

УДК 524.7-52

Т. В. Никитюк

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 ГСП, Киев, ул. Академика Заболотного 27

Формирование гало галактик М 31 и NGC 5128 путем слияния фрагментов

Рассматривается формирование гало галактик М 31 и NGC 5128 путем слияния фрагментов. Найдено, что гало М 31 и гало NGC 5128 могли сформироваться путем раннего слияния двух массивных фрагментов с соотношением масс 1:1 и 1:2.57 соответственно. Полученные результаты позволяют предположить, что аккреция газа с первичным химическим составом играла заметную роль в химической эволюции фрагментов до их слияния. Такие условия позволяют воспроизвести наблюдаемое распределение по металличностям звезд гало этих двух галактик.

ФОРМУВАННЯ ГАЛО ГАЛАКТИК М 31 ТА NGC 5128 ШЛЯХОМ ЗЛИТТЯ ФРАГМЕНТІВ, Никитюк Т. В. — Розглядається формування гало галактик М 31 та NGC 5128 шляхом злиття фрагментів. Знайдено, що гало галактик М 31 та NGC 5128 могли утворитись шляхом злиття двох масивних фрагментів із співвідношеннями мас 1:1 та 1:2.57 відповідно. Отримані результати дозволяють припустити, що акреція газу з первинним хімічним складом відіграла помітну роль у хімічній еволюції фрагментів до їхнього злиття. Такі умови дозволяють досить добре відтворити спостережний розподіл по металичностях зірок гало досліджуваних галактик.

FORMATION OF M 31 AND NGC 5128 GALACTIC HALOES BY MERGER OF FRAGMENTS, by Nyktyuk T. V. — The formation of haloes of the M 31 and NGC 5128 galaxies through mergers of fragments is considered. It is found that the accretion of unenriched gas plays an important role in the chemical evolution of fragments before their merger. We make the assumption that the haloes of the M 31 and NGC 5128 galaxies could be formed by merger of two massive fragments with mass ratios 1:1 and 1:2.57, respectively. This allows us to reproduce the observed halo metallicity distribution function of the galaxies quite well.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время появились наблюдательные данные для звезд поля гало М 31 и NGC 5128. Распределения по металличностям (здесь и далее функции металличностей) звезд поля гало, полученные из наблюдений этих галактик, показывают явное сходство не только по форме, но и по положению пика функции металличностей. В то же время сравнение

наблюдений звезд поля гало нашей Галактики (Млечный Путь) и М 31 показывает, что функции металличностей звезд этих галактик сильно отличаются [15].

Галактика М 31 имеет большую массу и размеры по сравнению с Галактикой. В наблюдениях довольно трудно провести четкую границу между балджем и гало; скорее можно говорить о сфероиде, в котором население с металличностью $Z \sim Z_{\odot}$ располагается в центральных областях, а звезды с меньшей металличностью — во внешней части, которая и является гало [8]. Распределение по металличностям красных гигантов в гало М 31 на 20 кпк от центра галактики имеет довольно узкий пик при значении $[Fe/H] = -0.8$ [8]. Моулд и Кристиан [29], которые провели двуцветную (V, I) CCD-фотометрию звезд М 31, из диаграммы «цвет — звездная величина» оценили среднее значение металличности $\langle [Fe/H] \rangle = -0.8$ для М 31 на расстоянии 7 кпк от центра галактики. Даррелл и др. [7] провели BR-фотометрию одной площадки внутреннего гало ($r = 9$ кпк) и пришли к выводу, что звезды поля гало М 31 действительно имеют высокую металличность (среднее значение $\langle [Fe/H] \rangle = -0.6$), их средняя металличность намного выше, чем средняя металличность звезд поля гало Галактики, и на 0.6 превышает среднюю металличность шаровых скоплений гало М 31. Кутюре и др. [6] провели фотометрический анализ отдельных звезд в пяти шаровых скоплениях и звезд поля гало М 31 в области 2.3×2.3 кпк. Средняя металличность гало М 31 составила $\langle [Fe/H] \rangle \approx -0.5$ с большой дисперсией $\sigma_{[Fe/H]} \approx 0.5$. Спектроскопические измерения 99 звезд внешнего гало М 31 ($r = 21 \dots 30$ кпк) дают среднее значение $[Fe/H]$ в диапазоне от -1.9 до -1.1 , но средняя металличность может быть выше из-за ограниченности выборки (отсутствие звезд с околосолярным обилием) [4]. Наблюдения окрестностей галактики М 31 на Космическом Телескопе Хаббла [4] показывают, что богатое металлами звездное население ($[Fe/H] \approx -0.6$) является преобладающим в диапазоне $2.3 \leq r \leq 29.9$ кпк. Интересно, что средняя металличность звезд балджа Галактики также составляет $\langle [Fe/H] \rangle = -0.6$ [28]. Гало спиральной галактики М33 в среднем беднее металлами, чем гало М 31. Сфероид М33 содержит значительное число звезд таких же бедных металлами, как и самые малометаллические шаровые скопления Галактики [29].

NGC 5128 классифицируется как гигантская пекулярная E0-галактика. Средняя металличность звезд гало NGC 5128 составляет $\langle [Fe/H] \rangle = -0.73$ [14]. Функция металличностей для внешнего гало ($r = 19$ кпк) NGC 5128 показывает пик при значении $[Fe/H] \approx -0.75$, число звезд с $[Fe/H] < -1.3$ мало; в противоположность этому гало Галактики населено звездами с $[Fe/H] < -1.3$ [15]. Марло и др. [26], исследуя звезды поля гало NGC 5128, обнаружили, что звезды имеют среднее значение металличности $[Fe/H] = -0.76 \pm 0.44$.

