

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ ОБРАЗОВАНИЯ РАССЕЯННЫХ СКОПЛЕНИЙ С ВОЗРАСТОМ НЕСКОЛЬКО МИЛЛИАРДОВ ЛЕТ

© 2016 И. А. Ачарова*, Е. С. Шевцова

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, 344006 Россия

Поступила в редакцию 29 июня 2015 года; принята в печать 15 декабря 2015 года

Обсуждается возможность определения мест образования рассеянных скоплений (РС) с возрастом несколько миллиардов лет. Предлагаемый метод основывается на сопоставлении результатов моделирования химической эволюции галактического диска с параметрами скопления. Известно пять РС, возраст которых превышает 7 млрд лет: NGC 6791, ВН 176, Collinder 261, Berkeley 17, Berkeley 39. Содержание кислорода и железа в NGC 6791 и кислорода в ВН 176 в два раза выше солнечного, в других скоплениях содержание тяжелых элементов близко к солнечному. Согласно моделям химической эволюции, на момент образования этих объектов соответствующее содержание кислорода и железа было достигнуто в области галактоцентрических расстояний меньше 5 кпк. В настоящее время рассматриваемые РС удалены от нее на несколько кпк. Некоторые из них находятся экстремально высоко, около 1 кпк над плоскостью диска, то есть подверглись действию механизма, вынесшего их на нехарактерные для такого типа объектов орбиты. Более молодые скопления, возрастом 4–5 млрд лет, например, NGC 1193, М 67 и др., как следует из сопоставления с расчетами химической эволюции, могли образоваться в широком диапазоне галактоцентрических расстояний. Предполагать, что они удалились от вероятного места своего рождения, можно лишь на основании их необычно большой высоты над плоскостью диска. Явление выноса скоплений на большие расстояния от плоскости галактического диска наблюдается вплоть до настоящего времени: около 40 скоплений расположены на высоте от 300 до 750 пк, при этом их возраст лежит в диапазоне от 0 до 2 млрд лет.

Ключевые слова: *рассеянные скопления и ассоциации — Галактика: кинематика и динамика — Галактика: содержание химических элементов*

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение формирования и эволюции галактик — одно из ключевых направлений современной астрофизики. В последние десятилетия в этой области был достигнут значительный прогресс, но еще далеко до детального понимания происходящих процессов. Один из способов изучения истории Галактики — исследование свойств населяющих ее объектов различных классов.

Звезды с массой около одной солнечной и меньше могут иметь возраст в диапазоне от начала формирования диска Галактики до настоящего времени. Использование их для расшифровки эволюционных процессов затруднено по нескольким причинам. Одна из них — большая ошибка определения возраста, сравнимая с его оценкой. Другая причина состоит в том, что объем выборки, доступной для исследования, ограничен окрестностью Солнца в пределах 100 пк. Его близость к экваториальной плоскости диска способствует тому, что в выборке преобладают молодые звезды. Помимо этого,

поскольку в окрестность Солнца попадают звезды из разных, порой довольно далеких, областей Галактики, можно ожидать, что корреляция возраст–металличность здесь будет нарушена [1].

На расстоянии нескольких килопарсек от Солнца видны звезды классов O, B, цефеиды и зоны ионизованного водорода. Это молодые объекты, которые унаследовали современный химический состав межзвездной среды (МЗС).

Еще один класс ярких объектов — рассеянные скопления. Они представляют собой группу из 100–1000 звезд, имеющих общее происхождение; характерный размер такой группы — несколько парсек. Их возраст, как правило, меньше 1 млрд лет. В результате движения в неоднородном гравитационном поле сила, действующая на разные части скопления, не одинакова, что приводит к его деформации, вытягиванию, и в конечном счете к диссипации среди звезд поля за время, сравнимое со временем жизни скопления [2, 3]. Однако известно около двадцати РС старше 4 млрд лет [5]. Это примерно 3% скоплений, изученных

*E-mail: iaacharova@sfsedu.ru

на основании каталога из [4]. Ошибка определения возраста таких скоплений — около 1 млрд лет [5, 6].

