

УДК: 524.7—8

ФЛУКТУАЦИИ ОРИЕНТАЦИЙ ДИСКОВ ГАЛАКТИК

Б. И. ФЕСЕНКО

Поступила 20 апреля 1989

Принята к печати 28 августа 1989

Изучены флуктуации в распределениях позиционных углов и классов наклона дисков многих тысяч галактик. Преимущество предложенного метода анализа флуктуаций состоит в возможности его применения к небольшим группам галактик без их предварительного выделения. Кроме того, оразу охватывается большой массив данных. Флуктуации в распределении позиционных углов галактик с угловыми диаметрами не меньшими $1'$ в площадках от 18 до 648 \square° соответствуют модели, в которой позиционные углы соседних на небе галактик не коррелированы. Вывод об отсутствии корреляций получен и при анализе флуктуаций в распределениях классов наклонов галактик.

1. *Введение.* Ориентация диска галактики относительно наблюдателя характеризуется позиционным углом θ (от 0 до 180°) большой оси изображения (отсчитывается от северного направления круга склонения); видимой сферичностью $e = b/a$, где a и b — большая и малая полуоси изображения; направлением закручивания спиралей (S или Z), а также особенностью кривой вращения. Данные о величинах θ для многих тысяч галактик с угловым диаметром $a \geq 1'$ приводятся для области $\delta > -2^\circ$ в каталоге [1]. Также для многих тысяч галактик в каталоге [2] приводятся данные о классах наклона i дисков к лучу зрения. Величина i имеет обозначение V для галактик, наблюдаемых с ребра, и I — для галактик, близких к положению плашмя относительно наблюдателя. Промежуточные классы обозначаются II, III и IV. Присваивая галактике некоторое значение i , авторы каталога [2] руководствовались не только отношением b/a , но и учитывали другие особенности изображения. Очевидно, для галактик типа E класс наклона этим методом не определяется. Согласно [3] границы интервалов угла ω между лучом зрения наблюдателя и осью вращения галактики для классов I, II, III, IV и V таковы: 0; 40.0; 59.2; 73.8; 80.3 и 90° (галактики с угловым диаметром, не меньшим $2'$).

Данные об ориентациях дисков галактик обсуждались неоднократно. Ставились следующие задачи.

1. Переход от распределения видимых сферичностей к распределению истинных сферичностей, не искаженных эффектом проекции. Для решения этой задачи обычно применяют численные методы. В работе [4] приведены соотношения между моментами четного порядка истинных и видимых сферичностей. Распределение направлений осей вращения галактик считается изотропным. В работе [5] изучены различные селекционные эффекты, затрудняющие решение этой задачи. К сожалению, большинство их игнорировалось в последующих исследованиях (см., например, [6]).

2. Поиск направлений преимущественной ориентации галактик в больших областях неба. Согласно [7], неоднократно обсуждавшаяся тенденция дисков галактик к параллельности относительно плоскости экватора Местного сверхскопления не обнаруживается. Исследование [8] позиционных углов 5559 галактик в трех областях неба также не привело к обнаружению существенной анизотропии. В [9] обращено внимание на дефицит позиционных углов галактик каталога [1] в интервале от 60 до 120° . Однако в [10] это явление объяснено зависимостью ошибки определения величины b/a от позиционного угла. Впрочем, необходимо независимое подтверждение этого объяснения.

3. Поиск корреляций между ориентациями дисков галактик в парах, группах и скоплениях. Математически проблему изучил Т. А. Агекян [11]. В значительно более общем виде задача рассмотрена в [12]. В этих работах исследованы теоретические кривые регрессии дисперсии лучевых скоростей по наклонам дисков галактик при различных предположениях относительно взаимных ориентаций дисков и плоскостей орбит галактик. Необходимым условием применимости этих формул к наблюдениям является наличие обширных данных о лучевых скоростях и наклонах членов групп и скоплений галактик. Анализ наблюдательных данных в [12] привел к обнаружению очень слабых корреляций, но их достоверность требует подтверждения на более богатом материале.

4. При решении предыдущей задачи требуется большая предварительная работа по выделению взаимно связанных галактик из общего галактического поля. За бортом остаются многочисленные объекты, так и не приписанные к тем или иным контрастно выделяющимся группам. Однако существует «слепой» метод поиска корреляций в положениях дисков соседних галактик. Для его применения не требуется устанавливать членство галактик в парах, группах и скоплениях.

