

ОБЗОРЫ

СВОЙСТВА И ПУТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ

М.Е.ШАРИНА

Поступила 20 сентября 2015

Принята к печати 16 декабря 2015

Решение многих ключевых задач в астрофизике связано с исследованием свойств звездных скоплений, например: изучение закономерностей звездной эволюции и нуклеосинтеза, историй звездообразования галактик, динамических процессов формирования галактик и их подсистем, калибровки фундаментальной шкалы расстояний во Вселенной, функции светимости звезд и звездных скоплений. Данный обзор знакомит читателя с современными наблюдательными и теоретическими данными о закономерностях формирования и эволюции звездных скоплений в нашей и других галактиках. Формулируются существующие в данной области нерешенные проблемы, обсуждаются поиски путей их решения. В частности, одними из наиболее важных на сегодняшний день наблюдательных и теоретических задач являются: 1) наиболее полное объяснение физических процессов в молекулярных облаках, приводящих к формированию и эволюции массивных звездных скоплений; 2) наблюдение этих объектов на разных стадиях эволюции, в том числе и протоскоплений, в диапазонах длин волн, где поглощение света межзвездной пылью минимально; 3) сравнение свойств массивных звездных скоплений в разных галактиках, и галактик в стадии наиболее активного звездообразования на разных красных смещениях. Основной целью решения всех этих задач является объяснение открытых в конце XX века вариаций содержания химических элементов и множественных популяций звезд в скоплениях.

Ключевые слова: *звездные скопления: формирование*

1. *Введение.* Большая часть звезд в нашей галактике сформировалась в скоплениях (Lada & Lada, 2003). Звездные скопления являются свидетелями эпизодов наиболее интенсивного звездообразования в галактиках (см., например, Zwart et al., 2010). Изучение свойств, происхождения и путей эволюции звездных скоплений важно для решения фундаментальных задач астрофизики. Перечислим основные вопросы, с которыми имеют дело исследователи галактических и внегалактических молодых и старых звездных скоплений: 1) каковы структурные, динамические, химические и прочие не искаженные эффектами наблюдательной селекции характеристики звездных скоплений разного возраста в нашей и других галактиках; 2) в результате каких физических процессов формируются скопления с такими свойствами в галактиках разных морфологических типов и в разных галактических подсистемах (балджи, диски,

звездные гало), отличающихся свойствами межзвездной среды и средним возрастом звездного населения; 3) как эволюционируют скопления в зависимости от окружающих условий, какой процент начальной массы они теряют, как меняется в процессе эволюции химический состав звезд, входящих в скопление. С этими вопросами связаны многие нерешенные проблемы современной астрофизики, например: происхождение множественных звездных населений в шаровых скоплениях, функции масс звездных скоплений и средне-массивных черных дыр¹ в галактиках; форма начальной функции масс звезд в скоплениях и в галактическом поле; доля двойных звезд и мало-массивных черных дыр.

В этой обзорной статье мы сосредоточимся, в основном, на звездных скоплениях нашей галактики, поскольку для них имеется наиболее полный набор наблюдательных данных: глубокие диаграммы "цвет-звездная величина" (CMD), достигающие точки поворота Главной последовательности; спектры высокого разрешения для ярчайших звезд - членов скоплений; интегральные спектральные и фотометрические характеристики для скоплений в целом в разных диапазонах длин волн. В некоторых случаях мы будем проводить сравнение свойств галактических и внегалактических скоплений.

2. *Немного истории.* История детального изучения звездных скоплений в нашей стране и за рубежом насчитывает более сотни лет. Успехи в данной области, как и в целом в астрофизике, определяются прогрессом наблюдательной техники. Первые работы были посвящены каталогизированию скоплений и фотометрическому их исследованию с помощью фотографических пластинок. Вспомним, например, труды Б.В.Кукаркина, А.С.Шарова, Н.Shapley, W.Baade, S. van den Berg, P.Hodge. Доступные в наше время электронные базы данных, такие как ADS (SAO NASA Astrophysics Data System (<http://www.adsabs.harvard.edu/>), SIMBAD Astronomical Database (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>) и другие, позволяют получить доступ практически ко всем научным статьям, посвященным звездным скоплениям. Необходимо упомянуть работы исследователей звездной динамики школы В.А.Антонова, выдающихся ученых в области теоретической звездной астрофизики: В.В.Соболева, В.А.Амбарцумяна. Достижения этих ученых и их замечательных учеников и последователей продолжают активно использоваться и цитироваться во всем мире.

Важные аспекты исследования звездной эволюции и нуклеосинтеза, калибровки фундаментальной шкалы расстояний во Вселенной и ряд других задач решаются с использованием CMD и спектров звезд рассеянных

¹ Средне-массивной считается черная дыра с массой $100-10^6$ масс Солнца. Предполагается, что такие объекты находятся в активных ядрах галактик низкой светимости (см., например, Merritt, 2013).

и шаровых скоплений. Под этим подразумевается, в частности: определение светимости и цветовых характеристик точки поворота Главной последовательности, вершины ветви красных гигантов и других важных эпизодов эволюции звезд, служащих для определения расстояния; подгонка теоретических моделей звездной эволюции к наблюдаемым диаграммам "цвет-звездная величина"; изучение зависимости период-светимость для переменных звезд; получение астрометрических, статистических и спектральных параллаксов для звезд в скоплениях. Подробно вопросы эволюции звезд в скоплениях освещены, например, в книгах П.Н.Холопова "Звездные скопления" (1981), В.В.Карней "Stellar evolution in globular clusters" (2001). В книге Карней детально рассматриваются методы определения возраста и металличности галактических шаровых скоплений, сравнение свойств звездных населений скоплений и подсистем нашей Галактики (толстого и тонкого дисков, балджа и гало) и о вкладе процессов звездообразования в скоплениях в формирование этих подсистем. В книге W.E.Harris "Star clusters" (2001), и статье "Globular cluster systems: formation models and case studies" (1999) обобщаются сведения о пространственно кинематической структуре шаровых скоплений. О молодых звездных скоплениях, комплексах и ассоциациях и астрофизических проблемах, связанных с этими объектами, рассказывается в статьях Ю.Н.Ефремова и в его книге "Очаги звездообразования в галактиках" (Efremov, 1989). Звездный состав и различные аспекты эволюции звездных скоплений исследуются многими российскими учеными, в том числе: сотрудниками отдела изучения Галактики и переменных звезд Государственного Астрономического института им. Штернберга Н.Н.Самусем, А.С.Расторгуевым, Ю.Н.Ефремовым, Е.В.Глушковой, В.Г.Сурдиным и другими.

С появлением больших наземных телескопов, спектрографов высокого разрешения и развитием внеатмосферной астрономии процесс изучения звездных скоплений в Галактике и за ее пределами значительно ускорился. В оптическом диапазоне были открыты предельно слабые по причине удаленности и/или затенения пылью шаровые и рассеянные звездные скопления, в том числе: в центральных областях Галактики и в спиральных рукавах. Были обнаружены молодые массивные скопления в нашей и других галактиках (см., например, обзор Zwart et al., 2010 и ссылки в нем).

До недавнего времени шаровые скопления считались представителями простых звездных населений, состоящими из звезд одного возраста и химического состава. Открытие множественных последовательностей на глубоких диаграммах "цвет-звездная величина" Галактических шаровых скоплений, а также различий в содержании химических элементов, входящих в эти объекты звезд, привело к революционному изменению научных взглядов на формирование скоплений и Галактики в целом (см., например,

обзор Gratton et al., 2004). Появление новых наблюдательных данных заставило критически пересмотреть теорию формирования и эволюции звездных скоплений в зависимости от эпохи и окружающих условий в межзвездной и межгалактической среде. Появились новые гидродинамические модели турбулентных процессов в газо-звездной среде при формировании скоплений. Возникла настоятельная потребность получения новых спектральных и фотометрических наблюдательных данных с использованием космических и больших наземных телескопов в различных диапазонах длин волн.

3. Разнообразные виды звездных скоплений.

