

УДК 524.78

Т. В. Никитюк

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27
nikita@mao.kiev.ua

Формирование звездного населения гало в эллиптических и спиральных галактиках

Рассматривается сценарий формирования гало галактик путем слияния фрагментов. В рамках сценария получены наборы фрагментов из наблюдаемых распределений по металличностям шаровых скоплений и звезд поля гало нашей Галактики и некоторых других галактик. Полученные результаты позволяют предположить, что: 1) в Галактике формирование звезд поля гало происходило во фрагментах, эволюционирующих как замкнутая система; 2) в Галактике формирование основной массы звезд поля гало может быть связано с образованием шаровых скоплений гало; 3) формирование звезд поля гало M31 и NGC 5128, по-видимому, не связано с образованием шаровых скоплений гало в этих галактиках.

ФОРМУВАННЯ ЗОРЯНОГО НАСЕЛЕННЯ ГАЛО В ЕЛІПТИЧНИХ ТА СПІРАЛЬНИХ ГАЛАКТИКАХ, Никитюк Т. В. — Розглядається сценарій формування гало галактик шляхом злиття фрагментів. У рамках сценарію отримано набори фрагментів із спостережуваних розподілів металічностей кулястих скупчень зір поля гало нашої Галактики і деяких інших галактик. Отримані результати дозволяють висловити припущення, що: 1) в Галактиці формування зірок поля гало відбувалось у фрагментах, які еволюціонували як замкнена система; 2) в Галактиці формування основної маси зірок поля гало може бути пов'язане з утворенням кулястих скупчень гало, 3) формування зірок поля гало M31 і NGC 5128, схоже, не пов'язане з утворенням кулястих скупчень гало в цих галактиках.

THE FORMATION OF THE HALO STELLAR POPULATION IN SPIRAL AND ELLIPTICAL GALAXIES, by Nikityuk T. V. — A scenario of the galactic halo formation through mergers of fragments is considered. In the framework of the scenario sets of the fragments are obtained from the observed halo metallicity distribution functions for the Milky Way and some other galaxies. Our results allow us to make the following suggestions: 1) in the Galaxy the halo field star formation occurred in fragments evolved as a closed system; 2) in the Galaxy the formation of the halo field stars can be associated with the halo globular cluster formation; 3) the formation of the bulk of the halo field stars for M31 and NGC 5128, perhaps, is not connected with the formation of the halo globular clusters in these galaxies.

ВВЕДЕНИЕ

Самые старые звездные системы несут в себе информацию о процессах, происходивших в галактиках в раннюю эпоху их формирования. Исследования возрастов и металличностей этих систем позволяют вносить ограничения в теоретическое описание процессов формирования галактик. Поэтому звездное население гало является подходящим объектом для тестирования моделей формирования (прото)галактики. Чтобы объяснить наблюдаемую корреляцию между эксцентриситетом и металличностью звезд-карликов, Эгген, Линден-Белл и Сендидж [13] рассмотрели быстрый коллапс монолитного протогалактического облака, продолжающийся примерно $2 \cdot 10^8$ лет. Сирл и Зинн [42], исследуя шаровые скопления Галактики, обнаружили, что систему шаровых скоплений можно разделить на две подсистемы с различными кинематическими и химическими характеристиками. Следует отметить, что распределение металличностей шаровых скоплений в других галактиках (спиральных и гигантских эллиптических) также указывает на наличие двух (а иногда и больше) подсистем шаровых скоплений [5, 8, 15—17, 27]. Но такое разделение системы шаровых скоплений на две подсистемы трудно объяснить в рамках модели монолитного коллапса. Поэтому Сирл и Зинн предложили модель формирования галактики, в рамках которой звезды и шаровые скопления гало образовались во фрагментах, которые слились с основным телом на промежутке времени более 1 млрд лет. Если галактики формируются в быстром монолитном коллапсе, в котором время обогащения межзвездной среды тяжелыми элементами короче, чем время коллапса, то звезды гало и шаровые скопления должны показывать корреляцию между возрастом и металличностью. Если же звездное население гало сформировалось во фрагментах, эволюционирующих независимо друг от друга, оно не должно показывать такой корреляции [42].

В настоящее время есть достаточно большое количество наблюдательных данных, свидетельствующих в пользу того, что слияние/аккреция может играть значительную роль в формировании галактик. Карни и др. [7] обнаружили, что высокоскоростные низкометаллические звезды гало Галактики можно разделить на два населения: «низкое» и «высокое» гало. Они предположили, что происхождение звезд низкого гало связано с формированием протодиска, а звезды высокого гало, по-видимому, сформировались в карликовых галактиках-сателлитах, которые были захвачены Галактикой, так как они показывают ретроградное вращение (т. е. вращение в направлении, противоположном преобладающему) и не показывают признаков радиального градиента металличности. Известно несколько десятков высокоскоростных низкометаллических звезд гало, которые по сравнению с большинством звезд поля гало имеют пониженные значения отношений содержания α -элементов (Mg, Ca, Si) и Fe. Все эти звезды имеют большие апогалактические расстояния, т. е. могли сформироваться в галактиках-спутниках, химическая эволюция которых происходила независимо от эволюции Галактики, и которые позднее были захвачены Галактикой [26]. Примером подобного захвата может служить ближайшая карликовая галактика Sagittarius [24]. Другим примером является Магелланов поток как результат захвата газа из Магеллановых Облаков [36]. В гало M31 обнаружен поток звезд с $[Fe/H] > -0.7$. Предполагается, что это образование — часть большого потока звезд от карликовых галактик NGC 205 и M32 [25].

Звездное население шарового скопления ω Cep показывает признаки наличия нескольких различных звездных популяций, что указывает на больше чем одну эпоху звездообразования в этом скоплении. Это позволяет

предположить, что ω Cep было частью более массивной системы, которая когда-то слилась с Галактикой [29].

Наблюдения звездного потока в гало на расстоянии 4-5 кпк над плоскостью Галактики также показали, что члены этого потока показывают ретроградное вращение; по всей вероятности, поток является остатком карликовой галактики, захваченной нашей Галактикой ранее [30].

