

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи
УДК 524.47, 524.7



Маричева Маргарита Игоревна

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ СУММАРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ НАШЕЙ И ДРУГИХ ГАЛАКТИК**

1.3.1 – Физика космоса, астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

п. Научный - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Научный руководитель: к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории внегалактической астрофизики и космологии САО РАН
Шарина Маргарита Евгеньевна

Официальные оппоненты: Селезнев Антон Федорович, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Коуровской астрономической обсерватории УрФУ

Каратаева Гульнара Мирсатовна, к.ф.-м.н., доцент кафедры астрофизики СПбГУ

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Защита состоится 2 декабря 2024 года в 13:00 на открытом заседании диссертационного совета 24.1.212.01 при САО РАН по адресу: 369167, КЧР, Зеленчукский район, пос. Нижний Архыз.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке САО РАН.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к. ф.-м. н.

 Шолухова О. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Большая часть звезд в нашей Галактике сформировалась в скоплениях [1]. Звездные скопления являются свидетелями эпизодов наиболее интенсивного звездообразования в галактиках (см., например, [2]). Изучение свойств, происхождения и путей эволюции звездных скоплений важно для решения фундаментальных задач астрофизики. В современных теориях галактики состоят из комбинации звезд, которые образовались «in situ» внутри основного гало галактики, и компонента «ex situ», который был создан в результате последовательности слияний и событий аккреции [3]. Доказательством такого сценария может служить идентификация разрушенных галактик-спутников Млечного Пути, таких как Стрелец, Гайя-Энцелад и другие, посредством анализа их кинематики и химического состава звезд и шаровых скоплений [4]. Большое количество субструктур в гало МЗ1 также свидетельствует об активной истории аккреции [5]. Поэтому продолжается активное изучение свойств звездных населений шаровых скоплений, а также процессов формирования и химической эволюции звезд в них, что важно как для понимания процессов нуклеосинтеза и звездной эволюции в ранней Вселенной (см., например, [6]), так и для понимания того, как возникли и сформировались основные структурные компоненты нашей и других спиральных галактик: диск, гало, балдж.

Большинство шаровых скоплений – это компактные, яркие и старые объекты. Их эффективный радиус достигает нескольких десятков пк с более типичными значениями около 3-5 пк. Средняя абсолютная звездная величина шаровых скоплений – $M_V \sim -7$, а возраст – порядка и более 10 млрд. лет. В пределах Млечного Пути шаровые скопления концентрируются в гало, толстом диске и балдже и отсутствуют в тонком диске. В среднем шаровые скопления на два порядка массивнее рассеянных и намного беднее металлами. Типичная металличность шаровых скоплений составляет 1-3% от солнечной. Однако при более внимательном рассмотрении классическое определение шаровых скоплений оказывается расплывчатым и существует много объектов, которые классифицируются как шаровые скопления на основе лишь нескольких из этих критериев. Caretta et al. 2010 [7] предложили новое определение: в отличие от рассеянного, в

шаровом скоплении должны наблюдаться так называемые множественные звездные населения, находящиеся на одной стадии эволюции, но имеющие разные содержания легких химических элементов. Согласно исследованиям шаровых скоплений Галактики большинство из них имеет две звездные популяции, отличающиеся содержаниями легких элементов (He, C, N, O, Na и Al): первую – с содержаниями как у большинства звезд поля Галактики при данной металличности и вторую – с содержаниями элементов, измененными в высокотемпературных процессах горения водорода: CNO-цикле и NeNa-цикле и MgAl-цикле (например, [8]). Поскольку последние процессы не могут протекать в маломассивных звездах, а разброс в содержаниях наблюдается даже у звезд точки поворота Главной последовательности, предполагают, например, что звезды в шаровых скоплениях произошли из газа, обогащенного массивными звездами первого поколения. У так называемых аномальных шаровых скоплений в дополнение к разбросу в содержаниях легких элементов имеется разброс по содержанию Fe и элементам s-процесса. Аномальные шаровые скопления относятся к самым массивным скоплениям в Галактике и, как предполагают, являются ядрами разрушенных карликовых галактик. Чем массивнее скопление, тем сложнее и многообразнее проявления множественности населений [9].

