

Утверждаю

Проректор по научной
деятельности ФГАОУ ВО
"Казанский (Приволжский)
федеральный университет"
проф. Таюрский Д.А.

"08" ноября 2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ
на диссертацию Маричевой Маргариты Игоревны
"Исследование спектров суммарного излучения
звездных скоплений нашей и других галактик",
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.03.01 — Физика космоса, астрономия.

Шаровые звездные скопления заслуженно считаются универсальными и эффективными инструментами изучения физики ближайшей Вселенной. Во-первых, они являются крупными и яркими астрофизическими объектами, доступными для высококачественных наблюдений и количественного анализа не только в местной группе галактик, но и далеко за ее границами вплоть до расстояний 15-20 Мпк. Во-вторых, шаровые скопления могут содержать до миллиона звезд, что позволяет игнорировать индивидуальные аномалии последних, получая при анализе суммарного излучения статистически достоверные результаты. Наконец, рождение новых скоплений происходило на протяжении многих этапов жизни Галактики и других галактик: от самых первых моментов эволюции до формирования ее дисковой компоненты. В результате изучение этих объектов позволяет проверить и уточнить фундаментальные физические и астрономические теории ядерного синтеза, эволюции Галактики, физики и эволюции звезд и др.

Методы исследования шаровых скоплений делятся на 3 типа в зависимости от характера используемых наблюдательных данных. Анализ многополосных прямых изображений, обычно получаемых на космических обсерваториях, позволяет оценить их фундаментальные параметры: размеры, яркость и, с некоторыми погрешностями, массу и возраст. Однако такой подход существенно ограничен по расстоянию до объектов и практически не дает информации об их химических свойствах. При спектральных наблюдениях наиболее ярких звезд скоплений можно установить их эволюционное состояние и химический состав атмосфер, что при наличии статистически значимой выборки позволяет распространить эти результаты на скопление в целом. Данный метод исследований имеет более жесткие ограничения по дальности даже по сравнению с предыдущим. Поэтому наиболее перспективными

оказываются наблюдения и анализ интегральных спектров скоплений, предоставляющие информацию сразу об их физических (возраст, масса, поле скоростей) и химических (индексы содержаний водорода X , гелия Y и других элементов Z , химический состав звездных атмосфер) характеристиках. Использование излучения всего скопления без требования его разделения на отдельные звезды позволяет многократно расширить изучаемую область и обеспечить значительно большую статистическую достоверность получаемых результатов.

В результате метод анализа интегральных спектров становится базовым при изучении шаровых скоплений, что обусловило его взрывное развитие в последнее десятилетие. За это время преодолены его основные вычислительные и методические трудности, разработаны приемы его наиболее эффективного применения и получен значимый пласт данных для объектов нашей Галактики и соседних галактик. Существенная часть из них обобщена и обсуждается в представленной диссертации Маричевой М.И., что обуславливает ее высокую актуальность и научную значимость.

Диссертация, полным объемом 101 страница, состоит из Введения, четырех Глав, Заключения и списка цитируемой Литературы, содержит 27 рисунков, 18 таблиц и 168 ссылок на литературные источники.

Во **Введении** диссертантом раскрывается актуальность и научная значимость рассматриваемой темы, сформулирована цель диссертации и решаемые в ней задачи, определены выносимые на защиту положения с указанием степени их апробации, перечислены публикации по теме диссертации и указан личный вклад автора, выделены новизна, а также научная и практическая значимость его результатов. Кроме того, Введение содержит краткое изложение структуры диссертации по главам. К сожалению вклад автора представлен общим описанием выполненных им работ без их соотнесения с отдельными публикациями.

Первая Глава включает 2 раздела и описывает применяемые в работе методики анализа спектров шаровых скоплений. В разделе 1.1 показан процесс определения фундаментальных параметров объектов при согласовании их наблюдаемых и модельных интегральных спектров. Последние получают как путем их прямых расчетов программным комплексом CLUSTER, так и многомерной интерполяцией по параметрам скоплений t , Y , Z и металличности атмосфер звезд $[Fe/H]$ заранее подготовленных сеточных спектров, что существенно упрощает процесс анализа. Для наилучшего согласования наблюдательных и модельных данных диссертантом разработаны процедуры автоматической нормировки спектров и поиска глобального минимума их уклонений, корректность реализации которых проверена в подпункте 1.1.2. Раздел 1.2 представляет систему Ликских индексов, особенности применения для получения параметров скоплений и их преимущества при изучении слабых объектов.

Последующие три Главы имеют в целом схожую структуру. Их первый раздел содержит информацию о фундаментальных характеристиках изучаемых объектов, а второй - об использованном наблюдательном материале, методах его обработки и исследования, полученных физических и химических параметрах скоплений в сравнении с имеющимися литературными данными и их совместным анализом. Каждая глава завершается разделом, обобщающим ее основные результаты.

