± 0.16	—	0.73 ± 0.17	—
0.61 ± 0.14	—	0.61 ± 0.12	—
0.38 ± 0.4	—	0.38 ± 0.07	—
1.1	—	0.4	—
1.1.	—	0.4	—

N^+ — полное число плотных областей в каталоге.

η_4^+ — доля плотных областей с площадью не менее 4-х ячеек. Только по таким областям определяются остальные включенные в таблицу параметры*.

S^+ — средняя площадь плотных областей, содержащих не менее 4-х ячеек, отнесенная к полной площади каталога.

L^+ — средняя длина плотных областей, отнесенная к размеру каталога.

T^+ — средняя толщина плотных областей, определяемая как максимальный диаметр вписанной окружности, отнесенная к размеру каталога.

D^+ — средний размер плотной области вдоль случайных прямых, отнесенный к размеру каталога.

α^+ — средняя сплюснутость плотных областей, определяемая отношением главных значений тензора квадрупольного момента.

β^+ — средняя сплюснутость плотных областей, определяемая отношением сторон накрывающего фигуру прямоугольника минимальной площади.

Δ^+ — средняя сплюснутость плотных областей, определяемая отношением T^+/L^+ .

Σ^+ — средняя сплюснутость плотных областей, определяемая отношением S^+/L^{+2} .

N_4^- — количество пустых ячеек с площадью $S^- \geq 4$ ячеек.

— Следующие 8 параметров совпадают с вышеперечисленными, но характеризуют пустые** (а не плотные) области.

i_{GC}^2 — характерные размеры каталога, определяемые с использованием критерия Гельфанда—Цетлина.

Сравнение каталогов (если речь не идет об анализе эволюции одной модели) следует проводить при одинаковом значении параметра η , поскольку этот параметр непосредственно связан с геометрической структурой и его изменение наиболее сильно влияет на всю картину. Это условие выполнено при составлении табл. 1.

Представленные в табл. 1 и на рис. 1 три модельных каталога весьма разнородны. Как уже отмечалось, А-каталог — пример хорошо развитой

* Все исследуемые каталоги выполнены в виде таблицы плотности частиц на дискретной сетке. Говорить о геометрической структуре области, выделяемой на дискретной сетке, можно лишь для области достаточно большой площади. Выбранная нами (условная) граница в 4 клетки представляется довольно удачной.

** «Пустыми» областями называются области, обладающие плотностью ниже выделенного уровня (см. выше).

ячейстой структуры, S-каталог — пример почти полного разрушения ячейстой структуры при образовании нескольких компактных плотных слабовытянутых областей, R-каталог иллюстрирует влияние и характеристики случайного фона. Сравнение O-каталога с этими тремя модельными каталогами, а также модельных каталогов между собой, позволяет оценить степень проявления ячейстой структуры и степень влияния фактора случайности в O-каталоге.

1. Прежде всего отметим, что A, S и R-каталоги резко различаются по величине χ^2 (и N^+). Для R-каталога типично большое количество областей малой площади, что хорошо согласуется с методом получения каталога. R-каталог (по тем же причинам) весьма неустойчив — содержит много областей, разделенных всего лишь одной пустой клеткой. В результате заполнения этой ячейки — переход к «дополненному» каталогу — как видно из табл. 1, резко уменьшается N^+ , резко возрастает χ^2 и «дополненный» R-каталог не отличается, в принципе, от A-каталога. Напротив, A-каталог и особенно S-каталог более устойчивы и их параметры изменяются заметно слабее при переходе к «дополненному» каталогу.

2. Некоторое различие величин S^+ , L^+ , T^+ и D^+ , характеризующих размеры плотных областей, для каталогов A, S и R очень эффективно сглаживается при переходе к «дополненным» каталогам. Для этих величин характерны большие значения среднеквадратичных уклонений, что связано не с малой выборкой при расчете этих величин, а характеризует реальную (большую) ширину функции распределения этих величин. Этот вывод весьма важен, т. к. показывает, что для надежных оценок этих параметров по наблюдениям требуется изучение очень большой выборки.

3. Параметры α^+ , β^+ , Δ^+ и Σ^+ характеризуют несколько различными способами сплюснутость плотных областей. Из определения этих параметров ясно, что они близки для слабо искривленных компактных областей. Напротив, в случае сильно искривленных областей по смыслу близки параметры α^+ и β^+ , характеризующие скорее общую сглаженную форму области, тогда как параметры Δ^+ и Σ^+ более тесно связаны с тонкой структурой плотных областей. Эти различия хорошо проявляются при переходе к «дополненным» каталогам: при этом согласно α^+ и β^+ , сплюснутость плотных областей уменьшается, а согласно Δ^+ и Σ^+ — увеличивается. Этот эффект связан с резким возрастанием наряду с длиной L^+ искривленности и запутанности плотных областей в «дополненном» каталоге. Связь параметров α^+ , β^+ , Δ^+ и Σ^+ иллюстрируется рис. 2.