Проблема второго параметра морфологии горизонтальной ветви связана с явлением множественных звездных населений в шаровых скоплениях [9]. Шаровые скопления одного возраста и металличности имеют разную морфологию горизонтальной ветви. Распределение по цвету (то есть по T_{eff}) и светимости таких звезд изменяется с возрастом, металличностью, удельным содержанием гелия Y и эффективностью потери массы красными гигантами ([10]). Звезды первой популяции располагаются на красном конце горизонтальной ветви и имеют Y ниже, чем у звезд второй популяции, обогащенных гелием и более горячих. Разброс по Y у звезд горизонтальной ветви шарового скопления ΔY коррелирует с массой скопления, а также разбросом по содержанию элементов у звезд скопления [11]. Чем выше ΔY , тем выше содержание N, Na, и Al и ниже C, O, и Mg наблюдается у обогащенных звездных популяций [11]. Значительные вариации содержания Mg наблюдаются у небольшого числа скоплений, и более значительны у низкометаллических объектов [9].

Из представленного в данном исследовании анализа спектров низкого разрешения можно судить о возможном присутствии множественных звездных населений в исследуемых скоплениях по полученному содержанию легких элементов и по протяженности горизонтальной ветви в голубую сторону. Скопления с пониженными $[Mg/Fe] \leq 0$ и голубой горячей горизонтальной ветвью (высокое Y и высокая T_{eff} у звезд голубого конца горизонтальной ветви) с большой степенью вероятности имеют множественные населенные, о чем свидетельствуют исследования шаровых скоплений Галактики. Результаты построения модельных спектров суммарного излучения шаровых скоплений с использованием синтетических или наблюдаемых спектров звезд и результаты анализа распределения звезд на диаграмме «цвет-звездная величина» зависят от используемых моделей звездной эволюции. Однако в моделях звездной эволюции не учитывается разнообразие условий конвективного перемешивания в звездах в зависимости от их химического состава, массы и эволюционной стадии ([12; 13] и ссылки в них). Возможной причиной несоответствия изохроны звездной эволюции наблюдаемым свойствам звездных населений шаровых скоплений может быть также вклад фоновых звезд в спектры и результаты звездной фотометрии скоплений.

Анализ спектров суммарного излучения шаровых скоплений является одним из наиболее эффективных инструментов определения их возраста и химического состава, а также изучения эволюции родительских галактик (см. например, [14—18] и ссылки в этих статьях). Одним из таких методов в литературе является метод попиксельного описания спектров суммарного излучения скопления моделями простых звездных населений (например, ULYSS [19; 20]), рассчитанных с использованием эмпирических звездных библиотек (например, модели Vazdekis et al. 2010 [21] с эмпирической звездной библиотекой Miles). Главным недостатком эмпирических звездных библиотек (и моделей звездного населения, основанных на них) является то, что содержание элементов наиболее полно представлено для звезд солнечного окружения с малой массой. Вычисление синтетических спектров скоплений с использованием моделей звездных атмосфер, примененное в данном исследовании, не ограничено параметрами атмосферы, диапазоном длин волн,

спектральным разрешением или диапазоном вариаций содержания элементов ([22] и ссылки в ней).

Актуальность выполненного исследования заключается в том, что в работе предложены новые идеи и подходы для определения возраста и химического состава шаровых скоплений. Полученные результаты способствуют решению многих широко обсуждаемых в литературе проблем, таких как проблема разделения влияния возраста и металличности на наблюдаемые характеристики скоплений, проблема влияния свойств звезд горизонтальной ветви на результаты оценки возраста скоплений и звездных комплексов.

