

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

**Аракелян Наир Рубеновны**

*«Исследование взаимосвязи системы шаровых скоплений Галактики и её окружения»,*

представленную на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.03.02 - астрофизика и звёздная астрономия

Шаровые звёздные скопления являются одними из старейших объектов в Галактике и поэтому вызывают сильный интерес в связи возможностью понять, как происходили формирование и ранняя эволюция Млечного Пути. До недавнего времени все шаровые скопления принято было считать типичными представителями собственного галактического гало, то есть образовавшимися из единого протогалактического облака на начальных этапах формирования Галактики. Однако впоследствии было показано, что часть скоплений попало в нашу Галактику из распавшихся карликовых галактик-спутников. Это открытие по времени примерно совпало с возникновением теории, согласно которой массивные галактики, подобные нашей, формировались на ранних этапах своей эволюции в результате непрерывной аккреции карликовых галактик. Согласно стандартной космологической модели, падающие галактики оставляли после себя на вполне определенных орбитах, как отдельные звёзды, так и шаровые скопления. В связи с этим возникает вопрос: взаимосвязаны ли между собой орбиты захваченных Галактикой шаровых скоплений с орбитами наблюдаемых в настоящее время карликовых галактик-спутников и Местным Сверхскоплением галактик. Несмотря на огромное количество публикаций по теме, происхождение шаровых скоплений все еще остается не до конца понятным. Появление в свободном доступе новых глубоких высокоточных астрометрических и астрофизических данных космических объектов стимулировало Аракелян Н.Р. на дополнительное исследование этой *актуальной* проблемы.

Диссертация Аракелян Н.Р. состоит из введения, трёх глав, заключения, двух приложений и списка цитированной литературы, включающего 247 публикаций. Результаты *опубликованы* в пяти статьях, четыре из которых изданы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Во *введении* дан качественный обзор современного состояния в исследуемой области, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели работы, охарактеризована её научная новизна, значимость и достоверность полученных результатов, приведено краткое содержание всех глав диссертации и сформулированы четыре основных

положения, выносимых на защиту. Представлены также сведения об апробации результатов и личном вкладе автора.

**В первой главе**, соискатель, применив статистический подход с анализом тензора гирации, провела поиск анизотропии пространственных распределений близких галактик-спутников Млечного Пути, а также шаровых скоплений, считающихся принадлежащими разным подсистемам Галактики. Причём параметры анизотропии впервые прослежены как функции галактоцентрического расстояния. Было, в частности, показано, что скопления старого гало, расположенные на галактоцентрическом расстоянии (5 - 18) кпк, по занимаемой ими области пространства можно разделить на две группы со статистически значимой анизотропией, выражающейся сжатием обеих к плоскости диска Галактики. Понятно, что при этом одна группа по масштабам оказалась похожей на галактический балдж, а другая диск. Одновременно показано, что скопления молодого гало не обнаруживают явной анизотропии, зато локация наиболее далёких ШС старого гало напоминает распределение близких галактик-спутников.

**Во второй главе** с помощью разработанного соискателем оригинального трехэтапного метода проведен поиск шаровых скоплений, принадлежавших в прошлом карликовой сферической галактике Sgr dSph в созвездии Стрельца. Автором учитывались не только пространственно-кинематические параметры скоплений, но также их возрасты и металличности. Причем в качестве объекта сравнения использовались наблюдательные данные известных звёзд потока Стрельца, а также результаты численного моделирования потока другими авторами. В итоге обнаружено, что с потоком могут быть связаны 17 шаровых скоплений, которые соискатель разбила на три группы по степени надежности принадлежности к нему. Избранные кандидаты основной группы, содержащей шесть скоплений, оказались и в большинстве списков других авторов, которые идентифицировали их другими методами. Понятно, что единого и достаточного критерия принадлежности скопления к какой-либо подсистеме не существует, но привлечение дополнительных способов идентификации существенно увеличивает её надежность.

**Третья глава** посвящена исследованию пространственной ориентации системы шаровых скоплений, имеющих предположительно внегалактическое происхождение. Показано, в частности, что вся совокупность этих скоплений не обнаруживает статистически значимой анизотропии. Однако их пространственная ориентация, по мнению автора, свидетельствует, что часть этих скоплений ошибочно отнесена к аккрецированным. Это предположение совпало с выводом нашей недавней работы, где мы показали, что скопления, считающегося аккрецированным Низкоэнергетического потока, имеют содержания альфа-элементов, металличности, массы, цвет горизонтальных

ветвей и положения характерные для генетически связанных скоплений, образовавшихся из вещества единого протогалактического облака. Кроме того, Аракелян Н.Р. обнаружила, что положения больших и малых осей тензоров гирации у шаровых скоплений и галактик-спутников меняют свои ориентации относительно Сверхскопления с удалением от галактического центра. В частности, ориентация в пространстве системы шаровых скоплений, находящихся далее 100 кпк от галактического центра, близка к ориентации карликовых галактик-спутников. Можно предположить, что их родительские карликовые галактики были разрушены приливными силами уже довольно массивного Млечного Пути, находясь ещё на значительном удалении от его центра.

В *заключении* кратко перечислены основные результаты и сформулированы выводы диссертации.

В *приложениях* приведен каталог 157 ШС с координатами и названиями подсистем Галактики, к которым они относятся, и каталог данных 27 галактик-спутников.