3.1. *Молодые массивные звездные скопления.* С запуском Космического телескопа Хаббла и других космических миссий, а также крупных наземных телескопов особое внимание исследователей начали привлекать массивные богатые звездами скопления, молодые и старые, открываемые в нашей и других галактиках, например: в Большом и Малом Магеллановых Облаках (van den Bergh, 1994), NGC1705 и NGC1569 (Ho & Filippenko, 1996a, b), M82 (Keto et al., 2005), во взаимодействующих галактиках, таких как Антенны (Whitmore & Schweizer, 1995, Johnson et al., 2015, Schweizer & Seitzer, 2007). Тесная корреляция между уровнем звездообразования в той или иной части галактики и числом молодых звездных скоплений недвусмысленно свидетельствует о том, что процесс формирования ШС продолжается и по сей день, и что основные свойства наиболее массивных молодых скоплений соответствуют таковым у предшественников старых ШС Галактики (например, Efremov & Elmegreen, 1998, McLaughlin & Fall, 2008). К молодым объектам такого класса в иностранной литературе применяются термины: "young massive cluster" (молодое массивное скопление), "super star cluster" (сверхскопление). Существуют также очень молодые, с возрастом порядка и менее десятка миллионов лет массивные скопления, погруженные в плотную газопылевую оболочку, как бабочка в кокон ("embedded cluster"). Свойства молодых массивных скоплений (здесь и далее - MMC) изучаются прежде всего посредством наблюдений в инфракрасном и радиодиапазонах длин волн, где поглощение излучения пылью минимально. Выяснилось, что массы MMC составляют $10^4 - 10^6 M_{\odot}$, а возраст меньше 100 млн лет. Такие скопления, включающие сотни молодых массивных звезд, являются в среднем на порядок более плотными, чем рассеянные с центральной плотностью $\rho_c > 10^3 M_{\odot} \text{ пк}^{-3}$ ($\sim 10^4$ звезд пк^3) (Zwart et al., 2010). Johnson et al., (2015) с помощью радиотелескопа ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array) обнаружили плотное молекулярное облако с массой более $5 \cdot 10^6 M_{\odot}$ в стадии эволюции непосредственно предшествующей коллапсу и формированию скопления. Масса и кинетическая энергия

объекта велики. Авторы считают, что менее 1 млн лет необходимо этому облаку до начала гравитационного коллапса и процесса звездообразования. ММС старше 10 млн лет уже не показывают признаков текущего звездообразования (Bastian et al., 2013). Понимание закономерностей формирования и эволюции ММС требует рассмотрения как крупномасштабных процессов, происходящих в галактиках в периоды активного звездообразования, так и локальных явлений в межзвездной среде, приводящих к формированию звезд различных масс.

3.2. Шаровые и рассеянные звездные скопления. Чем отличаются шаровые скопления (ШС) от рассеянных (РС)? Есть ли между ними четкая граница, или основная причина различий в свойствах этих объектов кроется в эпохе и окружающих условиях их формирования? Эти вопросы до сих пор окончательно не решены. Однако имеется значительный прогресс в их решении в наблюдательной и теоретической областях.

ШС в нашей Галактике имеют возраст более 8 млрд. лет. Это основное их отличие от РС, возраст которых менее 300 млн. лет, и от ШС в других галактиках, например, в Большом и Малом Магеллановых облаках - карликовых иррегулярных спутников Млечного Пути. ШС в других галактиках могут быть разного возраста. Наблюдательный факт различия в возрастах и других наблюдательных характеристиках между ШС и РС создает предпосылки для использования характеристик скоплений для детального исследования историй звездообразования галактик и моделирования физических условий в подсистемах галактик в моменты активного формирования в них звездных скоплений.

Табл.1 в статье Zwart et al., (2010) суммирует основные наблюдаемые параметры звездных скоплений различных типов в Галактике: возраст, массу, вириальный радиус, плотность ядерной части, металличность, характерное динамическое время (t_{dyn}) и время релаксации (t_r). Кроме ШС и РС, в таблице приведены данные для молодых массивных скоплений. Последние две характеристики, приведенные в табл.1 (Zwart et al., 2010), являются фундаментальными для самогравитирующих систем и означают (Spitzer, 1987): t_{dyn} - время, необходимое для пересечения звездой скопления и t_r - время перехода в тепловое равновесие звездной системы после столкновения двух звезд. Динамическое время определяется размерами и массой скопления и является примерно одинаковым для всех трех видов скоплений ($t_{dyn} \sim 1$ млн лет). Для ШС эта характеристика может быть больше 1 млн лет, а для РС - меньше 1 млн лет. Время релаксации тем больше, чем больше средняя дисперсия скоростей звезд, принадлежащих скоплению, и тем меньше, чем больше локальная плотность вещества. Характерные времена релаксации для ШС на порядок больше, чем для РС и молодых массивных скоплений.

Шаровые скопления в среднем на 2 порядка массивнее рассеянных. ММС в нашей Галактике занимают промежуточное положение по массе между РС и ШС. Средний вириальный радиус ШС, т.е. радиус, на котором суммарная потенциальная энергия скопления уравнивается кинетической, на порядок больше, чем у РС (10 и 1 пк). Диапазоны плотностей ШС, ММС и РС значительно перекрываются. Однако ШС и ММС имеют одинаковую тенденцию к повышенной средней плотности ($\rho_c > 10^3 M_\odot \text{пк}^{-3}$). В то время как ШС распределены в гало и балдже Галактики по степенному закону, если подсчитывать их количество в кольцах вокруг центра галактик, РС и ММС имеют совсем другое распределение. Молодые РС сконцентрированы непосредственно в диске, а старые РС - в более толстом слое вещества над плоскостью Галактики, а именно: в основном во внешнем диске Галактики вплоть до галактических высот 3 кпк. Заметим, что наблюдаемая картина распределения РС в Галактике искажена эффектами наблюдательной селекции. По причине значительного поглощения излучения пылью в плоскости Галактики и низкой светимости РС, по сравнению с ШС и ММС, РС уверенно наблюдаются в основном в радиусе примерно 3-4 кпк в окрестности Солнца. Почти все известные на сегодняшний день ММС были обнаружены в диске Галактики внутри солнечного круга. Эти объекты имеют тенденцию концентрации к центральным областям, бару и спиральным рукавам, где, по всей видимости, плотность газа и уровень турбулентции достаточно высоки, что способствует их формированию.

В основном, ШС намного беднее металлами, чем РС и молодые массивные скопления. Молодые скопления формировались из вещества диска, обогащенного химическими элементами на протяжении прошедших миллиардов лет эволюции Галактики. Типичная металличность ШС составляет 1-3 процента от солнечной. Металличность же РС порядка и больше солнечной. Интересно, что старые РС с возрастом больше 4 млрд лет также имеют металличность порядка солнечной и повышенное содержание легких элементов. Приведем пример. Происхождение и свойства звездного населения далекого скопления ВН176 были мало известны до недавнего времени (Sharina et al., 2014 и ссылки в этой статье). В данной работе было выяснено, что ВН176 является рассеянным скоплением толстого диска Галактики. Оно находится на расстоянии 15.2 ± 0.2 кпк от Солнца и на высоте 1.15 кпк над плоскостью Галактики. Это богатый металлами и легкими элементами объект с возрастом 7 млрд лет. Происхождение его не выяснено, однако есть предположение, что он возник в результате столкновения карликового спутника, или высокоскоростного облака с диском Галактики. Такие богатые металлами и легкими элементами скопления наблюдаются, в основном, на галактических высотах больше килопарсека

(см. например, Gozha et al., 2012). Их всего 16 (Sharina et al., 2014, табл.А4). Средние их характеристики следующие: $[Fe/H] = -0.14 \pm 0.28$ dex, $[Mg/Fe] = 0.16 \pm 0.1$ dex, $Age = 5.8 \pm 1.8$ Gyr и абсолютные величины в диапазоне $M_V \sim -4.9 \div -1.1$. По-видимому, они движутся по вытянутым орбитам, наклоненным относительно плоскости диска. Высокое содержание железа и легких элементов может означать, что такие скопления формировались частично под влиянием сверхновых второго типа при более мощных вспышках звездообразования, чем типичные РС. Альтернативное предположение состоит в том, что они могли формироваться в центральных частях Галактики, а затем по какой-то причине покинуть место своего рождения на большой скорости (Acharova & Shevtsova, 2016).

