

УДК 524.7-77/33

АНИЗОТРОПИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ РАДИОИСТОЧНИКОВ. II: ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕЙ

© 2009 В. Р. Амирханян

Государственный астрономический институт им. П. К. Штенберга, Москва, 119992 Россия

Поступила в редакцию 23 марта 2009 г.; принята в печать 20 мая 2009 г.

Анализ распределения позиционных углов 10461 протяженного радиисточника показал, что пространственная ориентация осей этих объектов анизотропна: они избегают направления на Полюс Мира и преимущественно ориентированы в направлении экватора. Отношение плотности вероятности ориентации в этих направлениях составляет 0.68. Вероятность того, что распределение осей по небесной сфере изотропно, менее 0.00004. Это утверждение находится в согласии с результатами работ, в которых исследовалось пространственное распределение ориентации нормалей галактик UGC, ESO и FGC каталогов.

Ключевые слова: *радиисточники*

1. ВВЕДЕНИЕ

Рейнхард, по-видимому, был первым, кто исследовал пространственную ориентацию галактик на всем небе [1]. Он использовал каталог галактик Брауна [2], пионера таких исследований. Рейнхард показал, что позиционные углы больших осей галактик распределены неравновероятно, а наклон галактик к лучу зрения наблюдателя не согласуется с гипотезой о равновероятной пространственной ориентации их нормалей. Следующий и очень существенный шаг был сделан Петером Нильсоном, который не только создал обширный Уппсальский каталог галактик северной полусферы [3], но и с большой значимостью подтвердил, что распределение позиционных углов больших осей галактик неравновероятное [4]. Лаубертс распространил поиск галактик на южную полусферу и сформировал каталог ESO [5]. Анализируя ориентацию объектов UGC и ESO каталогов, он построил функцию плотности вероятности пространственной ориентации нормалей галактик в виде трехмерного эллипсоида. Две оси эллипсоида, длиной 1 и 0.933, лежат практически в плоскости экватора. Третья, самая короткая ось (0.778), направлена на Полюс Мира. Манджос и др. [6] также исследовали ориентацию галактик UGC и ESO каталогов и показали, что наилучшее согласие с экспериментом дает цилиндрическая модель пространственной ориентации. Ось цилиндра, перпендикулярно поверхности которого предпочитают ориентироваться нормали галактик, направлена на Полюс Мира. Парновский и др. [7], кроме UGC и ESO, включили в анализ свой каталог FGC-галактик, видимых с ребра [8] и

показали с очень высоким уровнем значимости, что пространственная ориентация нормалей галактик анизотропна: есть области избегания (Полюс Мира) и есть области предпочтительной ориентации (экватор). Таким образом, авторы вышеперечисленных работ убедительно продемонстрировали, что пространственное распределение нормалей галактик анизотропно. Причем, нормали предпочитают ориентироваться в направлении экватора и избегают направления на Полюс Мира. Конечно, столь удивительное совпадение с экваториальной системой координат настораживает. И желательно проверить этот результат на независимой выборке объектов. Именно с этой целью на базе обзора FIRST автором был сформирован каталог протяженных радиисточников [9], ориентация которых будет исследована в этой работе.

2. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕЙ. ЭКСПЕРИМЕНТ

Протяженные радиисточники имеют унифицированную структуру с четко определяемой осью. Современные радиотелескопы уверенно строят изображения радиисточников, удаленных на десятки тысяч мегапарсек, в то время, как для галактик это около 200 Мпс: на больших расстояниях ошибки определения геометрических параметров галактик существенно возрастают. В [9, Рис. 7с] построена гистограмма позиционных углов радиисточников каталога. Отсюда вероятность, что распределение углов равновероятно, менее 10^{-7} . Очевидный вывод — пространственная ориентация радиисточников не изотропна. Обратное

утверждение, вообще говоря, не верно: “плоское” распределение позиционных углов относительно Полюса Мира не доказывает отсутствие анизотропии пространственной ориентации. Наши современные знания недостаточны, чтобы определить пространственную ориентацию конкретного радиоисточника. Мы фиксируем только проекцию его структуры на небесную сферу. Следовательно, мы имеем информацию о координатах радиоисточников и позиционных углах их проекций относительно Полюса Мира. Необходимо сделать переход от одномерного распределения позиционных углов к двумерному пространственному распределению осей радиоисточников. Сделаем два очевидных утверждения:

1) если на небесной сфере есть точка, в направлении которой “стремятся ориентироваться” радиоисточники, то функция распределения позиционных углов радиоисточников относительно этой точки достигает максимальной неравномерности по сравнению с распределением позиционных углов относительно соседних точек. При этом максимум функции близок к нулевому позиционному углу, а минимум к 90° .

