

УДК 524.6

## ВЛИЯНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА И ГАЛАКТИК–СПУТНИКОВ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Н. Р. Аракелян<sup>1,2</sup>

*В работе рассматривается анизотропия распределения в системах шаровых скоплений (ШС) и галактик–спутников Млечного Пути с помощью тензора инерции. Оценивается статистическая значимость результатов путем повторения этого анализа для случайных каталогов. Этот метод воспроизводит известную плоскую структуру в распределении галактик–спутников, однако ее значимость несколько ниже, чем для других методов, используемых в литературе. Для ШС на расстояниях  $2 < R < 10$  кпк структура компланарна с галактической плоскостью. На больших расстояниях ориентация структуры близка к ориентации галактик–спутников, то есть перпендикулярна плоскости Галактики. Вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7%. Также измеряется анизотропия распределения ШС без ШС, принадлежащих к приливному потоку Стрельца. Измерение показывает, что влияние потока на распределение ШС небольшое.*

**Ключевые слова:** Галактика, структура, шаровые скопления.

*Введение.* Целью настоящей работы является более детальное изучение анизотропии ШС. Прежде всего, в предыдущих работах использовалось предположение о плоском распределении и пытались определить плоскость, которая наилучшим образом соответствует распределению ШС. Вместо этого был использован тензор инерции для “слепого поиска” анизотропии. Во-вторых, система ШС подвергается изменениям из-за взаимо-

<sup>1</sup> МФТИ (Государственный университет), 141701 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: n.rubenovna@mail.ru.

<sup>2</sup> ФИАН, АКЦ, 117997 Россия, Москва, Профсоюзная ул., 84/32.

действия ШС с диском Галактики, поэтому можно было бы ожидать, что ШС, которые аккрецировали в последнее время и/или расположены дальше от центра Млечного Пути, должны сохранить больше памяти об анизотропной аккреции. В-третьих, некоторые ШС, принадлежащие Млечному Пути, родились не в самой нашей Галактике, а попали туда из-за приливных потоков, которые образовались в результате частичных разрушений галактик-спутников. Так что можно предположить, что измерение анизотропии распределения ШС без приливных потоков покажет насколько аккреция галактик-спутников влияет на распределение ШС.

*Измерение анизотропии.* Галактика содержит не менее 157 ШС [1]<sup>1</sup> и 27 галактик-спутников [2]. Для количественного анализа анизотропии распределений мы используем тензор инерции

$$S_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^k x_j^k, \quad (1)$$

где  $S$  – тензор инерции,  $N$  – количество объектов,  $x$  – расстояния от  $k$ -ой точки до центра Галактики.

Три собственных значения тензора инерции ( $a$ ,  $b$  и  $c$ ) сортируются в порядке возрастания так, что  $a > b > c$ . Степень анизотропии характеризуется отношениями собственных значений  $c/a$  и  $b/a$ , оба из которых приближаются к 1 в случае изотропного распределения. Для проверки статистической значимости мы создаем 10000 случайных выборок с тем же радиальным распределением и количеством объектов, что и в реальных каталогах, а галактические координаты даем случайным образом. В работе анизотропия называется статистически значимой, если отношение собственных значений тензора для реальных каталогов отличается от медианы случайных выборок более чем на  $3\sigma$ .

Из отношения  $c/a$ , показанного на рис. 1 для образца 27 галактик-спутников, на расстояниях  $R > 150$  кпк наблюдается явная статистически значимая анизотропия, но на меньших расстояниях она не очень выражена. Большая ось распределения на самой правой панели направлена почти перпендикулярно плоскости Галактики. Это демонстрирует, что используемый метод находит известную в литературе анизотропию, но она менее значительна, чем в других методах [3].

Из отношения  $c/a$  для полной выборки ШС, показанного в среднем ряду, можно отчетливо видеть значительную анизотропию при  $2 \leq R \leq 10$  кпк. При  $R > 18$  кпк отношение  $c/a$  становится близким к медиане для случайных изотропных выборок.