«Слепой» метод, по-видимому, впервые применен в [13] к распределению позиционных углов галактик в небольших площадках неба. Флуктуации этих распределений сравнивались с ожидаемыми в случае отсутствия каких-либо корреляций. Ниже видоизмененный метод работы [13] приме-

няется к данным о позиционных углах и классах наклона многих тысяч галактик в каталогах [1] и [2].

2. *Позиционные углы.* Рассмотрим все данные каталога [1] о позиционных углах ϑ галактик с $a \geq 1'$. Как и в [13], всю область с $\delta < 65^\circ$ разобьем кругами склонения на полосы шириною 24^m по прямому восхождению, а каждую полосу — еще на 18 равновеликих элементарных областей (ч. о.) площадью около $18 \square^\circ$ каждая. Именно в таких в. о. ранее были изучены флуктуации в распределениях углов ϑ . Использовалась формула:

$$\gamma_k = \frac{k}{k-1} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k (n_i - N/k)^2, \quad (1)$$

где k — число равных интервалов, на которые был разбит интервал от 0° до 180° , n_i — число галактик с позиционными углами в i -ом интервале ($i = 1, 2, \dots, k$) и N — число всех галактик в в. о. Недостаток формулы (1) в том, что она не учитывает возможное непостоянство вероятности p_i попадания галактики в i -тый интервал. Как показало изучение суммарного распределения позиционных углов во всех в. о., это распределение почти симметрично относительно значения $\vartheta = 90^\circ$. Поэтому при $k = 2$ можно положить $p_1 = p_2 = 1/2$ и формулу (1), как меру величины флуктуаций, можно считать справедливой. Ее в этом случае можно переписать так:

$$\gamma_2 = \frac{(n_1 - n_2)^2}{n_1 + n_2}. \quad (2)$$

При $k > 2$ будем вычислять величину:

$$\gamma_k = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - N p_i)^2}{N p_i}, \quad (3)$$

где вероятности p_i оцениваются по всей совокупности в. о. Если флуктуации соответствуют полиномиальному распределению чисел n_i , то

$$\langle \gamma_k \rangle = 1 \text{ и } \sigma^2 \{ \gamma_k \} \approx \frac{2(N-1)}{N(k-1)}, \quad (4)$$

где $\langle \quad \rangle$ — знак усреднения и σ^2 — дисперсия.

Повышенные значения $\langle \gamma_k \rangle$ свидетельствовали бы о положительной взаимной коррелированности позиционных углов хотя бы некоторых галактик, попавших в одну и ту же в. о. Если размер интервала позиционных углов (он равен $180^\circ/k$) велик в сравнении с разбросом значений ϑ в системе галактик, то величина $\langle \gamma_k \rangle$, как можно доказать, будет прибли-

зительно равна средней кратности систем галактик (выделенных в пространстве позиционных углов).

В [13] при $k = 2, 3$ и 6 среднее значение величины γ_k получилось равным 0.97 ± 0.018 . Это соответствует случаю полной взаимной независимости позиционных углов соседних на небе галактик.

Этот вывод проверим для укрупненных э. о. площадью около $72 \square^\circ$. Обработка данных каталога [1] приводит к такому результату:

$$\langle \gamma_2 \rangle = 0.98 \pm 0.094. \quad (5)$$

Отбрасывались все э. о. с $N < 4$.

Для еще более крупных э. о., площадью в $648 \square^\circ$ каждая, получено

$$\langle \gamma_2 \rangle = 1.01 \pm 0.26. \quad (6)$$

Таким образом, если и существует какой-либо эффект взаимной коррелированности ориентаций соседних галактик, он не выделяется на фоне случайных ошибок. Отдельные неслучайные выбросы значений γ_2 , возможно, тонут в «шуме». Поэтому применим еще один прием.

Рассмотрим окрестности всех э. о. (размерами $18 \square^\circ$), в которых оказалось $\gamma_2 > 5$. Всего таких случаев в нашем материале было 7. Для всех 8 смежных э. о. (в том числе и угловых) рассчитываем среднее значение γ_k . Общее усреднение привело к таким результатам:

$$\langle \gamma_2 \rangle = 1.03 \pm 0.20; \quad \langle \gamma_3 \rangle = 1.23 \pm 0.14; \quad \langle \gamma_6 \rangle = 1.14 \pm 0.09. \quad (7)$$

Таким образом, «болезнь» центральных э. о., выражающаяся в повышенных значениях γ_2 , оказывается незаразительной для соседних э. о.