2) если на небесной сфере есть точка, в направлении которой радиоисточники “ориентироваться избегают”, то функция распределения позиционных углов радиоисточников относительно этой точки достигает максимальной неравномерности и максимум функции соответствует позиционному углу 90° , а минимум — 0° .

Чем больше объектов предпочитает (избегает) ориентироваться в направлении некоторой точки, тем больше неравномерность гистограммы позиционных углов, измеренных относительно этой точки. Именно на этих тезисах был организован алгоритм построения функции распределения пространственной ориентации осей. Программа **anisoreal** перемещает по небесной сфере точку и, “зная” координаты и позиционные углы радиоисточников каталога [9], вычисляет их позиционные углы относительно текущей точки, строит гистограмму углов и определяет ее параметры. В качестве параметра, характеризующего неравномерность гистограммы использована амплитуда S свертки гистограммы с одним периодом гармоники $\cos(2p)$, где p — позиционный угол в пределах $0-180$ градусов. Из вышеизложенного ясно, что в точке предпочтительной ориентации свертка достигает положительного экстремума, а в точке избегания — отрицательного. Для перехода к амплитуде неравномерности свертка нормируется на

$$W = \sum_{i=0}^{n-1} \cos^2(2\pi i/n), \quad (1)$$

где n — разбиение гистограммы. В результате работы программы получаем карту небесной сферы (в экваториальных координатах), отсчет в каждой точке которой есть амплитуда неравномерности гистограммы позиционных углов всех радиоисточников каталога относительно данной точки (Рис. 1). На карте переход оттенка от светлого к темному соответствует изменению уровня карты от минимума к максимуму. На Рис. 2а и 2b — гистограммы в экстремальных точках карты. Отрицательный экстремум находится в точке $(120^\circ, 80^\circ)$, его величина -53.4 . В точке положительного экстремума $(140^\circ, 0^\circ)$ неравномерность гистограммы 46.2 . Здесь же показаны пунктиром средний уровень и диапазон ошибок в предположении равновероятного распределения позиционных углов. Вероятность, что гистограммы в экстремальных точках имеют “плоское” распределение, менее 10^{-7} . На Рис. 3 показано сечение карты по меридиану 130° (сплошная линия). Здесь же пунктирной линией показано сечение изотропного распределения. Его радиус равен среднему числу радиоисточников, приходящихся на один дискрет гистограммы — 581.17 . Отклонение от изотропии и есть амплитуда неравномерности гистограмм. На этом рисунке ось ординат есть полярная ось, а ось абсцисс — плоскость экватора. Карта на Рис. 1 демонстрирует, что оси радиоисточников преимущественно ориентированы в область экватора и избегают направления на Полюс Мира. Этот удивительный результат совпадает с не менее удивительными результатами, полученным по галактикам UGC, ESO и FGC каталогов. В качестве контроля программы **anisoreal** автор повторил такие же вычисления с объектами Flat Galaxies Catalogue, список которых был проанализирован ранее в [7]. В результате получена карта неравномерности распределения позиционных углов нормалей этих объектов (Рис. 4). Эта карта показывает, что нормали галактик, как и оси радиоисточников, избегают направления на Полюс Мира и предпочитают ориентацию в область экватора, что подтверждает результаты работы [7].

3. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕЙ. МОДЕЛЬ

Для того чтобы связать полученную карту с реальной анизотропией, построим модель анизотропии и научимся оценивать ее параметры. Последовательность действий:

1) генерируем список координат 10461 объекта, равномерно распределенных по небесной сфере. Также можно использовать координаты объектов реального каталога [9];

2) зададим простую функцию пространственного распределения осей, которая описывается выражением:

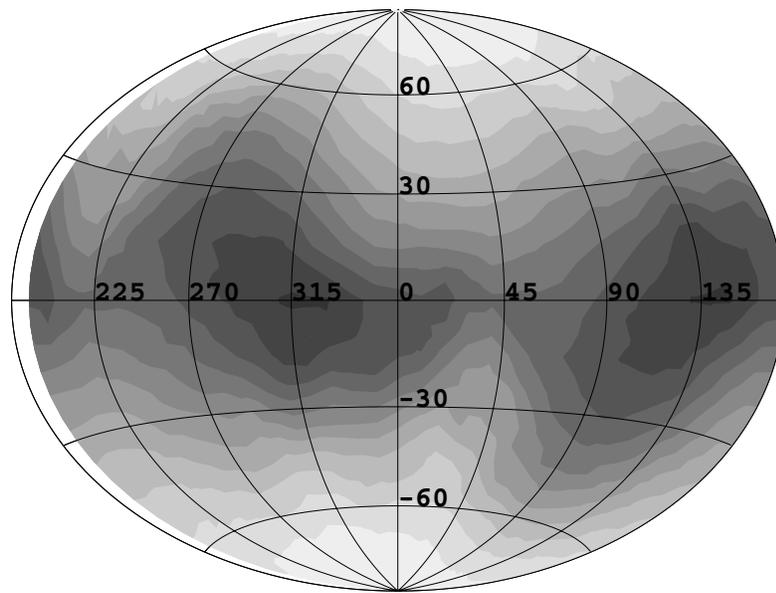
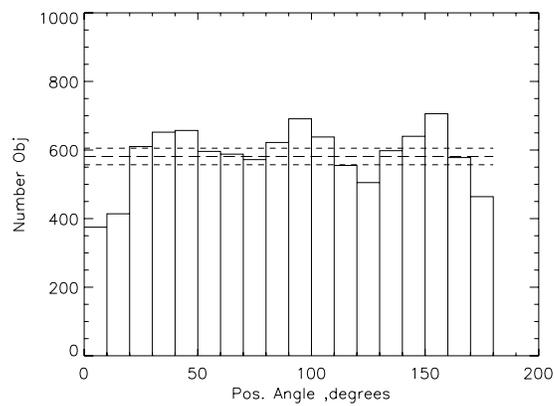


Рис. 1. Экспериментальная карта неравномерности распределения позиционных углов радиосточников. Переход оттенка от светлого к темному соответствует изменению уровня карты от минимума к максимуму.

(a)



(b)

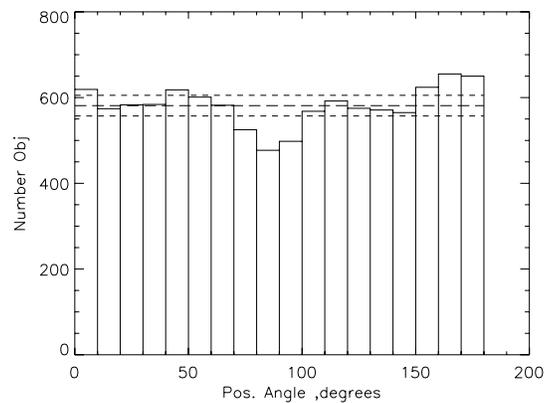


Рис. 2. (a) Распределение позиционных углов относительно точки отрицательного экстремума (120° , 80°); неравномерность гистограммы 53.4. (b) Распределение позиционных углов относительно точки положительного экстремума (140° , 0°); неравномерность гистограммы 46.2.

