

УДК 524.47+524.6-36

ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЛАКТИЧЕСКИХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ РАЗНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ, ВЫЯВЛЕННЫХ ПО ДАННЫМ Gaia DR2

© 2020 г. В. А. Марсаков^{1,*}, В. В. Коваль^{1,**}, М. Л. Гожа^{1,***}

¹ Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: marsakov@sfedu.ru

**E-mail: vvkoyal@sfedu.ru

***E-mail: gozha_marina@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2020 г.

После доработки 08.06.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Исследованы различия связей между физическими параметрами и содержаниями химических элементов у образовавшихся внутри Галактики и аккрецированных шаровых звездных скоплений. Информация об определенных по данным Gaia DR2 местах предположительного образования скоплений заимствована из литературных источников. В них для 151 шарового скопления оценена вероятность принадлежности к балджу и диску Галактики, а также к шести известным событиям слияния карликовых галактик-спутников с Млечным Путем. Элементы орбит, начальные массы, типы населений и возрасты взяты из литературы, а данные о химическом составе для 69 шаровых скоплений Галактики – из авторского компилятивного каталога. Показано, что все малометаллические ($[Fe/H] < -1.0$) генетически связанные шаровые скопления имеют высокие относительные содержания α -элементов. Поскольку, согласно современным представлениям, с увеличением массы сверхновые второго типа выбрасывают в межзвездную среду больше α -элементов, выдвинуто предположение, что массы сверхновых второго типа в Галактике были больше, чем в аккрецированных галактиках. Доказывается, что скопления группы “Low Energy”, считавшиеся аккрецированными, генетически связаны с единым протогалактическим облаком, как и нестратифицированные скопления UKS 1 и Liller 1, которые принадлежат, скорее всего, балджу. Показано, что с увеличением среднего радиуса орбит скоплений не только нижний, но и верхний пределы их масс уменьшаются. Последний факт объясняется уменьшением масс рождающихся скоплений с уменьшением масс их родительских галактик. Продемонстрировано, что экстремально многокомпонентное звездное население наблюдается только у аккрецированных шаровых скоплений с начальной массой $>10^6 M_{\odot}$. Выдвинуто предположение, что эти скопления сохранили все вещество, выброшенное их проэволюционировавшими звездами, из которого образовались новые поколения звезд, благодаря долгой эволюции вдали от нашей Галактики.

DOI: 10.31857/S0004629920110067

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно современной стандартной космологической модели Λ CDM (Lambda-Cold Dark Matter), массы галактик растут за счет слияний. При этом гало галактики формируется в результате нескольких крупных слияний, сопровождаемых множеством мелких слияний. Когда спутники сливаются с такой галактикой, как Млечный Путь, они лишаются своих звезд из-за приливных сил. Эти звезды следуют приблизительно по средней орбите своего прародителя, и это приводит к образованию потоков.

В последние годы наблюдательная астрономия дала нам несколько убедительных свидетельств того, что не все звезды, принадлежащие в настоя-

щий момент нашей Галактике, образовались из единого протогалактического облака. Часть звездных объектов в разное время были ею захвачены из ближайших галактик-спутников. Эпоха аккреции внегалактических объектов началась на самых ранних этапах формирования Галактики и продолжается до сих пор [1]. Более-менее надежно выявить предположительно аккрецированные объекты возможно лишь после измерения их пространственных скоростей и восстановления их галактических орбит. Необходимым условием верификации их внегалактического происхождения является определение содержания в них химических элементов, произведенных в различных процессах ядерного синтеза. Дело в том, что

в изолированных звездно-газовых системах возможны отличающиеся истории химической эволюции.

Для выявления звезд поля и шаровых скоплений с общим происхождением по данным Gaia анализируются их динамические свойства в пространстве интегралов движения и химический состав. Так, в статье Макрета и др. [2] проанализированы относительные содержания α -элементов и скоростей у нескольких десятков тысяч звезд в пределах 15 кпк от Солнца в выборке, составленной путем кросс-идентификации между каталогами SDSS-APOGEE DR14 и Gaia DR2. Авторы обнаружили, что у металлических ($[Fe/H] > -1.0$) звезд с высокими эксцентриситетами орбит отношения $[\alpha/Fe]$ ниже, чем у основной массы ближайших звезд поля. В итоге был сделан вывод о захвате нашей Галактикой на ранних этапах ее эволюции массивной ($\sim 10^9 M_{\odot}$) галактики-спутника, в результате чего часть звезд поля, рожденных в этой галактике-спутнике, попала в нашу Галактику, а часть звезд уже образовавшегося тонкого диска при этом “разогрелась”, сформировав подсистему толстого диска. К такому же выводу пришли и авторы работы Хелми и др. [3], которые по данным обзоров APOGEE и Gaia DR2, а также в результате численного моделирования показали, что во внутреннем гало преобладают обломки карликовой галактики более массивной, чем Малое Магелланово Облако, которую они назвали Гайя–Энцелад (Gaia-Enceladus). Они обнаружили, что среди исследованных ими звездных объектов сотни лирид и более дюжины шаровых скоплений образовались в этой галактике. Причем слияние Млечного Пути с Гайя–Энцеладом, по их мнению, привело к динамическому “разогреву” предшественника толстого галактического диска и, следовательно, способствовало формированию этой подсистемы Галактики примерно 10 млрд. лет назад. Однако обломки Гайя–Энцелада не единственная субструктура, присутствующая в окрестностях Солнца. В частности, солнечную область пересекают обнаруженные более 20 лет назад потоки Хелми (Helmi streams 99). Более того, совсем недавно по данным Gaia DR2 и DECaPS были обнаружены свидетельства не одного, а двух захватов массивных галактик примерно 9–11 млрд. лет назад.

Исследование интегралов движения (подробнее см. ниже) и возрастов шаровых скоплений Галактики, проведенное в работе Массари и др. [4] на основе данных Gaia DR2, и вычисленных по ним параметрах галактических орбит, показывает, что около 40% шаровых скоплений, вероятно, сформировались “на месте” (*in situ*), т.е. генетически связаны с единым протогалактическим облаком. Более трети (35%) скоплений связаны, по видимому, с известными событиями слияния, в

частности с Гайя–Энцеладом (Gaia-Enceladus – 19%), карликовой галактикой Сагиттариус (Sagittarius – 5%), прародителем потоков Хелми (Helmi 99 – 6%) и галактикой Секвойя (Sequoia – 5%), хотя некоторая неопределенность сохраняется из-за степени перекрытия их динамических характеристик. Из оставшихся скоплений 16% связаны с группами с низкими (Low Energy) и высокими (High Energy) энергиями орбит, в то время как остальные находятся на очень высоко поднимающихся над галактической плоскостью и сильно вытянутых орбитах, поэтому они имеют, скорее всего, гетерогенное происхождение.