Если рассматривать химическую эволюцию Галактики в рамках простой модели химической эволюции, неизбежно возникают противоречия с наблюдательными данными — модель предсказывает большее количество низкометаллических звезд в диске в сравнении с наблюдательными данными (проблема G-карликов) [2, 33]. По-видимому, подобная проблема есть и для других галактик [21]. Одним из вариантов решений этой проблемы является учет в модели химической эволюции галактик взаимодействия вещества Галактики с окружающей средой [2]. Захват фрагментов (прото)галактикой является примером такого взаимодействия.

Здесь предполагается, что звездное население гало представляет собой смесь звезд, которые образовались во фрагментах, первоначально эволюционировавших независимо от основного протогалактического облака. Следовательно, должен быть такой набор фрагментов, который позволит воспроизвести наблюдаемое распределение звезд гало по металличностям. Целью работы является отыскание такого набора фрагментов. Это может прояснить вопрос, формируются ли шаровые скопления и звезды поля гало в одних и тех же фрагментах. Чтобы выяснить, есть ли различия в формировании гало нашей и других галактик, будет проведено сравнение полученных наборов фрагментов для гало Галактики, M31 и некоторых других галактик, для которых есть соответствующие наблюдательные данные.

МОДЕЛЬ

Рассматривается модель эволюции (прото)галактики, звездное гало которой представляет собой смесь звезд, сформировавшихся в разных фрагментах [34].

Для химической эволюции не имеет значения, будет ли рассматриваться аккреция карликовых галактик-сателлитов на массивное центральное тело или слияние множества фрагментов (на которые распалась первоначально единая газовая (прото)галактика) с массивным фрагментом (или группой фрагментов) в центре, если и фрагменты, и сателлиты будут эволюционировать независимо от центрального тела (протодиска и балджа) до момента слияния с ним. Будем поэтому для простоты называть аккрецирующие/сливающиеся тела фрагментами.

Будем считать, что масса фрагментов, из которых формируется гало, равняется сумме масс звездного гало в современную эпоху и газа, ушедшего в диск. Предполагается, что каждый из фрагментов эволюционирует как замкнутая система, слияния между фрагментами не принимаются во внимание. Звездообразование в разных фрагментах может начинаться в разное время. Фрагмент эволюционирует до определенного уровня астрации s ($s = 1 - \mu$, μ — доля массы газа во фрагменте), прежде чем «упадет» на (прото)галактику. Звезды, образовавшиеся до этого момента, пополняют звездное население гало, а газ выпадает на диск. Некоторые фрагменты могут быть захвачены протогалактикой еще до образования в них звездного населения, т. е. захватываются чисто газовые фрагменты.

Нуклеосинтез *. Вклад элементов, синтезированных популяцией звезд, образовавшихся во фрагменте, в межзвездную среду зависит от: 1) синтеза

* Идея полностью взята из работы [3]

элементов звездами различных масс, 2) количества звезд в определенном интервале масс, т. е. от начального спектра масс.

Начальный спектр масс для интервала масс от m до $m + dm$ имеет вид

$$N(m) = \varphi_0 m^{-A} dm, \quad (1)$$

где φ_0 — нормировочный коэффициент, определяющийся из условия

$$\varphi_0 \sum_{j=1}^n m_j^{-A+1} \Delta m = 1M_{\odot}. \quad (2)$$

Принимается, что начальный спектр масс описывается законом Солпитера с $A = 2.35$ [41]. Верхний и нижний пределы масс формирующихся звезд принимаются равными $m_U = 120M_{\odot}$ и $M_L = 0.1M_{\odot}$ соответственно. Масса вещества, выброшенного звездами популяции на момент времени t , равна

$$Q_m(t) = \int_0^t \int_{m_L}^{m_U} \dot{Q}(m, \tau) \varphi_0 m^{-A} dm d\tau, \quad (3)$$

где $\dot{Q}(m, \tau)$ — темп потери массы звездой с массой m и временем жизни τ . Масса синтезированного элемента i , выброшенного всеми звездами популяции на момент времени t , равна

$$Q_i(t) = \int_0^t \int_{m_L}^{m_U} \dot{Q}(m, \tau) (Z_i(m, \tau) - Z_i(0)) \varphi_0 m^{-A} dm d\tau,$$

где $Z_i(0)$ — содержание i -го элемента в газе, из которого образовались звезды, $Z_i(m, \tau)$ — содержание i -го элемента в веществе, выброшенном звездами с массой m и временем жизни τ . Масса вещества и количество синтезированного кислорода и железа взяты из работ [31] и [35].

Эволюция фрагмента единичной массы и расчет суммарной массы фрагментов с определенным значением Z . Рассмотрим химическую эволюцию фрагмента единичной массы (фрагмента с массой $1M_{\odot}$). Мы принимаем, что каждый фрагмент эволюционирует как замкнутая система, и его эволюция рассматривается в рамках простой модели химической эволюции галактик. Изменение со временем содержания тяжелых элементов и газа в межзвездной среде, а также массы, заключенной в звездных остатках, рассчитаны в рамках численной модели [3]. Принимается, что фрагмент единичной массы эволюционирует до уровня астрации $s = 1$, т. е. до превращения практически всего газа в звезды. Звездообразование во фрагменте рассматривается как последовательность вспышек, период между вспышками равняется длительности жизни самых долгоживущих звезд популяции, образующейся при вспышке. Это значит, что в момент начала любой вспышки звезды всех предшествующих вспышек уже закончили эволюцию. Это условие необходимо для того, чтобы работала простая модель. Решив численно уравнения, описывающие изменения со временем массы газа, тяжелых элементов и массы, заключенной в звездных остатках [3], мы получаем распределение звезд по металличностям для фрагмента с уровнем астрации $s = 1$ (рис. 1, *a*). Так как эволюция всех фрагментов описывается простой моделью, распределение звезд по металличностям во всех фрагментах будет иметь один и тот же вид, но верхняя граница металличности звезд во фрагментах с разными уровнями астрации будет разной.