Таким образом, наблюдения показывают, что средняя металличность звезд гало М 31 и NGC 5128 выше, чем средняя металличность звезд поля гало Галактики ($[Fe/H] \approx -1.5$ [36]), хотя и не настолько высока, как металличность звезд диска Галактики ($[Fe/H] > 0.0$ [17]). Естественно было бы предположить, что такая разница значений средней металличности (и в форме распределения) для Галактики и М 31 вызвана разными условиями формирования звездного гало.

В настоящее время большое распространение получила теория формирования галактик путем слияний фрагментов, неоднократно подтвержденная наблюдениями [5, 18—20, 24, 25, 34]. В данной работе предполагается, что звездное население гало представляет собой смесь звезд, которые образовались во фрагментах до слияния, и что фрагменты первоначально

эволюционировали независимо от основного протогалактического облака и друг от друга. Будем также предполагать, что существует такой набор независимо эволюционирующих фрагментов и такое распределение звезд по металличностям в этих фрагментах, чтобы их звездное население наилучшим образом воспроизвело наблюдаемое распределение звезд гало по металличностям.

Нашей целью является отыскание таких характеристик фрагментов и такой эволюции фрагмента до момента слияния, которые лучше всего воспроизводят наблюдаемые распределения звезд поля гало M 31 и NGC 5128 по металличностям, а также сравнение условий формирования звездных гало этих галактик с условиями формирования звезд поля гало Млечного Пути.

МОДЕЛЬ

В предыдущей работе [1] была подробно описана модель химической эволюции единичного фрагмента, поэтому мы не будем на ней останавливаться. Рассмотрим основные моменты сценария слияния в том виде, в котором он применяется в работе [1]. Для простоты назовем аккрецирующие/сливающиеся тела фрагментами независимо от их массы. Предполагается, что фрагменты будут эволюционировать независимо до момента слияния с другим телом.

Будем считать, что звездное население гало сформировалось из смеси звезд, образовавшихся во фрагментах до момента слияния, а масса фрагментов, из которых формируется гало, равняется сумме масс звездного гало в современную эпоху и газа, ушедшего в диск. Фрагмент эволюционирует до определенного уровня астрации s ($s = 1 - \mu$, μ — доля массы газа во фрагменте), прежде чем произойдет его слияние с основным телом или другим фрагментом. Звезды, образовавшиеся до этого момента, пополняют звездное население гало, а газ оседает в диск. Уровень астрации определенного фрагмента показывает, какая доля звезд и с какими металличностями вносится одним фрагментом в гало при слиянии.

Будем рассматривать три варианта эволюции фрагментов: 1) фрагмент эволюционирует как закрытая система, и принимается условие мгновенного кругооборота вещества (простая модель химической эволюции галакти); 2) фрагмент эволюционирует как закрытая система, но отбрасывается условие мгновенного кругооборота вещества; 3) фрагмент эволюционирует как открытая система, в процессе эволюции происходит приток необогащенного газа на фрагмент, отбрасывается условие мгновенного кругооборота вещества.

Рис. 1 показывает рассчитанные функции металличностей для трех вариантов с уровнем астрации $s = 1$. Форма функции металличности во

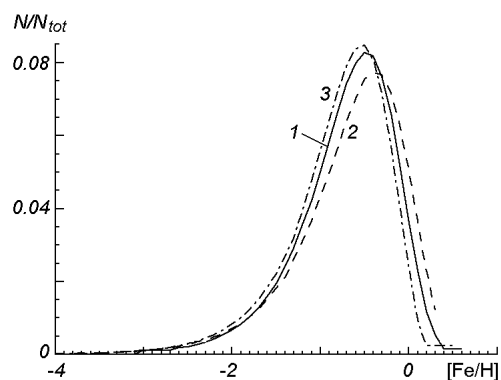


Рис. 1. Вид рассчитанных функций металличностей для трех вариантов эволюции фрагментов ($s = 1$)

втором и третьем варианте фрагментов зависит от принятого темпа звездообразования, а в третьем варианте — также и от изменения темпа аккреции на фрагмент. При моделировании всех функций металличностей на рис. 1 в дополнение к основному источнику обогащения тяжелыми элементами, описанному в работе [1], учитывались выходы сверхновых Ia. Изменение темпа звездообразования и аккреции со временем и расчет выходов SNIa в единичном фрагменте будут рассмотрены ниже.

Напомним, что согласно нашему сценарию слияния наблюдаемая функция металличности звезд гало исследуемых галактик является результатом суммирования функций металличностей сливающихся фрагментов. Если уровень астрации фрагмента невысок, фрагмент «внесет» в общее распределение преимущественно малометалличное звездное население. Если фрагмент проэволюционировал до практически полного превращения газа в звезды, он внесет в гало галактики как низкометаллические, так и высокометаллические звезды.

ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ХИМИЧЕСКУЮ ЭВОЛЮЦИЮ ФРАГМЕНТА

Под химической эволюцией фрагмента подразумевается изменение со временем массы газа во фрагменте, содержания тяжелых элементов и массы, заключенной в звездах и звездных остатках.

Во фрагменте происходит звездообразование, которое описывается серией вспышек. Темп звездообразования в химической эволюции обычно задается экспоненциальной зависимостью от времени эволюции галактики. Обычно пользуются функцией вида

$$\psi(t) \propto \begin{cases} t e^{-t/T_{\text{top}}}, & t \leq T_{\text{top}}, \\ e^{-t/T_{\text{str}}}, & t \geq T_{\text{top}}, \end{cases}$$

где T_{top} и T_{str} являются свободными параметрами темпа звездообразования [32]. Изменяя значения свободных параметров, можно описать самые разнообразные типы изменения темпа звездообразования.

Зная изменения темп звездообразования со временем, можно задать амплитуду вспышки звездообразования:

$$M_{b_j} = \int_{t_{b_{j-1}}}^{t_{b_j}} \psi(t) dt, \quad (1)$$

где t_{b_j} и $t_{b_{j-1}}$ — время начала j -й и $j-1$ -й вспышек звездообразования соответственно.