В работах [5–7] мы вычислили вероятности принадлежности скоплений подсистемам толстого диска и гало по методике, описанной в работе Бенсби и др. [8], используя наземные измерения их остаточных скоростей. При этом генетически связанными с единым протогалактическим облаком мы посчитали только скопления, принадлежащие толстому диску, тогда как в гало оставили в этой категории лишь скопления на прямых орбитах с размерами, не выходящих далее 15 кпк от галактического центра. В работах, в частности, показано, что на диаграмме “ $[Fe/H]$ – $[\alpha/Fe]$ ” в диапазоне $[Fe/H] < -1.0$ вся совокупность аккрецированных скоплений занимает на диаграмме практически одну и ту же полосу вместе с быстрыми ($V_{\odot} > 240$ км/с), т.е. аккрецированными звездами поля. Зато практически все генетически связанные скопления, а также аккрецированные скопления, принадлежавшие в прошлом двум разрушенным массивным карликовым галактикам Sgt и CMa, вместе с генетически связанными звездами поля ($V_{\text{ост}} < 240$ км/с) концентрируются к верхней части этой полосы. При этом звезды нынешних карликовых галактик-спутников нашей Галактики при такой же низкой металличности имеют существенно меньшие величины $[\alpha/Fe]$. В результате сделан вывод, что все звездные объекты аккрецированного гало являются остатками галактик более высокой массы, чем нынешнее окружение Галактики.

Поскольку в своих предыдущих исследованиях мы выделяли скопления в предположительно аккрецированные и генетически связанные по отягощенным ошибкам наземным измерениям их расстояний и скоростей, в настоящей работе мы будем использовать стратификацию, выполненную Массари и др. [4] по более точным спутниковым данным. Эти данные позволили определить скорости и вычислить по ним орбиты практически всех известных шаровых скоплений, принадлежащих в настоящее время нашей Галактике, тем самым существенно увеличив используемое нами для анализа количество шаровых скоплений. В данной работе нас интересует отличие физических и химических свойств совокупностей

генетически связанных скоплений от аккрецированных, а также возможные различия в свойствах между разными предположительно аккрецированными группами скоплений.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

2.1. Содержания химических элементов

Для анализа поведения некоторых химических элементов в шаровых скоплениях мы взяли спектроскопические определения обилий железа и относительных содержаний некоторых химических элементов из нашего компилятивного каталога [5], включающего более ранний каталог Харриса [9]. В нем собраны и усреднены содержания 28 химических элементов в звездах 69 шаровых скоплений из 101 статьи, опубликованной с 1986 г. по 2018 г. Известно, что во всех скоплениях происходило самообогащение, и это изменяло их усредненные по звездам содержания некоторых химических элементов (см., напр., [10] и ссылки в ней). В основном оказались искаженными содержания только тех химических элементов, которые участвуют в реакциях протонных захватов, происходящих в гидростатических процессах горения гелия в центре или слоевых источниках гигантов асимптотической ветви. При сбросе оболочки такой звездой на более поздних стадиях эволюции эти элементы попадают в межзвездную среду скопления. В итоге новые поколения звезд в нем оказываются с измененным химическим составом. Средние содержания остальных химических элементов в звездах скоплений остаются практически первичными (см., напр., [11] и ссылки в ней). Это позволяет нам использовать усредненные по звездам скоплений содержания в них оставшихся неискаженными химических элементов для исследования природы каждого шарового скопления.

В настоящей работе мы рассмотрим поведение в шаровых скоплениях практически не подверженных искажению относительных содержаний четырех α -элементов (магния, кремния, кальция и титана) как наиболее информативных в плане диагностики эволюции ранней Галактики, а также одного элемента быстрых нейтронных захватов – европия. В работе [5] мы привели подробное описание процедуры усреднения относительных содержаний каждого элемента и их ошибок. Одновременно мы продемонстрировали, что внешние сходности определений используемых в настоящей работе химических элементов разными авторами лежат в диапазоне $\langle \sigma_{[el/Fe]} \rangle = (0.06-0.11)$ и сделали заключение о возможности использования наших компилятивных содержаний химических элементов для статистического анализа начального химического состава скоплений, принадлежащих разным подсистемам

Галактики. Поскольку спектроскопические данные известны менее чем для половины шаровых скоплений, постольку для анализа связей между физическими параметрами и содержаниями тяжелых элементов мы использовали металличесности из компьютерной версии компилятивного каталога Харриса [9], в котором они приведены почти для всех скоплений.

Для сравнения мы использовали звезды поля из каталога [12], в котором приведены металлические и относительные содержания всех α -элементов, а также европия для 785 звезд Галактики во всем интересующем нас диапазоне металличности. Содержания кремния в нем не приведены, поэтому они взяты из каталога [13], содержащего 714 F-G карликов поля. К сожалению, в последнем каталоге находятся звезды, принадлежащие, в основном, дисковым населением Галактики, поэтому малометаллические звезды здесь в дефиците.

2.2. Принципы определения мест рождения шаровых скоплений

В работе Массари и др. [4] были рассмотрены положения всех скоплений в пространстве вычисленных интегралов движения: полных энергий орбит (E), компонентов углового момента (L_Z) и компонентов углового момента (L_{\perp}), перпендикулярной L_Z , и других элементов их галактических орбит. При этом каждое скопление анализировалось на предмет ассоциации с единым протогалактическим облаком и с прародителями известных событий слияния, пережитых Галактикой. Рожденные, по мнению авторов, внутри Галактики (*in situ*) скопления ограничивались дополнительными параметрами. Так, скопления балджа должны удовлетворять условию $R_{\max} < 3.5$ кпк (в результате выделено 36 скоплений этой подсистемы), тогда как принадлежность скоплений к дисковой подсистеме ограничивалась невысоким поднятием точек орбит над галактической плоскостью ($Z_{\max} < 5$ кпк) и малыми эксцентриситетами галактических орбит. Причем среди выделенных 26 скоплений диска несколько оказались на ретроградных орбитах. Они нашли, что все “чистые” *in situ* скопления при одинаковой металличности демонстрируют больший возраст. Поэтому они исключили из этой группы два относительно молодых скопления (NGC 6235 и NGC 6254). Таким образом, кроме интегралов движения при стратификации шаровых скоплений учитывались также и их возрасты (подробнее см. далее). Отметим, что из-за большого разброса динамических характеристик группы Гайя–Энцелад и пересечения их с параметрами других групп, некоторым скоплениям авторы цитируемой работы вынуждены были

оставить двойную принадлежность. В результате на наших диаграммах такие скопления оказались обозначенными наложенными друг на друга двумя значками. Стратификация для всех скоплений приведена в [4].

Напомним, что в работах [5–7] мы относили к генетически связанным (т.е. рожденным из единого протогалактического облака) скопления, которые при движении по орбите не удалялись далее 15 кпк от галактического центра и были на прямых орбитах. Кроме того, они должны демонстрировать остаточные скорости такие же, как и звезды поля дисковых подсистем Галактики (т.е. близкие к круговым), и не считаться остатками известных на то время разрушенных галактик-спутников. Хотя мы и посчитали все скопления на ретроградных орбитах аккрецированными, тем не менее большинство скоплений, выделенные такими различающимися подходами к кинематическим данным в группу генетически связанных, совпали (сравни табл. 1 в работах [4] и [6]). Заметим, что в отличие Массари и др. [4] мы скопления балджа присовокупили к толстому диску, тогда как у этих авторов в дисковой подсистеме оказались и все звездные объекты подсистемы собственного гало.

2.3. Возрасты скоплений

Возрасты для 68 шаровых скоплений также взяты из работы [4]. Авторы этой работы все полученные по современным фотометрическим данным определения относительных возрастов разных авторов привели к однородной шкале абсолютных возрастов Ван Ден Берга и др. [14], которая базируется на спектроскопической шкале определений содержания химических элементов Карретта и др. [15].