Во **второй Главе**, состоящей из шести разделов, выполнен комплексный анализ 8 металлически бедных скоплений в окрестности Туманности Андромеды. В разделе 2.3 рассматриваются теоретические вопросы влияния параметров скоплений на профили бальмеровских линий $H\beta$ в интегральных спектрах горизонтальной ветви (ГВ). В итоге сделан методически важный вывод о значимом и сложном влиянии возраста и удельного содержания гелия на вариации профилей $H\beta$, что подразумевает обязательный учет звезд ГВ при вычислении полных спектров шаровых скоплений. В разделе 2.4 показано, что модельные

изохроны трех скоплений, выбранные на основе изучения спектров, хорошо соответствуют наблюдаемым, построенным на основе их многополосной фотометрии. Наконец, раздел 2.5 содержит оценки и анализ содержаний 6 химических элементов в звездах всех объектов, что для подавляющего большинства из них сделано впервые. В целом, содержание **второй Главы** наглядно демонстрирует безусловную эффективность анализа интегральных спектров внегалактических скоплений, когда в рамках одной методики при малом объеме наземных наблюдений удается получить практически полный набор их физических и химических характеристик.

Третья Глава, содержащая пять разделов, посвящена изучению 4 шаровых скоплений умеренной металличности, принадлежащих галактике М31, но находящихся проекционно близко к ее спутнику NGC205. После получения в разделе 3.2 наборов их параметров и химического состава в разделе 3.3 проводится сравнение соответствующих модельных изохрон с литературными данными широкополосной фотометрии Vol6 и Vol45. Оно показывает не более чем удовлетворительное согласие результатов, но дает оценки красных смещений и расстояний до скоплений от наблюдателя и от родительской галактики М31, хорошо совпадающие с информацией из литературы. В разделе 3.4 найденные диссертантом значения параметров и содержаний 8 химических элементов сравниваются с литературными данными для других скоплений в М31 и для звезд поля Галактики. Изученные объекты характеризуются систематическими (до 0.2 dex) избытками элементов *alpha*-процесса C, Mg и Ca, из которых лишь избыток углерода имеет однозначное объяснение.

В **четвертой Главе**, содержащей 6 разделов, изучение 8 галактических скоплений выполнено с применением как Ликских индексов, так и стандартного моделирования интегральных спектров. В разделе 4.3 на основе собственных измерений индексов в наблюдаемых спектрах диссертантом найдены оценки возраста, бальмеровского декремента, металличности и избытка содержаний *alpha*-элементов. Для большинства объектов автором подобраны аналоги с близкими значениями перечисленных параметров и проведен модельный анализ спектра N6535 с наибольшим отношением сигнал/шум. Полученные результаты показывают хорошее согласие с альтернативными оценками в литературе с учетом их достаточно высокой дисперсии. Последующий раздел 4.4 представляет сравнение модельных изохрон скоплений Pal10 и NGC6426 с данными их фотометрических наблюдений. Их удовлетворительное согласие позволяет сделать вывод о достаточной точности определения параметров объектов при использовании Ликских индексов, а также определить коэффициенты покраснения и модули расстояний до скоплений.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Диссертация Маричевой М.И. оставляет достаточно благоприятное впечатление целостной работы по изучению эволюционного состояния и определению характеристик шаровых скоплений. Ее несомненным достоинством является первое в России массовое применение модельных интегральных спектров к анализу галактических и внегалактических объектов. В результате для них получены наиболее полные наборы физических и химических параметров, взаимосвязанные в рамках одной модели. Очевидно, что эти результаты априори являются новыми и представляют большое научное значение для дальнейшего развития теорий эволюции астрофизических объектов самой разной иерархии: от отдельных звезд до галактик в целом. Кроме того, параметры скоплений совместно с обработанными наблюдаемыми спектрами и Ликскими индексами следует признать полезным практическим материалом для дальнейших исследований. Продемонстрированная в работе важность учета звезд ГВ и проблемы с модельным описанием ряда спектров служит важной информацией для совершенствования метода популяционного синтеза интегральных спектров скоплений. Достоверность результатов подтверждается тестовыми расчетами с вариацией анализируемых

данных, сравнением модельных изохрон с данными фотометрии, широким компарированием с информацией из литературных источников и надлежащей апробацией в 7 докладах на российских и международных конференциях с личным участием автора. По теме диссертации автором опубликованы 4 статьи в высокорейтинговых, рецензируемых изданиях, включенных в списки ВАК, РИНЦ, WoS и Scopus. Ее результаты могут применяться во многих астрономических центрах, специализирующихся на исследованиях в области физики звезд и галактик: САО РАН, ГАИШ МГУ, ИНАСАН, КФУ, КрАО РАН и др.

К представленному тексту необходимо высказать следующие замечания:

I) В диссертации практически отсутствует обзор современного состояния исследований, что особенно огорчительно в связи с выбором одного из новейших и эффективных методов. Такой обзор позволил бы диссертанту полноценно проявить набор своих компетенций в выбранном направлении, определить сохраняющиеся в нем проблемы как отправные точки для начала своей работы, увязать решаемые задачи с предыдущими результатами и показать достоинства выбранного подхода.