Масса газа m_g , масса m_i i -го элемента и масса m_s , заключенная в звездах и звездных остатках, в момент t_{b_j} начала очередной вспышки звездообразования равны

$$m_g(t_{b_j}) = m_g(t_{b_{j-1}}) - m_{b_{j-1}} + M_{\text{acc}} - \sum_{k=1}^{j-1} m_{b_k} [Q_m(\tau_{j,k}) - Q_m(\tau_{j-1,k})], \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m_i(t_{b_j}) = & m_i(t_{b_{j-1}}) - m_{b_{j-1}} z_i(t_{b_{j-1}}) - \sum_{k=1}^{j-1} m_{b_k} [Q_m(\tau_{j,k}) - Q_m(\tau_{j-1,k})] z_i(t_{b_k}) + \\ & + \sum_{k=1}^{j-1} m_{b_k} [Q_i(\tau_{j,k}) - Q_i(\tau_{j-1,k})], \end{aligned} \quad (3)$$

$$m_s(t_{b_j}) = m_s(t_{b_{j-1}}) + m_{b_{j-1}} - \sum_{k=1}^{j-1} m_{b_k} [Q_m(\tau_{j,k}) - Q_m(\tau_{j-1,k})], \quad (4)$$

где $\tau_{j,k} = t_{b_j} - t_{b_k}$, $\tau_{j-1,k} = t_{b_{j-1}} - t_{b_k}$, m_{b_j} — масса j -й вспышки звездообразования, $z_i(t_{b_j})$ — содержание i -го элемента (в нашем случае He, C, N, O и Fe) в момент времени t_{b_j} , $\tau_{j,k}$ — возраст k -й вспышки звездообразования в момент времени t_{b_j} [2]. Масса M_{acc} необогащенного газа, оседающего на фрагмент до начала вспышки звездообразования, определяется выражением

$$M_{\text{acc}} = \frac{M}{(t_{\text{fr}} - t_{\text{ba}})/\Delta t_b},$$

где Δt_b — время, прошедшее между двумя последовательными вспышками звездообразования (в нашем случае 50 млн лет), t_{fr} — время эволюции фрагмента, t_{ba} — время начала аккреции на фрагмент, M — масса вещества, аккрецируемого на фрагмент за все время его эволюции. В нашей работе три последних параметра являются свободными. Для закрытой модели химической эволюции $M_{\text{acc}} = 0$.

Расчет массы газа Q_m и тяжелых элементов Q_i , вносимых популяцией звезд в межзвездную среду, описан в работе [1]. Здесь дополнительно учитываются выходы массы газа и массы железа, поставляемые сверхновыми Ia-типа.

Задавая историю звездообразования во фрагменте (т. е. длительность и амплитуду вспышек и длительность междувспышечных периодов), из приведенных выше уравнений можно получить значения массы газа, звезд и количества тяжелых элементов во фрагменте в момент любой вспышки.

Сверхновые Ia. В данной работе учитывается вклад железа сверхновыми Ia-типа, которые вспыхивают по SD-сценарию (single degenerate), в рамках которого рассматривается аккреция водорода или гелия на белый карлик, возникающая при передаче массы с соседней звезды-спутника [11, 30]. Масса белого карлика за счет аккреции достигает предела Chandrasekhara с последующим взрывным горением углерода и полным разрушением звезды [43].

Чтобы рассчитать изменение со временем количества тяжелых элементов, вносимых в межзвездную среду популяцией сверхновых Ia, необходимо знать количество тяжелых элементов, поступающих в межзвездную среду при вспышке одной сверхновой, и количество сверхновых, вспыхивающих в каждый момент времени жизни Галактики. Так как вспышки сверхновых Ia происходят только в двойных системах, необходимо рассчитать число двойных звезд, которое зависит от доли двойных звезд в Галактике (примерно 85 %) и распределения двойных систем по массам и по величинам больших полуосей. Число вспышек сверхновых Ia в определенный момент времени зависит от времени жизни звезды, позже становящейся белым карликом, времени жизни звезды-спутника, массы белого карлика и массы газа, оседающего на него с звезды-спутника. При наших расчетах вклад газа и тяжелых элементов, поступающих при вспышке одной сверхновой Ia, взят из работы [21], возраст звезд — из работы [33] (начальная металличность $Z_{\text{in}} = 0.0004$), начальная функция масс описывалась законом Солпитера [37].

Полученное изменение со временем массы железа, поставляемого в межзвездную среду сверхновыми Ia, показано на рис. 2. Как видно, после 8 млрд лет вещество из SN Ia практически не поступает в межзвездную среду. Вклад железа, поставляемого сверхновыми типов II и Ia за все время эволюции, составил около 1/3 и 2/3 соответственно. Изменение начальной металличности Z_{in} при расчете выходов сверхновых Ia-типа (с $Z_{\text{in}} = 0.0004$ на $Z_{\text{in}} = 0.004$) практически не влияет на результат, рис. 2, б.