2.4. Тип скопления по многокомпонентности населения

Уже долгое время известно, что звездные населения во всех шаровых скоплениях не являются химически однородными и в них существует, по крайней мере, два поколения звезд (1G и 2G). Второе население образовалось из выбросов прэволюционировавших звезд первого поколения и отличается повышенными содержаниями элементов протонных захватов. Однако существуют еще и скопления, которые демонстрируют две и более параллельных последовательностей 1G и 2G звезд. В серии статей Марино и др. (см. [16] и ссылки в ней) на основе данных Hubble Space Telescope UV Legacy Survey of Galactic Globular Clusters было проведено разделение шаровых скоплений на две группы по многокомпонентности в них звездного населения. Причем это разделение выполнено по спектроскопическим опре-

делениям содержаний химических элементов в звездах скоплений. Для исследования мы взяли все перечисленные в работе [16] семь скоплений с экстремально многокомпонентным типом населения Type II: NGC 362, NGC 1851, NGC 5286, NGC 6656, NGC 6715 (M 54), NGC 7089 (M 2) и NGC 5139 (ω Cen).

2.5. Массы скоплений

Массы скоплений до последнего времени определялись по их полной светимости. Сейчас, когда стали доступны данные Gaia DR2 и появилась возможность определения даже для наиболее удаленных скоплений не только их полных скоростей, но и скоростей их отдельных звезд, массы вычисляются по дисперсиям скоростей этих звезд. Основываясь на этих данных, Баумгардт и др. [17] определили дисперсии внутри 154 шаровых скоплений, вычислили их текущие массы, галактические орбиты и восстановили их начальные массы (M_{ini}), учтя потери звезд каждым скоплением за время жизни в результате взаимодействия с неоднородностями галактического потенциала и диссипации звезд. Из этой работы мы взяли текущие и начальные массы скоплений, а также средние радиусы их орбит.

2.6. Морфологический индекс

Морфологический индекс, или цвет горизонтальной ветви $HBR = (B - R)/(B + V + R)$, где B , V , R – соответственно количество звезд на голубом конце горизонтальной ветви, в полосе неустойчивости и на красном конце, взят из нашего каталога [5].

3. СВЯЗИ МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ СКОПЛЕНИЙ

На рис. 1а показана взаимосвязь между возрастом скоплений и металличностью (последняя на этом рисунке взята из каталога [9], поскольку имеется для всех скоплений). Разными значками обозначены скопления, принадлежащие всем девяти группам, выделенным в работе [4]. Скопления разных групп обозначены на рисунке разными значками, при этом образовавшиеся внутри Галактики (*in situ*) скопления обозначены большими шариками. На диаграмме отчетливо выделяются различающиеся возрастом две параллельные зависимости. Заметим, что авторы работы [14], первыми обнаружившие эту структуру на диаграмме, не нашли однозначного объяснения природы двух последовательностей, но связали их возникновение с различием потери скоплениями газа, выброшенного их гигантами асимптотической ветви. Хорошо видно, что при фиксированной металличности генетически связанные

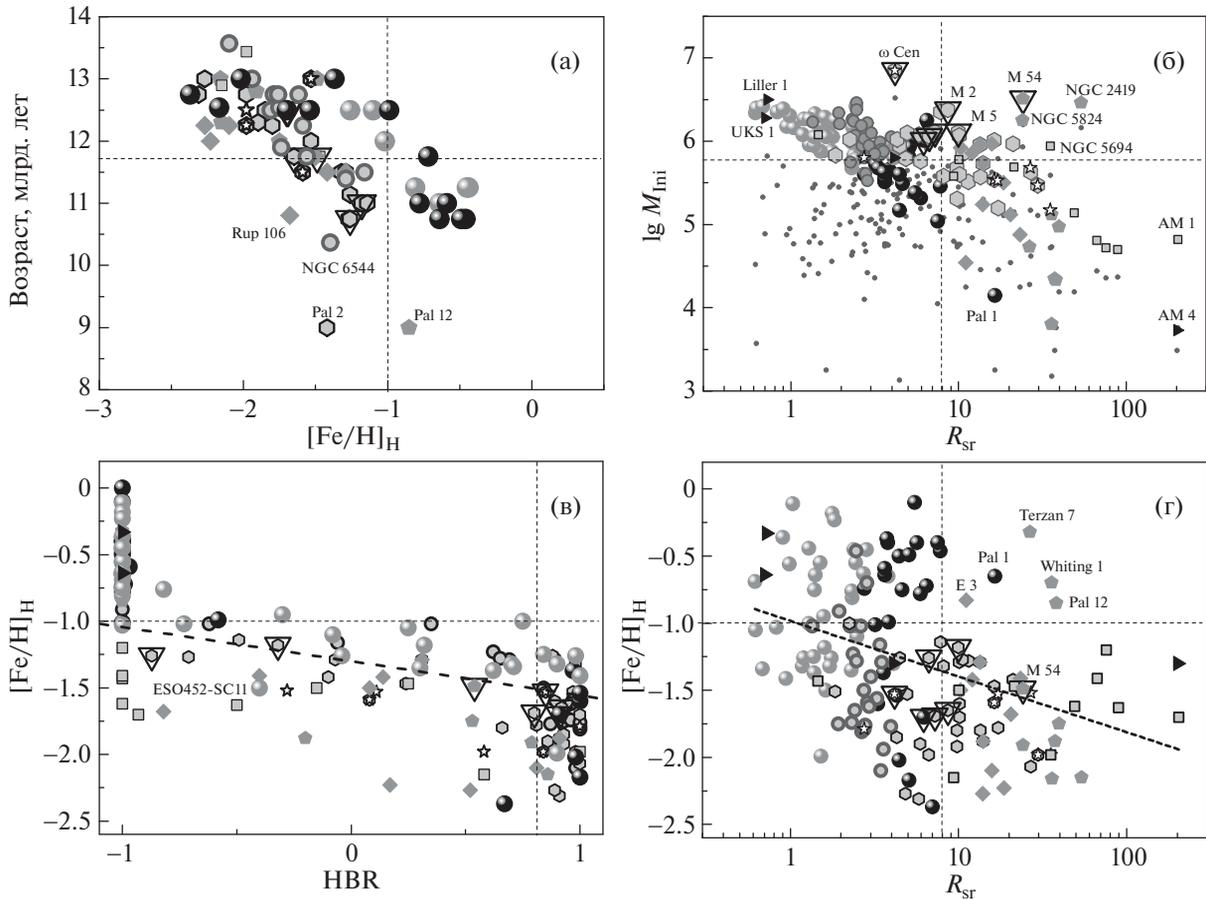


Рис. 1. Связь металличности с возрастом (а), среднего радиуса орбиты с начальной массой (б), морфологического индекса горизонтальной ветви с металличностью (в) и среднего радиуса орбиты с металличностью (г) для шаровых скоплений различного происхождения. Генетически связанные шаровые скопления обозначены большими шариками: светлые – балджа, темные – диска; аккрецированные скопления из разных групп показаны: большими кружками со светло-серым заполнением (группа Low Energy), шестиугольниками со светло-серым заполнением (Gaia–Enceladus), серыми пятиугольниками (Sagittarius), открытыми звездочками (Sequoia), квадратами со светло-серым заполнением (High Energy), косыми серыми квадратами (Helmi stream), черным треугольником, повернутым вправо – нестратифицированные скопления, большими треугольниками обведены скопления с экстремально многокомпонентным типом звездного населения Туре II. Серые точки – текущие массы шаровых скоплений (б). Горизонтальные пунктирные линии: средний возраст (а), средняя начальная масса (б), традиционная разделительная линия между диском и гало $[Fe/H]_H = -1.0$ (в, г). Вертикальные пунктирные линии: средний радиус солнечной орбиты (б, г), линия $HBR = 0.85$ отделяет экстремально голубые скопления (в). Подписаны скопления, упоминаемые в тексте. Величины $[Fe/H]_H$ из каталога Харриса [9]. Наклонная штриховая линия – радиальный градиент металличности (в, г), $[Fe/H] = (-0.42 \pm 0.08)R_{Sr} - (0.98 \pm 0.07)$ (г).