Результаты исследования химического состава самых старых РС, возраст которых 7 млрд лет и более (Collinder 261, Berkeley 17, Berkeley 39, ВН 176, NGC 6791), оказались неожиданными. Для трех первых из перечисленных он близок к солнечному [5–9], как у самых молодых объектов, окружающих эти скопления. В случае NGC 6791, возраст которого оценивают в 9–10 млрд лет, содержание тяжелых элементов превышает солнечное в два раза (см. [10] и ссылки в этой работе). Также неожиданными оказались параметры РС ВН 176, возраст которого 7 ± 1 млрд лет. Содержание железа в нем $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.1 \pm 0.1$, в то время как $[\text{O}/\text{Fe}] = 0.35 \pm 0.2$ [6]. Скопление расположено на галактоцентрическом расстоянии $R_{\text{gc}} = 9.4$ кпк, где не обнаружены другие объекты с таким же высоким отношением $[\text{O}/\text{Fe}]$. Стоит отметить и его экстремальную высоту над плоскостью галактического диска — $z = -1350$ пк.

Из перечисленных РС лишь Berkeley 17, возраст которого около 10 млрд лет [5], находится в пределах тонкого диска Галактики — $z = -155$ пк, — остальные наблюдаются на высотах в несколько раз больших. По-видимому, они избегают разрушения благодаря тому, что в процессе движения в Галактике РС удаляются на высокие орбиты, где действие приливных сил пренебрежимо мало. При этом скопления периодически приближаются к плоскости диска и могут наблюдаться на небольших высотах (моделирование орбит РС см., например, в [11]).

На основании свойств РС возрастом несколько миллиардов лет в литературе делаются выводы о ранних этапах химической эволюции галактического диска [5, 12, 13]. При этом химический состав скопления приписывается той области Галактики, где это скопление наблюдается. При таком подходе, как признают сами авторы, выявить следы химической эволюции не удастся. Это становится понятным, если учесть, что на различных галактоцентрических расстояниях сценарии химической эволюции Галактики существенно отличаются. Как показано в работах [10, 14], центральная область диска ($R_{\text{gc}} < 3$ кпк) обогащается тяжелыми элементами очень быстро, при этом уже через 2 млрд лет от начала эволюции ее металличность превышает солнечную в два раза. Обогащение солнечной окрестности химическими элементами происходит гораздо менее интенсивно. Если имеет место перемещение старых скоплений от места образования, то картина химической эволюции замыкается.

В нашем исследовании мы сопоставляем данные о содержании кислорода и железа в скоплении

и о его возрасте с имеющимися расчетами производства и перераспределения этих элементов в галактическом диске, детально описанными в [14]. Таким образом, решается задача, обратная к рассмотренной в [5, 12, 13]: на основании результатов моделирования химической эволюции определяется возможное место образования исследуемых скоплений.

2. МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На первом этапе моделирования выполнялись расчеты эволюции содержания кислорода и железа в диске Галактики, метод моделирования подробно описан в работе [14]. Подход к моделированию близок к описанному в работах [15, 16]. Основные отличия используемой модели в том, что учитываются новейшие представления о пространственном распределении и темпах образования сверхновых [17]: массивные яркие звезды концентрируются в спиральных рукавах, тогда как маломассивные распределены по галактическому азимуту достаточно однородно. Была установлена неоднородность нуклеосинтеза сверхновых типа Ia и полученные оценки средней массы синтезированного железа при взрыве двух различных подтипов сверхновых типа Ia: произошедших от короткоживущих предшественников, взрывающихся в областях звездообразования, и от долгоживущих. Результаты расчетов эволюции содержания кислорода и железа в диске Галактики показаны на рис. 1. Предполагается, что диск Галактики формируется из газа, обогащенного продуктами первичного нуклеосинтеза, содержание тяжелых элементов в нем равно 2% от солнечного. Распределение, соответствующее настоящему моменту времени, то есть через 10 млрд лет от начала эволюции диска, нормировано на содержание тяжелых элементов в цефеидах. Четко видны три особенности эволюции. Во-первых, она протекает с разной скоростью на различных расстояниях от центра галактического диска, при этом внутренние области диска, $R_{\text{gc}} < 3$ кпк, приобретают сверхсолнечное содержание рассматриваемых элементов в первый миллиард лет от начала эволюции диска. Это объясняется высокой плотностью газа и, как следствие, высоким темпом звездообразования и образования сверхновых звезд — поставщиков тяжелых элементов. В окрестности Солнца (его галактоцентрическое расстояние здесь и далее принимается $R_{\text{gc}} = 7.9$ кпк) в первые 3 млрд лет средняя скорость обогащения кислородом и железом составляла примерно 0.2 dex за 1 млрд лет. Вторая особенность состоит в том, что темп эволюции содержания тяжелых элементов замедляется. В центральной области диска эволюция практически завершилась через 2 млрд