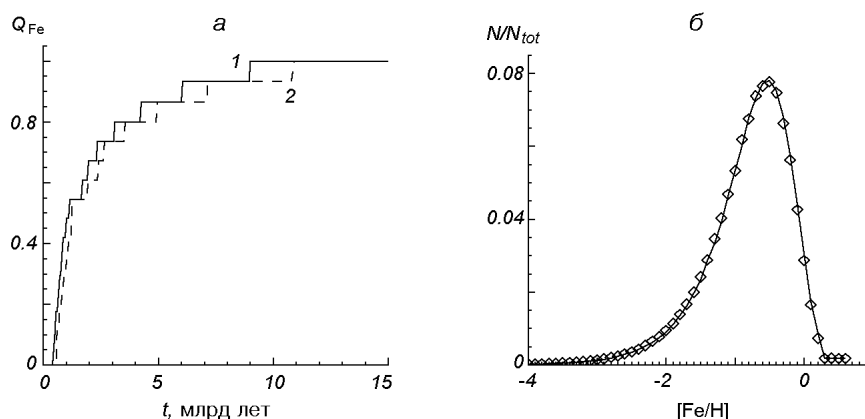


Рис. 2. *a* — зависимость от времени количества железа Q_{Fe} , выбрасываемого популяцией сверхновых Ia в межзвездную среду с момента рождения популяции: 1 — для $Z_{\text{in}} = 0.0004$, 2 — для $Z_{\text{in}} = 0.004$. Кривые нормированы на свое значение при $t = 15 \cdot 10^9$ лет; *б* — функции металличности, полученные в рамках закрытой модели химической эволюции с учетом выходов SNIa: сплошная линия — для $Z_{\text{in}} = 0.0004$, ромбики — $Z_{\text{in}} = 0.004$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Слияние нескольких маломассивных фрагментов. Первый этап исследования заключался в проверке согласия наблюдательной и теоретической функций металличностей в случае, когда используется эволюция фрагментов в рамках простой модели (подробно см. [1]).

По методу [1] были найдены характеристики фрагментов для гало Галактики, M 31 и NGC 5128 (рис. 3, *a*, *в*, *д*). Выходы SNIa при этом не учитывались, а значения масс вспышек были постоянными во времени.

Рассчитанная функция металличностей для Галактики (рис. 3, *б*) согласуется с наблюдаемой, а для M 31 и NGC 5128 (рис. 3, *з*, *е*) получено большее число малометалличных звезд и меньшее число высокометаллических звезд по сравнению с наблюдениями. Параметр σ в тесте Колмогорова — Смирнова на степень совпадения двух распределений составляет 0.83 для Галактики (согласие удовлетворительное), 0.51 для M 31 и 0.48 для NGC 5128 (согласие плохое). Это значит, что использование фрагментов, эволюционирующих в рамках простой модели, не позволяет воспроизвести функции распределения металличностей галактик M 31 и NGC 5128.

Описанная выше картина справедлива только в случае, если время эволюции системы не превышало 1 млрд лет. Как видно из рис. 3, *б*, распределение звезд поля гало по металличностям для Галактики воспроизводится и без учета вклада сверхновых Ia-типа, т. е. эволюция фрагментов, из которых формировалось гало Галактики, происходила в течение 1 млрд лет.

Следующим этапом работы является исследование возможности воспроизведения функции металличностей звезд гало галактик M 31 и NGC 5128 в результате слияния фрагментов, эволюция которых соответствует второму варианту эволюции единичного фрагмента.

Для гало галактик M 31 и NGC 5128 путем подбора был найден темп звездообразования $\psi(t)$ вида

$$\psi(t) \propto t^\alpha,$$

где свободный параметр скорости звездообразования α составил $\alpha = 2$ для M 31 и $\alpha = 1$ для NGC 5128 (последний использовался для расчета функции

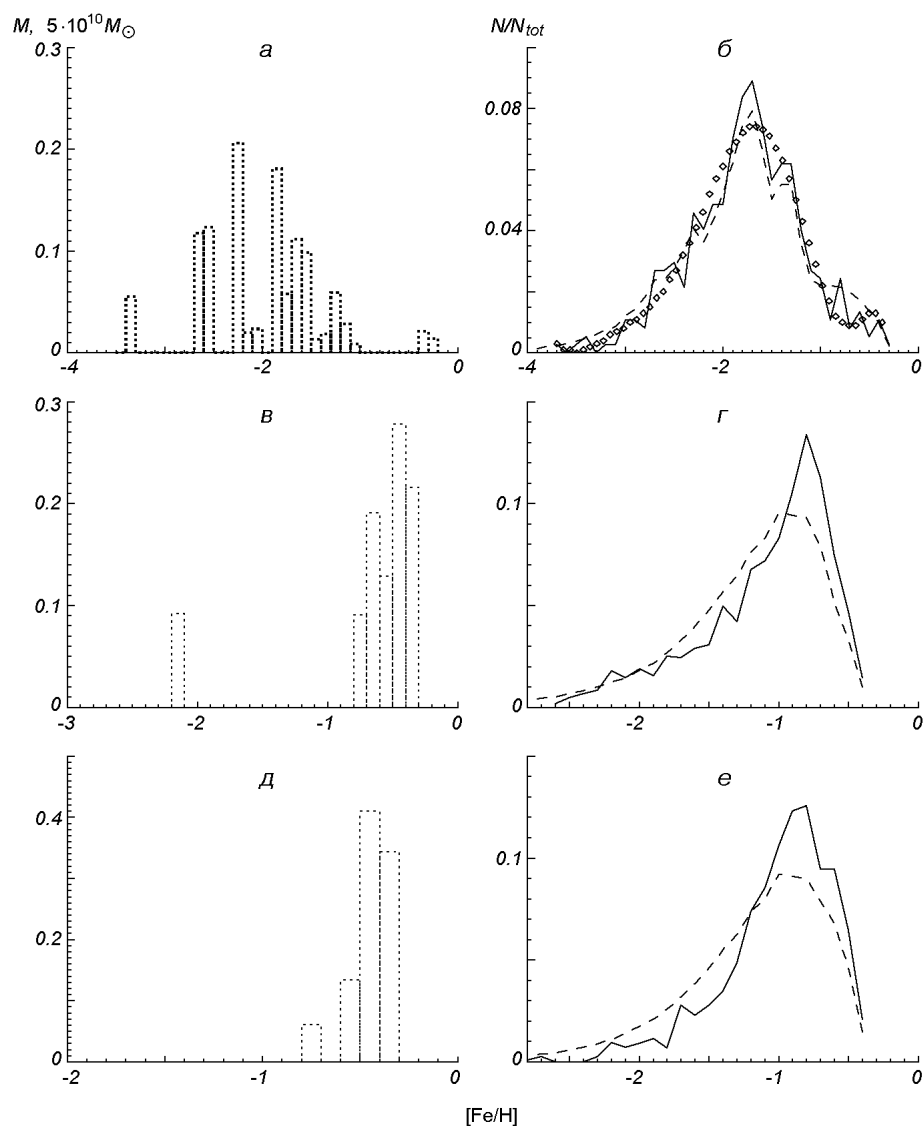


Рис. 3. Слева — массы фрагментов (простая закрытая модель), полученные на основе наблюдений гало Галактики (а), гало М 31 (б), гало NGC 5128 (в); справа — соответствующие функции металличности смеси фрагментов (штриховые линии — расчет, сплошные линии и ромбики — наблюдения и их аппроксимация): б — для гало Галактики [36], в — для гало М31 [8], е — для гало NGC 5128 [13]