Тот же прием в применении к четырем укрупненным э. о. (площадью $72 \square^\circ$), в которых оказалось $\gamma_2 > 5$, дает

$$\langle \gamma_2 \rangle = 1.21 \pm 0.29; \quad \langle \gamma_3 \rangle = 1.18 \pm 0.20 \quad \text{и} \quad \langle \gamma_6 \rangle = 1.01 \pm 0.13. \quad (8)$$

И здесь свойство заразительности не выделяется на фоне ошибок. Среднее весовое из шести значений (7) и (8) таково: $\langle \gamma_k \rangle = 1.13 \pm 0.058$. Отклонение от единицы чуть больше двух стандартов. Однако ошибка последнего результата несколько занижена, так как при ее вычислении предполагалась взаимная независимость чисел $\langle \gamma_k \rangle$.

Выше рассматривались все э. о., независимо от того, попали туда группы галактик или нет. Особый интерес вызывают э. о. с повышенными числами галактик. Применим следующий тест. В каждой из 60 полос шириной 24^m (см. выше) выделяем э. о. с наибольшим числом галактик n , если оно оказывается больше 9, вычисляем величину γ_2 . Усреднение по всему материалу дало:

$$\langle \gamma_2 \rangle = 0.98 \pm 0.21.$$

3. *Классы наклона.* Для анализа флуктуаций распределений классов наклона галактик с $a \geq 1'$ в полях каталога [2] применим формулу (3) при $k = 5$. В этом случае величины, входящие в формулу (3), имеют следующий смысл: n_i — число галактик поля $6^\circ \times 6^\circ$, которым присвоен класс наклона i (I, II, ..., V), N — число всех галактик с известным классом наклона и p_i — вероятность встретить класс наклона i , оцениваемая по данным для всей совокупности полей данного тома каталога. Рассматриваются лишь поля, в которых $N \geq 15$. Результаты даны в табл. 1. При отсутствии связей между наклонами соседних галактик значения величин $\langle \gamma_5 \rangle$ и $\sigma^2 \{ \gamma_5 \}$ должны составлять 1.00 и приблизительно 0.5. Средние ошибки, приведенные в табл. 1, соответствуют случаю $\langle \gamma_5 \rangle = 1$. Галактики со склонениями $\delta > 45^\circ$, вошедшие в первый том [2], флуктуируют по наклонам явно сильнее, чем ожидается при отсутствии корреляций. Возможно, этот результат объясняется тем, что нами игнорировались изменения вероятностей p_i от поля к полю. Такие изменения могут быть вызваны неустойчивостью критерия присвоения галактикам классов наклона, характерной именно для этого тома, составлявшегося первым. Если эти данные исключить, то усреднение по остальным томам дает $\langle \gamma_5 \rangle = 1.12 \pm 0.053$.

Таблица 1

| Том | Число полей | $\langle \gamma_5 \rangle$ | $\sigma^2 \{ \gamma_5 \}$ |
|-----|-------------|----------------------------|---------------------------|
| I | 44 | 1.46 ± 0.11 | 1.29 |
| II | 77 | 1.19 0.08 | 0.68 |
| III | 60 | 1.10 0.09 | 0.36 |
| IV | 39 | 1.01 0.11 | 0.11 |

В табл. 2 аналогичные данные приводятся для всех полей с $N > 2$. Среднее весовое для томов II—IV таково: $\langle \gamma_5 \rangle = 1.032 \pm 0.026$. Заметим, что с уменьшением величины N должен уменьшаться и эффект изменчивости вероятностей p_i от поля к полю. Поэтому данные табл. 2 меньше подвержены указанному эффекту, чем данные табл. 1. Флуктуации в распределении классов наклона почти точно соответствуют тем, которые ожидаются при взаимной независимости наклонов галактик.

4. *Обсуждение.* Для истолкования полученных результатов рассмотрим следующую модель видимого распределения галактик. В [14] анализ видимого распределения галактик по данным лижских подсчетов позволил вывести приближенное выражение для функции $\varphi(s)$, дающей вероятность принадлежности произвольной галактики с $m < \bar{m}$ (то есть в выборке по блеску) к системе (группе, скоплению) с числом видимых членов (то есть с $m < \bar{m}$), равным s :

$$\varphi(s) = 0.61/s^2, \quad s = 1, 2, \dots, 165. \tag{9}$$

Отсюда видно, что одиночные галактики (являющиеся, как правило, «верхушками» далеких групп и скоплений) составляют большинство (61%). Остальные 39% галактик входят, в основном, в группы со средней видимой населенностью 3.2. Если предположить, что ориентации осей вращения главных членов соседних групп и скоплений не связаны взаимно, остается изучить эффект этих 39% галактик.