шаровые скопления балджа и диска старше скоплений, которые согласно их пространственно-кинематическим свойствам авторы работы [4] посчитали аккрецированными Галактикой из нескольких разрушенных галактик-спутников. Пересечение последовательностей скоплений разной природы на диаграмме наблюдается лишь для самых старых малометаллических скоплений. Именно это различие в возрастах авторы [4] посчитали одним из основных признаков (наряду с кинематикой) их внегалактического происхождения. На этой же диаграмме выделены скопления с экстремально многокомпонентным населением.

ем. Видим, что все они оказались среди аккрецированных скоплений.

На рис. 1б по данным работы [17] нанесены зависимости от средних радиусов орбит скоплений их текущих (черные точки) и вычисленных начальных масс (большие значки). Хорошо видно резкое различие начальных и текущих масс скоплений, средние радиусы орбит которых лежат внутри солнечного круга. Отсутствие на малых галактоцентрических расстояниях скоплений с первоначально малой массой авторы цитируемой работы объяснили их полным разрушением к настоящему моменту. Зато с увеличением среднего

радиуса их орбит нижний предел первоначальной массы монотонно увеличивается из-за уменьшающегося разрушающего эффекта от балджа и диска Галактики. Заметим, что избыток шаровых скоплений с малой массой на больших галактоцентрических расстояниях, обнаруженный по теплым массам, известен давно [18].

Обращает на себя внимание на рисунке понижение также и верхней границы первоначальной массы скоплений с увеличением радиуса орбиты, которое за пределами солнечного радиуса орбиты становится более резким (см. вертикальную пунктирную линию). Исключением являются три изначально массивных скопления из разрушенной галактики Сагиттариус, причем одно из них (M 54) предположительно являлось ядром этой галактики. У центральных скоплений галактик особая история формирования, и они не только практически не теряют звезды из-за диссипации, но и могут увеличивать свою массу за счет падедения на них звезд поля родительской галактики до разрушения последней. Все скопления с далекими орбитами ($R_{sr} > R_{\odot}$) и с начальными массами ниже средней (горизонтальную пунктирную линию) оказались аккрецированными. Получается, что в карликовых галактиках реже образуются массивные шаровые скопления. Хотя галактика Гайя–Энцелад, судя по количеству в ней массивных скоплений, была все же весьма массивной, но, тем не менее, уступала нашей Галактике. Такое предположение согласуется с выводом авторов работы [3], которые заявили, что примерно 10 млрд. лет назад наша Галактика захватила галактику со звездной массой $\sim 6 \times 10^8 M_{\odot}$. Особая ситуация у прародителя группы с низкой энергией (Low Energy), массы шаровых скоплений в которой даже больше, чем у скоплений группы диска, а радиусы орбит – меньше. Эту группу авторы работы [4] посчитали остатками какой-то разрушенной карликовой галактики, поскольку все они лежат на диаграмме “металличность–возраст” в полосе, в которой находятся все аккрецированные более молодые скопления (см. рис. 1а). Но, как видно из того же рисунка, наименее металлические скопления, составляющие более половины этой группы (7 из 13), лежат вместе с самыми старыми скоплениями диска. И только более металлические ($[Fe/H] > \sim -1.6$) оказываются моложе скоплений балджа и диска. Поэтому происхождение этой группы скоплений мы полагаем сомнительным (см. далее). Рис. 1б также дает возможность предположить происхождение нестратифицированных в работе [4] трех шаровых скоплений. В частности, малые средние радиусы орбит и высокие массы скоплений UKS 1 и Liller 1 свидетельствуют, что они, скорее всего, принадлежат к подсистеме балджа, тогда как очень уда-

ленное скопление с малой массой (AM 4) наверняка аккрецированное.

Большими треугольниками на рис. 1б выделены скопления Туре II, которые согласно авторам работы [16] имеют экстремально многокомпонентные населения. Эти скопления, как видим, все аккрецированные, изначально обладали массами более миллиона солнечных масс и все, кроме двух бывших ядер галактик-спутников (ω Cen и M 54), лежат на орбитах с радиусами, близкими к солнечному. Все такие скопления захвачены из разрушенных карликовых галактик-спутников, т.е. в начальный период своего формирования они практически не подвергались разрушительному действию неоднородностями гравитационного потенциала нашей Галактики. В итоге, благодаря также своей большой массе, они смогли сохранить газ, выбрасываемый их проэволюционировавшими звездами, и в состоянии были сформировать внутри себя несколько звездных населений.

Диаграмма “морфологический индекс горизонтальной ветви (HBR)–металличность” для скоплений, принадлежащих разным группам, приведена на рис. 1в. Из диаграммы видно, что практически все скопления (кроме ESO452–SC11) с металличностью ($-1.5 < [Fe/H] < -1.0$), принадлежащие балджу и диску, лежат в узком слое выше наклонной линии, проведенной “на глаз” и разделяющей положения этих скоплений и аккрецированных (см. также [5, 6]). Обратим внимание, что скопления группы с низкой энергией также все находятся выше этой линии. Этот факт подтверждает предположение, что они являются генетически связанными и образовались из единого протогалактического облака, как и скопления балджа и диска. Зато, как можно увидеть на рис. 1в, практически все аккрецированные скопления, в том числе и с экстремально многокомпонентным звездным населением, лежат ниже наклонной линии. Такое поведение скоплений на диаграмме неудивительно, поскольку впервые такая линия была проведена в работе Зинна [19], разделяя скопления, лежащие внутри и вне солнечного круга. Напомним, что в работе [4] принадлежность скоплений балджу и диску ограничивалась небольшим удалением от галактического центра (см. выше). Таким образом, подтверждается неоднократно высказываемое предположение, что малометаллические скопления с аномально покрасневшими горизонтальными ветвями имеют внегалактическое происхождение (см. [20]).

На рис. 1г приведена диаграмма “средний радиус орбиты–металличность” для всех наших скоплений. Данная диаграмма демонстрирует существование давно известного отрицательного радиального градиента металличности в нашей

Галактике. Из диаграммы видно, что градиент обусловлен исключительно тем, что аккрецированные скопления в основном имеют $[Fe/H] < -1.0$ (см. горизонтальную пунктирную линию), а все генетически связанные скопления находятся внутри солнечного радиуса (см. вертикальную пунктирную линию). Пять скоплений, неудовлетворяющие сказанному, подписаны, причем три из них принадлежат разрушенной галактике Сагиттариус. Именно эта галактика проэволюционировала изолированно дольше других разрушенных галактик и сумела достичь более высокой металличности. Хорошо видно, что среди генетически связанных половина скоплений балджа и треть диска имеют низкие металличности, характерные для аккрецированных скоплений. Такое свойство генетически связанных скоплений подтверждает вывод нашей работы [7] о том, что разделение шаровых скоплений по принадлежности к подсистеме толстого диска или гало по металличности значением $[Fe/H] = -1.0$, как это обычно делается (см. ссылки в [7]), некорректно. Обратим внимание, что скопления группы с низкой энергией имеют такой же диапазон металличности, как и скопления *in situ*, правда, малометаллических скоплений среди них подавляющее большинство. Тем не менее такое поведение на диаграмме более соответствует генетически связанным скоплениям. Все скопления с экстремально многокомпонентным звездным населением (кроме бывшего ядра М 54) имеют металличности, близкие к $[Fe/H] \approx -1.5$, и средние радиусы орбит, близкие к солнечному галактоцентрическому расстоянию.