распределения металличностей второго и третьего вариантов эволюции фрагментов на рис. 1). Эти значения приняты для всех дальнейших расчетов, так как их использование позволило получить хорошую сходимость теоретической и наблюдательной функции металличностей в области малых металличностей.

Полученные характеристики фрагментов и функции металличностей показаны на рис. 4. Рис. 4, а демонстрирует, что при использовании в расчетах фрагментов, эволюционирующих по второму варианту, необходимо большее число фрагментов, чем при использовании первого варианта эволюции фрагмента (ср. с рис. 3, в). Как показывает рис. 4, б, увеличение

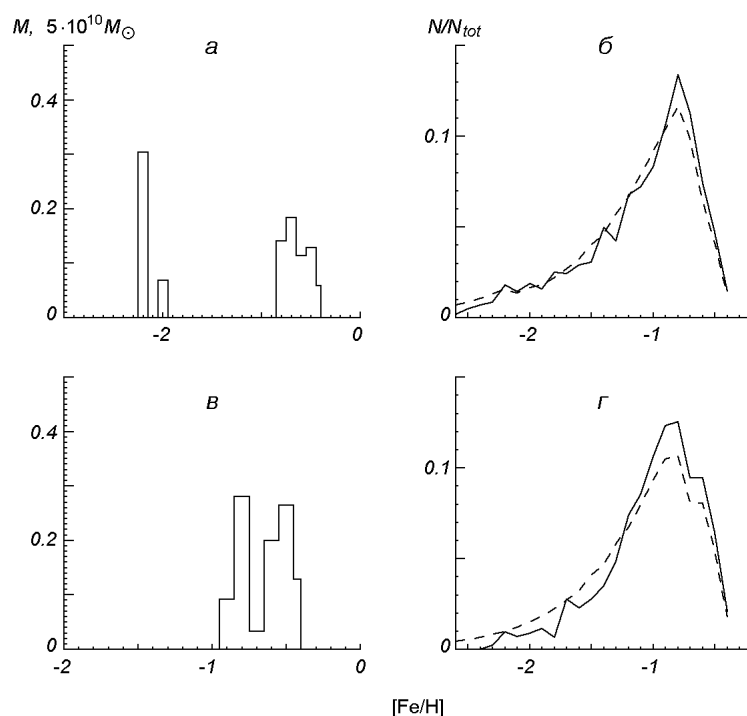


Рис. 4. Слева — массы фрагментов (закрытая модель) гало М 31 (а) и гало NGC 5128 (в); справа — соответствующие функции металличности смеси фрагментов (штриховые линии — расчет, сплошные линии — наблюдения): б — для гало М 31 [8], г — для гало NGC 5128 [13]

массы фрагмента с $[Fe/H] = -2.2$ и появление еще одного фрагмента с $[Fe/H] = -2.0$ позволило очень хорошо воспроизвести малометалличную часть наблюдаемой функции металличностей гало М 31 (параметр Колмогорова — Смирнова $\sigma = 0.98$).

При использовании фрагментов второго типа наблюдаемая функция металличности гало NGC 5128 воспроизводится добавлением двух фрагментов (рис. 4, в), что не сильно улучшило полученную теоретическую функцию металличностей гало этой галактики (рис. 4, г, параметр $\sigma = 0.46$).

Итак, использование фрагментов второго типа с экспоненциальным темпом звездообразования позволило воспроизвести наблюдаемую функцию металличностей М 31.

Подчеркнем, что изменение темпа звездообразования должно иметь именно экспоненциальную форму, чтобы получилась такая сходимость. Однако в данном случае масса газа, оседающего на диск, весьма высока. Соотношение масс звездного и газового компонента (или гало и дискового компонента) в данном случае составило 1:12. Фотометрическое изучение М 31 [41] показало, что соотношение масс сфероидального и дискового компонентов составляет 2.4:1. Полученное соотношение звездного (сфероидального) и газового (диск) компонентов, таким образом, противоречит наблюдаемому.

Слияние двух фрагментов соизмеримых масс. Предполагается, что гигантские эллиптические галактики являются очень старыми звездными системами, которые сформировались в процессе слияний больших фрагментов (т. е. слияния массивных галактик-предшественников) в раннюю эпоху [38]. Альтернативный сценарий основан на иерархической теории галакти-

ческого сгущивания и предполагает, что массивные галактики сформировались относительно поздно в результате множественных слияний небольших фрагментов с дополнительной аккрецией газа [22].

С точки зрения Бекки и др. [3], сходство между формами функций металличностей NGC 5128 и M 31 объясняется, если сфероид M 31 был сформирован путем слияния двух спиральных галактик, подобно эллиптической галактике NGC 5128.

Предположим, что звезды поля гало могли образоваться в двух массивных фрагментах, которые, слившись, дали наблюдаемое распределение звездного населения по металличностям. В дальнейших расчетах будут использованы функции металличностей второго и третьего вариантов эволюции фрагментов, в этом случае принятая история звездообразования будет влиять на общий вид функции металличностей фрагмента. Выясним, можно ли воспроизвести наблюдаемые функции металличностей для NGC 5128 и M 31 в рамках сценария слияния двух тел.