Целью исследования является детальное изучение свойств звездных населений шаровых скоплений нашей и других галактик. Предполагается исследовать спектры суммарного излучения скоплений с помощью разработанной специальной методики на предмет измерения их фундаментальных параметров: химического состава, возраста и удельного содержания гелия.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Определение и сравнительный анализ следующих фундаментальных параметров Галактических и внегалактических шаровых скоплений: химический состав, возраст и удельное содержание гелия Y .
2. Сравнение подобранных по спектрам суммарного излучения изохрон звездной эволюции с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина» скоплений, если имеются данные глубокой звездной фотометрии.
3. Сравнение полученных возраста, Y и химического состава исследуемых скоплений с таковыми у детально изученных в литературе звезд и шаровых скоплений разных подсистем нашей Галактики.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Впервые показано, что существует немонотонная зависимость ширины на половине интенсивности и глубины бальмеровских линий от возраста, металличности и удельного содержания гелия при расчете синтетических спектров суммарного излучения скоплений с учетом стадии горизонтальной ветви. Выяснено, что данная зависимость обусловлена изменениями температуры и светимости звезд

горизонтальной ветви и их вклада в суммарный спектр в моделях звездной эволюции.

2. Показано, что оптимальное определение параметров изохрон звездной эволюции для расчета синтетических спектров скоплений позволяет достичь не только согласия между модельным и наблюдаемым спектрами, но и соответствия выбранных изохрон результатам звездной фотометрии для исследуемых объектов.
3. Определено содержание химических элементов Fe, C, Mg, Ca, Mn, Ti и Sr для восьми внегалактических шаровых скоплений очень низкой металличности $[Fe/H] < -2$ dex, четырех шаровых скоплений M31 промежуточной металличности $-1.1 < [Fe/H] < -0.75$ dex и скопления Галактики с низкой поверхностной яркостью NGC6535 по спектрам их суммарного излучения. Для всех объектов впервые определены удельное содержание гелия и возраст, согласно выбранным для моделирования спектров скоплений изохронам. Для пяти объектов выборки получено низкое содержание магния $[Mg/Fe] < 0$ dex по сравнению с содержанием для звезд поля Галактики $[Mg/Fe] \sim 0.4$ dex, что свидетельствует о присутствии в скоплениях множественных звездных населений. Показано удовлетворительное согласие содержания остальных элементов с литературными данными для звезд поля Галактики.
4. Для восьми шаровых скоплений Галактики с низкой поверхностной яркостью впервые определены значения абсорбционных индексов в Ликской системе по спектрам их суммарного излучения. Для семи из них найдены яркие скопления – аналоги нашей Галактики со сходными значениями индексов. Для всех восьми объектов определены возраст, металличность и содержание элементов α - процесса путем сравнения измеренных Ликских индексов с литературными модельными значениями.

Научная новизна:

1. Выполнен анализ наблюдательных данных, результаты для которых ранее не публиковались: (i) Выполнена обработка и анализ спектров внегалактических шаровых скоплений,

- полученных в результате наблюдений по программе Шариной М. Е. на телескопе БТА. (ii) Выполнен анализ спектров суммарного излучения шаровых скоплений Галактики, полученных Шариной М. Е. на 1.93-м телескопе обсерватории Верхнего Прованса (ОНР). (iii) Выполнена обработка архивных прямых снимков, полученных на VLT.
2. Для всех внегалактических шаровых скоплений выборки впервые представлены параметры звезд горизонтальной ветви, заданные выбранными для анализа спектров изохронами.
 3. Для скоплений Bol20, Bol50 (в M31) и скопления [CS82]C39 (в M33) впервые получены оценки возрастов из анализа спектров их суммарного излучения методом, описанным в главе 1.
 4. Для восьми внегалактических скоплений с очень низкой металличностью, а также скоплений Bol20 и Bol50 из выборки скоплений M31 промежуточной металличности впервые получено содержание [C/Fe]. Для скоплений Bol2, Bol20, Bol50, Bol165, Bol317 (в M31) и [CS82]C39 (в M33) впервые получено содержание химических элементов Mg, Ca, Ti, Cr, Mn. Для скоплений Bol6, Bol45 (в M31) впервые определено содержание [Mn/Fe], [Cr/Fe].
 5. Для выборки скоплений Галактики низкой поверхностной яркости впервые представлен анализ спектров их суммарного излучения, определены значения абсорбционных индексов, оценки возрастов и средние значения содержания элементов α -процесса [α /Fe].