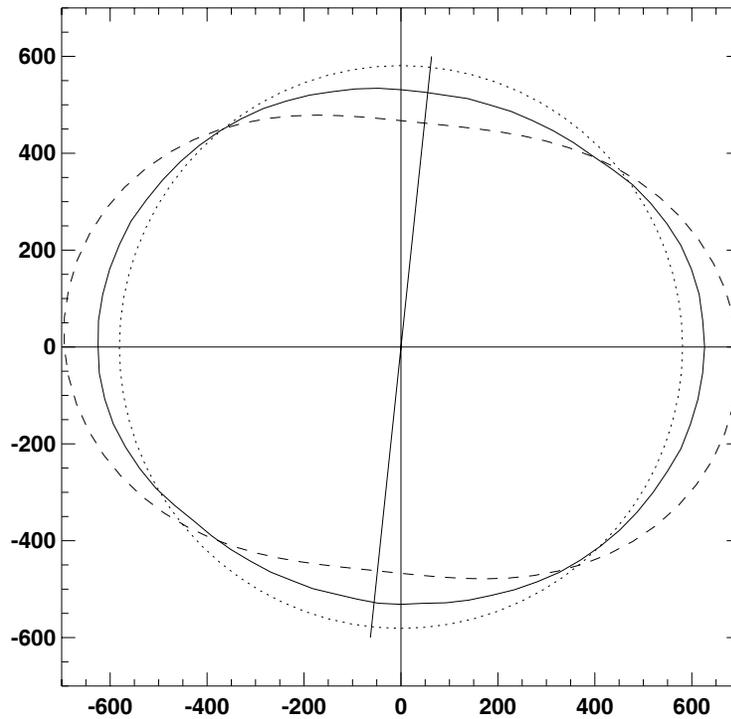


Рис. 3. Сечение экспериментальной карты неравномерности (сплошная линия) и функции распределения ориентации осей радиоисточников. Пунктирная линия — изотропная функция для $A=0$. Штриховая линия — функция для $A=0.5$. Угол между осью анизотропии и осью Y равен 6° .

$$P(\varphi, \omega)d\varphi d\omega = \frac{1 + A \cos^2 \omega}{\pi(1 + A/2)}d\varphi d\omega. \quad (2)$$

Здесь ω — угол между плоскостью, перпендикулярной оси анизотропии, и осью радиоисточника. Для любого ω распределение по второй координате φ равновероятно от 0 до 2π . Следовательно, направление $\omega = \pm\pi/2$ является осью симметрии модели, которая может быть направлена в любую точку небесной сферы (α_o, δ_o) . Если $A < 0$, то максимум функции распределения находится на оси симметрии, а минимум на $\omega = 0$ для $\varphi = 0-2\pi$. Если $A > 0$, то максимум и минимум меняются местами. Для $A=0$ функция $P(\varphi, \omega) = \frac{1}{\pi}$ изотропна. Сечение функции (2) показано на Рис. 3 штриховой линией. Чтобы привести ее к масштабу Рис. 3, функция отнормирована на $\frac{1}{581.17\pi}$;

3) для каждого радиоисточника генерируем, согласно распределению (2), координаты точки небесной сферы (α_i, δ_i) , в направлении которой ориентирована его ось. В результате, получаем карту пространственной ориентации этих осей;

4) зная координаты радиоисточников и ориентацию их осей, рассчитываем позиционные углы осей радиоисточников относительно Полюса Мира;

5) формируем каталог координат и позиционных углов объектов;

6) программа **anisoreal** анализирует этот каталог и выдает карту неравномерности, которую мы можем сравнить с заданной функцией анизотропии.

Например, зададим параметры анизотропии, а точнее, параметры функции распределения пространственной ориентации осей радиоисточников (2): $\alpha_o = 60^\circ, \delta_o = 45^\circ, A = 3$. Равномерно распределим 10461 радиоисточник по небесной сфере. В результате работы программы получаем карту распределения сгенерированных осей (Рис. 5) и карту неравномерности гистограмм (Рис. 6а). Так как $A > 0$, то ось анизотропии совпадает с областью избегания ориентации осей радиоисточников и, следовательно, отрицательный экстремум карты (Рис. 6а) должен располагаться вблизи координат (α_o, δ_o) . Действительно, именно в этой точке карта достигает минимального значения -161.8 . В плоскости, перпендикулярной оси виден темный контур, соответствующий зоне предпочтительной ориентации, что также соответствует заданной функции анизотропии. На Рис. 5 столь четкую картину разглядеть трудно. Объяснение очень простое: поисковая программа есть мощный фильтр низких пространственных частот, через который прошли данные, образующие карту на Рис. 6а. Анализ шумов модельной карты для изотропного случая ($A=0$) позволил грубо оценить апертуру этого фильтра $\approx 90^\circ$. Если “пропустить” через такой фильтр карту