Галактика M 31. Внешнее гало ($r > 20$ кпк) M 31 состоит преимущественно из старых звезд (11–13 млрд лет) [8]. Наблюдения внешних частей диска M 31 показали, что звездное население диска составляют звезды с возрастом порядка 8 млрд лет, но обнаружена также небольшая популяция звезд с возрастом, превышающим 10 млрд лет [10]. Это позволяет наложить некоторые ограничения на время эволюции сливающихся фрагментов. Так как, по-видимому, звезды диска должны формироваться после формирования основной массы звезд гало и из предварительно обогащенного газа [10], то мы принимаем время эволюции фрагментов до слияния около 4 млрд лет (мы принимаем возраст галактики равным 15 млрд лет). Рассмотрим вначале случай, когда фрагмент эволюционирует по второму варианту. Рис. 5, б показывает сравнение рассчитанного и наблюдаемого распределений звезд по металличностям для M 31. Рассчитанная функция металличностей, полученная из смеси звезд фрагментов на рис. 5, а, воспроизводит вид наблюдаемой функции металличностей гало M 31 при значении параметра $\sigma = 0.74$. Мы обнаружили, что массы

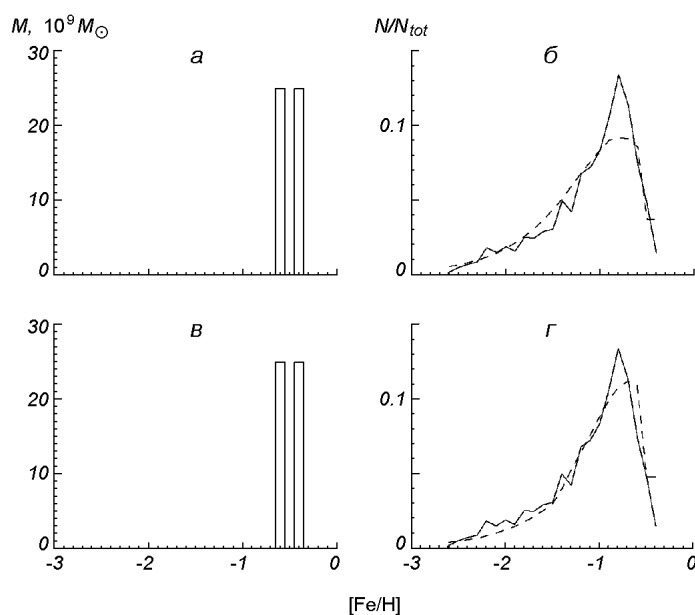


Рис. 5. Массы фрагментов (закрытая модель) гало M31 и рассчитанная функция металличности смеси фрагментов (б: штриховая линия — расчет, сплошная линия — наблюдения [8]); в — то же для открытой модели

сливающихся фрагментов должны быть примерно одинаковыми, а уровни астрации фрагментов должны находиться в пределах 0.86—0.9 и 0.76—0.8. Но при этом рассчитанная функция металличностей показывает явный недостаток звезд вблизи ее пика по сравнению с наблюдениями. Если слияние двух массивных тел имело место при образовании гало М 31, то появление «избытка» звезд вблизи пика наблюдаемой функции металличностей можно объяснить тем, что фрагменты могли взаимодействовать с окружающей средой, что не учитывалось в данном случае. Проверим это предположение — введем аккрецию небогатого вещества на фрагмент до слияния (третий вариант эволюции фрагмента).

Рис. 5, *г* показывает, что учет притока небогатого межгалактического газа на фрагменты перед их слиянием действительно приводит к лучшему согласию между наблюдательной и рассчитанной функциями металличностей ($\sigma = 0.95$). Для того чтобы воспроизвести наблюдаемую функцию металличностей, аккреция небогатого газа на фрагмент должна начаться через 2.4 млрд лет после начала эволюции фрагмента и продолжаться вплоть до начала слияния. Общая доля газа, осевшего на диск, должна составлять 0.3 от общей массы фрагмента. Значение доли газа во фрагментах на момент их слияния лежит в пределах 0.12—0.17 и 0.25—0.34 (уровни астрации фрагментов 0.83—0.88 и 0.66—0.75). Найденные значения масс фрагментов (рис. 5, *в*) получились примерно равными, как и в предыдущем случае. Подсчет доли газа, которая отсталась «неиспользованной» перед слиянием и которая позже осядет на диск, дал минимальное и максимальное значения 16.6 и 25.4 % от общей массы М 31. Согласно фотометрическим наблюдениям [41] соотношение масс сфероида и дискового компонентов М 31 равно 2.4:1, и масса дискового компонента составляет 29.4 % общей массы. Как можно видеть, полученное нами максимальное значение газа, идущего на образование диска, довольно близко к наблюдаемому.

Таким образом, можно заключить, что звезды поля гало М 31 действительно могли сформироваться в результате слияния двух близких по массам фрагментов, и аккреция, по-видимому, играет заметную роль в эволюции фрагментов.

Галактика NGC 5128. Рассмотрим теперь возможность воспроизвести наблюдаемые характеристики гало NGC 5128 в рамках сценария слияния двух массивных фрагментов. Исследования [13] показали, что во внешнем ($r = 21$ кпк) гало NGC 5128 преобладают старые звезды (~ 12.5 млрд лет). Наблюдения внутреннего ($r = 9$ кпк) гало NGC 5128 [26] показали, что оно состоит по крайней мере из двух типов населений, старого, явно преобладающего (~ 12 млрд лет), и молодого (~ 2 млрд лет). Это показывает, что основная масса звезд внешнего гало этой галактики сформировалась около 12 млрд лет назад, и мы принимаем время эволюции фрагментов равным 3 млрд лет. Рассчитанная функция металличностей согласуется с наблюдаемой [13] (рис. 6, *б*, $\sigma = 0.8$) и еще лучше — с данными [3] (рис. 6, *в*, $\sigma \approx 1$). Как и в случае с М 31, эволюция фрагментов рассматривалась в рамках открытой модели (фрагменты третьего типа). Вариированием свободных параметров (значения масс и уровней астрации фрагментов) мы нашли, что массы фрагментов соотносятся как 1:2.57, а значения уровней астрации лежат в пределах 0.85—0.92 для более массивного фрагмента и 0.7—0.78 для менее массивного фрагмента (рис. 6, *а*). Такое согласие между теоретической и наблюдаемой функциями металличностей (рис. 6, *б*, *в*) получено при условии, что аккреция небогатого газа должна начаться спустя 1 млрд лет после начала звездообразования во фрагментах и доля аккрецированного газа должна составлять 0.5 от массы каждого фрагмента. Хотя NGC 5128