Есть аналитическое описание простой модели химической эволюции [3, 4]. Чтобы проверить корректность построения численной модели, проводилось тестирование результатов численного моделирования путем сравнения численных результатов с аналитическими. На рис. 1, *b* показаны распреде-

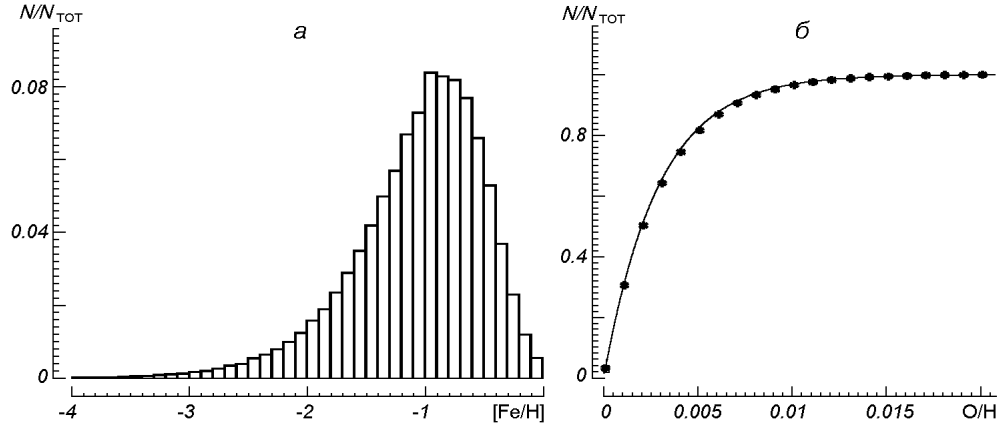


Рис. 1: *a* — относительное распределение количества звезд по металличностям, найденное в рамках численной модели для фрагмента с уровнем астрации $s = 1$; *б* — кумулятивное распределение звезд по металличностям (в качестве металличности принято значение содержания кислорода по массе). Сплошная линия — численная модель, звездочки — аналитическая модель

ления звезд по металличностям, рассчитанных в рамках численной модели и с помощью аналитического описания простой модели, взятого из [4]. Видно, что кривая, полученная путем численного моделирования, совпадает с кривой, полученной аналитическим путем, следовательно, построенная численная модель пригодна для наших целей.

Рассмотрим теперь, каким образом на основе наблюдательных данных можно получить массы фрагментов, в которых образуется звездное население гало. Пусть a_j — число звезд, попадающих в диапазон металличностей $Z_j, Z_j + \Delta Z$ во фрагменте массы m (в нашем случае $m = 1M_\odot$). Тогда наблюдаемое количество звезд гало, попадающие в диапазон металличностей $Z_j, Z_j + \Delta Z$, будет представлять собой суммарное количество звезд $N_{Z_j} = a_j \sum_{i=1}^n m_i$ данной металличности Z_j из всех фрагментов, максимальная металличность звезд которых превышает Z_j . Для заданного набора металличностей имеем

$$\begin{aligned}
 a_1 m_1 + a_1 m_2 + a_1 m_3 + \dots + a_1 m_n &= N_{Z_1}, \\
 a_2 m_2 + a_2 m_3 + \dots + a_2 m_n &= N_{Z_2}, \\
 \dots, \\
 a_n m_n &= N_{Z_n}.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Естественно, фрагмент с самым высоким уровнем астрации s определяет количество звезд a_n с наибольшим значением металличности Z_n . Решив систему уравнений (5), можно получить массы фрагментов с максимальными металличностями звезд от Z_1 до Z_n (т. е. количество фрагментов единичной массы, приходящихся на определенное Z_j и ответственных за звезды с такой металличностью). Таким образом, используя наблюдаемое распределение звезд гало по металличностям и модель эволюции фрагмента единичной массы, мы получим значение суммарной массы фрагментов с единичной массой, проэволюционировавших до каждого заданного значения уровня астрации s . Следует отметить, что мы можем получить суммарную массу фрагментов, проэволюционировавших до определенного значения

металличности Z_j , но не количество фрагментов, входящих в эту суммарную массу. Ниже будут показаны полученные наборы фрагментов, воспроизводящие наблюдаемые распределения по металличностям звезд гало и шаровых скоплений для нашей Галактики, туманности Андромеды (M31), NGC 5128, M87, NGC 1404 и NGC 1399.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Звезды поля гало. Долгоживущие звезды гало являются очень удобными объектами для изучения химического обогащения межзвездной среды в раннюю эпоху эволюции галактик, изучение распределений их металличностей дает ключ к пониманию процессов формирования гало Галактики.

Наблюдательное распределение звезд поля гало по металличностям для Галактики приводится на рис. 2. Для сравнения приведено также распределение металличностей для звезд диска Галактики и Большого Магелланового Облака. Сравнение распределений звезд гало по металличностям для Галактики, M31 и NGC 5128 показывает, что средняя металличность звезд гало M31 и NGC 5128 выше, чем средняя металличность звезд гало Галактики, хотя и не настолько высока, как металличность звезд диска Галактики. Если учесть то, что M31 и Галактика имеют подобные характеристики, возникает вопрос, чем вызвано такое различие средних металличностей звезд поля гало этих галактик. Интересно, что гало M33, другой спиральной галактики (тип Sc), в среднем беднее металлами, чем гало M31. Сфероид M33 содержит звезды, так же бедные металлами, как и самые малометаллические шаровые скопления Галактики [32].

M31 является спиральной галактикой (Sb I-II), как и Галактика (S (B) bc I-II), поэтому изучение ее представляет интерес для сравнения с эволюцией Галактики. M31 — более массивна, и размеры ее балджа превышают размеры балджа Галактики. Поэтому в наблюдениях довольно трудно провести четкую границу между балджем и гало; по-видимому, наблюдается сфероид, в котором население с $Z \sim Z_\odot$ располагается в центральных областях, а звезды несколько менее богатые металлами — во внешней части, которая и играет роль гало [12]. Функция распределения металличностей (полученная из фотометрического измерения обилий нескольких тысяч красных гигантов на $r = 20$ кпк) в гало M31 показывает сильный довольно узкий пик на $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.8$ и протяженный низкометаллический хвост [12]. Примерно то же значение ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.6 \dots -0.8$) получили и другие исследователи [10, 11, 32]. Спектроскопические измерения 99 звезд внешнего гало M31 (21—30 кпк) дают значения $[\text{Fe}/\text{H}]$ в диапазоне от -1.9 до -1.1 , но средняя металличность может быть недооценена из-за фактической невозможности определить звезды с околосолнечным содержанием [37]. По-видимому, эти 99 звезд попадают в протяженный малометаллический хвост распределения, полученного Дарреллом и др. [12].