Диссертация Аракелян Наиры Рубеновны представляет собой астрофизически грамотную и математически строгую научную работу. Судя по стилистике текста можно с уверенностью сказать, что соискатель его писала самостоятельно. Все выносимые на защиту результаты и выводы диссертации являются *новыми*. Для выяснения природы шаровых скоплений, принадлежащих в настоящее время нашей Галактике, автор использовала нетрадиционный статистический подход, который даёт возможность исследовать особенности пространственных распределений скоплений, приписанных отдельным группам. Это позволило дополнительно верифицировать принадлежности конкретных скоплений, а также выяснить, насколько ответственны галактики-спутники и Местное Сверхскопление галактик за появление шаровых скоплений в нашей Галактике. *Достоверность* полученных результатов и выводов обеспечивается использованием самых высокоточных наблюдательных данных, корректных методов их статистической обработки и публикациями в рецензируемых журналах. Интересна и разработанная Аракелян Н.Р. трехэтапная методика поиска скоплений, принадлежавших разрушенной приливными силами Млечного Пути карликовой сфероидальной галактике в Стрельце, которую *следует использовать* и для исследования других известных потоков. Основные результаты диссертации детально опубликованы. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Все положения научно *обоснованы*.

Так получилось, что у двух последних статей Аракелян Н.Р., которые полностью составляют вторую и третью главы, я был анонимным рецензентом. В результате все мои замечания, касающиеся научной стороны работы, она

исправила. Однако остались вопросы к тексту диссертации, поэтому хотелось бы высказать несколько *замечаний*.

1. Во-первых, соискатель неоднократно ссылается не на соответствующий раздел диссертации, а на свою статью, которая является её первой главой. Это обстоятельство, а также то, что во введениях всех глав повторяется описание шаровых скоплений, свидетельствует, что текст диссертации является простой компиляцией публикаций и в недостаточной степени приведен в единый документ.
2. Во-вторых, сам стиль изложения указывает на то, что соискателю английский язык более близок, чем русский. В тексте много несоответствия падежей, ошибочных склонений и наличия слов из машинного перевода с английского. Например, в подписях к рисункам и таблицам часто вместо корректного русскоязычного термина "выборка" вставлено неподходящее слово из словаря - "образец". Согласно англоязычному правописанию прилагательные в тексте пишутся с большой буквы, например "Галактическая широта" и др. На стр. 72 написано, что степень анизотропии...приближается не к единице, а к "одному". Часто женские фамилии авторов склоняются как мужские. Все это несколько напрягает.
3. Очень неудобно читать текст с цифровыми ссылками. Удобнее было бы приводить фамилию первого автора и год публикации, как иногда сделано в третьей главе.
4. Расшифровка англоязычных аббревиатур - ОН, ВД, УН - приведена не при первом упоминании на стр. 14, а только на стр. 40. Причем утверждается, что это разные типы шаровых скоплений. На самом деле, это скопления, просто причисленные к разным подсистемам Галактики. Различие типов подразумевает различие внутренних параметров.
5. Соискатель в разных местах текста по-разному формулирует принадлежности шаровых скоплений. На самом деле скопления балджа, диска (точнее толстого диска) и старого (т.е. внутреннего) гало образовались, скорее всего, из единого протогалактического облака, т.е. "in situ". Тогда как скопления молодого (т.е. внешнего) гало, почти все аккрецированные.
6. Даже в положениях, выносимых на защиту и пунктах научной новизны, приводятся вероятности случайных событий с излишней точностью до десятых процента.
7. В положении 2 утверждается, что шаровые скопления делятся на три категории по вероятности принадлежности к потоку в Стрельце. По-видимому, корректнее говорить, что соискатель искусственно поделила скопления на три группы.

8. На стр. 53 корректнее утверждать, что лучевые скорости 13 шаровых скоплений совпадают со скоростями звёзд из модели не в пределах ошибок, а в пределах  $3\sigma$ . Аналогично и для пространственных скоростей у шести скоплений основной группы.
9. На рис. 2.6а соискатель привела относительные содержания титана в скоплениях, собранных из разных источников. Такая процедура не вполне корректна, поскольку разные авторы исследуют разное количество звёзд в скоплениях, используют разные модели атмосфер, разные солнечные содержания химических элементов и т.д., поэтому определения разных авторов могут значительно отличаться друг от друга и следует все обилия по возможности сводить в единую шкалу.
10. К сожалению, в выбранной соискателем несколько устаревшей модели потока от карликовой галактики Sgr её начальная масса всего  $6 \times 10^8 M_{\odot}$ . Тогда как более позднее моделирование кинематики приливного хвоста звёзд галактики Sgr в работе (Gibbons et al. 2017) показало, что для того чтобы воспроизвести дисперсию скоростей в потоке от этой галактики, масса её тёмного гало должна быть на два порядка больше. Такое расхождение могло привести к потере некоторых кандидатов, например, обсуждаемого в диссертации скопления NGC 2419.

Отмеченные недостатки не умаляют большой ценности диссертации как капитального научного труда, посвященного развитию весьма важного направления звёздной астрономии – изучению населения шаровых звёздных скоплений. Представленная диссертация свидетельствует о высоком уровне квалификации её автора как исследователя в области астрофизики и звёздной астрономии. *Диссертация Аракелян Наиры Рубеновны* «Исследование взаимосвязи системы шаровых скоплений Галактики и её окружения» полностью *удовлетворяет* всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а её автор вполне *заслуживает* присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 - астрофизика и звёздная астрономия.

Отзыв составил официальный оппонент Владимир Андреевич Марсаков, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник НИИ физики Южного федерального университета.

«        »                      2022 г.

В.А. Марсаков