4. СВЯЗИ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ СОДЕРЖАНИЙ НЕКОТОРЫХ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С МЕТАЛЛИЧНОСТЬЮ У ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

4.1. Альфа-элементы

На рис. 2а приведены диаграммы “ $[Fe/H] - [Mg/Fe]$ ” для шаровых скоплений, принадлежащих разным группам, и звезд поля разной природы (подробности ниже). Для ориентировки на рисунке ломаной кривой, проведенной “на глаз”, нанесена нижняя огибающая для генетически связанных скоплений. Кроме балджа и диска, эта же огибающая подходит и для группы с низкой энергией (Low Energy), подтверждая предположение о происхождении ее скоплений из межзвездного газа единого протогалактического облака. Оба скопления с известным химическим составом из группы с высокой энергией (High Energy) также близки к этой линии. Зато значительная часть скоплений аккрецированных групп Гайя—Энцелада, Секвойи, Хелми и Сагиттариус расположены значительно ниже этой линии. Не-

стратифицированное авторами работы [4] металличное скопление UKS 1 оказалось среди скоплений диска и балджа. Из рис. 2а можно увидеть, что в малометаллическом диапазоне генетически связанные скопления и звезды поля лежат на диаграмме в верхней части полосы, занимаемой всеми исследуемыми объектами.

На рис. 2б приведена диаграмма “ $[Fe/H] - [Si/Fe]$ ” для скоплений и звезд поля. Здесь скопления балджа и диска во всем диапазоне металличности лежат выше звезд поля (см. нижнюю огибающую этих скоплений). Напомним, что звезды поля на этой диаграмме взяты из каталога [13], в который включены только генетически связанные звезды дисковых подсистем Галактики. Подавляющая часть скоплений группы с низкой энергией находится также выше этой линии. Оба скопления с определенным химическим составом из группы с высокой энергией и здесь лежат вблизи нижней огибающей генетически связанных скоплений. Все скопления галактики Сагиттариус во всем диапазоне металличности оказались ниже проведенной нижней огибающей. Для остальных аккрецированных групп можно провести одну нижнюю огибающую еще ниже. Нестратифицированное скопление UKS 1 и по содержаниям кремния находится среди генетически связанных скоплений.

На рис. 2в приведена диаграмма “ $[Fe/H] - [Ca/Fe]$ ”. Содержания кальция в генетически связанных скоплениях демонстрируют слабо упорядоченную структуру на диаграмме, хотя линий этого элемента в видимом диапазоне несколько и содержания определяются весьма уверенно. Главным образом это выражается в том, что скопления всех групп занимают всю ширину полосы. В итоге весьма условно проведенная нами горизонтально нижняя огибающая для малометаллических генетически связанных скоплений получилась таковой практически для всех скоплений. В частности, скопления групп с низкой и высокой энергиями также оказались выше проведенной линии. Однако, как видно из диаграммы, некоторые скопления группы Сагиттариус во всем диапазоне металличности располагаются много ниже этой линии, значит и нижняя огибающая этой группы везде проходит ниже. Скопление UKS 1 расположено в верхней части диаграммы и имеет одно из самых высоких содержаний кальция $[Ca/Fe] = 0.4$.

На рис. 2г, где дана диаграмма “ $[Fe/H] - [Ti/Fe]$ ”, уверенно провести нижнюю огибающую для скоплений удается только в диапазоне $[Fe/H] > -1.0$. В менее металлическом диапазоне разброс содержаний титана настолько велик, что для всех групп (кроме групп с низкой и высокой энергиями) их следовало бы провести ниже всех звезд поля параллельно абсциссе значением

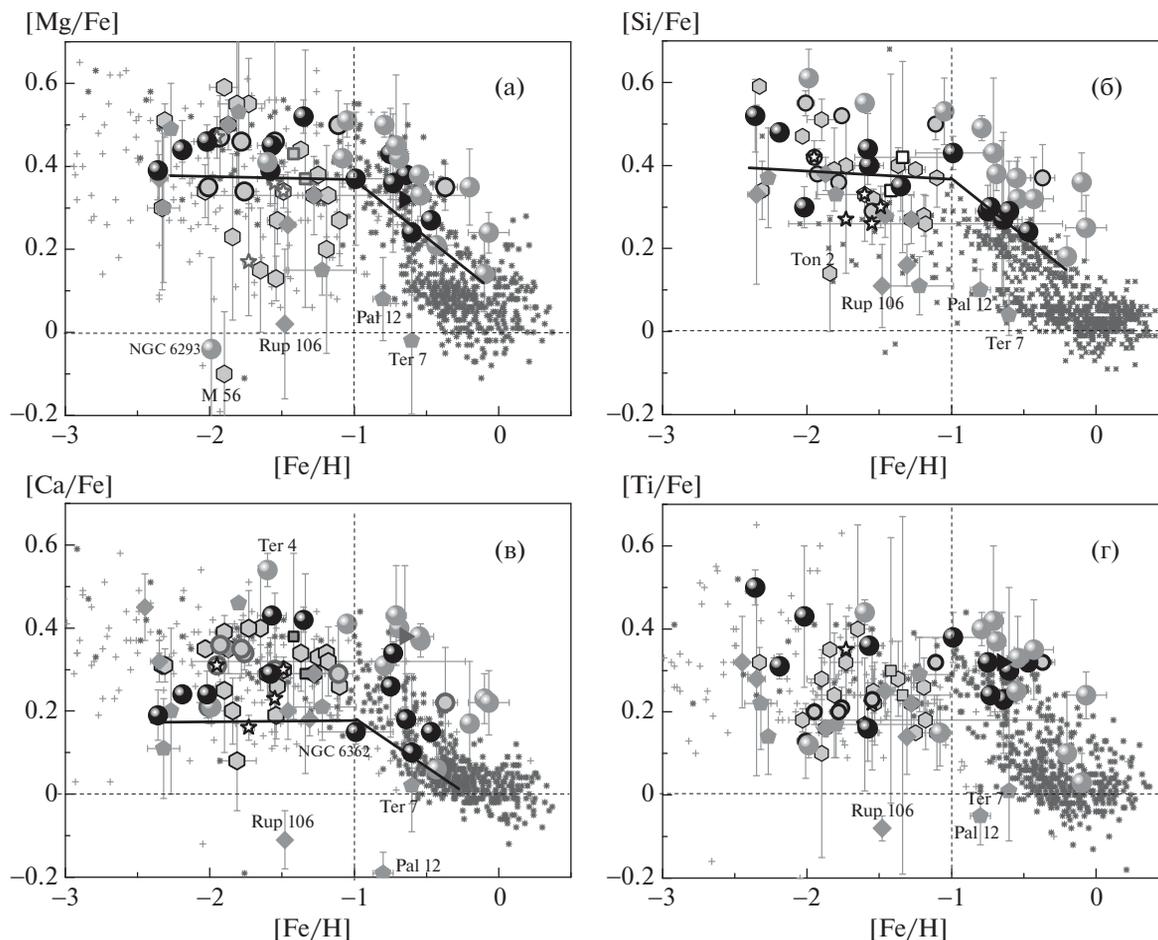


Рис. 2. Зависимость относительных содержаний магния (а), кремния (б), кальция (в) и титана (г) от металличности для шаровых скоплений нашего каталога и звезд поля из каталога [12] (а, в, г) и из [13] (б). Обозначения шаровых скоплений и звезд поля, как на рис. 1. Темные звездочки – генетически связанные звезды поля с $V_{\text{ост}} < 240$ км/с, светло-серые крестики – более высокоскоростные звезды поля (б). Горизонтальные пунктирные линии проведены через солнечные относительные содержания элементов, а вертикальные – через разделительное значение $[Fe/H] = 1.0$. Барями нанесены усредненные авторские ошибки определения содержаний для шаровых скоплений. Ломаные кривые – проведенные “на глаз” нижние огибающие для генетически связанных скоплений.