Научная и практическая значимость:

Основные результаты, представленные в данном исследовании, вносят вклад в исследование фундаментальных параметров внегалактических шаровых скоплений, в том числе наиболее низкометаллических шаровых скоплений, которые чрезвычайно редки. Исследован спектр суммарного излучения единственного известного скопления с $[Fe/H]=-2.8$ dex, EHT8 в гало M31. Полученные в данной работе изохронные значения возраста и Y , а также химический состав скоплений могут быть использованы исследователями в процессе изучения нуклеосинтеза и эволюции галактик и их подсистем.

Разработанный алгоритм оптимального подбора изохрон для расчета синтетических спектров скоплений, выполняющий минимизацию отклонений между наблюдаемым и модельным спектрами, может быть использован исследователями для анализа абсорбционных спектров суммарного излучения скоплений и звездных комплексов.

Впервые оцифрованы зависимости между шириной на половине интенсивности и глубиной бальмеровских линий от возраста и металличности Z в синтетических спектрах суммарного излучения шаровых скоплений с использованием изохрон звездной эволюции. Данные зависимости помогают в оценке вклада звезд горизонтальной ветви в спектр суммарного излучения скоплений и правильной оценке их возраста.

Выполнено определение Ликских индексов, возраста и металличности шаровых скоплений Галактики низкой поверхностной яркости, изучение которых осложнено удаленностью этих объектов или ослаблением света пылью вблизи плоскости Галактики. Результаты могут быть использованы для изучения свойств их звездных населений, а также возможной принадлежности этих объектов звездным потокам.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

1. Семинар САО РАН (10.12.20, САО РАН). Устный доклад: «Свойства звездных населений восьми галактических шаровых скоплений с низкой центральной поверхностной яркостью» (Маричева М. И.).
2. Конференция «ВАК-2021» (23-28.08.21, Москва). Постерный доклад: «Исследование интегральных спектров четырех шаровых скоплений М31» (Маричева М. И.).
3. «Конкурс-конференция работ сотрудников САО-2022» (08.02.22, САО РАН). Устный доклад: «Исследование интегральных спектров четырех шаровых скоплений М31» (Маричева М. И.).
4. Конференция «Многоликая Вселенная: теория и наблюдения - 2022» (23-27.07.22, САО РАН). Постерный доклад: «Глубина и ширина Бальмеровских линий в спектрах суммарного излучения шаровых скоплений» (Маричева М. И. и Шарина М. Е.).

5. Конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2022 (HEA-2022)» (19-22.12.22, ИКИ РАН). Постерный доклад: «Исследование семи низкометаллических шаровых скопления в окрестностях М31» (Маричева М. И., Шарина М. Е., Шиманский В. В.).
6. «Конкурс-конференция работ сотрудников САО-2023» (08.02.23, САО РАН). Устный доклад: «Анализ интегральных спектров семи шаровых скоплений в М31» (Маричева М. И.).
7. Конференция «Физика звезд: теория и наблюдения» (26-30.06.23, ГАИШ МГУ). Устный доклад: «Моделирование спектров суммарного излучения внегалактических шаровых скоплений» (Маричева М. И., Шарина М. Е., Шиманский В. В.).

Личный вклад. Автор принимал участие в наблюдениях на телескопе БТА по программе М. Е. Шариной «Свойства звездных населений внегалактических шаровых скоплений». Автором выполнялась редукция полученных длиннощелевых спектров суммарного излучения шаровых скоплений. Автором определялись возраст, удельное содержание гелия Y и химический состав по методике из [18; 22] для всех объектов данного исследования. Для скоплений Галактики рассчитывались значения абсорбционных индексов в Ликской системе и проводилось сравнение полученных значений с модельными. Также автором выполнено исследование влияния вклада звезд горизонтальной ветви в суммарный спектр шарового скопления. Выполнена разработка программы автоматического подбора изохрон звездной эволюции для расчета синтетических спектров.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 публикациях в том числе из списка ВАК:

1. Sharina M. E., Maricheva M. I., Kniazev A. Y., Shimansky V. V., Acharova I. A. Horizontal branch structure, age, and chemical composition for very metal-poor extragalactic globular clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society — 2024 — vol. 528, no. 4 — 7165—7185.
2. Sharina M. E., Maricheva M. I. Properties of Stellar Populations of Eight Galactic Globular Clusters with Low Central Surface

Brightness // Astronomy Reports — 2021 — vol. 65, no. 6 — 455—476.