NGC 5128 классифицируется как гигантская пекулярная E0-галактика. Она состоит из большого сфероида и диска, что содержит большое количество газа и пыли [22]. Средняя металличность звезд гало NGC 5128 составляет $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.73$, что примерно в 10 раз превышает среднее значение для Галактики [19]. Функция распределения металличности для внешнего гало NGC 5128 имеет пик на $[m/\text{H}] \approx -0.45$ ($[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.75$), число звезд с $[m/\text{H}] < -1$ заметно мало; в противоположность этому гало нашей Галактики населено звездами с $[m/\text{H}] < -1$ [20].

Распределение по металличности звезд поля гало на рис. 2 для Галактики имеет более симметричный вид, чем распределения для гало M31 и NGC 5128, особенно для M31. Заметим, что распределение по металлич-

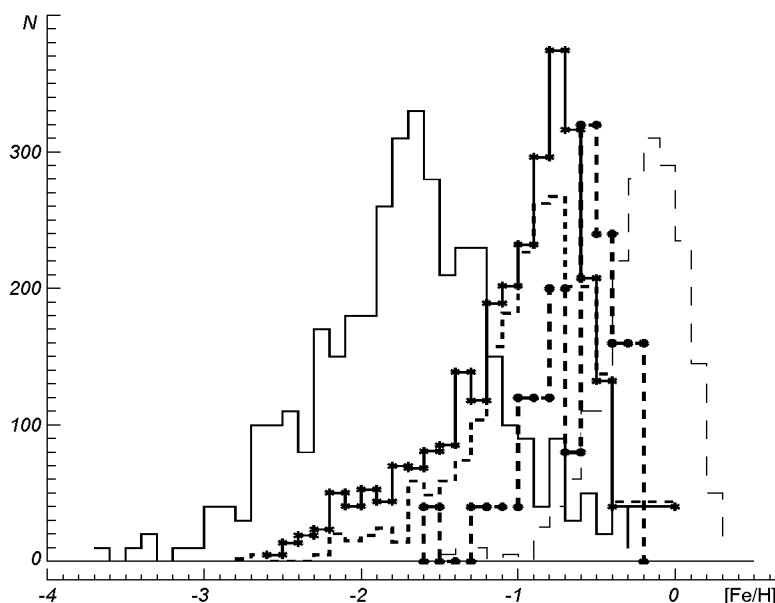


Рис. 2. Наблюдаемые распределения по металличностям звезд поля гало некоторых галактик: 1 — M31, 2 — NGC 5128, 3 — Галактика, 4 — Галактика, диск, 5 — Большое Магелланово Облако. Данные взяты из работ [9, 12, 18, 23, 38]. Для наглядности наблюдаемое число звезд для гало, диска Галактики и БМО увеличено в 100, 5 и 40 раз соответственно

ностям системы шаровых скоплений M31 указывает на наличие двух населений — богатого и бедного металлами; для населения более богатого металлами, пик распределения по металличностям приходится на $[Fe/H] \approx -0.6$ [5], что почти совпадает со значением пика распределения звезд гало. Значит ли это, что протяженный низкометаллический хвост распределения «прячет» малометаллическую популяцию красных гигантов поля гало M31? Бимодальное распределение металличности красных гигантов поля гало было отмечено для S0-галактики NGC 3115, со значениями пиков $[Fe/H] = -0.7$ и -1.3 [14]. Для NGC 5128 найдено совпадение пика распределения по металличностям более богатой металлами популяции звезд поля и шаровых скоплений гало, сходство же между более низкометаллическими звездами поля и бедными металлами шаровыми скоплениями менее очевидно [18].

Даррелл и др. [12] обнаружили, что сфероид (гало и балдж) M31 составлены преимущественно из старых звезд и что образование подавляющего большинства звезд гало произошло в раннюю эпоху в иерархическом слиянии. Гало NGC 5128 также содержит старые богатые металлами гиганты, которые в нашей Галактике в большом количестве находят только во внутреннем балдже [19]. По-видимому, звездное гало M31 больше похоже на гало NGC 5128, чем на звездное гало Галактики.

Рассмотрим теперь набор фрагментов, полученный из распределения звезд поля гало по металличностям для Галактики (рис. 3, *a*). Теоретическое распределение, полученное из смеси звезд разных фрагментов данного набора, довольно хорошо воспроизводит наблюдаемое распределение (рис. 3, *b*); это позволяет нам предположить, что звездное население поля гало нашей Галактики сформировалось во фрагментах с небольшими уровнями астрации, причем дисперсия металличностей полученного набора фрагментов довольно большая. Следует отметить, что полученные значения