4. *Современные взгляды на вопросы формирования и эволюции звездных скоплений.*

4.1. *Функция масс звездных скоплений.* В работе Elmegreen & Efremov (1997) было показано, что в природе действует универсальный механизм формирования звездных скоплений, шаровых и рассеянных. Эти идеи были развиты в последующих исследованиях этих и других авторов (например, Elmegreen, 2002, Vesperini, 2001, Kruijssen, 2012, Walker et al., 2015). Скопления рождаются в молекулярных облаках в условиях турбулентии, высокого газового давления и повышенной суммарной вириальной плотности звезд, газа и темной материи. Различия в массах и структурных характеристиках скоплений возникают как следствие различий газового давления в момент формирования, а также благодаря различиям в физических условиях на протяжении последующей эволюции. Форма функции масс (=светимости) молодых звездных скоплений в данной конкретной галактике, или области галактики всегда очень похожа на функцию масс межзвездных облаков: $N(M)dM \propto M^{-2}dM$. Это степенное распределение справедливо в полном диапазоне масс скоплений ($10^2 \div 10^8 M_\odot$) и называется функцией Шехтера (Schechter, 1976, Kruijssen & Cooper, 2012).

Начиная с 70-х годов прошлого века известно, что распределение старых ШС по звездным величинам напоминает функцию Гаусса (Hanes, 1977, Harris & Racine, 1979). Surdin (1979) и Racine, Dordrecht (1980) однако отмечали, что массивный конец функции светимости галактических ШС может быть с успехом описан степенной функцией. Яркий конец функции светимости незначительно меняется в процессе эволюции. Завал функции масс на маломассивном конце, наблюдаемый для систем старых ШС с возрастом порядка 10 млрд лет, является следствием разрушения скоплений. Пик функции светимости старых ШС определяется свойствами иерархической структуры из молекулярных облаков межзвездного газа. Этот пик не зависит от светимости родительской галактики и не определяется

массой Джинса в момент рекомбинации, как предполагалось ранее (Peebles & Dicke, 1968). Механизмы разрушения ШС в Млечном Пути (Fall & Rees, 1977; Gnedin & Ostriker, 1997) включают в себя: 1) соударения с богатыми горячим и холодным газом диска и балджа; 2) динамическое обдирание; 3) релаксацию двух тел и 4) "испарение" маломассивных звезд. Во внешних частях галактики два последних механизма работают эффективнее других. Таким образом наблюдаемая форма функции масс ШС является функцией только лишь возраста и не зависит от светимости родительской галактики. Согласно этому сценарию, значительная часть звезд галактического гало должна была появиться из разрушенных маломассивных ШС (см. Surdin, 1995, Murali & Weinberg, 1997). Современные наблюдения многочисленных звездных потоков вокруг ШС Галактики качественно подтверждают эти выводы (например, Lisanti et al., 2015 и ссылки в этой статье). Всевозможные модификации механизмов разрушения, результаты численного моделирования эволюции скоплений продолжают разрабатываться и по сей день.

4.2. Физические процессы в молекулярных облаках, приводящие к формированию звездных скоплений. Молодые богатые скопления содержат наиболее массивные звезды со светимостями порядка $L > 100 - 400 L_{\odot}$. Такие звезды сыграли немаловажную роль в реионизации межзвездной среды на ранних этапах формирования иерархической структуры Вселенной. Самые массивные звезды, формирующиеся в молекулярных облаках, являются основными объектами, влияющими на формирование и эволюцию звездных скоплений (Zinnecker & Yorke, 2007, Peretto et al., 2013, Onishi, 2013). Такие звезды оказывают динамическое и ионизирующее воздействие на окружающую среду посредством звездных ветров и ультрафиолетового излучения. Они обогащают окружающее вещество химическими элементами при вспышках сверхновых.

Современные наблюдения гигантских молекулярных облаков в нашей Галактике и ближайших ее карликовых соседях, Большом и Малом Магеллановых облаках, с помощью современных радио и оптических телескопов позволяют исследовать процессы, предшествовавшие формированию звездных скоплений и зависимость этих явлений от окружения (Subramanian & Subramaniam, 2010; Fukui & Kawamura, 2010). Наблюдения показывают, что слои молекулярного газа имеют сложную волокнистую структуру, свидетельствующую о турбулентных процессах, протекающих в межзвездной среде. Звездные скопления формируются на пересечении плотных газовых волокон (Schneider et al., 2012, Fukui et al., 2015a, b). Столкновения межзвездных облаков способствуют сжатию слоев газа и падению их к центрам узлов волокнистой структуры (Elmegreen & Lada, 1977). Сжатие же газовых слоев способствует увеличению

интенсивности звездообразования (Fukui et al., 2015a, b, 2014 и ссылки в этих статьях). Турбулентные процессы в межзвездной среде усиливаются вследствие процессов рождения и эволюции массивных звезд. Для поддержания достаточно высокой эффективности звездообразования в данной конкретной области галактики уровень аккреции вещества должен быть выше определенного предела. Из наблюдений было получено следующее значение: $6 \times 10^{-4} M_{\odot} / \text{yr}^{-1}$ (Fukui et al., 2015a, b). Динамическое время столкновения молекулярных облаков составляет десятки тысяч лет.

Существуют веские теоретические и наблюдательные основания полагать, что именно в плотных центральных частях молекулярных облаков появляются массивные звезды и скопления. Фрагментация вещества, предшествующая появлению протозвезд, является следствием повышения плотности среды выше определенного порогового значения (порядка 10^4 см^{-3}) вследствие турбулентции, столкновения облаков и последующего гравитационного коллапса (Clark et al., 2008, Smith et al., 2012, DeSouza & Bazu, 2015, Gomez & Vazquez-Semadeni, 2014, Banerjee & Kroupa, 2015). Однако непосредственно процесс фрагментации газа в процессе формирования протоскопления еще никто не наблюдал. Наблюдают лишь последствия этого явления. Предполагают, что механизмы обратной связи (feedback), действующие при формировании первых звезд и скоплений в ранней Вселенной и сейчас во многом схожи. Главное отличие состоит в том, что первые звезды были гораздо более массивными и низкометаллическими (звезды III типа населения, Pop III). Их температуры - порядка 30000 K. Такой энергии было достаточно для вторичной ионизации гелия (Johnson et al., 2009) и полной потери барионов теми минигало, в которых вспыхивали такие звезды. Дальнейшая эволюция Pop III звезд с массами $140 - 260 M_{\odot}$ приводила к вспышкам сверхновых и высвобождению энергии порядка 10^{51} эрг (Heger & Woosley, 2002). Мощное давление излучения массивных звезд, аккреция газа и джеты, звездный ветер и протяженные зоны HII в окрестностях массивных звезд, вспышки сверхновых - вот те механизмы обратной связи, которые приводили, во-первых, к усилению турбулентных процессов, и, во-вторых, разрушали молекулярные облака с массами менее $10^4 M_{\odot}$ и маломассивные звездные скопления (Rosen et al., 2014, Dale et al., 2015 и ссылки в этой статье, Negt & Boulanger, 2015).

Плотность, температуру и кинематические характеристики в гигантских молекулярных облаках удается моделировать в N-body численных расчетах с учетом магнитогидродинамических процессов (Inoue & Fukui, 2013, Matsumoto et al., 2015). Согласно этим моделям, рождающиеся звезды движутся по хаотическим орбитам, а в периферийных областях молекулярного облака возникают характерные дугообразные структуры, что и наблюдается, например, с помощью телескопов ALMA (Matsumoto et al., 2015) и Herschel

(см., например, Schneider et al., 2012). С помощью телескопа ALMA в линиях CO удалось обнаружить формирующееся самое молодое в нашей Галактике сверхмассивное звездное скопление RCW38 (Fukui et al., 2015b), открытое первоначально Rodgers et al., (1960). Это третий такого рода объект, открытый в Млечном Пути после Westerlund 2 и NGC3603 (Furukawa et al., 2009, Fukui et al., 2014). Аналогичные объекты найдены в Магеллановых Облаках (Fukui et al., 2015a). Интересно, что во всех трех случаях было обнаружено, что вспышки звездообразования были инициированы столкновением газовых облаков. Инфракрасные наблюдения свидетельствуют о наличии нескольких тысяч молодых массивных звезд в рождающихся в каждом из этих скоплениях (Wolk et al., 2006, Winston et al., 2011).