$[Ti/Fe] \approx 0.15$. Скопление UKS 1 и здесь находится внутри полосы, занимаемой металичными генетически связанными скоплениями.

4.2. Усредненные содержания α -элементов

Поскольку согласно современным представлениям большинство атомов всех α -элементов образуются в одних и тех же процессах ядерного синтеза, естественно ожидать, что усредненные по магнию, кремнию, кальцию и титану величины относительных содержаний окажутся более надежными, чем для любого отдельного взятого элемента, и позволят корректнее представить различия отношений $[\alpha/Fe]$ у скоплений разных групп. Диаграммы “ $[Fe/H]$ – $[Mg, Si, Ca, Ti/Fe]$ ” для шаровых скоплений и звезд поля приведены на рис. 3а. Количество скоплений здесь несколько

ко меньше, чем с отдельными элементами, но надежность средних значений выше. На рисунке это проявляется в том, что полосы, занимаемые и звездами поля, и шаровыми скоплениями, здесь получились заметно уже, а различия в положениях скоплений разных групп и звезд различной природы более отчетливыми.

Для генетически связанных звезд поля и скоплений, т.е. образовавшихся из единого протогалактического облака, металличность может служить статистическим индикатором их возраста, поскольку в замкнутой звездно-газовой системе (каковой в первом приближении можно считать нашу Галактику) общее содержание тяжелых элементов со временем неуклонно увеличивается. Таковыми мы полагаем звезды поля с остаточной скоростью $V_{\text{ост}} < 240$ км/с (см. [21]) (обозначены они на диаграмме маленькими темными снежин-

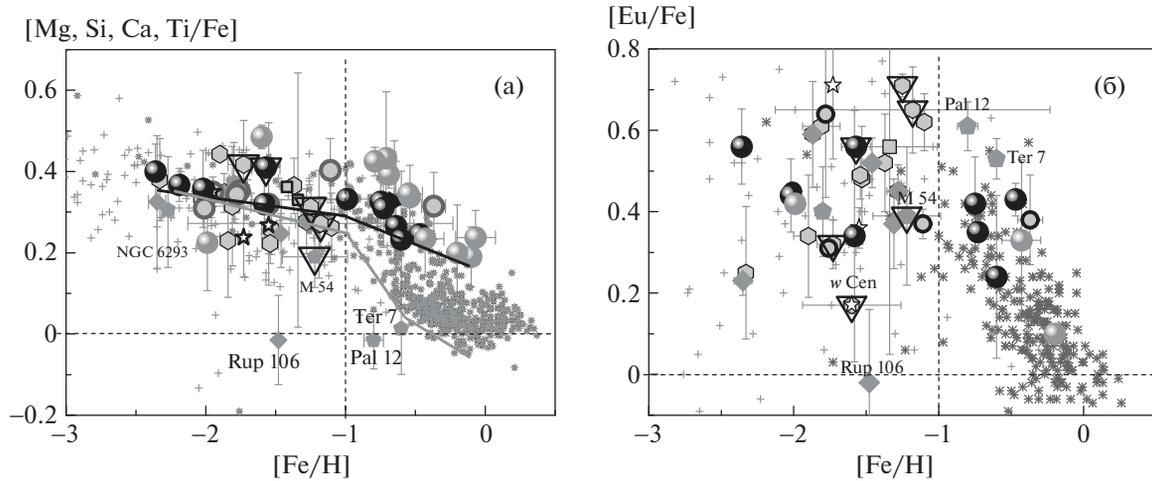


Рис. 3. Зависимость относительных содержаний, усредненных по четырем α -элементам (Mg, Si, Ca, Ti) (а), и элемента быстрых нейтронных захватов (Eu) (б) от металличности для шаровых скоплений и звезд поля из каталога [12] (ввиду отсутствия содержаний кремния у звезд поля на панели (а), отношения $[\alpha/\text{Fe}]$ получены по трем элементам). Обозначения как на рис. 1 и 2. Ломаные линии – проведенные “на глаз” нижние огибающие для генетически связанных шаровых скоплений (черная) и звезд поля (серая).

ками). Подавляющее число звезд поля с более высокими остаточными скоростями (обозначены серыми крестиками) имеют ретроградное вращение (см. [21]). Все более высокоскоростные звезды можно считать кандидатами в аккрецированные. Обратим внимание, что малометаллические ($[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$) генетически связанные звезды поля располагаются вдоль верхней половины полосы на наших диаграммах “ $[\text{Fe}/\text{H}] - [\alpha/\text{Fe}]$ ”, и это подтверждает вывод работы [22] о том, что малометаллические звезды поля с пониженными относительными содержаниями α -элементов являются аккрецированными. Разделительную линию эти авторы для звезд с $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ провели по величине $[\alpha/\text{Fe}] \sim 0.3$. Для ориентировки серой ломаной линией и мы провели здесь “на глаз” нижнюю огибающую для генетически связанных звезд, положение которой, как видим, практически совпало с предложенной авторами работы [22]. Относительно положения металлических ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$) шаровых скоплений на диаграммах “ $[\text{Fe}/\text{H}] - [\alpha/\text{Fe}]$ ” мы подробно писали в работе [7].

Темной ломаной линией на рисунке “на глаз” нанесена нижняя огибающая для скоплений, названных в работе [4] *in situ*. Примерно там же в малометаллическом диапазоне проходит и нижняя огибающая для генетически связанных звезд поля, нанесенная серой линией также “на глаз”. Только скопление NGC 6293 из балджа оказалось в малометаллическом диапазоне много ниже этой линии. У этого скопления только содержания кремния получились самыми высокими среди скоплений, тогда как все остальные элементы неизменно демонстрируют заниженные относи-

тельные содержания. Видим, что выше проведенной линии находятся также и практически все скопления из группы с малой энергией орбит, возможно также и из группы с высокой энергией (правда, последних с химсоставом только два). Получается, что скопления с определенными относительными содержаниями α -элементов из группы с низкой энергией, как и из группы с высокой энергией уверенно держатся среди генетически связанных. Большая часть скоплений всех остальных аккрецированных групп лежит ниже этой линии. Среднее содержание четырех альфа-элементов у малометаллических генетически связанных скоплений: $\langle [\alpha/\text{Fe}] \rangle = 0.36 \pm 0.03$, тогда как у аккрецированных скоплений оно за пределами ошибок меньше и составляет 0.29 ± 0.02 . Эти значения совпадают с аналогичными величинами для звезд поля: 0.34 ± 0.02 и 0.29 ± 0.01 соответственно.