3. Maricheva M. I. Study of Integrated Spectra of Four Globular Clusters in M31 // Astrophysical Bulletin — 2021 — vol. 76, no 4 — 389—404.
4. Sharina M. E., Maricheva M. I. Chemical composition and ages of four globular clusters in M31 from the analysis of their integrated-light spectra // Open Astronomy — 2022 — vol. 31, no. 1 - 118-124.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 101 страницы с 27 рисунками и 18 таблицами. Список литературы содержит 168 наименований.

Во **введении** обсуждается актуальность выбранной темы, определены цели и задачи, сформулированы положения и результаты, выносимые на защиту, обсуждается новизна и научная и практическая значимость данного исследования, указан личный вклад автора. Также приводится список публикаций в которых изложены основные результаты исследования с указанием личного вклада автора.

В **главе 1** приводится описание используемых в работе методов анализа спектров суммарного излучения. В разделе 1.1 описывается метод популяционного синтеза из [18; 22] для определения возраста, удельного содержания гелия и химического состава шаровых скоплений, основанный на сравнении спектров их суммарного излучения с синтетическими спектрами. В разделе 1.1.2 приводится описание программы подбора теоретических изохрон звездной эволюции для оптимального описания наблюдаемого спектра суммарного излучения. В разделе 1.2 обсуждается Ликская система абсорбционных индексов и способ расчета индексов.

В **главе 2** представлены результаты анализа спектров суммарного излучения очень бедных металлами ($[Fe/H] < -2$ dex) внегалактических шаровых скоплений в галактиках групп M31 и Centaurus A. Основные наблюдательные характеристики скоплений приводятся в таблице 2. В разделе 2.2 описываются наблюдательные данные, полученные с помощью 6-м телескопа САО РАН (БТА), и архивные данные 6,5-м телескопа ММТ. В таблице 5 приводятся параметры изохрон, подобранных для моделирования спектров суммарного излучения скоплений. Полученное содержание

химических элементов дано в таблицах 7, 8. В разделе 2.3 описывается исследование влияния звезд стадии горизонтальной ветви на интенсивность бальмеровских линий в синтетических спектрах суммарного излучения скопления. В разделе 2.4 выполнено сравнение изохрон, подобранных при моделировании спектров суммарного излучения, с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина» для скоплений [H76b] 3, Vol317 и EXT8. Также для объектов были определены модули расстояния $(m-M)_0$ и избытки цвета $E(B-V)$, которые даны в таблице 6. В разделе 2.5 показано сравнение химического состава шаровых скоплений с соответствующим содержанием, полученным методом спектроскопии высокого разрешения для звезд поля Галактики ([23—27]) и шаровых скоплений в M31 из работ [14] и [28]. В разделе также обсуждаются возможные причины расхождения полученного в этой работе содержания с литературными.

В главе 3 представлены результаты анализа спектров суммарного излучения четырех ярких шаровых скоплений промежуточной металличности ($-1.1 < [Fe/H] < -0.75$ dex) в галактике M31. Основные характеристики исследуемых скоплений приводятся в таблице 9. В разделе 3.2 описываются наблюдения спектров суммарного излучения скоплений исследования, полученные на 6-м телескопе САО РАН (БТА), и их обработка. Также описывается процесс подбора теоретических изохрон Bertelli et al. 2008 [29] и Pietrinferni et al. 2004 [30] для моделирования синтетических спектров. В таблицах 11 и 12 приведено полученное содержание химических элементов. В разделе 3.3 приводится сравнение подобранных для моделирования спектров изохрон с наблюдаемыми диаграммами «цвет-звездная величина» скоплений Vol6 и Vol45. В разделе 3.3.1 описывается процедура определения расстояния до скоплений Vol6 и Vol45 по светимости вершины ветви красных гигантов. В таблице 13 приводятся полученные значения модулей расстояний до скоплений $(m-M)_0$ и избытки цвета $E(B-V)$ в сравнении с литературными данными. В разделе 3.4 приводится сравнение результатов анализа спектров с литературными данными для шаровых скоплений M31 ([16] и [28]) и звезд поля Галактики из [24]. Также обсуждаются возможные причины расхождения полученных в этом исследовании содержаний с литературными данными.