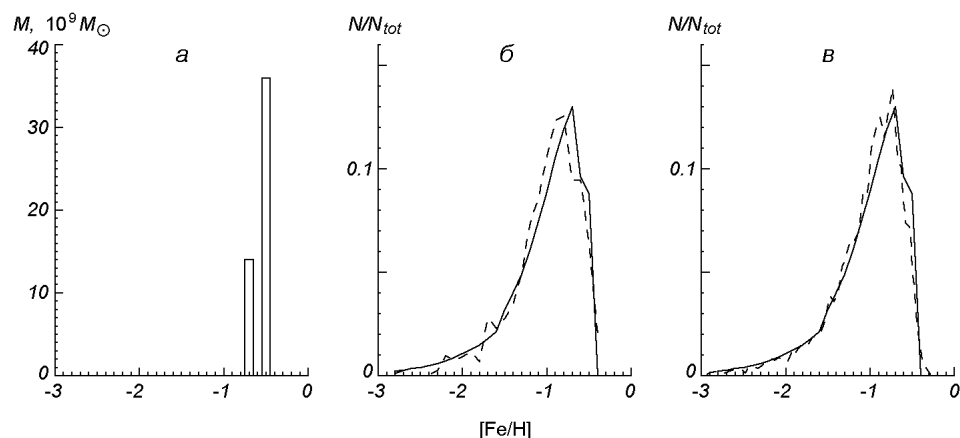


Рис. 6. Характеристики фрагментов (открытая модель) гало NGC 5128 и рассчитанные функции металличности смеси фрагментов (штриховые линии — расчет, сплошные — наблюдения): б — данные [13], в — данные [3]

является эллиптической галактикой, она имеет дисковую составляющую [16]. Вклад светимости диска в общую светимость галактики составляет около 10 % [42], поэтому для грубой оценки предположим, что значение массы диска не превышает 0.1 общей массы галактики. Доля газа, остающегося на образование диска, составляет 0.08—0.15 для более массивного и 0.22—0.3 для менее массивного фрагментов, или 12—21 % общей массы исследуемой галактики.

Рассмотрение формирования эллиптических галактик (в частности, NGC 5128) путем слияния спиральных галактик [3] показало, что звездное гало эллиптических галактик, сформированных таким образом, населено преимущественно звездами с металличностью $[Fe/H] \approx -0.7$, которые происходят из внешних частей дисков сливающихся спиральных галактик. Их результаты предполагают, что если доля массы гало сливающихся спиралей больше 0.2, то функция металличности показывает больше малометаллических звезд, чем наблюдаемое распределение. В нашем случае трудно сказать, будут ли сливающиеся фрагменты (протогалактики) дисковыми, так как по виду распределения звезд по металличностям этих фрагментов трудно судить об их морфологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была рассмотрена возможность формирования гало галактик M 31 и NGC 5128 путем слияния фрагментов. Было проведено сравнение рассчитанных и наблюдаемых функций металличностей галактик M 31 и NGC 5128. Было найдено, что рассчитанная функция металличностей воспроизводит наблюдаемую в случае, если звезды поля гало галактики NGC 5128 образовались в двух массивных фрагментах, соотношение масс которых составляло 1:2.57. Звезды гало галактики M 31 могли образоваться в двух массивных фрагментах, массы которых соотносились как 1:1.

Полученные результаты позволяют предположить, что аккреция небогатого газа, по-видимому, играла важную роль в эволюции фрагментов до слияния. В случае NGC 5128 доля газа, оседающего на фрагмент, составила 0.5 полной массы каждого фрагмента, и время начала аккреции на фрагменты составило 1 млрд лет после начала его эволюции. В случае

М 31 доля газа, аккрецирующего на фрагмент, составила 0.3 полной массы каждого фрагмента, и время начала аккреции на фрагменты составило 2.4 млрд лет после начала его эволюции. Мы нашли, что доля газа, приходящегося на образование дисковой составляющей М 31, составляет 16—25 % всей массы галактики, а для NGC 5128 — в пределах 12—21 %, что не противоречит наблюдаемым данным.

Автор благодарит Л. С. Пилюгина и Ю. И. Изотова за обсуждение работы и помощь в подготовке рукописи. Работа частично финансирована Украинским фондом фундаментальных исследований (грант 02.07/00132).

