

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Аракелян Наиры Рубеновны
«Исследование взаимосвязи системы шаровых скоплений Галактики
и ее окружения»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Изучение пространственно-кинематической и химической структуры системы шаровых скоплений (ШС) Галактики имеет фундаментальное значение для построения теории происхождения и эволюции как самой системы ШС, так и Галактики в целом. Несмотря на длительную традицию исследования системы ШС и большой объем соответствующей литературы, многие вопросы остаются дискуссионными, а выводы авторов требуют более объективного обоснования. Поэтому использование новых методов решения задач этого круга можно только приветствовать. В данном контексте тема диссертации, посвященной оригинальному анализу пространственной анизотропии системы ШС и исследованию связи ШС с галактиками-спутниками нашей Галактики и Местным сверхскоплением галактик, несомненно является **актуальной**.

Основная **новизна** диссертации состоит в разработке основанного на тензорах вращения (гирации) метода исследования анизотропии пространственного распределения объектов и в применении этого метода к системе ШС и к различным ее подсистемам, а также к галактикам-спутникам. Благодаря получению радиальной зависимости от галактоцентрического расстояния R характеристик тензоров вращения **впервые** удалось показать, что для системы ШС в целом значимая пространственная анизотропия присутствует только в диапазоне расстояний $2 < R < 10$ кпк. Также представляет интерес вывод о том, что ШС старого гало представляют собой смесь двух динамически различных популяций, по-разному проявляющих себя на разных промежутках R . **Впервые** показано, что пространственное распределение 6 самых далеких ($R > 50$ кпк) ШС на уровне маргинальной значимости ориентировано вдоль плоской структуры в распределении галактик-спутников, которая перпендикулярна диску Галактики. Также был разработан **новый** метод поиска ШС, принадлежавших в прошлом карликовой сфероидальной галактике в Стрельце (Sgr dSph).

Все научные положения, вынесенные на защиту являются **обоснованными**. **Достоверность** результатов обеспечивается использованием современных данных, в том числе полученных в рамках проекта GAIA, и применением корректных статистических методов, не требующих дополнительных предположений. Так, при анализе анизотропии распределения ШС не использовано традиционное в подобных исследованиях предположение о существовании плоскости, к которой тяготеют ШС. В пользу **достоверности** сделанных выводов говорит стремление автора диссертации учесть различные систематические и случайные факторы, могущие повлиять на результаты, например, наличие зоны избегания на низких галактических широтах и

случайную неопределенность расстояний до ШС и галактик-спутников — при анализе анизотропии, три вида ошибок при определении лучевых скоростей и декартовых компонент пространственных скоростей объектов — при поиске ШС, связанных с потоком Стрельца. При этом диссертант заранее рассматривает уровень значимости 3σ как минимально необходимый для принятия обоснованных решений в рамках поставленных задач, что также повышает общее доверие к полученным результатам. (Заметим, что нередко за минимальный принимают лишь уровень 2σ .)

В пользу общей объективности работы говорит, на мой взгляд, то, что в нее было включено и много «отрицательных» результатов, например, случаев отсутствия значимой анизотропии для той или иной выборки. Действительно, и такие результаты важны. Автор проявляет разумную осторожность при рассмотрении результатов как собственных, так и других авторов. Так, признается, что при случайной генерации даже для изотропной модели могут появиться признаки фиктивной анизотропии (подпись к рис. 1.9 на стр. 35). В этом плане существенен вывод диссертации о том, что 10% ШС ошибочно отнесены другими авторами к аккрецированным, а на самом деле они генетически связаны с Галактикой.

К достоинствам работы можно отнести большой список литературы.

Несмотря на высокий уровень диссертации в целом, следует сделать ряд **замечаний**.

1. Формулировка «Влияние зоны избегания на распределения ШС и галактик-спутников на низкой Галактической широте несущественное» (п. 1 Основных положений, выносимых на защиту) неудачная. Можно подумать, что автор отрицает само существование этой зоны избегания как фактора для наблюдаемого распределения ШС. На самом деле диссертант лишь хотел сказать, что зона избегания не влияет на результаты измерения анизотропии, полученные в работе.
2. Рассматривая влияние на результаты зоны избегания, связанной с поглощением света в диске Галактики, автор не учитывает две другие зоны избегания: 1) зацентральной и 2) осевой. Первая из этих зон обусловлена экранированием галактическим баром (точнее пылью, с ним связанной) ШС в дальней по отношению к Солнцу части бара и за баром (Nikiforov I.I., Smirnova O.V. // *Astronomische Nachrichten*. 2013. V. 334. N. 8. P. 749–755, figs. 5, 6; Schultheis M. et al. // *Astron. and Astrophys.* 2014. V. 566. A120, fig. 8). Эта зона хорошо заметна и на рис. 1.11 диссертации — на распределении ШС в галактоцентрических координатах в полосе между долготами от -50° до 110° на низких широтах. Учет этой зоны избегания, приводящей из-за отсутствия ШС в области за центром Галактики к дополнительному дефициту ШС вдоль галактической плоскости, должен усилить «дископодобную» анизотропию распределения и, возможно, изменить ее пределы по R . Осевая зона избегания (ШС дефицитны в конусе/желобе с углом полураствора 15°) ориентирована вдоль оси вращения Галактики (Никифоров И.И., Агладзе Е.В. // *Письма в Астрон. ж.* 2017. Т. 43.

№ 2.С. 97–128) и сама по себе вполне может быть проявлением связи ШС с плоскостью галактик-спутников, особенно в варианте желоба.