4.3. Формирование звездных скоплений в карликовых галактиках. Теоретические основы изучения этой проблемы были заложены в работе Elmegreen & Efremov (1997) (см. также ссылки в этой статье), однако она до сих пор далека от окончательного решения.

Прежде всего стоит отметить, что карликовые галактики в настоящую эпоху (красное смещение примерно 0) делятся на несколько типов по морфологии, звездному составу, структурным и кинематическим характеристикам: 1) сфероидальные (dSph; прототипы - Sculptor dSph и Fornax dSph в Местной группе); 2) иррегулярные (dIrr; прототипы - Большое и Малое Магеллановы облака); 3) промежуточного типа (dSph/dIrr; прототипы - галактики Cetus, KDG61); 3) эллиптические (dE; прототип - M32) dSphs - это объекты без газа со старым звездным населением (II типа). Их поверхностная яркость составляет несколько процентов от яркости ночного неба. Доля темной материи у dSphs в среднем значительно выше, чем в галактиках других типов, как гигантских, так и карликовых (см., например, рис.14 в статье Forbes et al., 2008). Примерно половина из dSphs содержит массивные звездные скопления вблизи оптического центра. dIrrs - богатые газом галактики с активным звездообразованием в широком диапазоне светимостей ($-18 < M_v < -8$). В таких объектах наблюдаются как правило молодые звездные скопления вблизи очагов звездообразования. Наряду с MMC, в них встречаются звезды и скопления промежуточного (примерно 1-6 млрд лет) и старого возраста. Это, по-видимому, говорит об исключительном богатстве газом и продолжительной истории звездообразования таких галактик. На сегодняшний день известны единицы dIrrs без старых звезд: например, карлик приливного происхождения возле M81 - Holmberg IX (Makarova et al., 2002). Объект очень ярк на длине волны H α . Ему принадлежит рентгеновский источник X-9, который по яркости превосходит таковой в центре M81. dSph/dIrr - это объекты похожие на dSphs с одной-двумя молодыми звездами, и/

или областями ионизованного газа.

Эллиптические карлики редки. Структурно и по свойствам звездного населения dEs похожи на маломассивные балджи. Согласно Kormendy & Bender (2012), в нашей Местной группе содержится только один объект этого типа. Это соседка туманности Андромеды M32. В центре этой галактики есть небольшое ШС.

dEs занимают особое место на многомерной зависимости между фундаментальными параметрами галактик "светимость - поверхностная яркость/плотность - размер - дисперсия скоростей". Только совокупное рассмотрение всех этих параметров позволяет правильно классифицировать галактику этого типа (Kormendy & Bender, 2012). Предполагают, что происхождение dEs неразрывно связано с окружением. Не случайно большинство из них найдено вблизи центров богатых скоплений галактик. В результате приливного взаимодействия с более массивными соседями внешние части dEs по-видимому бывают оторваны. Остаются только плотные балджи без газа (Bekki et al., 2001, Graham, 2002).

Вернемся к обсуждению вопроса о формировании ШС в карликовых галактиках. Elmegreen & Efremov (1997) отмечали, что несмотря на малую массу и среднюю плотность вещества, карликовые галактики должны производить на свет шаровые скопления столь же массивные, как и гигантские галактики, и к тому же - более компактные. Для достижения высокого давления и пороговой плотности газа, как пускового механизма формирования скоплений, в карликовых галактиках достаточно причин: это взрывы сверхновых, вызывающие стремительный отток газа, и как следствие - высокую вириальную суммарную плотность материи (газ, звезды и темная материя). Для карликовых галактик характерны в 10-100 раз более высокие критические плотности газа, чем в случае нормальных галактик. Карлики имеют в среднем гораздо более низкую металличность, чем нормальные галактики. Это означает, что холодные части молекулярных облаков расположены гораздо ближе к их плотным центрам. К тому же колонковая плотность незапыленного газа выше из-за формирования молекулярного водорода на пылинках. Таким образом, давление в областях звездообразования карликовых галактик выше, чем в нормальных галактиках. Это ведет к формированию массивных компактных скоплений (Elmegreen & Efremov, 1997). Добавим также, что ШС в карликовых галактиках имеют гораздо меньше причин быть разрушенными из-за отсутствия массивных дисковых структур. Таким образом, можно объяснить высокую частоту встречаемости ШС в карликовых галактиках.

Поиски ШС в карликовых галактиках за пределами Местной группы были проведены в работах Sharina et al. (2005), Georgiev et al. (2009). Были подтверждены выводы предыдущих исследований о высокой частоте

встречаемости ШС в dSphs и о процентном соотношении карликовых галактик, содержащих и не содержащих скопления.

Kruijssen & Cooper (2012) проверяли, действительно ли массы старых ШС в карликовых галактиках соответствуют таковым в предположении, что они формировались как ММС в близких галактиках с активным звездообразованием. В частности, исследователей интересовало соответствие масс самых массивных ШС в карликовых галактиках функции Шехтера на момент их формирования. Моделирование показало, что ожидаемое соответствие имеется в 90% случаев для ШС с массами $10^7 - 10^9 M_{\odot}$. Оставшиеся 10% наиболее массивных ШС в карликовых галактиках являются ядерными скоплениями, которые наращивали массы в процессе слияний с другими скоплениями и звездами галактик. Авторы оценили процент бедных металлами ШС в Млечном Пути, которые ранее были ядрами карликовых галактик, как 1/3.

Существуют в природе объекты со свойствами (массами, размерами, временами релаксации, дисперсиями скоростей звезд, отношениями массы к светимости), промежуточными между таковыми у массивных ШС и карликовых галактик. Это, так называемые, ультра-компактные карликовые галактики (UCD) (Hilker et al., 1999), компактные звездные системы, состоящие из старых и промежуточного возраста звезд с массами больше $2 \cdot 10^6 \div 10^8 M_{\odot}$, размерами 3 - 50 пк и с дисперсиями скоростей звезд менее



Рис.1. SDSS - снимок области неба в окрестности гигантской эллиптической галактики в скоплении Virgo Messier 59 (NGC4621). Кружком выделена ультра-компактная карликовая галактика, найденная Chilingarian & Mamon (2008) на расстоянии ~9 кпк от M59. На снимке отмечены также две карликовые галактики ранних морфологических типов с ядерными шаровыми скоплениями: IC809 и IC3486 (Seth et al., 2008).

100 км/с, которые примерно на порядок больше, чем у шаровых скоплений. На рис.1 показано изображение UCD, найденной Chilingarian & Mamon (2008) на расстоянии ~ 9 кпк от гигантской эллиптической галактики M59 (NGC4621) вблизи центра скопления галактик Virgo. На данном снимке области неба Слоановского обзора (Sloan Digital Sky Survey, SDSS¹) также видны M59 и две карликовые галактики ранних морфологических типов с ядерными шаровыми скоплениями: IC809 и IC3486 (Seth et al., 2008).

Некоторые UCD содержат сверхмассивные черные дыры, и у них заметно вращение (например, Seth et al., 2014, Mieske et al., 2012 и ссылки в этих статьях, на статьи о свойствах и возможном происхождении UCD). Металличности у UCD были найдены самые разные: $-1.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0 \text{ dex}$. Металличность же на единицу светимости у UCD выше, чем у гигантских эллиптических галактик (Chattopadhyay et al., 2012) и похожа на таковую у M32, что говорит в пользу происхождения UCD как ядерных частей галактик разных масс (карликовых и нормальных).

4.4. Частота встречаемости шаровых скоплений в галактиках. Харрисом и Ван ден Бергом в 1981г. (Harris & van den Bergh (1981), см. также Harris (2001)) был введен термин частоты встречаемости ШС в галактике, или числа ШС на единицу светимости галактики, который используется и сейчас: $S_N = N_{cl} \cdot 10^{0.4(M_v + 15)}$, где M_v - интегральная абсолютная величина галактики, и N_{cl} - полное число ШС. Исследования систем ШС скоплений в галактиках (globular cluster systems) давно уже сформировали отдельную отрасль астрофизики, которая использует современные спектральные и фотометрические наблюдения на космических и крупнейших наземных телескопах в разных диапазонах электромагнитного спектра и занимается изучением следующих вопросов: функции светимости ШС, пространственного распределения и кинематики ШС, распределения ШС по возрасту, металличности и содержанию легких элементов, путей происхождения и эволюции ШС.