Таблица 2

| Групп | Число полей | $\langle \gamma_2 \rangle$ | $\sigma^2 (\gamma_2)$ |
|-------|-------------|----------------------------|-----------------------|
| I | 135 | 1.26 ± 0.078 | 0.83 |
| II | 222 | 1.08 0.048 | 0.51 |
| III | 189 | 1.02 0.046 | 0.39 |
| IV | 176 | 1.01 0.044 | 0.35 |

В [14] изучались числа галактик ярче 18.7^m в э. о. размерами $1^\circ \times 1^\circ$, а в нашем материале рассмотрены, в основном, галактики ярче $14.5-15^m$ при минимальных размерах э. о. от $4.2^\circ \times 4.2^\circ$ до $6^\circ \times 6^\circ$ (в каталогах [1] и [2] соответственно). Эффект разрезания групп границами э. о. здесь не выше, чем в случае ликских подсчетов, поскольку различие размеров э. о. почти точно скомпенсировано различием в пространственной глубине выборок. Поэтому выражение (9) применимо и к нашему материалу. При переходе к укрупненным э. о. (при изучении позиционных углов) выражение (9) занижает значения $\varphi(s)$ при больших s .

Для существенного упрощения дальнейшего анализа примем, что в состав видимых групп ($s \geq 2$) входит не 39% галактик выборки, а 50%; зато средняя видимая населенность этих групп составляет не 3.2, а 2. Рассмотрим случай позиционных углов и получим теоретическое выражение для величины $\langle \gamma_2 \rangle$ (см. (2)), предположив, что в каждой паре галактик модуль разности позиционных углов ψ имеет плотность вероятности:

$$\varphi(\psi) = \frac{2}{\alpha} \left(1 - \frac{\psi}{\alpha} \right), \quad \psi \leq \alpha, \quad (10)$$

где α — постоянная. Наша цель состоит в поиске тех значений α , которые совместимы с наблюдаемыми флуктуациями чисел n_1 и n_2 в (2). С учетом того, что некоторая пара галактик, попавшая в э. о., может попасть в интервал $\theta \leq 90^\circ$ либо сразу двумя компонентами, либо только одним компонентом, либо вовсе не попасть в этот интервал, получаем выражение:

$$\langle \gamma_2 \rangle = 1 + 2\epsilon \left(2p_2 - \frac{1}{2} \right), \quad (11)$$

где $\xi = 2N_2/N$ — доля галактик в парах среди всех галактик (у нас $\xi = 0.5$) и

$$p_2 = \frac{1}{2} \int_0^{90} \left(1 - \frac{\psi}{90}\right) \varphi(\psi) d\psi. \quad (12)$$

С учетом (10), приходим к равенству:

$$\langle \gamma_2 \rangle = 1 + \xi \left(1 - \frac{2\alpha}{270}\right). \quad (13)$$

Полагая при $\xi = 0.5$ последовательно $\alpha = 30, 60, 90$ и 120° , вычисляем соответствующие значения $\langle \gamma_2 \rangle = 1.39; 1.28; 1.17$ и 1.056 .

В [13] для э. о. площадью $18 \square^\circ$ было получено:

$$\langle \gamma_2 \rangle = 0.960 \pm 0.0464,$$

что по правилу «трех сигм» позволяет отвергнуть случаи $\langle \gamma^2 \rangle \geq 1.10$ или $\alpha \leq 108^\circ$. В случае э. о. площадью в $72 \square^\circ$ при охвате более широких пар результат (5) позволяет отвергнуть случаи $\alpha \leq 90^\circ$ лишь по правилу «двух сигм».

Общий вывод: данные о флуктуациях в распределениях позиционных углов совместимы с предположением об отсутствии корреляций в ориентациях галактик. Однако чувствительность предложенного метода такова, что в случае справедливости закона (10) данные наблюдений позволяют уверенно отвергнуть лишь значения $\alpha \leq 108^\circ$ (для э. о. площадью $18 \square^\circ$) и $\alpha \leq 90^\circ$ (для э. о. площадью в $72 \square^\circ$).

Из анализа флуктуаций классов наклона галактик можно сделать два вывода. Во-первых, критерий присвоения галактике того или иного класса наклона в первом томе каталога [2] более неоднородны (изменчивы), чем в других томах, и игнорирование этого обстоятельства могло бы привести к обнаружению фиктивных корреляций в ориентациях соседних на небе галактик. Во-вторых, значение величины $\langle \gamma_5 \rangle$, полученное для всех полей с $N > 2$, когда исключены данные первого тома [2], совместимо с предположением о полном отсутствии указанных выше корреляций. Однако, учитывая, что в среднем ширина каждого из пяти интервалов наклона составляет всего $18 \square^\circ$ и используя подход, аналогичный примененному только что в случае позиционных углов, можно утверждать лишь, что отсутствует жесткая корреляция, когда типичная разность углов наклона в парах меньше 10° .