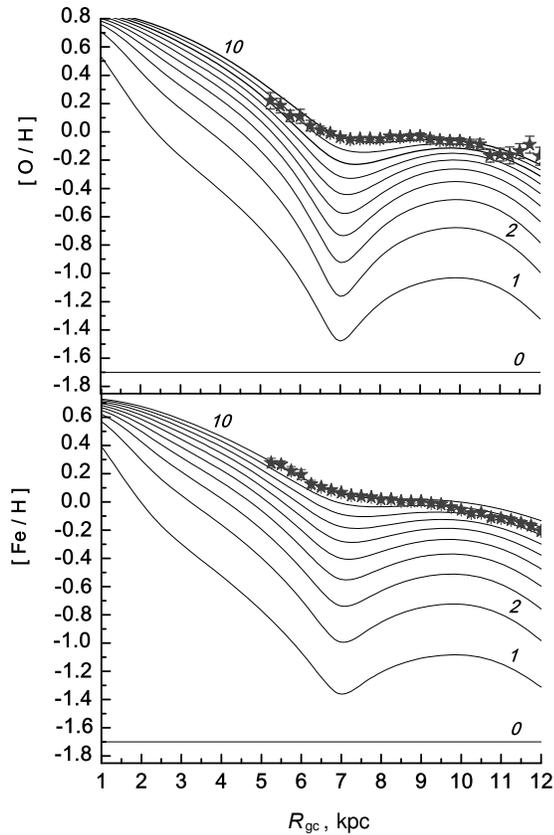


Рис. 1. Графики эволюции содержания кислорода (вверху) и железа (внизу) в диске Галактики (сплошные линии). Цифрами обозначено время в млрд лет от начала формирования диска. За начальное содержание тяжелых элементов в диске принято 2% от их содержания на Солнце. Звездочками показаны усредненные наблюдаемые распределения кислорода и железа, полученные с использованием выборки цефеид в работе [14].

лет от начала его формирования, и дальнейшее ее обогащение пренебрежимо мало. В солнечной окрестности за последние 3 млрд лет содержание тяжелых элементов увеличилось на 0.2 dex. В-третьих, в окрестности коротационного резонанса, который принимался в расчетах расположенным вблизи 7.0 кпк [18], формируется четко выраженный излом на радиальных распределениях кислорода и железа, который замыкается со временем вследствие диффузионных процессов [19, 20].

Метод определения возможного места образования скопления состоит в следующем. Выбирается график, соответствующий времени образования скопления; рассматриваются также два соседних графика с учетом ошибки определения возраста. На этих графиках отмечаются участки, соответствующие содержанию кислорода и железа в скоплении с учетом ошибок их определения. В ошибки оценок содержания этих элементов наи-

большой вклад вносят ошибки определения параметров звездных атмосфер, с учетом которых точность составляет 0.1 dex для железа [10] и 0.2 dex для кислорода [21]. Определяется область галактоцентрических расстояний, для которой на эволюционных графиках выполняется совместное соответствие времени образования скопления и наблюдаемых значений содержания кислорода и железа. Эта область и рассматривается как предполагаемое место образования скоплений.