4.5. Возможные пути формирования старых шаровых скоплений. Существуют несколько сценариев формирования ШС с возрастом, сравнимым с возрастом Вселенной. Перечислим основные из них:

1) Шаровые скопления могут быть центральными областями мало-массивных галактик, потерявших в процессе взаимодействия с более массивными соседями свои внешние части. Каталогизирование карликовых галактик в ближайших к нам богатых скоплениях галактик в созвездиях Дева и Печь, а также фотометрические исследования этих скоплений с помощью космического телескопа Хаббла выявили большое число карликовых галактик

¹ <http://www.sdss3.org/>

с преобладающим старым звездным населением и центральными яркими звездными скоплениями (Binggelli et al., 1985, Ferguson, 1989, Karachentseva & Sharina, 1989, Sharina, 1989, Cote et al., 2006). Спектрофотометрические исследования позволили изучить структурные и кинематические характеристики ядерных скоплений (см., например, Geha et al., 2002; Lotz et al., 2004, Puzia & Sharina, 2008, Sharina et al., 2010). Оказалось, что большая часть ядерных скоплений по свойствам очень напоминают старые ШС Галактики. Появились теоретические модели, объясняющие происхождение ядерных ШС в карликовых галактиках. Согласно Bekki et al. (2006a, b), например, эти объекты могли образоваться путем множественных диссипативных слияний газовых и звездных частей центральных дисков галактик, как следствие гравитационной неустойчивости; 2) Шаровые скопления могут являться потомками разрушенных приливными взаимодействиями массивных звездных скоплений, образовавшихся в богатых газом галактиках на $z > 3$ и попавших во внешние части соседних галактик при слияниях и взаимодействии галактик (Kruijssen, 2014 и ссылки в этой статье). Сценарий большого слияния галактик (Ashman & Zepf, 1992, Toomre & Toomre, 1972; Toomre, 1977, Schweizer, 1987, Li & Gnedin, 2014, Muratov & Gnedin, 2010) предсказывает формирование богатой и бедной металлами популяций ШС в результате слияний богатых газом спиралей и бедных газом эллиптических галактик. Слияния галактик являются неотъемлемой частью общепринятого иерархического сценария эволюции Вселенной и детально воспроизводятся в численных космологических расчетах (например, Ibata et al., 2014 и ссылки в этой статье); 3) Шаровые скопления могли образовываться в галактиках из малометаллического газа большой плотности в ранние эпохи в результате многофазного диссипативного коллапса (in-situ сценарий, Forbes et al., 1997).

Согласно возрасту и металличности шаровых скоплений Галактики, определенных в процессе HST исследований их глубоких CMD (Vandenberg et al., 2013, Leaman et al., 2013, Marin-Franch et al., 2009), скопления продолжали формироваться вплоть до красных смещений $z \sim 2$. Зависимость "возраст-металличность" для них строго соблюдается. Причем ШС за пределами солнечного круга (галактоцентрический радиус 8 кпк) имеют на 0.4-0.5 dex более высокую металличность при том же возрасте, чем ШС внутри него. Для близких галактик, помимо самых слабых карликов, существует уверенная зависимость массы системы шаровых скоплений от массы родительской галактики (Spitler & Forbes, 2009; Harris et al., 2013; Hudson et al., 2014). Наблюдательные факты позволяют предполагать, что слияния богатых газом массивных галактик играли существенную роль до красных смещений примерно 2, что и подтверждается космологическими гидродинамическими расчетами (Li & Gnedin, 2015). Такие вычисления позволяют воссоздать начальную функцию светимости звездных скоплений,

а также ее эволюцию и обрыв на ярком конце. Максимальная масса шарового скопления в галактике, а также доля массы галактики, заключенная в шаровых скоплениях, зависит прямо пропорционально от массы родительской галактики, уровня звездообразования (SFR) и плотности окружения в момент формирования скоплений (и соответственно теперешней плотности окружения) (Adamo et al., 2015, Kruijssen et al., 2012, Whitmore et al., 2014, Fall & Chandar, 2012, Chandar et al., 2015).

Существуют многочисленные модификации перечисленных выше сценариев. Согласно Gnedin et al., (2014), центральные массивные скопления и черные дыры в галактиках могли образовываться путем слияний множества скоплений, падающих на ядро в результате динамического трения и приливного взаимодействия со внешними частями газо-звездных дисков, звездных гало, и газовых корон. Как видно, во многом вышеперечисленные сценарии не противоречат, а дополняют друг друга. Существуют однако наблюдательные факты, которые трудно объяснить какой-либо одной моделью, и даже комбинацией нескольких сценариев, например: существование множественных звездных населений, открытых в Галактических ШС и скоплениях Магеллановых облаков (Milone et al., 2015 и ссылки в этой статье).

4.6. Множественные звездные населения в шаровых скоплениях. Исследования вариаций содержания химических элементов и множественных звездных популяций в шаровых скоплениях имеют богатую историю (Freeman & Norris, 1981, Lee et al., 1999, Gratton et al., 2004, Caretta et al., 2009, Gratton et al., 2012, Dotter et al., 2015; Milone et al., 2013, 2015). Вариации содержания легких элементов (O-Na, Mg-Al) связаны с их производством в CNO-цикле в массивных звездах (Prantzos et al., 2007). Так называемые "аномальные" звезды второго поколения имеют пониженное содержание кислорода и повышенное содержание натрия. В некоторых скоплениях, называемых также аномальными, таких звезд большинство (примерно 2/3). Известны следующие аномальные скопления: Омега Центавра, NGC1851, M22 (NGC6656), M54 (NGC6715), M2 (NGC7089), Terzan 5, NGC5824, NGC5286, M19 (NGC 6273) (Marino et al., 2015, 2014a, b и ссылки в этих статьях). C+N+O вариации у звезд аномальных скоплений коррелируют с содержанием элементов s-процесса и с [Fe/H] (Marino et al., 2012a, b; 2014a, b). Существуют две популяции звезд в таких скоплениях: s-element/Fe - богатые и s-element/Fe - бедные; и каждая из этих популяций в каждом аномальном скоплении показывает свою собственную форму антикорреляций O-Na, Mg-Al, C-N (Marino et al., 2011). Было выяснено, что C+N+O вариации могут быть ответственными за наблюдаемое расщепление ветвей субгигантов на CMD.

Множественные звездные населения (множественные точки поворота

Главной последовательности, двойные красные сгущения (red clump), двойные Главные последовательности) наблюдаются не только у старых ШС Галактики, но и у скоплений молодого и промежуточного возраста (1-2 млрд лет) в Магеллановых Облаках (Milone et al., 2009, Girardi et al., 2009, Milone et al., 2013, 2015). С точки зрения теории звездной эволюции, множественные точки поворота могут являться следствием: 1) наличия в скоплениях звездных населений разного возраста (Goudfrooij et al., 2015); 2) различий в скоростях вращения звезд (Bastian & de Mink, 2009); и 3) взаимодействующих двойных звезд (Li et al., 2014b). Li et al., (2014a) и Bastian & Nederhoter (2015) отвергли предположение о продолжительной истории звездообразования у звездных скоплений промежуточного возраста в Магеллановых Облаках. Авторами было показано, что существование множественных точек поворота Главной последовательности и двойных Главных последовательностей у этих объектов не сопровождается множественностью других последовательностей CMD (например, ветвей красных гигантов, субгигантов). Это означает, что другие механизмы ответственны за наблюдаемые явления в данном случае.