Несмотря на малую численность, можно заметить, что скопления группы Сагиттариус (Sgr) образуют довольно узкую полосу, которая во всем диапазоне металличности лежит ниже нижней огибающей для генетически связанных звезд поля (см. серую ломаную линию) и ниже нижней огибающей для генетически связанных шаровых скоплений. Единственное скопление с известными нам относительными содержаниями α -элементов, принадлежность которого авторы работы [4] не смогли установить – UKS 1, попало в область, заполненную металлическими скоплениями диска и балджа. Видно также, что шаровые скопления с экстремально многокомпонентным населением при довольно близких металличностях

демонстрируют значительное различие в относительных содержаниях α -элементов.

4.3. Элемент быстрых нейтронных захватов

На рис. 3б приведены диаграммы зависимости от металличности относительных содержаний представителя элементов быстрых нейтронных захватов — европия — для шаровых скоплений, принадлежащих разным группам, и звезд поля. Известно, что элементы быстрых нейтронных захватов образуются при вспышках наименее массивных сверхновых второго типа с массами $(8-10) M_{\odot}$, а часть таких атомов и в результате слияния нейтронных звезд [23]. Поскольку и α -элементы выбрасываются в межзвездную среду также SNe II (правда с массами $>10M_{\odot}$) интегрально диаграммы “[Fe/H]—[α /Fe]” и “[Fe/H]—[Eu/Fe]” довольно похожи. Однако отношения [Eu/Fe] в малометаллическом диапазоне у скоплений разного происхождения не обнаруживают четкого различия положений, подобных отмеченным у отношений [α /Fe]. Здесь скопления всех групп перемешаны, и далеко за пределами ошибок отскакивают вниз только два аккрецированных скопления — ω Cen и Rup 106. Однако можно заметить, что в этом диапазоне наибольшие величины отношений [Eu/Fe] демонстрируют не генетически связанные, а аккрецированные скопления (в основном из галактики Гайя—Энцелад). Зато в диапазоне [Fe/H] > -1.0 скопления балджа, диска и группы с низкой энергией орбит образуют последовательность, лежащую в верхней части полосы звезд поля.

Обратим внимание, что с наиболее высокими отношениями [Eu/Fe] оказались оба металлических скопления из галактики Сагиттариус — Pal 12 и Ter 7. Возможно, такое противоположное относительным содержаниям α -элементов положение отношений [Eu/Fe] получилось из-за того, что межзвездное вещество в карликовой галактике Сагиттариус, скорее всего, обогащалось преимущественно сверхновыми SNe II малых масс, которые являются основными поставщиками элементов быстрых нейтронных захватов. В итоге в этой галактике, как видим, у этих скоплений наблюдается дефицит α -элементов и избыток r -элементов. Однако это предположение требует дополнительных исследований.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Перечислим продемонстрированные в работе основные свойства шаровых скоплений, образовавшихся согласно авторам работы [4] *in situ*, т.е. скоплений балджа и диска. Все они находятся на орбитах, средние радиусы которых менее солнечного (см. рис. 1б, г). Кроме большего возраста при

одинаковой металличности, чем у аккрецированных скоплений (см. рис. 1а), эти скопления оказываются в среднем и с более высокими относительными содержаниями α -элементов (см. рис. 2 и 3а). Как правило, скопления диска и балджа имеют преимущественно большие начальные массы (см. рис. 1б), поскольку вблизи галактического центра все менее массивные скопления успели полностью распасться на отдельные звезды. Кроме того, металлические скопления этих групп обладают экстремально красными, а малометаллические — экстремально голубыми горизонтальными ветвями (рис. 1в). При этом скопления балджа (и одно скопление диска) с промежуточной металличностью ($-1.3 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.9$) имеют и горизонтальные ветви промежуточного цвета. Получается, что именно совокупность всех перечисленных свойств присуща скоплениям, образовавшимся внутри единого протогалактического облака, т.е. являющимся генетически связанными.

Оказалось, что практически всеми перечисленными свойствами обладают и скопления группы с низкими энергиями орбит (Low Energy), приписанные авторами работы [4] к аккрецированным. Поэтому мы приходим к выводу, что они, на самом деле, являются генетически связанными, несмотря на то, что все они на диаграмме “металличность—возраст” находятся в полосе, занимаемой аккрецированными скоплениями, причем часть из них при одинаковой металличности оказались моложе генетически связанных (см. рис. 1а). К такому же выводу пришли и авторы работы [24] на основании обнаружения у них высоких относительных содержаний кремния по данным SDSS-APOGEE. Можно предположить, что скопления этой группы образовались несколько позднее остальных из изолированных протогалактических фрагментов. Безусловно, это предположение требует проверки численным моделированием. К генетически связанным, скорее всего, принадлежит и нестратифицированное в [4] металлическое скопление UKS 1, у которого содержания всех α -элементов такие же, как у скоплений балджа и диска. Поскольку, как видно из рис. 1б, его масса более миллиона солнечных масс, а из рис. 1г — средний радиус ее орбиты ≈ 0.7 кпк, оно принадлежит балджу. Кроме того, малый средний радиус орбиты и большая масса нестратифицированного в [4] скопления Liller 1 предполагает, что и оно, скорее всего, принадлежит балджу (см. также [24]), зато очень удаленное скопление с малой массой (AM 4) наверняка имеет внегалактическое происхождение.

Скопления всех остальных групп демонстрируют в среднем заметно более низкие относительные содержания α -элементов (см. рис. 2 и 3а), что предполагает их рождение в галактиках меньших масс, чем у нашей Галактики. Причем вряд ли

низкие величины отношений $[\alpha/\text{Fe}]$ у аккрецированных скоплений можно объяснить только меньшей скоростью звездообразования в этих разрушенных карликовых галактиках (как обычно полагают), поскольку значительное количество молодых аккрецированных скоплений так же, как и генетически связанные, имеют высокие относительные содержания α -элементов. Кроме того, относительные содержания европия аналогичной тенденции не обнаруживают. Скорее всего, разброс обусловлен просто плохим перемешиванием межзвездной среды в карликовых галактиках, внутри которых в разных местах вспыхивают SNe II разных масс. Более приемлемым представляется объяснить наблюдаемое завышение в среднем более высокими массами сверхновых второго типа в нашей очень массивной Галактике. Действительно, с одной стороны, согласно современным представлениям выход α -элементов увеличивается с ростом массы предсверхновой (см., напр., [25]). А с другой стороны, известно, что в карликовых галактиках малой массы с большей вероятностью происходят вспышки сверхновых небольших масс [26]. Однако массы карликовых галактик, поставивших нашей Галактике шаровые скопления, были на самом деле значительно больше, чем массы карликовых галактик-спутников, окружающих ее в настоящее время (см., в частности, [5, 6, 27]). Этот вывод сделан на основании того, что величины отношений $[\alpha/\text{Fe}]$ в звездах выживших карликовых галактиках-спутниках существенно меньше, чем у шаровых скоплений и звезд поля, принадлежащих в настоящее время нашей Галактике (см., напр., [6]). И действительно, как показывают спутниковые определения расстояний и скоростей звездных объектов, массы аккрецированных 10 млрд. лет назад галактик были довольно большими, но меньше, чем у нашей Галактики. Так, выше мы уже отмечали, что масса карликовой галактики Gaia–Enceladus, согласно авторам работы [3], значительно превышает массу Малого Магелланова Облака, только звездная масса в которой достигает $\approx 5 \times 10^9 M_{\odot}$. Звездная масса в галактике Секвойя составляет $\sim 5 \times 10^7 M_{\odot}$, в то время как общая масса $\sim 10^{10} M_{\odot}$ [2]. Моделирование кинематики приливного хвоста звезд галактики Сагиттариус в работе [28] показало, что, для того чтобы воспроизвести дисперсию скоростей в потоке от этой галактики, масса ее темного гало должна быть $M = 6 \times 10^{10} M_{\odot}$. Массы других распавшихся галактик, образовавших исследуемые в настоящей работе группы скоплений (Sequoia, High Energy и Helmi streams 99), лишь немногим меньше, чем у перечисленных (см. [29] и ссылки в ней). В итоге получается, что на ранних этапах своего формирования нашей Галактикой

были аккрецированы наиболее массивные галактики-спутники, тогда как наименее массивные пока еще продолжают существовать автономно.