<sup>1</sup><http://physwww.mcmaster.ca/harris/Databases.html>

Можно сделать предположение, что анизотропия при  $R < 18$  кпк полностью связана с галактическим диском. Это ясно видно из самой правой панели на рис. 1: большая ось тензора инерции лежит внутри диска, а малая ось – перпендикулярна диску.

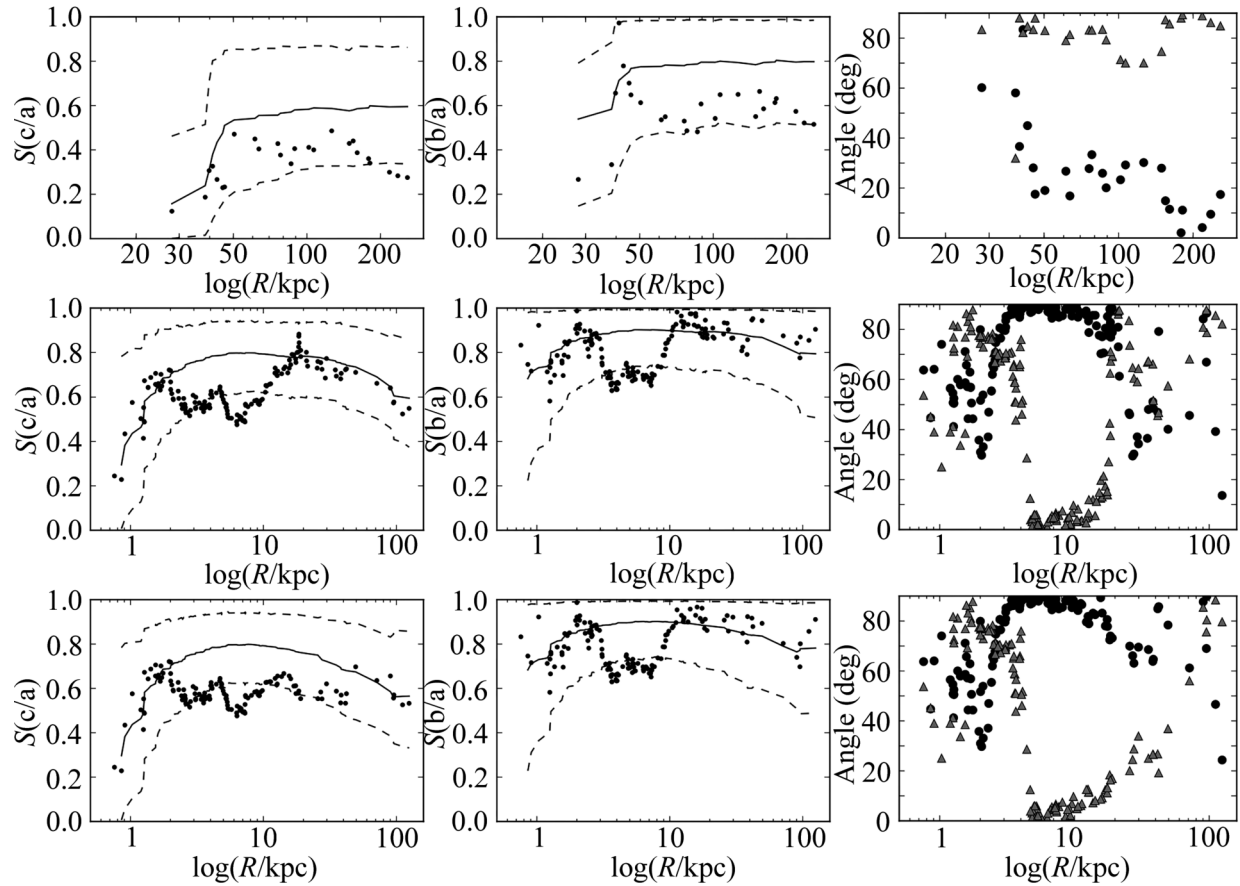


Рис. 1: Анизотропия 27 галактик-спутников (верхний ряд), 157 ШС (средний ряд) и ШС без потока Стрельца (нижний ряд). В левой и в средней колонке показано распределение  $c/a$  и  $b/a$  как функция галактоцентрического расстояния. Каждая черная точка представляет собой распределение реальных объектов. Сплошная линия представляет медианные отношения собственных значений для 10000 случайных выборок. Пунктирные линии представляют собой  $\pm 3\sigma$  таких случайных распределений. В правой колонке показан угол, измеренный в градусах, между направлением на галактический полюс Млечного Пути и большой (черные круги) и малой (серые треугольники) осью тензора инерции.