II) Ряд узловых этапов методики исследований изложен схематично, что не позволяет четко судить о достоверности соответствующих результатов.

1) Как известно, на интегральный спектр скопления основное влияние оказывают его возраст t , удельное массовое содержание гелия Y и тяжелых элементов Z , задающие его изохрону, а также металличность звездных атмосфер $[Fe/H]$. Набор наблюдательных индикаторов в оптических спектрах позволяет из их модельного анализа одновременно определить t , Y и $[Fe/H]$. Значение Z может быть с некоторыми неопределенностями вычислено на основе металличности $[Fe/H]$, но его дискретность в используемых изохронах требует выбора изохроны с наиболее подходящей величиной Z . В результате этот выбор является вариативной задачей, о чем не сказано в разделе 1.1.1. Более того, в нем вообще не упомянута металличность $[Fe/H]$. Отметим, что в целом диссертант грамотно синхронизировал для своих объектов значения $[Fe/H]$ и Z . Однако в Главе 4 для скопления NGC 6535 им найдена металличность $[Fe/H] = -2.2$, хорошо соответствующая $Z = 0.0001$, но почему-то использована изохрона с $Z = 0.0004$.

2) Практически отсутствует описание процедуры нормировки наблюдаемых спектров в разделе 1.1.2. Диссертантом не показана устойчивость этой процедуры к вариациям стартовых параметров скопления, для которых выбирается модельный спектр при первой нормировке. Не исключено, что неверный выбор этого спектра может так исказить уровень континуума, что процесс итерационных уточнений будет все больше удалять его от истинного решения. Серьезные вопросы возникают к принятой диссертантом линейной интерполяции локального континуума между точками его определения. Подобная интерполяция обеспечивает достаточную точность при малом шаге между узлами, но его величина не приведена в тексте. Более того, следовало включить в диссертацию рисунок с распределением континуума у спектров скоплений с разными значениями $[Fe/H]$.

3) Нередко отсутствуют пояснения по методам оценки ошибок при определении параметров скоплений. Например, для параметров, дискретно заданных набором используемых изохрон, погрешности не могут вычисляться строго математически и должны устанавливаться из иных соображений, которые не приведены в тексте. В ряде случаев полученные значения ошибок кажутся нам сомнительными. Например, в таблице 5 точность определения Z для многих объектов оценена на уровне 10% от ее абсолютной величины, хотя ошибки металличности составили $\Delta[Fe/H] \approx 0.15$ dex, что эквивалентно погрешности в 40%. Наконец, диссертанту следовало подробно перечислить, по каким наблюдаемым индикаторам находятся содержания разных химических элементов и как интенсивность этих индикаторов в сравнении с имеющимся уровнем шумов связана с точностью определения

содержаний.

III) При хорошем в целом оформлении диссертация содержит отдельные недостатки.

1) Часть рисунков (например, 3.8, 4.2, 4.3 и др.) неоправданно мелкие, многие детали на них сливаются или плохо различимы. Особенно странным это выглядит для рис. 2.9 со сравнением модельных и наблюдаемых спектров, который было бы логично разделить на две или четыре части.

2) Подпись к рисунку 1.1 практически не поясняет его содержание.

3) Неясна суть фразы "эффекты возраста и металличности" на стр. 21.

4) На стр. 63 в предложении "Из анализа ... звезд, ... определялись с помощью калибровочных соотношений из Alonso et al. 1999 [127] и Ramirez et al. 2005 [128]." отсутствует подлежащее.

5) Названная в заключении Главы 4 оценка возраста NGC 6426 ($t = 12.7$ млрд. лет) нигде не упомянута в тексте этой главы.

6) Неясен смысл обозначения $Fe4668 = C_24668$ на стр. 64.

Указанные неточности не снижают общую положительную оценку диссертации и не влияют на оценку выносимых на защиту результатов.

Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации.

Характеризуя в целом диссертацию "Исследование спектров суммарного излучения звездных скоплений нашей и других галактик" нужно резюмировать, что она является квалифицированным и законченным исследованием оптического излучения и характеристик шаровых скоплений, обеспечивающим существенный прогресс в понимании физики и эволюции астрофизических объектов разных типов, удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а диссертант Маричева Маргарита Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.01 — Физика космоса, астрономия.

Отзыв подготовлен доцентом Шиманской Н.Н. и утвержден на астрофизическом семинаре кафедры астрономии и космической геодезии Казанского (Приволжского) федерального университета 30 октября 2024 г.

Зав. кафедрой астрономии
и космической геодезии,
к.т.н.



Безменов В.М.

Доцент кафедры астрономии
и космической геодезии,
к.ф.-м.н.



Шиманская Н.Н.

Адрес: 420008, РТ, г. Казань, ул. Кремлевская, 18, КФУ
Телефон: (843) 233-76-53
Факс: (843) 292-77-97
E-mail: Nelli.Shimanskaya@kpfu.ru