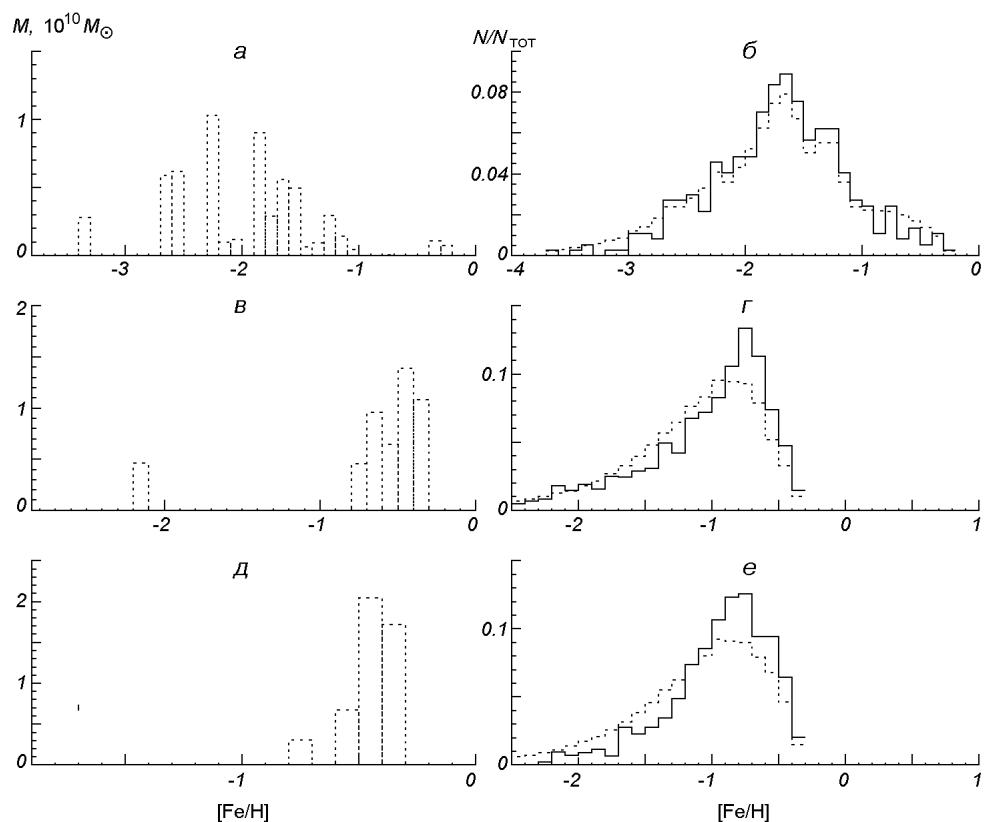


Рис. 3. Слева — массы отдельных фрагментов, полученные из наблюдаемого распределения звезд поля гало некоторых галактик (*a* — Галактика [38]; *б* — M31 [12], *д* — NGC 5128 [18]); справа (*б*, *г*, *е*) — соответствующие распределения, полученные из смеси звездного населения этих фрагментов: сплошная линия — наблюдаемые, пунктирная — теоретические

масс фрагментов являются до некоторой степени условными, так как для точного определения масс фрагментов требовалась масса звездного гало исследуемых галактик, что было возможно только для нашей Галактики. Поэтому было принято значение массы звездного гало $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ для звезд поля гало и $10^9 M_{\odot}$ для шаровых скопления гало всех галактик. Впрочем, в нашей работе определение абсолютных масс фрагментов не является принципиально важным.

Рассмотрим набор фрагментов, полученный из наблюдаемого распределения звезд поля гало M31 (рис. 3, *б*). Распределение по металличностям звезд из полученного набора фрагментов хотя и воспроизводит общий вид наблюдаемого распределения, но при этом дает больше малометаллических звезд, чем наблюдается в действительности (рис. 3, *б*). Подобная картина получается и для NGC 5128 (рис. 3, *д*, *е*). Харрис и Харрис [19], исследуя наблюдаемые распределения звезд гало по металличности, пришли к выводу, что гало NGC 5128 и M31 (в отличие от гало Галактики) образовалось скорее путем слияния больших сателлитов (подобных Большому Магелланову Облаку, Малому Магелланову Облаку и M32 в размерах), чем путем аккреции меньших звездных систем. Бекки с сотрудниками [6] рассматривали формирование эллиптических галактик (в частности NGC 5128) путем слияния спиральных галактик и обнаружили, что звездное гало эллиптических галактик, сформированных таким образом, населено пре-

имущественно звездами умеренной металличности ($[m/H] \sim -0.4$), которые происходят из внешних частей дисков сливающихся спиральных галактик. Интересно, что если доля массы гало сливающихся спиралей больше 0.2, то функция распределения металличности показывает больше малометаллических звезд, чем наблюдаемое распределение. Подобие между распределениями NGC 5128 и M31 объясняется, если балдж M31 также был сформирован путем слияния двух спиралей [6].

Исходя из сказанного, можно предположить, что если звезды поля гало M31 и NGC 5128 действительно образовались в результате слияний, то рассмотрение эволюции фрагмента в рамках простой модели химической эволюции галактик не подходит для данного случая, и было бы целесообразно использовать также распределение звезд по металличности для единичного фрагмента, который взаимодействует с другими фрагментами и окружающей средой.

Шаровые скопления гало нашей и некоторых других галактик.

Рассмотрим теперь возможность формирования подсистемы шаровых скоплений гало во фрагментах, позже захваченных (прото)галактикой. Для расчета масс фрагментов использовалась только та часть распределения, которая включает в себя шаровые скопления гало. Распределение шаровых скоплений гало галактик было получено путем аппроксимации гауссианой наблюдаемых распределений во всех случаях, кроме нашей Галактики.

На рис. 4, *a* показан набор фрагментов, полученный из наблюдаемого распределения шаровых скоплений гало Галактики. Сравнение наблюдаемого распределения и распределения, полученного из смеси звезд фрагментов на рис. 4, *a*, показывает (рис. 4, *б*), что полученный набор фрагментов не так хорошо воспроизводит наблюдаемое распределение шаровых скоплений гало Галактики, как ожидалось. Пики наблюдаемых распределений звезд поля гало и шаровых скоплений гало Галактики совпадают, хотя распределение для шаровых скоплений гало уже, чем для звезд поля (рис. 5, *a*). Рис. 5, *б* показывает связь «возраст — металличность» для шаровых скоплений Галактики. Сопоставление данных наблюдений с треками фрагментов единичной массы (эволюционирующих как замкнутая система), показывает, что звездное население фрагментов, звездообразование в которых началось в разное время, вполне может объяснить наклон и разброс наблюдаемых значений на рис. 5, *б*. То есть, вполне возможно, что шаровые скопления гало могли образоваться вместе с частью звезд поля гало в одних и тех же фрагментах, и рассматривать образование шаровых скоплений гало Галактики как отдельной подсистемы не имеет смысла.

Средняя металличность шаровых скоплений M31 слегка выше, чем у скоплений Галактики [5]. Наблюдаемое распределение по металличности шаровых скоплений гало M31 и набор фрагментов, получаемый из этого распределения, показаны на рис. 4, *в*, *г*. Сравнение наблюдаемого и теоретического (полученного из смеси звезд фрагментов) распределений показывает (рис. 4, *г*), что наблюдаемое распределение дает избыток малометаллического звездного населения (как и в случае с звездами поля гало). Пики наблюдаемых распределений звезд поля гало и шаровых скоплений гало M31 не совпадают — наблюдения дают $[Fe/H] \approx -0.6$ [12] и -1.4 [5] соответственно. В отличие от Галактики, пик распределения звезд поля гало M31 совпадает с пиком распределения шаровых скоплений балджа, значение $[Fe/H]$ для которого также составляет около -0.6 [5]. По-видимому, в случае M31 мы действительно имеем дело с населением сфероида, а не с населением собственно гало, как уже упоминалось в работе [12]. В таком случае эволюцию шаровых скоплений гало можно рассматривать отдельно. Впрочем, избыток малометаллического звездного населения в