На рис. 2 показаны диаграммы "цвет-звездная величина" двух шаровых скоплений, содержащих множественные звездные населения: NGC6838 и NGC6218 (Carretta et al., 2010), - по результатам звездной фотометрии Piotto et al. (2002). Khamidullina et al. (2013) выполнили популяционный синтез суммарного излучения звезд скоплений с использованием длинно-шелевых спектров среднего разрешения, функции масс звезд Cabrier (2005) и синтетических спектров моделей звездных атмосфер. Соответствие теоретических изохрон с полученными в работе Khamidullina et al. (2013) параметрами (возраст, $[Fe/H]$ и Y) наблюдаемым CMD показано на левых панелях рисунков. Справа на наблюдаемые CMD наложены изохроны Bertelli et al. (2009) с параметрами, определенными VandenBerg et al. (2013). Данный пример иллюстрирует, с одной стороны, известную проблему вырождения "возраст-металличность", и, с другой стороны, сложность анализа CMD скоплений. Методы, использующие различные теоретические предположения, могут давать отличающиеся результаты оценки возраста и металличности. Литературные выводы о множественных звездных населенностях в том, или ином объекте основаны на очень тщательной фотометрии и анализе.

Причины, вызывающие наблюдаемые проявления химических аномалий у звезд шаровых скоплений, пока до конца не изучены (см., например, Bastian et al., 2015). Существует несколько предполагаемых звезд-источников обогащения химическими элементами, приводящих к наблюдаемым антикорреляциям: 1) массивные звезды Асимптотической ветви ($Mass \sim 5 \div 9 M_{\odot}$) (D'Ercole et al., 2010); 2) быстро-вращающиеся массивные

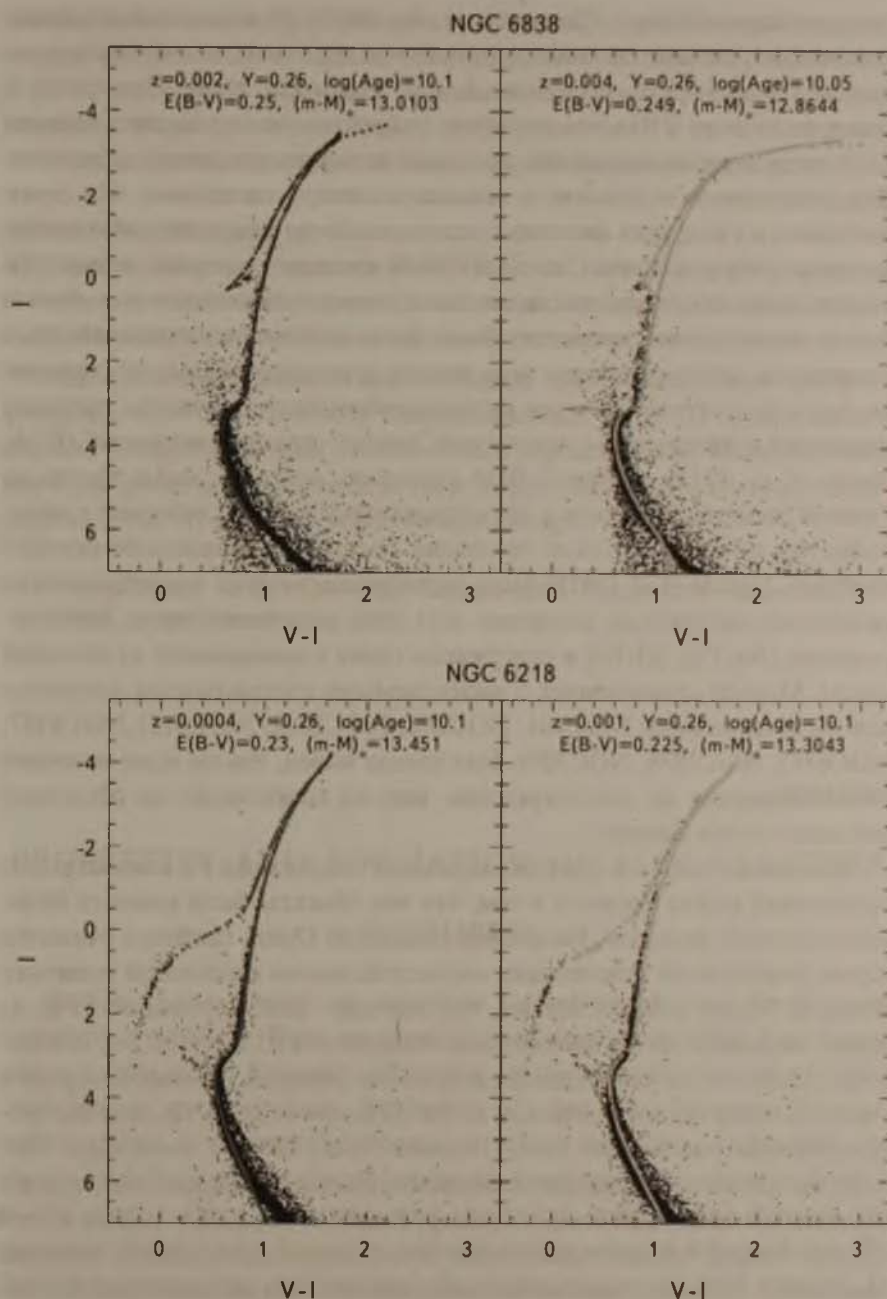


Рис.2. Сравнение положения звезд скоплений NGC6838 и NGC6218 на диаграмме "цвет-звездная величина" (CMD) по результатам фотометрии Piotto et al., (2002) с изохронами Bertelli et al. (2009). Параметры изохрон (возраст, $[\text{Fe}/\text{H}]$ и Y) на графиках слева и справа были определены разными способами. Слева показаны результаты популяционного синтеза суммарных спектров звезд скоплений (Khamidullina et al., 2013). Справа приведены изохроны с параметрами, определенными VandenBerg et al. (2013) из анализа самих CMD.

звезды ($Mass > 20 M_{\odot}$) (Decressin et al., 2007); 3) взаимодействующие массивные двойные звезды ($Mass \sim 10 + 20 M_{\odot}$) и 4) очень массивные звезды ($Mass > 10^4 M_{\odot}$) (Denissenkov & Hartwick, 2014). Суть AGB - сценария состоит в том, что вещество, выброшенное в процессе эволюции AGB звезд первого поколения, не может покинуть массивное скопление. Это вещество охлаждается и оседает к центру скопления. Из этого материала и продуктов эволюции остальных звезд скопления образуются звезды второго поколения. Сценарий FRMS использует материал, оставшийся в скоплении после производства звезд первого поколения и выбросы быстро-вращающихся массивных звезд, богатые гелием и натрием и бедные кислородом, для производства звезд второго поколения. Взаимодействующие двойные рассматривались как источник обогащения вещества звездных скоплений в сценарии так называемой "ранней дисковой аккреции" (EDA, Bastian et al., 2013). Согласно EDA сценарию, маломассивные звезды до Главной последовательности с протопланетными дисками собирают в диски вещество, оставшееся после эволюции массивных взаимодействующих двойных. Bastian et al. (2015) были разработаны модели самообогащения скоплений продуктами эволюции всех этих пяти типов звезд. Моделировались $[Na/Fe]$, $[O/Fe]$ и содержание гелия в зависимости от звездной массы. Модели сравнивались с наблюдаемыми содержаниями элементов для звезд скоплений NGC104, NGC288, NGC2808, NGC6121, NGC6397, NGC6752, NGC7078, NGC7099. Был сделан вывод, что ни один источник самообогащения из рассмотренных, или их комбинация не объясняет наблюдательные данные.

Предполагают, что причина вариаций содержания Fe в аномальных скоплениях может состоять в том, что эти объекты были намного более массивными в прошлом. Например, скопление Омега Центавра считается ядром разрушенной приливными взаимодействиями карликовой галактики (Bekki & Norris, 2006). Считают, что обычные ШС, состоящие из звезд одной металличности с постоянным отношением $[(C+N+O)/Fe]$, формировались путем самообогащения в процессе реакций горения водорода с участием звезд Асимптотической ветви (D'Ercole et al., 2010), или быстро-вращающихся массивных звезд (Decressin et al., 2007). У звезд таких ШС тоже наблюдаются вариации содержания химических элементов, как и у аномальных скоплений (см., например, Bastian et al., 2013 и ссылки в этой статье). Звезды галактического поля со сходной с аномальными звездами скоплений картиной химических содержаний - это экстремально бедные металлами углеродные AGB звезды s-процесса (CEMP), в которых доминирует источник нейтронов в виде изотопа углерода ^{13}C .