1. *Никитюк Т. В.* О формировании гало в эллиптических и спиральных галактиках // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 3.—С. 259—271.
2. *Пилюгин Л. С.* Влияние галактического ветра на химическую эволюцию неправильных галактик. Численное моделирование и аналитическое описание // Астрон. журн.—1994.—71, № 6.—С. 825—832.
3. *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.
4. *Bellazzini M., Cacciari C., Federici L., et al.* The Andromeda project. I. Deep HST-WFPC2 V,I photometry of 16 fields toward the disk and the halo of the M 31 galaxy. Probing the stellar content and metallicity distribution // Astron. and Astrophys.—2003.—405, N 3.—P. 867—901.
5. *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.
6. *Couture J., Racine R., Harris W. E., Holland S.* Stellar populations in M 31: Resolved I, V photometry of five halo globular clusters and surrounding fields // Astron. J.—1995.—109, N 4.—P. 2050—2060.
7. *Durrell P. R., Harris W. E., Pritchett C. J.* BR photometry of the halo of M 31 // Astron. J.—1994.—108, N 6.—P. 2114—2122.
8. *Durrell P. R., Harris W. E., Pritchett C. J.* Photometry and the metallicity distribution of the outer halo of M 31 // Astron. J.—2001.—121, N 5.—P. 2557—2571.
9. *Edvardsson B., Andersen J., Gustafsson B., et al.* The chemical evolution of the galactic disk I. Analysis and results // Astron. and Astrophys.—1993.—275, N 1.—P. 101—152.
10. *Ferguson A. M. N., Johnson R. A.* Constraints on galaxy formation from stars in the far outer disk of M 31 // Astrophys. J. Lett.—2001.—559, N 1.—P. L13—L16.
11. *Hachisu I., Kato M., Nomoto K.* A new model for progenitor systems of type Ia supernovae // Astrophys. J. Lett.—1996.—470, N 2.—P. L97—L100.
12. *Hachisu I., Kato M., Nomoto K.* A wide symbiotic channel to type Ia supernovae // Astrophys. J.—1999.—522, N 1.—P. 487—503.
13. *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.
14. *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.
15. *Harris W. E., Harris G. L. H.* On the formation of galaxy halos: Comparing NGC 5128 and the Local Group members // Astron. J.—2001.—122, N 6.—P. 3065—3069.
16. *Holland S., Cote P., Hesser J. E.* Globular clusters in NGC 5128 // Astron. and Astrophys.—1999.—348, N 3.—P. 418—436.
17. *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.
18. *Ibata R. A., Gilmore G., Irwin M. J.* A dwarf satellite galaxy in Sagittarius // Nature.—1994.—370, N 6486.—P. 194—196.
19. *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 M 31 // Nature.—2001.—370, N 6486.—P. 194—196.
20. *Ivans I. I., Carney B., L. de Almeida, Sneden C.* The galactic mergers: Search of chemical evidences // ASP Conf. Ser.: Dynamics of Star Clusters and The Milky Way.—2001.—228.—P. 461.
21. *Iwamoto K., Brachwitz F., Nomoto K., et al.* Nucleosynthesis in Chandrasekhar mass models for type Ia supernovae and constraints on progenitor systems and burning-front propagation // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1999.—125, N 2.—P. 439—462.
22. *Kauffmann G., Charlot S.* The K-band luminosity function at $z = 1$: a powerful constraint on galaxy formation theory // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1998.—297, N 1.—P. L23—L28.
23. *Kobayashi C., Tsujimoto T., Nomoto K., et al.* Low-metallicity inhibition of type Ia supernovae and galactic and cosmic chemical evolution // Astrophys. J. Lett.—1998.—503, N 1.—P. 155L—159L.

24. Lee Y.-W., Joo J.-M., Sohn Y.-J., et al. Multiple stellar populations in the globular cluster ω Centauri as tracers of a merger event // *Nature*.—1999.—**402**, N 6757.—P. 55—57.
25. 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.
26. Marleau F. R., Graham J. R., Liu M. C., Charlot S. The nature of the halo population of NGC 5128 resolved with NICMOS on the Hubble Space Telescope // *Astron. J.*—2000.—**120**, N 4.—P. 1779—1793.
27. Matteucci F., Recchi S. On the typical timescale for the chemical enrichment from type Ia supernovae in galaxies // *Astrophys. J.*—2001.—**558**, N 1.—P. 351—358.
28. Minniti D., Olszewski E. W., Liebert J., et al. The metallicity gradient of the Galactic bulge // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1995.—**277**, N 4.—P. 1293—1311.
29. Mould L., Kristian J. The stellar populations of M 31 and M33 // *Astrophys. J.*—1986.—**305**, N 1.—P. 591—599.
30. Nomoto K. Accreting white dwarf models for type I supernova. I — Presupernova evolution and triggering mechanisms // *Astrophys. J.*—1982.—**253**, N 1.—P. 798—810.
31. Nomoto K., Kondo Y. Conditions for accretion-induced collapse of white dwarfs // *Astrophys. J. Lett.*—1991.—**367**, N 1.—P. L19—L22.
32. Pilyugin L. S., Edmunds M. G. Chemical evolution of the Milky Way Galaxy I. On the infall model of galactic chemical evolution // *Astron. and Astrophys.*—1996.—**313**, N 3.—P. 783—791.
33. 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.
34. 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 6622.—P. 752—754.
35. Reitzel D. B., Guhathakurta P. Metallicity and kinematics of M 31's outer stellar halo from a Keck Spectroscopic Survey // *Astron. J.*—2002.—**124**, N 1.—P. 234—265.
36. Ryan S. G., Norris J. E. Subdwarf studies. III The halo metallicity distribution // *Astron. J.*—1991.—**101**, N 5.—P. 1865—1881.
37. Salpeter E. E. The luminosity function and stellar evolution // *Astrophys. J.*—1955.—**121**, N 1.—P. 161—167.
38. Searle L., Sargent W. L. W., Bagnuolo W. G. The history of star formation and the colors of late-type galaxies // *Astrophys. J.*—1973.—**179**, N 1.—P. 427—438.
39. 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.
40. Zepf S. E., Ashman K. M. Globular cluster systems formed in galaxy mergers // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1993.—**264**, N 3.—P. 611—618.
41. Vaucouleurs G., de Photoelectric photometry of the Andromeda nebula in the U, B, V syst // *Astrophys. J.*—1958.—**128**, N 3.—P. 465—488.
42. van den Bergh S. The post-eruptive galaxy NGC 5128 = Centaurus A // *Astrophys. J.*—1976.—**208**, N 3.—P. 673—682.
43. Whelan J., Iben I. J. Binaries and supernovae of type I // *Astrophys. J.*—1973.—**186**, N 2.—P. 1007—1014.

Поступила в редакцию 25.09.03