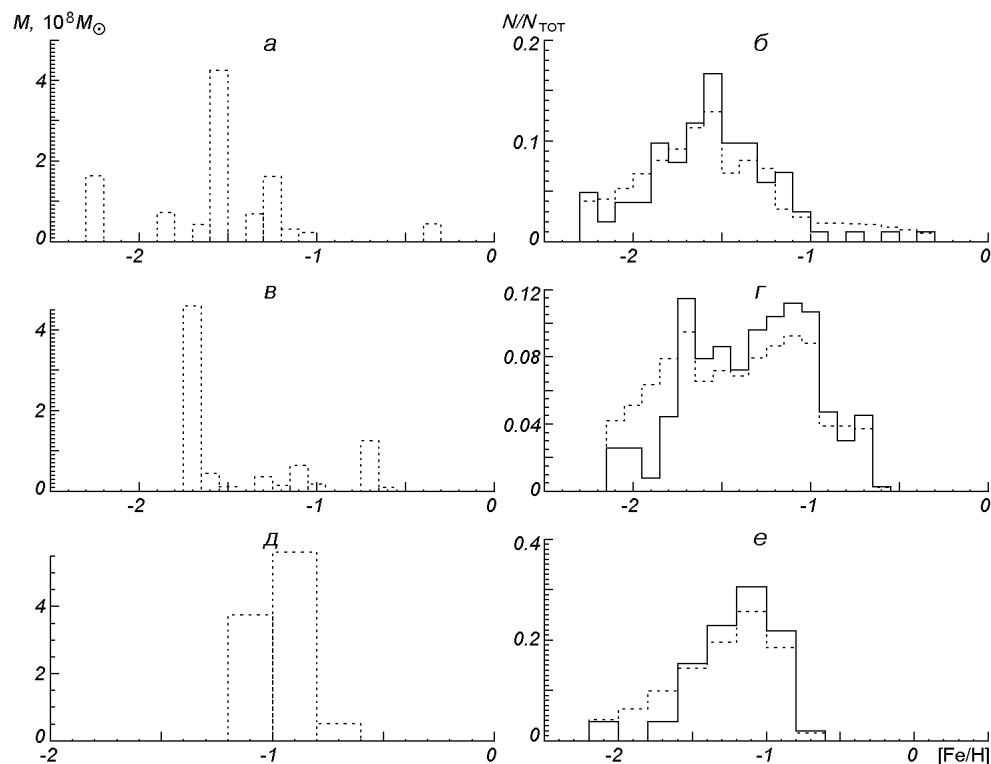


Рис. 4. То же, что на рис. 3 — для шаровых скоплений гало (по данным [1, 5, 17])

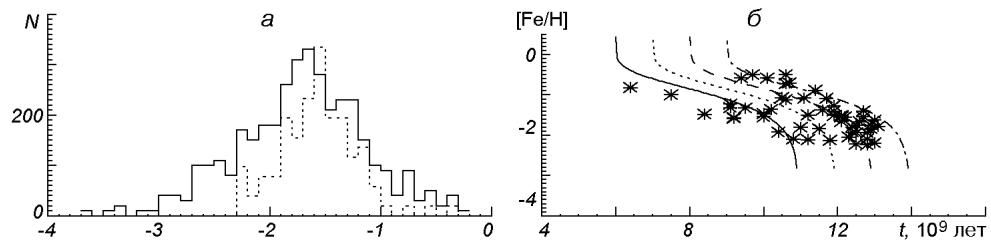


Рис. 5. Полученные из наблюдений Галактики распределения по металличности звезд поля гало (сплошная линия) и шаровых скоплений гало (пунктирная линия) (а) и диаграмма «возраст — металличность» для шаровых скоплений Галактики (б). Линии — эволюционные треки фрагментов единичной массы (время эволюции 5 млрд лет), звездообразование в которых началось 11, 12, 13 и 14 млрд лет назад. Наблюдательные данные взяты из работ [39, 40]

теоретическом распределении шаровых скоплений гало М31 (как и звезд поля гало) в любом случае не позволяет предположить, что шаровые скопления гало сформировались в фрагментах, эволюционирующих как замкнутая система.

Так же, как и в случае шаровых скоплений гало М31, распределение по металличностям шаровых скоплений гало NGC 5128 не совсем сходится с теоретическим распределением (рис. 4, е), которое было получено из смеси звездного населения фрагментов на рис. 4, д. Тут также имеет место некоторый избыток малометаллического звездного населения. Сравнение распределений по металличностям звезд поля и шаровых скоплений гало NGC 5128 также показывает несовпадение пиков распределений — наблю-