5. *Заключительные замечания.* В данной статье изложены теоретические и наблюдательные данные о свойствах и закономерностях

происхождения и эволюции звездных скоплений, способные пролить свет на проблему множественных звездных населений в шаровых скоплениях. В обзор не вошли, или были освещены слишком кратко некоторые вопросы, например: о зависимости свойств систем ШС от свойств родительских галактик, о развитии и совершенствовании методов определения возраста и химического состава звездных скоплений, о пространственно кинематической структуре Галактической системы шаровых скоплений, о ШС вне галактик, о звездных потоках в гало нашей и других галактик и о поисках следов разрушенных звездных скоплений, о черных дырах в шаровых скоплениях. Этим вопросам будет посвящена отдельная статья.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №14-12-00965). Финансирование SDSS-III предоставлено фондом Альфреда Слоуна, участвующими учреждениями, Национальным научным фондом, и Министерством энергетики США по науке. Веб-сайтом SDSS-III является <http://www.sdss3.org/>.

Специальная Астрофизическая Обсерватория Российской Академии
Наук, e-mail: sme@sao.ru

REVIEWS

PROPERTIES AND FORMATION OF STAR CLUSTERS

M.E.SHARINA

Studies of star clusters are important for solving of many fundamental astrophysical problems. These are some of them: clarification of the fundamental distance scale in the Universe, elaboration of the general principles of stellar evolution and nucleosynthesis, detalisation of galactic star formation histories, understanding of dynamical processes of galaxy formation, explanation the shapes of stellar and star cluster luminosity functions. This review is devoted to the present-day observational and theoretical data shedding light on the processes of star cluster formation and evolution in our and other galaxies. We formulate the existing problems and discuss the progress in their solution. In particular, among the most important observational and theoretical tasks are: 1) a complete explanation of the physical processes in molecular clouds, leading to the formation and evolution of massive star clusters; 2) observations of massive star clusters at different stages of evolution, including protoclusters, in

the wavelength regions where interstellar absorption is minimal; 3) comparison of properties of massive star clusters in different galaxies, and galaxies at the stages of most active star formation at different redshifts. The main aim of these studies is explanation of the discovered for the first time in the late 20th century multiple populations and variations of chemical elements in star clusters.

Key words: *stellar clusters:formation*

ЛИТЕРАТУРА

- Acharova I.A., Shevtsova E.S., Astrophysical Bulletin, accepted (2016).
 Adamo A., Kruijssen J.M.D., Bastian N., Silva-Villa E., Ryon J., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **452**, 246 (2015).
 Ashman K.M., Zepf S.E., Astrophys. J., **384**, 50 (1992).
 Banerjee, Kroupa, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **447**, 728 (2015).
 Bastian N., Niederhofer F., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **448**, 1863 (2015).
 Bastian N., Cabrera-Ziri I., Davies B., Larsen S.S., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **436**, 2852 (2013).
 Bastian N., de Mink S.E., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **398**, L11 (2009).
 Bekki K., Yahagi H., Nagashima M., Forbes D.A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **387**, 1131 (2008).
 Bekki K., Yahagi H., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **372**, 1019 (2006a).
 Bekki K., Couch W.J., Y.Shioya, Astrophys. J. Letters, **642**, L133 (2006b).
 Bekki K., Norris J.E., Astrophys. J. Letters, **637**, L109 (2006).
 Bekki K., Couch W.J., Drinkwater M.J., Gregg M.D., Astrophys. J., **557**, 39 (2001).
 Bertelli G., Nasi E., Girardi L., Marigo P., Astron. Astrophys., **508**, 335 (2009).
 Binggeli B., Sandage A., Tammann G.A., Astron. J., **90**, 1681 (1985).
 Carretta E., Bragaglia A., Gratton R. et al, Astron. Astrophys., **516**, 55 (2010).
 Carretta E., Bragaglia A., Gratton R., Lucatello S., Astron. Astrophys., **505**, 139 (2009).
 Carney B.W., Star Clusters, Saas-Fee Advanced Courses, Volume 28. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.1 (2001).
 Chabrier G., in The Initial Mass Function 50 years later. Eds. E.Corbelli et al. (Springer, Dordrecht), 327, 41 (2005).
 Chandar R., Fall S.M., Whitmore B.C., Astrophys. J., **810**, 1 (2015).
 Chattopadhyay T., Sharina M., Davoust E., De T., Chattopadhyay A.K., Astrophys. J., **750**, 91 (2012).
 Chilingarian I.V., Mamon G.A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **385**, L83 (2008).
 Cote P. et al., Astrophys. J. Suppl. Ser., **165**, 57 (2006).

- Clark P.C., Bonnell I.A., Klessen R.S., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **386**, 3 (2008).
- D'Ercole A., D'Antona F., Ventura P., Vesperini E., McMillan S.L.W., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **407**, 854 (2010).
- Dale J.E., Ercolano B., Bonnell I.A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **451**, 987 (2015).
- Decressin T., Meynet G., Charbonnel C., Prantzos N., Ekstrom S., Astron. Astrophys., **464**, 1029 (2007).
- Denissenkov P.A., Hartwick F.D.A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **437**, L21 (2014).
- DeSouza A.L., Basu S., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **450**, 295 (2015).
- Dotter A., Ferguson J.W., Conroy C. et al., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **446**, 1641 (2015).
- Efremov Yu.N., Elmegreen B., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **299**, 588 (1998).
- Efremov Yu.N., Sites of star formation in galaxies: star complexes and spiral arms. Nauka, Moskva (USSR) (1989).
- Elmegreen B.G., Astrophys. J., **564**, 773 (2002).
- Elmegreen B., Efremov Yu.N., Astrophys. J., **480**, 235 (1997).
- Elmegreen B., Lada C., Astrophys. J., **214**, 725 (1977).
- Fall S.M., Chandar R., Astrophys. J., **752**, 96 (2012).
- Fall S.M., Rees M.J., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **181**, 37 (1977).
- Ferguson H.C., Astron. J., **98**, 367 (1989).
- Forbes D.A., Lasky P., Graham A.W., Spitler L., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **389**, 1924 (2008).
- Forbes D.A., Brodie J.P., Grillmair C.J., Astron. J., **113**, 1652 (1997).
- Freeman K.C., Norris J., Ann. Rev. Astron. Astrophys., **19**, 319 (1981).
- Fukui Y. et al., Astrophys. J. Lett., **807**, L4 (2015a).
- Fukui Y. et al., arXiv:1504.05391 (2015b).
- Fukui Y. et al., Astrophys. J., **780**, 36 (2014).
- Fukui Y., Kawamura A., Ann. Rev. Astron. Astrophys., **48**, 547 (2010).
- Furukawa N. et al., Astrophys. J. Lett., **696**, L115 (2009).
- Geha M., Guhathakurta P., van der Marel R.P., Astron. J., **124**, 3073 (2002).
- Georgiev I.Y., Hilker M., Puzia T.H., Goudfrooij P., Baumgardt H., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **396**, 1075 (2009).
- Girardi L., Rubele S., Kerber L., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **394**, L74 (2009).
- Gnedin O.Y., Ostriker J.P., Tremaine S., Astrophys. J., **785**, 71 (2014).
- Gnedin O.Y., Ostriker J.P., Astrophys. J., **474**, 223 (1997).
- Gomez G.C., Vazquez-Semadeni E., Astrophys. J., **791**, 124 (2014).
- Gozha M.L., Borkova T.V., Marsakov V.A., Astron. Lett., **38**, 506 (2012).
- Graham A.W., Astrophys. J., **568**, L13 (2002).
- Gratton R., Sneden C., Carretta E., Ann. Rev. Astron. Astrophys., **42**, 385 (2004).
- Gratton R.G., Carretta E., Bragaglia A., Astron. Astrophys. Rev., **20**, 50 (2012).
- Hanes D.A., Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **180**, 309 (1977).