Сравнение A, S и R-каталогов по средней сплюснутости показывает, что по этим параметрам каталоги A и R весьма близки как до, так и после

«дополнения», тогда как S-каталог отличается от них достаточно сильно. Плотные области S-каталога заметно менее сплюснуты и, как показывает сравнение с соответствующими параметрами пустых областей, средние значения α^+ , β^+ , Δ^+ и Σ^+ для S-каталога близки к типичным для случайной выборки, т. е. для областей, не обладающих вытянутостью, отличной от случайной. Поскольку максимальные значения этих параметров (по определению) равны 1, то средние их значения по случайной выборке будут несколько меньше 1. Для оценки этого среднего удобно использовать оценку средней сплюснутости пустых областей, которая весьма стабильна и не зависит ни от типа каталога, ни от степени заполнения каталога η .

4. Выделение пустых областей с помощью описанного выше алгоритма — довольно сложная и многоступенчатая процедура. Однако сравнение полученных с ее помощью результатов с визуальным определением ячеистой структуры демонстрирует неплохое согласие этих методов. Специально изучалась устойчивость полученных результатов как к небольшим изменениям процедуры выделения пустых ячеек, так и к случайной порче исходной структуры. Показано, что изменения статистических характеристик пустых областей незначительны, получаемые параметры устойчивы и отражают объективные характеристики распределения плотности. О том же говорит близость характеристик T^- , L^- , D^- и b_{CC} , две из которых связаны с процедурой выделения пустых областей.

Для A и R каталогов наблюдается четко выраженная ячеистая структура, несколько различающаяся по параметрам S^- , L^- и D^- . Для S-каталога типично образование одной «очень большой пустой» области, что сразу сильно искажает S^- и L^- параметры. Отметим, что для всех трех каталогов велики среднеквадратичные отклонения величин S^- , L^- и D^- , что, как и выше, свидетельствует об очень широкой функции распределения этих величин. Интересно, что для всех трех модельных каталогов близки значения α^- , β^- , Δ^- и Σ^- .

Сравнение O-каталога с модельными каталогами демонстрирует близость O и R-каталогов и, тем самым, сильный элемент случайности в распределении галактик в O-каталоге. Это особенно ярко заметно по параметрам η^+ и S^+ . Наиболее сильно O-каталог отличается от S-каталога: в O-каталоге не наблюдается компактных, массивных, слабо вытянутых областей.

Разработанные критерии анализа плотных областей ориентированы на чисто геометрические задачи и не учитывают распределение плотности внутри плотных областей и распределение этих областей по массе. Вероятно, учет этих факторов наряду с используемыми критериями будет интересен.

4. *Обсуждение.* Проведенный анализ позволил получить важные качественные и количественные результаты. Обсудим наиболее интересные из них:

1) Один из наиболее неожиданных качественных результатов — появление вытянутых плотных конфигураций и больших пустых областей при всех рассмотренных выше методах моделирования каталога. Вероятно, это естественный результат, поскольку в двумерных задачах (и тем более в трехмерных) одномерные вытянутые конфигурации всегда более вероятны, чем конфигурации компактные. Гладкость начальных возмущений, закладываемая в теорию «блинов», ведет к появлению более длинных плотных областей и более обширных пустых областей, но это — лишь количественные различия. Вероятно, в любых теориях образования галактик в той или иной степени можно ожидать возникновения ячеистой структуры и обширных областей низкой плотности (некоторые различия будут лишь в структуре плотных областей).

2) Как показывает изучение модельных каталогов при $\eta \geq 0,1$ описанный в [20] алгоритм, добавляя около 10% от полной площади каталога к площади заполненных областей, выделяет четко определенные пустые ячейки. Однако такие важные параметры пустых ячеек, как их площадь S^- или размер D^- , очень сильно зависят от параметра η . Этот вывод может быть обоснован теоретически для некоторых моделей. Здесь мы лишь отметим, что эта зависимость может быть приближенно описана соотношением:

$$S^- \sim (1 - \eta)/\eta; \quad D^- \sim \eta^{-1}.$$

3) Приведенные в табл. 1 данные о размерах, пустых областей О-каталога близки к $L = 8h^{-1}$ Мпс, $T = 4h^{-1}$ Мпс, если принять глубину обзора порядка $800 h^{-1}$ Мпс, что соответствует размеру каталога около $50 h^{-1}$ Мпс. Эти величины сильно отличаются от типичных [3—10] параметров пустых ячеек, полученных при анализе трехмерной картины. Вероятно, это связано с очень сильным влиянием эффекта проекции, ведущего к проявлению мощного фона случайно распределенных частиц.