Одновременно у разрушенных карликовых галактик наряду с уже известным уменьшением нижнего предела начальных масс скоплений с удалением от галактического центра обнаружилось еще одно интересное свойство: в них практически отсутствуют шаровые скопления больших масс (см. рис. 1г). Исключениями можно назвать лишь несколько скоплений, и два из них являются центральными скоплениями этих бывших галактик. Причем верхний предел масс уменьшается с увеличением средних радиусов орбит скоплений. Это уменьшение уже нельзя объяснить разрушением скоплений. Численное моделирование показывает, что довольно массивные галактики-спутники начинают интенсивно разрушаться приливными силами Галактики только после значительного уменьшения размеров своих орбит, тогда как менее массивные разрушаются еще на дальних подступах к нашей Галактике [30]. При этом наименее массивные скопления теряются карликовыми галактиками в первую очередь, поэтому они большей частью остаются на далеких орбитах. Исходя из вышеизложенного, мы можем предположить, что чем меньше масса родительской галактики, тем меньше максимальные массы образующихся в них шаровых скоплений.

Наконец, у ряда наиболее массивных скоплений из разрушенных карликовых галактик наблюдаются экстремально многокомпонентные звездные населения типа Туре II (см. рис. 1). Среди них присутствуют центральные скопления галактик Секвойя (ω Cen) и Сагиттариус (M 54), 4 скопления из самой массивной из разрушенных галактики Гайя–Энцелад и самое малометалличное из этой группы скопление диска (M 22), обладающее к тому же лишь немногим отличной от экстремально голубой горизонтальной ветвью. При этом все эти скопления имеют возрасты менее 12.5 млрд. лет, промежуточную металличность ($-1.7 < [\text{Fe}/\text{H}] < -1.2$) и средние радиусы орбит, примерно равные солнечному. Образование экстремально многокомпонентных звездных населений в массивных аккрецированных скоплениях можно объяснить тем, что они долго эволюционировали вдали от разрушающего влияния неоднородностей гравитационного потенциала нашей Галактики и в результате сохранили все обогащенное вещество, выброшенное их проэволюционировавшими звездами, из которого образовались новые поколения звезд.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Давиду Массари (Davide Massari) за предоставление неопубликованных

возрастов шаровых скоплений и Холгеру Баумгардту (Holger Baumgardt) за предоставление уточненных начальных масс шаровых скоплений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследования были финансово поддержаны Южным федеральным университетом, 2020 (Министерство науки и высшего образования Российской Федерации).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. Ibata, G. Gilmore, and M. Irwin*, *Nature* **370**, 194 (1994).
2. *J. T. Mackereth, R. P. Schiavon, J. Pfeffer, C. R. Hayes, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, 3426 (2019).
3. *A. Helmi, C. Babusiaux, H. H. Koppelman, D. Massari, J. Veljanoski, and A. G. A. Brown*, *Nature* **563**, 85 (2018).
4. *D. Massari, H. H. Koppelman, and A. Helmi*, *Astron. and Astrophys.* **630**, id. 4 (2019).
5. *V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha*, *Astron. Rep.* **63**, 274 (2019).
6. *V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha*, *Astrophys. Bull.* **74**, 404 (2019).
7. *V. A. Marsakov, V. V. Koval', and M. L. Gozha*, *Astrophys. Bull.* **75**, 21 (2020).
8. *T. Bensby, S. Feltzing, and I. Lundstrom*, *Astron. and Astrophys.* **410**, 527 (2003).
9. *W. E. Harris*, *Astron. J.* **112**, 1487 (1996), arXiv: 1012.3224 [astro-ph.GA].
10. *E. Carretta*, in *The General Assembly of Galaxy Halos: Structure, Origin and Evolution*, edited by A. Bragaglia, M. Arnaboldi, M. Rejkuba, and D. Romano, *Proc. IAU Symp.* **317**, 97 (2016).
11. *J. Pritzl, K. A. Venn and M. Irwin*, *Astron. J.* **130**, 2140 (2005).
12. *K. A. Venn, M. Irwin, M. D. Shetrone, C. A. Tout, V. Hill, and E. Tolstoy*, *Astron. J.* **128**, 1177 (2004).
13. *T. Bensby, S. Feltzing, and M. S. Oey*, *Astron. and Astrophys.* **562**, id. 71 (2014).
14. *D. A. VandenBerg, K. Brogaard, R. Leaman, and L. Casagrande*, *Astrophys. J.* **775**, id. 134 (2013).
15. *E. Carretta, A. Bragaglia, R. Gratton, V. D'Orazi, and S. Lucatello*, *Astron. and Astrophys.* **508**, 695 (2009).
16. *A. F. Marino, A. P. Milone, A. Renzini, F. D'Antona, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **487**, 3815 (2019).
17. *H. Baumgardt, M. Hilker, A. Sollima, and A. Bellini*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **482**, 5138 (2019).
18. *T. V. Borkova and V. A. Marsakov*, *Bull. SAO* **54**, 61 (2002).
19. *R. Zinn*, in *The Globular Cluster-Galaxy Connection*, edited by *H. Smith and J. Brodee*, *ASP Conf. Ser.* **48**, 38 (1993).
20. *G. S. Da Costa and T. E. Armandroff*, *Astron. J.* **109**, 253 (1995).
21. *V. A. Marsakov and T. V. Borkova*, *Astron. Letters* **32**, 545 (2006).
22. *P. E. Nissen and W. J. Schuster*, *Astron. and Astrophys.* **511**, L10 (2010).
23. *J. J. Cowan, C. Sneden, J. E. Lawler, A. Aprahamian, M. Wiescher, K. Langanke, G. Martinez-Pinedo, and F.-K. Thielemann*, arXiv: 1901.01410 [astro-ph.HE] (2010).
24. *D. Horta, R. P. Schiavon, J. T. Mackereth, T. C. Beers, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **493**, 3363 (2020).
25. *C. Travaglio, D. Galli, R. Gallino, M. Busso, F. Ferrini, and O. Straniero*, *Astrophys. J.* **521**, 691 (1999).
26. *J. Köppen, C. Weidner, and P. Kroupa*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **375**, 673 (2007).
27. *J. Pritzl, K. A. Venn, and M. Irwin*, *Astron. J.* **130**, 2140, (2005).
28. *S. L. J. Gibbons, V. Belokurov, and N. W. Evans*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **464**, 794 (2017).
29. *H. H. Koppelman, A. Helmi, D. Massari, A. M. Price-Whelan, T. K. Starkenburg*, *Astron. and Astrophys.* **631**, id. L9 (2019).
30. *M. G. Abadi, J. F. Navarro, M. Steinmetz, and V. R. Eke*, *Astrophys. J.* **591**, 499 (2003).