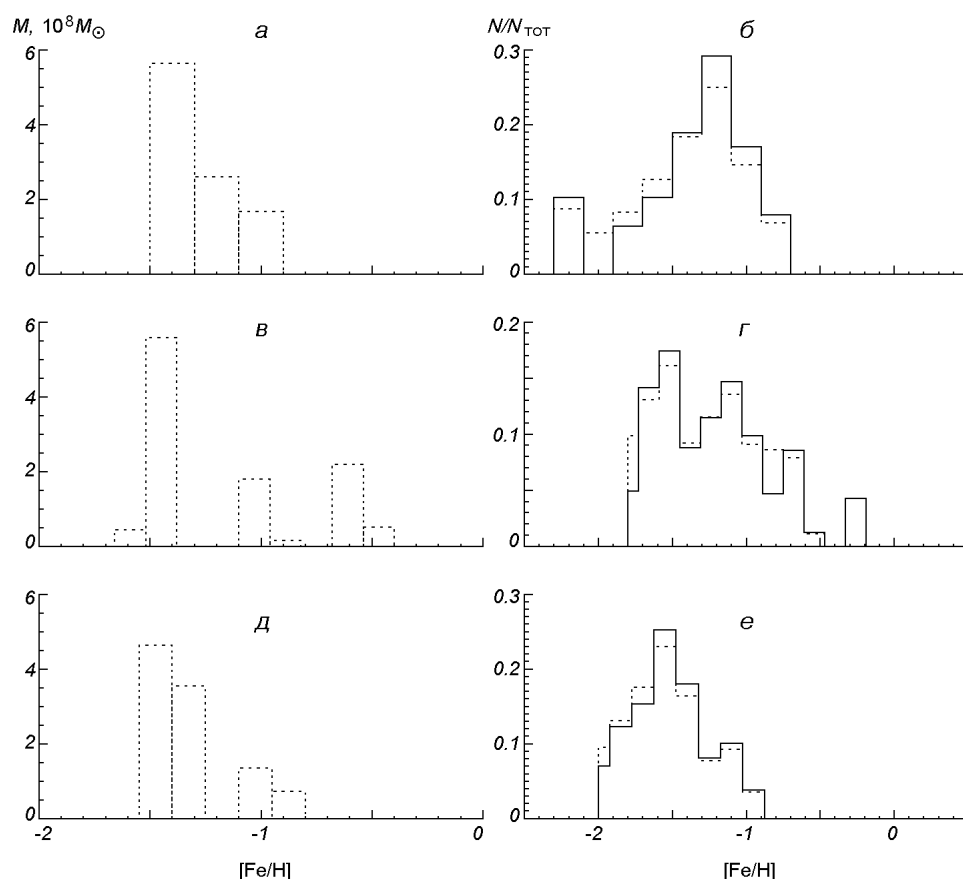


Рис. 6. Слева — массы отдельных фрагментов, полученные из наблюдаемого распределения шаровых скоплений гало некоторых галактик (*a* — M87 [8]; *в* — NGC 1399 [15], *д* — NGC 1404 [15]); справа (*б*, *г*, *е*) — соответствующие распределения, полученные из смеси звездного населения этих фрагментов: сплошная линия — наблюдаемые, пунктирная — теоретические

дения дают $[Fe/H] \approx -0.75$ [22] и -1.1 [17] соответственно. Заметим, что в отличие от случая M31, пик распределения по металличностям звезд поля гало NGC 5128 не совпадает также и с пиком распределения шаровых скоплений балджа, значение $[Fe/H]$ для которых составляет -0.2 [17].

Наборы фрагментов, полученные из наблюдаемых распределений по металличностям шаровых скоплений гало для эллиптических галактик M87, NGC 1399 и NGC 1404, показаны на рис. 6, *a*, *в*, *д* соответственно. Сравнение теоретических распределений, полученных из смеси звездного населения фрагментов, с наблюдаемыми распределениями (рис. 6, *б*, *г*, *е*) показывает, что теоретические распределения по металличностям шаровых скоплений гало галактик M87, NGC 1399 и NGC 1404 воспроизводят общий вид наблюдаемых распределений, хотя полученное число шаровых скоплений для каждого бина не совпадает с количеством шаровых скоплений в наблюдаемом распределении шаровых скоплений гало по металличности. Возможно, подсистема шаровых скоплений гало этих эллиптических галактик действительно могла сформироваться в результате слияний нескольких фрагментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен сценарий формирования гало галактик путем слияния фрагментов, эволюционирующих как замкнутая система. В рамках сценария предполагалось, что звездное население гало галактик образовалось в отдельных фрагментах, которые позже были захвачены (прото)галактикой. Полученные результаты позволяют предположить, что гало нашей Галактики сформировалось во фрагментах, эволюционирующих как замкнутая система. Так как средняя металличность гало M31 и NGC 5128 значительно выше, чем для Галактики, то формирование гало этих галактик путем слияния предполагает наличие фрагментов, взаимодействующих с окружающим веществом, так как избыток малометаллических звезд в теоретическом распределении невозможно объяснить в рамках простой модели. Если подсистема шаровых скоплений гало сформировалась путем слияний, то рассмотрение эволюции фрагмента в рамках простой модели не подходит для воспроизведения наблюдаемого распределения по металличностям шаровых скоплений гало M31 и NGC 5128. Формирование шаровых скоплений гало Галактики, по-видимому, следует рассматривать в совокупности с формированием звезд поля гало. Для галактик M31 и NGC 5128 формирование подсистемы шаровых скоплений гало, по-видимому, происходило отдельно от подсистемы звезд поля гало. Если шаровые скопления гало и формировались во фрагментах, аккрецирующих на галактику, рассмотрения эволюции фрагментов в рамках закрытой модели недостаточно для того, чтобы воспроизвести наблюдаемые распределения шаровых скоплений гало по металличностям как в эллиптических, так и в спиральных галактиках.

Автор признательна Л. С. Пилюгину за плодотворное обсуждение работы, рецензенту, Ю. И. Изотову за ряд ценных советов, а также Е. В. Хоменко за помощь в разработке программ.

Работа финансирована Украинским фондом фундаментальных исследований (грант 02.07/00132).

1. Боркова Т. В., Марсаков В. А. Подсистемы шаровых скоплений // *Астрон. журн.*—2000.—77, № 10.—С. 750—771.
2. Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. — М.: Наука, 1984.—392 с.
3. Пилюгин Л. С. Влияние галактического ветра на химическую эволюцию неправильных галактик. Численное моделирование и аналитическое описание // *Астрон. журн.*—1994.—71, № 6.—С. 825—832.
4. Тейлер П. Дж. Галактики: Строение и эволюция. — М.: Мир, 1981.—223 с.
5. Barmby P., Huchra J. P., Brodie J. P., et al. M31 globular clusters: Colors and metallicities // *Astron. J.*—2000.—119, N 2.—P. 727—747.
6. Bekki K., Harris W. E., Harris G. L. H. Origin of the metallicity distribution of the NGC 5128 stellar halo // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2003.—338, N 3.—P. 587—598.
7. Carney B. W., Laird J. B., Latham D. W., Aguilar L. A. Review of the stars with proper motions. XIII The halo population(s) // *Astron. J.*—1996.—112, N 2.—P. 668—692.
8. Cohen J. G., Blakeslee J. P., Ryzhov A. The ages and abundances of a large sample of M87 globular clusters // *Astrophys. J.*—1998.—496, N 2.—P. 808—826.
9. Cole A. A., Smecker-Hane T. A., Gallagher J. S. The metallicity distribution function of red giants in the Large Magellanic Cloud // *Astron. J.*—2000.—120, N 4.—P. 1808—1829.
10. Couture J., Racine R., Harris W. E., Holland S. Stellar populations in M31: Resolved I, V photometry of five halo globular // *Astron. J.*—1995.—109, N 5.—P. 2050—2060.
11. Durrell P. R., Harris W. E., Pritchett C. J. BR photometry of the halo of M31 // *Astron. J.*—1994.—108, N 6.—P. 2114—2122.
12. Durrell P. R., Harris W. E., Pritchett C. J. Photometry and the metallicity distribution of the outer halo of M31 // *Astron. J.*—2001.—121, N 5.—P. 2557—2571.
13. Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R. Evidence of the motions of old stars that the Galaxy collapsed // *Astrophys. J.*—1962.—136, N 3.—P. 748—766.
14. Elson R. A. W. Red giants in the halo of the S0 galaxy NGC 3115: A distance and a bimodal