Появление сильного случайного фона в каталогах, полученных при очень глубоких обзорах, существенно снижает ценность таких каталогов с точки зрения анализа крупномасштабной структуры Вселенной.

A GEOMETRIC ANALYSIS OF CATALOGUES OF GALAXIES

SH. A. GUBERMAN, A. G. DOROSHKEVICH, E. V. KOTOK, S. F. SHANDARIN

A method of analysis of galaxy count catalogues is proposed. The method is based on the procedure that select regions of high density $\rho > \rho_c$ (ρ_c is a parameter and may be chosen at a different magnitude) and then statistical analysis of their geometrical properties made. The algorithm of selection and analysis is described. Three model catalogues as well as an observational one are studied (Fig. 1): R-catalogue was pure stochastic; A-catalogue was produced by making counts of points at "pancake" stage in a 2D numerical simulation [1]; S-catalogue was produced quite similarly but at a stage, when "pancake" structure had disintegrated; and O-catalogue represents a real distribution of galaxies down to 22 magnitude near the South Galactic Pole [2]. The comparative analysis of geometrical properties of dense and empty regions in these catalogues is shown: 1) Elongated regions of high density are typical for all catalogues and this is weakly connected with the method of constructing catalogues. 2) The mean area of empty regions and their length D are determined by the method of random straight lines which strongly depend on the total area of dense regions γ .

ЛИТЕРАТУРА

1. A. G. Doroshkevich, E. V. Kotok, I. D. Novikov, A. N. Polyudov, S. F. Shandarin, Yu. S. Stgov, M. N. RAS, 192, 321, 1980.
2. H. T. Mac Gillivray, R. S. Dodd, M. N. RAS, 193, 1, 1980.
3. M. Joeveer, J. Einasto, E. Tago, M. N. RAS, 185, 357, 1978.
4. J. Einasto, M. Joeveer, E. Saar, M. N. RAS, 193, 353, 1980.
5. S. A. Gregory, L. A. Thompson, Ap. J., 217, 385, 1978.
6. G. Chincarini, H. J. Rood, Ap. J., 230, 648, 1979.
7. W. G. Tifft, S. A. Gregory, Ap. J., 231, 23, 1979.
8. M. Taronchi, W. G. Tifft, G. Chincarini, H. J. Rood, L. A. Thompson, Ap. J., 234, 793, 1979.
9. R. P. Kirchner, A. Oemler, P. L. Schechter, S. A. Shectman, Ap. J. Lett., 248, L57, 1981.
10. R. B. Tully, Ap. J., 257, 389, 1982.
11. Я. Б. Зельдович, *Астрофизика*, 6, 319, 1970.
12. Я. Б. Зельдович, Крупномасштабная структура Вселенной, ред. М. Лонгейр, Я. Эйнштейн, Мир, М., 1981.
13. H. Totulij, T. Kihara, P. A. S. Japan, 21, 221, 1969.
14. P. J. E. Peebles, *The Large Scale Structure of the Universe*, Princeton; Princeton University Press, 1980.
15. M. Fall, *Rev. Mod. Phys.*, 51, 21, 1979.
16. T. Shanks, M. N. RAS, 186, 583, 1979.

17. *M. Seldner, B. Sisbers, F. J. Groth, P. J. E. Peebles*, *Ap. J.*, 82, 249, 1977.
18. *A. Rosenfeld, J. S. Weszka*, *Communication and Cybernetics 10 „Digital Pattern Recognition“*, ed. K. S. Fu, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New-York, 1976, p. 135.
19. Ш. А. Губерман, Н. И. Овчинников, *Нефтепромысловая геофизика*, вып. 5, Уфа, 1975, стр. 48.
20. Ш. А. Губерман, А. Г. Дорошкевич, Э. В. Коток, С. Ф. Шандарин, *Препринт ИПМ АН СССР*, № 42, 1981.
21. А. Г. Дорошкевич, Э. В. Коток, Ю. С. Ситов, С. Ф. Шандарин, *Препринт ИПМ АН СССР*, № 68, 1981.