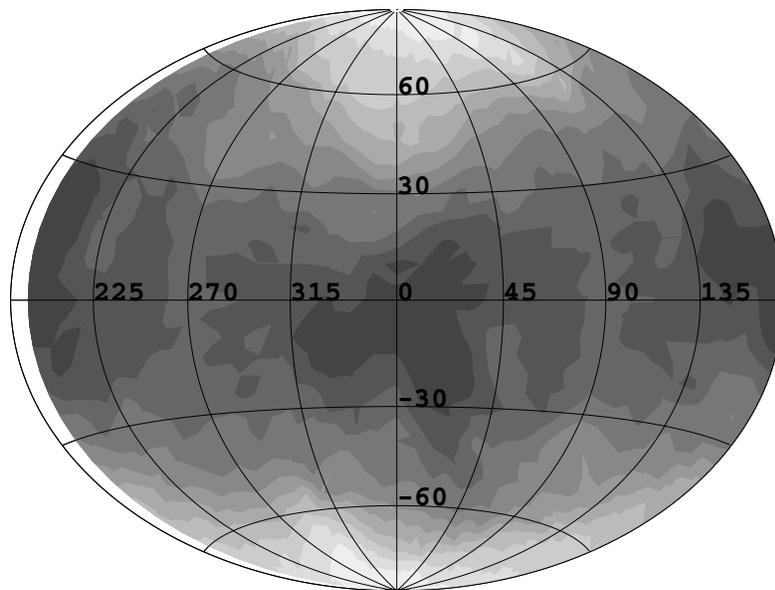


Рис. 4. Экспериментальная карта неравномерности распределения позиционных углов нормалей объектов FGC-каталога.

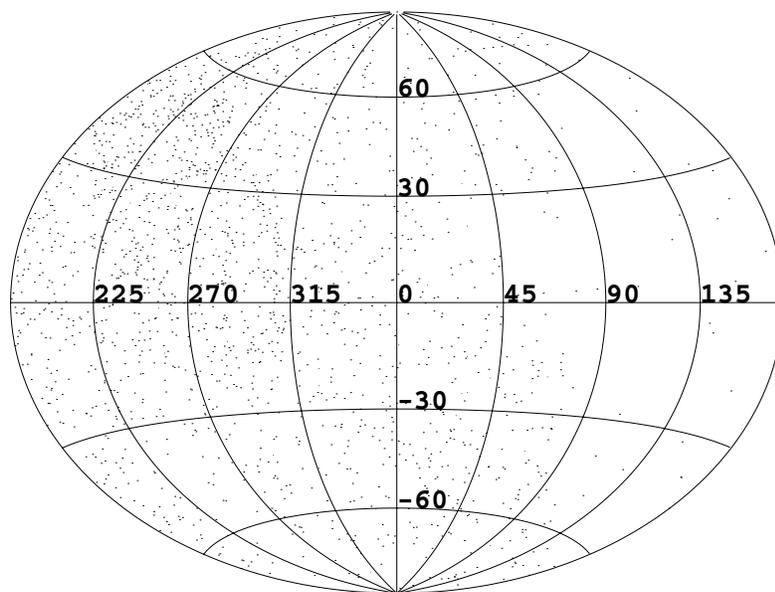


Рис. 5. Карта ориентации осей радиоисточников модельного каталога. Ось анизотропии направлена в точку $\alpha_o = 60^\circ$, $\delta_o = 45^\circ$, $A = 3$. Радиоисточники равномерно распределены по небесной сфере.

распределения осей, то получим четкую картину (Рис. 6b), структура которой повторяет карту на Рис. 6a. Фильтр улучшает отношение “сигнал-шум” карты, но при этом, как видно на Рис. 3, уменьшает амплитуду анизотропии. Если мы изменим в модели полярность коэффициента анизотропии ($A = -0.5$), то, как следует из выражения (2), получим карту неравномерности с положительным экстремумом в направлении оси анизотропии (Рис. 6c). После этих численных экспериментов можно уверенно утверждать, что програм-

ма **anisoreal** адекватно отображает распределение осей по небесной сфере. Повторим модельные вычисления с прежними параметрами анизотропии, но с координатами реальных объектов [9], распределение которых повторяет область покрытия обзора FIRST. В результате получим карту неравномерности гистограмм (Рис. 6d), которая отличается от карты на Рис. 6a значительной неравномерностью в области предпочтительной ориентации. Гистограмма позиционных углов относительно полюса Мира также показывает большую неравно-