Уже упоминалось, что около 60% галактик изученных здесь выборок — это кажущиеся одиночные галактики (а на самом деле среди них много «верхушек» далеких групп и скоплений). Если бы существовала крупномасштабная анизотропия в распределении направлений осей вращения га-

ластик, то это немедленно отразилось бы и на значениях γ_k . Оценим эффект крупномасштабной анизотропии для классов наклона в [2]. В (3) входит величина, полученная путем усреднения данных по всем полям данного тома каталога [2]. Если \tilde{p}_i — значение вероятности для конкретного поля и $\Delta p_i = \tilde{p}_i - p_i$, то

$$\gamma_k = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - N\tilde{p}_i)^2}{N\tilde{p}_i} \frac{\tilde{p}_i}{p_i} + \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \frac{N(\Delta p_i)^2}{p_i}. \quad (14)$$

Первый член здесь в среднем равен единице, если отсутствуют корреляции между наклонами в пределах группы или скопления. Второй член характеризует эффект крупномасштабной анизотропии, выражающийся в постепенных изменениях величины Δp_i от области к области. Предположим, что среднее значение величины $(\Delta p_i / p_i)^2$ не зависит от i . Отбросив этот значок, получим

$$\langle \gamma_k \rangle = 1 + \frac{k}{k-1} \langle Np_i \rangle \left\langle \left(\frac{\Delta p}{p} \right)^2 \right\rangle. \quad (15)$$

В нашем материале $k = 5$, $\langle Np_i \rangle \approx 5$ и $\langle \gamma_5 \rangle = 1.032 \pm 0.026$. Применяя правило „трех сигм“, приходим к оценке: $|\Delta p/p| < 0.13$.

При тех же предположениях данные о позиционных углах (при $k=2$, площади в. о., равной $72 \square^\circ$, $\langle Np_i \rangle = 13.1$ и $\langle \gamma_2 \rangle = 0.98 \pm 0.094$) приводят к оценке: $|\Delta p/p| < 0.10$.

Горьковский педагогический
институт

FLUCTUATION IN THE ORIENTATION OF DISKS OF GALAXIES

B. I. FESENKO

Fluctuation in the distributions of the positional angles and inclination classes of disks of many thousands of galaxies are investigated. An advantage of the method proposed is the possibility to apply it to a small groups of galaxies without their preliminary distinguishment. Moreover a large amount of data is involved in simultaneous consideration. Fluctuations in the distributions of positional angles for galaxies with angular diameters of $1'$ and larger within fields from 18 to 648 \square° square degrees corresponds to a model without correlation between the positional angles of the neighbouring galaxies. A conclusion that a correlation is absent is obtained likewise from the investigation of the fluctuations in the distribution of the galaxy inclination classes.

ЛИТЕРАТУРА

1. *P. Nilson*, Uppsala Catalogue of Galaxies, Uppsala, 1973.
2. *В. П. Архипова, Б. А. Воронцов-Вельяминов, А. А. Красногорская*, Морфологический каталог галактик, I—IV, МГУ, М., 1962—1968.
3. *Б. И. Фесенко*, Астрон. ж., 49, 97, 1972.
4. *Т. А. Азекян, Н. К. Сумкина*, Астрофизика, 3, 545, 1967.
5. *Б. И. Фесенко*, Астрофизика, 6, 549, 1970.
6. *М. Hamabe, Y. Nakada, K. Kodaira*, Publ. Astron. Soc. Jap., 33, 223, 1981.
7. *Г. Вокулер*, в сб. «Крупномасштабная структура Вселенной», Мир, М., 1981, стр. 232.
8. *D. L. Hawley, P. J. E. Peebles*, Astron. J., 80, 477, 1975.
9. *P. Nilson*, Uppsala Astron. Observ. Rep. № 3, 1974.
10. *Б. И. Фесенко*, Астрофизика, 18, 37, 1982.
11. *Т. А. Азекян*, Основы теории ошибок для астрономов и физиков, Наука, М., 1972.
12. *Г. Г. Кузмин, М. М. Иыввявр, Б. И. Фесенко*, Публ. Тартуск. астрофиз. обсерв., 49, 140, 1982.
13. *Б. И. Фесенко*, Астрон. ж., 53, 1153, 1976.
14. *Б. И. Фесенко, Н. П. Питъев*, Астрон. ж., 51, 736, 1974.