В главе 4 представлены результаты анализа спектров суммарного излучения восьми шаровых скоплений Галактики с относительно низкой светимостью и звездной плотностью. Основные наблюдательные данные для исследуемых скоплений и других скоплений нашей Галактики с похожими свойствами приводятся в таблице 15. В разделе 4.2 описываются архивные наблюдательные спектральные данные, полученные на 1.93-м телескопе ОНР. В разделе 4.3 дано сравнение на диагностических диаграммах значений абсорбционных Ликских индексов, полученных для объектов исследования, с соответствующими модельными индексами из [31; 32]. В таблицах 17, 18 приводятся полученные возраст и металличность в сравнении с соответствующими литературными данными. Описаны результаты подбора химического состава для скопления NGC6535 с использованием метода, описанного в разделе 4.3.1. В разделе 4.4 представлены результаты звездной фотометрии скопления Pal10 с использованием прямых снимков из архива VLT. Здесь же приводится анализ диаграмм «цвет-звездная величина» Pal10 и NGC6426, построенных по данным Gaia DR3, и полученные значения расстояний и избытков цвета. В разделе 4.5 дано обсуждение результатов для каждого исследуемого скопления в отдельности.

В заключении обобщаются основные результаты описанного здесь исследования.

Список литературы

1. Lada C. J., Lada E. A. Embedded Clusters in Molecular Clouds // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — янв. — т. 41. — с. 57—115.
2. Portegies Zwart S. F., McMillan S. L. W., Gieles M. Young Massive Star Clusters // *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — сент. — т. 48. — с. 431—493.
3. Navarro J. F., White S. D. M. Simulations of dissipative galaxy formation in hierarchically clustering universes-2. Dynamics of the baryonic component in galactic haloes // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1994. — март. — т. 267, № 2. — с. 401—412.

4. The merger that led to the formation of the Milky Way's inner stellar halo and thick disk / A. Helmi et al. // *Nature*. — 2018. — окт. — т. 563, № 7729. — с. 85—88.
5. The Large-scale Structure of the Halo of the Andromeda Galaxy. I. Global Stellar Density, Morphology and Metallicity Properties / R. A. Ibata et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — янв. — т. 780, № 2. — с. 128.
6. Sharina M. E. Properties and Formation of Star Clusters // *Astrophysics*. — 2016. — т. 59, № 1. — с. 126—144.
7. Properties of stellar generations in globular clusters and relations with global parameters / E. Carretta et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2010. — июнь. — т. 516. — A55.
8. Prantzos N., Charbonnel C., Iliadis C. Revisiting nucleosynthesis in globular clusters. The case of NGC 2808 and the role of He and K // *Astronomy and Astrophysics*. — 2017. — дек. — т. 608. — A28.
9. Milone A. P., Marino A. F. Multiple Populations in Star Clusters // *Universe*. — 2022. — июнь. — т. 8, № 7. — с. 359.
10. Lee H.-c., Yoon S.-J., Lee Y.-W. The $H\beta$ Index as an Age Indicator of Old Stellar Systems: The Effects of Horizontal-Branch Stars // *The Astronomical Journal*. — 2000. — авг. — т. 120, № 2. — с. 998—1005.
11. What is a globular cluster? An observational perspective / R. Gratton et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2019. — т. 27, № 1. — с. 8.
12. D'Antona F., Caloi V., Tailo M. On the blind use of statistical tools in the analysis of globular cluster stars // *Nature Astronomy*. — 2018. — т. 2. — с. 270—272.
13. Investigating the Metallicity-Mixing-length Relation / L. S. Viani et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2018. — май. — т. 858, № 1. — с. 28.
14. The chemical composition of globular clusters in the Local Group / S. S. Larsen et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2022. — апр. — т. 660. — A88.
15. Colucci J. E., Bernstein R. A., McWilliam A. Globular Cluster Abundances from High-resolution, Integrated-light Spectroscopy. II. Expanding the Metallicity Range for Old Clusters and Updated Analysis Techniques // *The Astrophysical Journal*. — 2017. — янв. — т. 834, № 2. — с. 105.
16. Infrared high-resolution integrated light spectral analyses of M31 globular clusters from APOGEE / C. M. Sakari et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2016. — т. 829, № 2. — с. 116.