Галактики-спутники образуют удлинённую структуру шириной  $\approx 100$  кпк и длиной 400 кпк. Представляла интерес проверка ШС на расстояниях более 50 кпк (полови-

на толщины плоскости спутников) от центра галактики, распределенных в одних и тех же координатных осях, определяемых собственными векторами системы галактик–спутников, так как ШС на меньших расстояниях будут целиком лежать внутри структуры, образованной галактиками. Результат показал, что все 6 ШС, на расстоянии  $> 50$  кпк, находятся в области  $\pm 50$  кпк вдоль малой оси тензора инерции галактик–спутников. Чтобы проверить, является ли это расположение результатом совпадения, снова генерируем 10000 случайных выборок в нашем методе измерения анизотропии и обнаруживаем, что вероятность того, что все 6 ШС находятся внутри  $\pm 50$  кпк, составляет 1.7%. Это не позволяет уверенно заключить, что ШС расположены в одной плоскости со спутниками, однако это указывает на то, что это может быть правдой.

Некоторые ШС родились не в самой нашей Галактике, а попали туда из приливных хвостов потоков. Один из таких потоков – это поток Стрельца, и чтобы понять, насколько он влияет на распределение ШС, из всего списка были удалены ШС, принадлежащие потоку, и после этого повторно была измерена анизотропия распределения (NGC 4147, NGC 6715, Terzan7, Arp 2, Terzan8, Pal. 12, Whiting 1, NGC 5024, NGC 5053, NGC 5272, NGC 5466, Pal 5, NGC 5634, NGC 5694, NGC 4590, NGC 7492, NGC 6864 – ШС в потоке Стрельца [4, 5]). Эти скопления находятся на расстоянии 15–40 кпк и при их удалении, как можно увидеть на нижнем ряду рис. 1, для  $c/a$ , пик на расстоянии 18 кпк практически пропадает, а распределение до 40 кпк теряет изотропность. На этом расстоянии большая и малая ось тензора тоже меняются.

*Обсуждение и заключение.* Используя тензор инерции, была характеризована анизотропия ШС. Для ШС находим, что полная выборка показывает значительную анизотропию только в диапазоне расстояний  $2 < R < 10$  кпк. Структура имеет удлиненную форму с  $c/a \approx 0.5$  и  $b/a \approx 0.6$ , с большой осью, лежащей в галактической плоскости. Можно считать, что эта структура связана с галактическим диском. Тем не менее пространственное распределение 6 самых отдаленных ШС указывает на совпадение с известной плоской структурой в распределении галактик–спутников [3]. Вероятность случайной реализации такого распределения составляет 1.7%. При удалении ШС, принадлежащих приливному потоку Стрельца, результат хотя и не сильно, но меняется; оставшиеся ШС в диапазоне 20–40 кпк показали ориентацию, близкую к диску Галактики. И это говорит о том, что поток вносит небольшой вклад в распределение ШС в Галактике.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] W. E. Harris, G. L. Harris, and M. Alessi, *Astrophys. J.* **772**, 82 (2013).
- [2] A. W. McConnachie, *Astron. J.* **144**, 4 (2012).
- [3] M. Metz, P. Kroupa, and H. Jerjen, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **374**, 1125 (2007).
- [4] J. A. Carballo-Bello, A. Sollima, D. Martinez-Delgado, et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 2971 (2014).
- [5] A. D. Mackey, S. van den Bergh, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **360**, 631 (2005).

Поступила в редакцию 15 августа 2018 г.

После доработки 7 марта 2019 г.

Принята к публикации 7 марта 2019 г.

*Публикуется по результатам VII межинститутской молодежной конференции “Физика элементарных частиц и космология 2018” (ФИАН, Москва).*