- Harris W.E., in: *Star Clusters*, Saas-Fee Advanced Courses, Vol. 28. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.223 (2001).
- Harris W.E., Racine R., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **17**, 241 (1979).
- Harris W.E., van den Bergh S., *Astron. J.*, **86**, 1627 (1981).
- Heger A., Woosley S.E., *Astrophys. J.*, **567**, 532 (2002).
- Herrera C.N., Boulanger F., IAU General Assembly, Meeting 29, 2252184 (2015).
- Ho L.C., Filippenko A.V., *Astrophys. J.*, **472**, 600 (1996a).
- Ho L.C., Filippenko A.V., *Astrophys. J.*, **466**, 83 (1996a).
- Hilker M., Infante L., Viera G., Kissler-Patig M., Richtler T., *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **134**, 75 (1999).
- Hudson M.J., Harris G.L., Harris W.E., *Astrophys. J.*, **787**, 5 (2014).
- Ibata R.A. et al., *Astrophys. J. Letters*, **784**, 6 (2014).
- Inoue T., Fukui Y., *Astrophys. J. Letters*, **774**, 31 (2013).
- Johnson K.E., Leroy A.K., Indebetouw R. et al., *Astrophys. J.*, **806**, 35 (2015).
- Johnson K.E., Hunt L.K., Reines A.E., *Astron. J.*, **137**, 3788 (2009).
- Karachensteva V.E., Sharina M.E., Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii, **57**, 5 (1988).
- Keto E., Ho L.C., Lo K.-Y., *Astrophys. J.*, **635**, 1062 (2005).
- Khamidullina D.A., Sharina M.E., Shimansky V.V., Davoust E., *Baltic Astronomy*, **23**, 260 (2014).
- Kholopov P.N., "Star clusters Moscow, Izdatel'stvo Nauka (1981).
- Kormendy J., Bender R., *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **198**, 2 (2012).
- Kruijssen J.M.D., *Classical and Quantum Gravity*, **31**, 244006 (2014).
- Kruijssen J.M.D., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **426**, 3008 (2012).
- Kruijssen J.M.D., Cooper A.P., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **420**, 340 (2012).
- Lada C.J., Lada E.A., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **41**, 57 (2003).
- Leaman R., VandenBerg Don A., Mendel J.T., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **436**, 122 (2013).
- Lee Y.-W., Joo J.-M., Sohn Y.-J. et al., *Nature*, **402**, L55 (1999).
- Li H., Gnedin O.Y., *Astrophys. J.*, **796**, 10 (2014).
- Li C., de Grijs R., Deng L., *Nature*, **516**, 367 (2014a).
- Li L., Zhang F., Han Q., Kong X., Gong X., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **445**, 1331 (2014b).
- Lisanti M., Spergel D.N., Madau P., *Astrophys. J.*, **807**, 14 (2015).
- Lotz J.M., Miller B.W., Ferguson H.C., *Astrophys. J.*, **613**, 262 (2004).
- Makarova L.N. et al., *Astron. Astrophys.*, **396**, 473 (2002).
- Marin-Franch A. et al., *Astrophys. J.*, **694**, 1498 (2009).
- Marino A.F. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **450**, 815 (2015).
- Marino A.F. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **442**, 3044 (2014a).
- Marino A.F. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **437**, 1609 (2014b).
- Marino A.F. et al., *Astron. Astrophys.*, **541**, 15 (2012a).
- Marino A.F. et al., *Astrophys. J.*, **746**, 14 (2012b).
- Marino A.F., Villanova S., Milone A.P. et al., *Astrophys. J. Lett.*, **730**, L16 (2011).

- Matsumoto T., Toshikazu O., Tokuda K., Inutsuka S., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **449**, L123 (2015).
- McLaughlin D.E., Fall S.M., *Astrophys. J.*, **679**, 1272 (2008).
- Merritt D., *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei*. Princeton, NJ: Princeton University Press. (2013).
- Mieske S., Hilker M., Misgeld I., *Astron. Astrophys.*, **537**, 3 (2012).
- Milone A.P. et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **450**, 3750 (2015).
- Milone A.P., Bedin L.R., Cassisi S. et al., *Astron. Astrophys.*, **555**, 143 (2013).
- Milone A.P., Bedin L.R., Piotto G., Anderson J., *Astron. Astrophys.*, **497**, 755 (2009).
- Murali C., Weinberg M.D., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **291**, 717 (1997).
- Muratov A.L., Gnedin O.Y., *Astrophys. J.*, **718**, 1266 (2010).
- Onishi T., *ASP Conference Series*, San Francisco: Astron. Soc. Pacif., **476**, 85 (2013).
- Peebles P.J.E., Dicke R.H., *Astrophys. J.*, **154**, 891 (1968).
- Peretto N. et al., *Astron. Astrophys.*, **555**, 112 (2013).
- Piotto G. et al., *Astron. Astrophys.*, **391**, 945 (2002).
- Prantzos N., Charbonnel C., Iliadis C. et al., *Astron. Astrophys.*, **470**, 179 (2007).
- Puzia T.H., Sharina M.E., *Astrophys. J.*, **674**, 909 (2008).
- Racine R., Dordrecht D., Reidel Publishing Co., 369 (1980).
- Rodgers A.W., Campbell C.T., Whiteoak J.B., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **121**, 103 (1960).
- Rosen A.L., Lopez L.A., Krumholz M.R., Ramirez-Ruiz E., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **442**, 2701 (2014).
- Seth A.C. et al., *Nature*, **513**, 398 (2014).
- Seth A., Agueros M., Lee D., Basu-Zych A., *Astrophys. J.*, **678**, 116 (2008).
- Schechter P., *Astrophys. J.*, **203**, 297 (1976).
- Schneider N. et al., *Astron. Astrophys.*, **540**, L11 (2012).
- Schweizer F., Seitzer P., *Astron. J.*, **133**, 2132 (2007).
- Schweizer F., in *Nearly Normal Galaxies: From the Planck Time to the Present; Proceedings of the Eighth Santa Cruz Summer Workshop in Astron. Astrophys.*, ed. S.Faber, New York: Springer-Verlag, p.18 (1987).
- Smith R.J., Ioco F., Glover S.C.O. et al., *Astrophys. J.*, **761**, 154 (2012).
- Sharina M.E., Donzelli C.J., Davoust E., Shimansky V.V., Charbonnel C., *Astron. Astrophys.*, **570**, 48 (2014).
- Sharina M.E., Chandar R., Puzia T.H., Goudfrooij P., Davoust E., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **405**, 839 (2010).
- Sharina M.E., Puzia T.H., Makarov D.I., *Astron. Astrophys.*, **442**, 85 (2005).
- Sharina M.E., *Astrophysics*, **31**, 452 (1989).
- Spitler L.R., Forbes D.A., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **392**, 1 (2009).
- Spitzer L.Jr., *Dynamical Evolution of Globular Clusters*. Princeton, NJ: Princeton Univ. Press., 191 (1987).
- Surdin V.G., *Astron. Lett.*, **21**, 508 (1995).
- Surdin V.G., *Soviet Astron.*, **23**, 648 (1979).

- Subramanian S., Subramaniam A.*, *Astron. Astrophys.*, **520**, 24 (2010).
- Toomre A., Toomre J.*, *Astrophys. J.*, **178**, 623 (1972).
- Toomre A.*, in *Evolution of Galaxies and Stellar Populations*, *Proceedings of a Conference at Yale University*, eds. B.M.Tinsley, R.B.Larson, p.40. New Haven: Yale University Observatory (1977).
- VandenBerg D.A., Brogaard K., Leaman R., Casagrande L.V.*, *Astrophys. J.*, **775**, 134 (2013).
- Vesperini E.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **322**, 247, (2001).
- Walker D.L., Longmore S.N., Bastian N. et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **449**, 715 (2015).
- Whitmore B.C., Brogan C., Chandar R. et al.*, *Astrophys. J.*, **795**, 156 (2014).
- Whitmore B.C., Schweizer F.*, *Astron. J.*, **109**, 960 (1995).
- Winston E., Wolk S.J., Bourke T.L. et al.*, *Astrophys. J.*, **743**, 166 (2011).
- Wolk S.J., Spitzbart B.D., Bourke T.L., Alves J.*, *Astron. J.*, **132**, 1100 (2006).
- Zinnecker H., Yorke H.W.*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **45**, 481 (2007).
- Zwart S.F.P., McMillan S.L.W., Gieles M.*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **48**, 431 (2010).