17. Benítez-Llambay A., Clariá J. J., Piatti A. E. Fast Integrated Spectra Analyzer: A New Computational Tool for Age and Reddening Determination of Small Angular Diameter Open Clusters // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2012. — февр. — т. 124, № 912. — с. 173.
18. Sharina M. E., Shimansky V. V., Shimanskaya N. N. Analysis of Integrated Light Spectra of Galactic Globular Clusters // Astrophysical Bulletin. — 2020. — т. 75, № 3. — с. 247—266.
19. Spectroscopic ages and metallicities of stellar populations: validation of full spectrum fitting / M. Koleva et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2008. — апр. — т. 385, № 4. — с. 1998—2010.
20. ULySS: a full spectrum fitting package / M. Koleva et al. // Astronomy and Astrophysics. — 2009. — июль. — т. 501, № 3. — с. 1269—1279.
21. Evolutionary stellar population synthesis with MILES - I. The base models and a new line index system / A. Vazdekis et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2010. — июнь. — т. 404, № 4. — с. 1639—1671.
22. Horizontal branch structure, age, and chemical composition for very metal-poor extragalactic globular clusters / M. E. Sharina et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2024. — март. — т. 528, № 4. — с. 7165—7185.
23. Smith G. H., Martell S. L. Comparing Deep Mixing in Globular Cluster and Halo Field Giants: Carbon Abundance Data from the Literature // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 2003. — окт. — т. 115, № 812. — с. 1211—1219.
24. Stellar Chemical Signatures and Hierarchical Galaxy Formation / K. A. Venn et al. // The Astronomical Journal. — 2004. — сент. — т. 128, № 3. — с. 1177—1195.
25. Ishigaki M. N., Aoki W., Chiba M. Chemical Abundances of the Milky Way Thick Disk and Stellar Halo. II. Sodium, Iron-peak, and Neutron-capture Elements // The Astrophysical Journal. — 2013. — июль. — т. 771, № 1. — с. 67.
26. Observational constraints on the origin of the elements. III. Evidence for the dominant role of sub-Chandrasekhar SN Ia in the chemical evolution of Mn and Fe in the Galaxy / P. Eitner et al. // Astronomy and Astrophysics. — 2020. — март. — т. 635. — A38.

27. The Pristine survey - XV. A CFHT ESPaDOnS view on the Milky Way halo and disc populations / R. Lucchesi et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2022. — март. — т. 511, № 1. — с. 1004—1021.
28. Colucci J. E., Bernstein R. A., Cohen J. G. The Detailed Chemical Properties of M31 Star Clusters. I. Fe, Alpha and Light Elements // *The Astrophysical Journal*. — 2014. — т. 797, № 2. — с. 116.
29. Scaled solar tracks and isochrones in a large region of the Z-Y plane. I. From the ZAMS to the TP-AGB end for 0.15-2.5 $\{M\}_{\odot}$ stars / G. Bertelli et al. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2008. — т. 484, № 3. — с. 815—830.
30. A Large Stellar Evolution Database for Population Synthesis Studies. I. Scaled Solar Models and Isochrones / A. Pietrinferni et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — т. 612, № 1. — с. 168—190.
31. Thomas D., Maraston C., Bender R. New clues on the calcium underabundance in early-type galaxies // *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*. — 2003. — июль. — т. 343, № 1. — с. 279—283.
32. Thomas D., Maraston C., Korn A. Higher-order Balmer line indices in α /Fe-enhanced stellar population models // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2004. — июнь. — т. 351, № 1. — с. L19—L23.

Бесплатно

Маричева Маргарита Игоревна

Исследование спектров суммарного излучения звездных
скоплений нашей и других галактик

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____