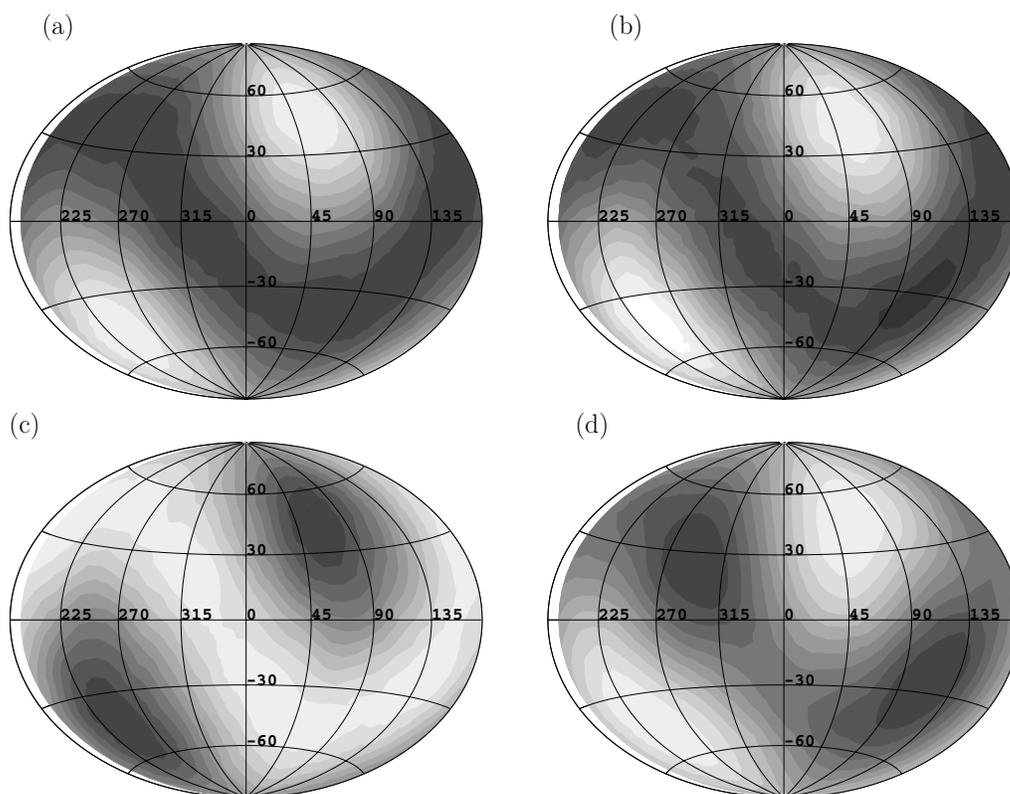


Рис. 6. Карты неравномерности распределения позиционных углов радиоисточников модельных каталогов. (а) — ось анизотропии направлена в точку $\alpha_o = 60^\circ, \delta_o = 45^\circ, A=3$. Радиоисточники равномерно распределены по небесной сфере; (б) — карта ориентации осей радиоисточников модельного каталога (Рис. 5), свернутая с низкочастотным пространственным фильтром, апертура которого 90° ; (с) — ось анизотропии направлена в точку $\alpha_o = 60^\circ, \delta_o = 45^\circ, A=-0.5$. Радиоисточники равномерно распределены по небесной сфере; (д) — ось анизотропии направлена в точку $\alpha_o = 60^\circ, \delta_o = 45^\circ, A=3$. Радиоисточники занимают область обзора FIRST — координаты радиоисточников взяты из каталога в работе [9].

мерность и асимметрию. Многократные повторения вычислений для различных выборок случайных чисел и параметров анизотропии подтвердили, что неравномерное заполнение небесной сферы радиоисточниками накладывает неизгладимый отпечаток на карту неравномерности гистограмм. Этим же объясняется положительный экстремум в экваториальной области экспериментальной карты на Рис. 1. Отсюда следует тривиальный вывод: при построении программы, оценивающей параметры анизотропии необходимо учитывать распределение радиоисточников по небесной сфере. Попытка автора построить идеальную аналитическую модель дала менее надежный результат.