- metallicity distribution // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1997.—286, N 3.—P. 771—776.
15. *Forbes D. A., Grillmair C. J., Williger G. M., et al.* HST imaging of the globular clusters in the Fornax cluster: NGC1399 and NGC 1404 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—293, N 3.—P. 325—336.
 16. *Geisler D., Lee M.-G., Kim E.* Washington photometry of the globular clusters system of NGC 4472. I. Analysis of the metallicities // *Astron. J.*—1996.—111, N 4.—P. 1529—1550.
 17. *Harris G. L. H., Geisler D., Harris H. G., Hesser J.* The metal abundances from Washington photometry of NGC 5128 globular clusters // *Astron. J.*—1992.—104, N 2.—P. 613—626.
 18. *Harris G. L. H., Harris W. E., Poole G. B.* The metallicity distribution in the halo stars of NGC 5128: Implication for galaxy formation // *Astron. J.*—1999.—117, N 2.—P. 855—867.
 19. *Harris G. L. H., Harris W. E.* The halo stars in NGC 5128. II. An outer halo field and a new metallicity distribution // *Astron. J.*—2000.—120, N 5.—P. 2423—2436.
 20. *Harris W.* On the formation of galaxy halos: Comparing NGC 5128 and the Local Group members // *Astron. J.*—2001.—122, N 6.—P. 3065—3069.
 21. *Henry R. B. C., Worthey G.* The distribution of heavy elements in spiral and elliptical galaxies // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1999.—111, N 762.—P. 919—945.
 22. *Holland S., Cote P., Hesser J. E.* Globular clusters in NGC 5128 // *Astron. and Astrophys.*—1999.—348, N 3.—P. 418—436.
 23. *Hou J., Chang R., Fu C.* Metallicity distribution solar neighbourhood and the galactic chemical evolution // *ASP Conf. Ser.: 1997 Pacific Rim Conf. on Stellar Astrophysics.*—1998.—138.—P. 143.
 24. *Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J.* A dwarf satellite galaxy in Sagittarius // *Nature.*—1994.—370, N 6486.—P. 194—196.
 25. *Ibata R. A., Irwin M. J., Lewis G., Ferguson A., Tanvir N.* A giant stream of metal-rich stars in the halo of the galaxy M31 // *Nature.*—2001.—412, N 6842.—P. 49—52.
 26. *Ivans I. I., Carney B., de Almagro L., Sneden C.* The galactic mergers: Search of chemical evidences // *ASP Conf. Ser.: Dynamics of Star Clusters and The Milky Way.*—2001.—228.—P. 461.
 27. *Larsen S. S., Forbes D. A., Brodie J. P.* Hst photometry of Globular Clusters in the Sombbrero galaxy // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2001.—327, N 4.—P. 1116—1126.
 28. *Layden A. C., Sarajedini A.* Photometry of the globular cluster M54 and the Sagittarius dwarf galaxy: The age - metallicity relation // *Astron. J.*—2000.—119, N 4.—P. 1760—1792.
 29. *Lee Y.-W., Joo J.-M., Sohn Y.-J., et al.* Multiple stellar populations in the globular cluster omega Centauri as tracers of a merger event // *Nature.*—1999.—402, N 6757.—P. 55—57.
 30. *Majewski S. W., Munn J. A., Hawley S. L.* Absolute proper motions to B sim 22. 5: Evidence for kinematical substructure in halo field stars // *Astrophys. J.*—1994.—427, N 1.—P. L37—L41.
 31. *Marigo P.* Chemical yields from low- and intermediate-mass stars: model predictions and basic observational constraints // *Astron. and Astrophys.*—2001.—370, N 2.—P. 194—217.
 32. *Mould L., Kristian J.* The stellar populations of M31 and M33 // *Astrophys. J.*—1986.—305, N 1.—P. 591—599.
 33. *Pagal B. E. J.* *Nucleosynthesis and chemical evolution of galaxies.* — Cambridge: Univ. Press, 2001.—378 p.
 34. *Pilyugin L. S.* Chemical evolution of the Milky Way Galaxy III. Is the disk formed through mergers of fragments? // *Astron. and Astrophys.*—1996.—313, N 3.—P. 803—809.
 35. *Portinari L., Chiosi C., Bressan A.* Galactic chemical enrichment with new metallicity dependent stellar yields // *Astron. and Astrophys.*—1998.—334, N 2.—P. 505—539.
 36. *Putman M. E., Gibson B. K., Staveley-Smith L., et al.* Tidal disruption of the Magellanic Clouds by the Milky Way // *Nature.*—1998.—394, N 6695.—P. 752—754.
 37. *Reitzel D. B., Guhathakurta P.* Metallicity and kinematics of M31's outer stellar halo from a Keck Spectroscopic Survey // *Astron. J.*—2002.—124, N 1.—P. 234—265.
 38. *Ryan S. G., Norris J. E.* Subdwarf studies. III The halo metallicity distribution // *Astron. J.*—1991.—101, N 5.—P. 1865—1881.
 39. *Salaris M., Weiss A.* Chronology of the halo globular cluster system formation // *Astron. and Astrophys.*—1997.—327, N 1.—P. 107—120.
 40. *Salaris M., Weiss A.* Homogeneous age dating of 55 Galactic globular clusters. Clues to the Galaxy formation mechanisms // *Astron. and Astrophys.*—2002.—388, N 1.—P. 492—503.
 41. *Salpeter E. E.* The luminosity function and stellar evolution // *Astrophys. J.*—1955.—121, N 1.—P. 161—167.
 42. *Searle L., Zinn W. L. W.* Compositions of halo clusters and the formation of the Galactic halo // *Astrophys. J.*—1978.—225, N 2.—P. 357—379.