3. Автор небрежно работает с системами координат. Так, в подписи к рис. 1.11 указано, что это карта «в галактических координатах», на самом деле — в галактоцентрических. При этом направление и начало отчета галактоцентрических долгот не указано явно, хотя это существенно для изучения и данного рисунка, и, например, рис. 2.3. Приходится догадываться из общих соображений. . . Галактические координаты обозначаются то (l, b) (например, стр. 47), то (L, B) (стр. 50), а на рис. 2.3 и в табл. 2.3 (L, B) уже означают галактоцентрические координаты. Это сильно осложняет чтение и понимание.
4. Указанная небрежность привела к тому, что на рис. 2.3 собственные движения по галактоцентрической широте B были отложены с противоположным знаком. К сожалению, так и в публикации. Но, по счастью, это не влияет на выводы, т.к. вектора собственных движений, будучи правильно отложенными, также согласуются с потоком Стрельца в силу симметрии самого потока относительно галактики Sgr.
5. Отрадно, что (случайные) ошибки расстояний до ШС были учтены. Однако принятая величина ошибки — 5% от расстояния, т.е. 0^m1 , — представляется слишком оптимистичной. Только среднеквадратический разброс калибровочного соотношения в каталоге Harris (2010, *astroph/1012.3224*) уже составляет 1^m1 (5.1%). А есть еще ошибки измерения зв. величины горизонтальной ветви, $V(\text{HB})$, ошибки величины покраснения $E(B - V)$, вариации отношения общего поглощения к селективному, $A_V/E(B - V)$, и др. источники ошибок. В известном автору файле *mwgc.ref* с описанием каталога прямо сказано, что абсолютная величина $M_V(\text{HB})$ только в *наилучших* случаях составляет, вероятно, $\pm 0^m1$. Таким образом, более реалистичной выглядит средняя ошибка $\sim 0^m2$, или $\approx 10\%$ от расстояния. Насколько бы изменились результаты работы при принятии такой величины ошибки?

Кстати, автор пишет: «Расстояния до большинства [шаровых] скоплений были определены по ветви красных гигантов» (стр. 35). Это не так: главным индикатором в каталоге Harris (2010) является видимая величина горизонтальной ветви $V(\text{HB})$ (та же статья Harris в arXiv, стр. 1), шкала расстояний строится именно для этой величины. Конечно, шкала зависит от металличности $[\text{Fe}/\text{H}]$, но главным источником ошибок в расстояниях, как указано в диссертации на стр. 35, я бы ее не назвал (см. выше), тем более что наклон шкалы у Harris получился слабый.

Похоже, автор не конца разобрался, как определялись расстояния до ШС.

6. Некоторые результаты и выводы диссертации носят качественный характер. Так, при разделении ШС на категории А, Б, В в порядке уменьшения вероятности принадлежности потоку Стрельца, хорошо бы и указать вероятности,

пограничные между категориями. Вероятности можно оценить не только для расхождения по пространственному положению, как это сделано в работе, но и по компонентам скоростей, и вывести итоговую вероятность принадлежности потоку. Особенно была бы важна такая формализация при *отрицании* вхождения в поток некоторых «популярных» у других авторов скоплений (стр. 66).

Характеристикам направлений осей анизотропии (на правых панелях рис. 1.7–1.10 и подобных) не хватает указания какой-то неопределенности точечных оценок углов. Без нее, например, трудно судить, насколько существенны различия между направлениями осей для разных выборок в табл. 1.3.

7. На стр. 14 автор пишет: «Попытки разделить ШС на типы были еще примерно тридцать лет назад». В действительности гораздо раньше. Автор сам указывает статью Zinn (1985), но не упоминает более ранние работы, например, В.А. Марсаков, А.А. Сучков, «Функция металличности шаровых скоплений: свидетельство о трех активных фазах в эволюции Галактики» (Письма в Астрон. Журн. 1976. Т.2. С.381–385).

Можно сделать и другие замечания, но они менее существенны.

В диссертации имеется лишь небольшое число опечаток (например, «IC» вместо «ШС», стр. 48). Однако довольно много синтаксических и стилистических погрешностей. Например, «формирования блина Зельдович» (стр. 13), «наблюдаемые данные» (в подписи к рис. 2.1), «другая распределена более похожи на BD ШС» (стр. 42), «в отборе выборки YH ШС» (та же стр.) и т.п. Много неудачных переводов английских терминов, например, вместо слова «выборка» во многих случаях употребляется слово «образец» (например, «в образце BD», стр. 41; «в образце YH», стр. 42; также на стр. 43, 58); «плоскость... , которая выровнена с... потоком в M31» (стр. 12), ««со-вращающаяся» плоскость GC» (стр. 25).

Часто встречаются дефисы для переноса слова прямо посередине строки (например, на стр. 47, 49).

В списке литературы после каждого сокращенного названия журнала почему-то стоит дополнительная точка через пробел. Много недочетов и ошибок при цитировании работ в тексте, например, статья [22], у которой два автора с фамилией Lynden-Bell, упоминается как «статья Белла 1995 [22] года» (стр. 12), статья Байковой и др. [59] названа работой «Бачкова и др.» (стр. 14). К сожалению, эти ошибки попали и в автореферат.

Указанные отдельные недостатки не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Основные работы диссертанта опубликованы в ведущих научных журналах, во всех публикациях он является первым автором. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию. В целом диссертационная работа Н. Р. Аракелян является законченным научно-исследовательским трудом и удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее

автор, Наира Рубеновна Аракелян, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Официальный оппонент:

Никифоров Игорь Иванович,
кандидат физико-математических наук,
01.03.02 – астрофизика и радиоастрономия,
доцент по кафедре небесной механики,
доцент Кафедры небесной механики
Санкт-Петербургского государственного университета

Адрес: 198504 Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28
e-mail: i.nikiforov@spbu.ru
тел.: +7 (911) 1610084

25 августа 2022 г.

_____ И. И. Никифоров