4. ПАРАМЕТРЫ АНИЗОТРОПИИ

Решать задачу — определение параметров анизотропии — будем наиболее простым и естественным способом: манипулируя параметрами анизотропии α_o, δ_o и A , минимизируем невязки между модельной и экспериментальной картами неравномерности гистограмм. При построении модели

будем использовать реальное распределение радиоисточников по небесной сфере. Проведем эту операцию с несколькими выборками случайных чисел, чтобы оценить не только параметры, но и их ошибки. В результате были получены следующие параметры анизотропии:

$$\alpha_o = 180^\circ \pm 92^\circ, \delta_o = 84^\circ \pm 6^\circ, A = 0.48 \pm 0.08.$$

Именно эти параметры использовались для изображения сечения функция пространственного распределения углов на Рис. 3 (пунктир). Среднеквадратичное отклонение между изотропным распределением и экспериментальной картой равно 29.3, а между модельными и экспериментальной картами 6.9. Из отношения этих стандартов получим оценку вероятности того, что экспериментальное распределение есть случайная выборка изотропного распределения: $P < 0.00004$. С помощью тех же программ все вышеперечисленные процедуры были проделаны с каталогом галактик, видимых с ребра [8]. Получены следующие параметры анизотропии:

$$\delta_o = 89^\circ, A = 0.35.$$

Прямое восхождение (α_0) не определено, так как точка находится вблизи Полюса Мира.

Вероятность того, что пространственное распределение нормалей галактик изотропно, менее 10^{-5} .

5. ВЫВОДЫ

Анализ распределения позиционных углов осей протяженных радиоисточников показал, что пространственное распределение осей анизотропно. Оси радиоисточников избегают направления на Полюс Мира и преимущественно ориентированы в направлении экватора. Отношение плотности вероятности ориентации в этих направлениях примерно 0.68. То же самое можно сказать и о распределении нормалей объектов FGC-каталога, но отношение плотности вероятности для них порядка 0.74. Автор не может предложить механизма, который внесет в оптический и радио эксперименты столь настораживающее совпадение осей. Численные эксперименты показывают, что и программных ошибок подобного рода нет. Распределение 1801 радиоисточника каталога по красному смещению [9], позволяет осторожно утверждать, что анизотропия покрывает пространство

до $Z \sim 1$ или более. Несомненно, функция пространственного распределения осей имеет и более тонкую структуру, как по пространству, так и по типу объектов. Исследование структуры потребует увеличения объема каталогов и более изощренных методов анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Reinhardt, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **156**,151 (1972).
2. F. G. Brawn, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **127**,517 (1963).
3. P. Nilson, Ann. Uppsala astron.Observ. **6**, 1 (1973).
4. P. Nilson, Rep, Uppsala astron.Observ. **3**, 1 (1974).
5. A. Lauberts, The ESO/Uppsala Survey of the ESO(B) Atlas.(1982).
6. А. В. Манджос, А. Я. Грегуль, И. Ю. Изотова, В. В. Тельнюк-Адамчук, *Астрофизика* **26**, 321 (1987).
7. S. L. Parnovsky, I. D. Karachentsev, and V. E. Karachentseva, Monthly Notices Roy. Astronom. Soc. **268**, 665 (1994).
8. I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, and S. L. Parnovsky, *Astron. Nachr.* **314**, 97 (1993).
9. V. R. Amirkhanyan, *Astrophysical Bulletin* **64**, 25 (2009).

ANISOTROPY OF THE SPACE ORIENTATION OF RADIO SOURCES. II: THE AXIS DISTRIBUTION FUNCTION

V. R. Amirkhanyan

An analysis of the position angles distribution of 10461 extended radio sources shows that the spatial orientation of the axes of these objects is anisotropic: they avoid the direction toward the Celestial Pole and are mostly oriented in the equatorial direction. The ratio of the probability densities of the orientation in these two directions is 0.68. The probability that the sky distribution of axes is isotropic is less than 0.00004. This conclusion is consistent with the results of the spatial distribution normals analysis of the UGC, ESO, and FGC galaxies planes.

Key words: *radiosources*