Необходимо отметить, что существует естественный разброс содержания химических элементов около 0.2 dex в молодых объектах на данном радиусе галактического диска. При этом модели химической эволюции показывают значение, усредненное по азимуту. Поэтому, делая выводы о месте образования РС, необходимо учитывать естественный разброс содержания тяжелых элементов в межзвездной среде.

Начнем рассмотрение со скоплений, известных как самые старые: NGC 6791, Collinder 261, Berkeley 17, Berkeley 39, ВН 176.

NGC 6791. Возраст скопления 10 ± 1 млрд лет [5]. Это самое высокометаллическое РС, сохранившееся с ранних этапов эволюции галактического диска: $[O/H] = 0.28 \pm 0.2$, $[Fe/H] = 0.35 \pm 0.1$ [10]. Как видно на рис. 2, одновременное удовлетворение соответствия параметров скопления достигается в центральных областях диска для значений радиуса меньше 2 кпк. То есть согласно модели химической эволюции, в первый миллиард лет от начала эволюции диска существовала область с содержанием кислорода и железа, превышающим солнечное более чем в два раза, поэтому параметры РС оказываются типичными для галактоцентрического расстояния, отличающегося от современного на несколько килопарсек. Сейчас скопление находится на расстоянии 8.02 кпк от центра Галактики в области, где его металличность более чем в два раза превышает среднюю металличность окружающих его самых молодых объектов диска. Более того, для своего класса объектов оно расположено нетипично высоко над плоскостью диска, на расстоянии около 800 пк. Сопоставив данные, можно сделать вывод, что РС удалилось от места своего образования.

ВН 176. Скопление, возраст которого 7 ± 1 млрд лет, по содержанию магния, кальция и кислорода богаче самых молодых окружающих его объектов галактического диска в 1.5 раза [6]. Учитывая, что содержание железа $[Fe/H] = -0.1 \pm 0.1$ [6], а $[O/H] = 0.25 \pm 0.2$ (метод оценки содержания кислорода описан в [22]), получаем $[O/Fe] = 0.35 \pm 0.2$. ВН 176 наблюдается на расстоянии 9.4 кпк от центра галактического диска, где такое высокое

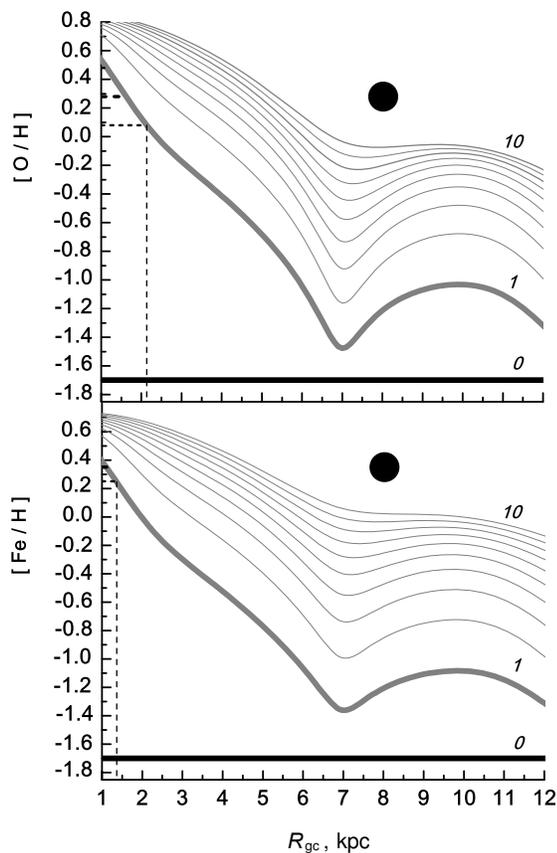


Рис. 2. Графики эволюции содержания кислорода (вверху) и железа (внизу) в диске Галактики, как на рис. 1. Цифрами отмечено время от начала эволюции в млрд лет. График, соответствующий времени образования скопления NGC 6791, показан черной широкой линией. С учетом ошибки определения возраста в 1 млрд лет рассматривается также соседний график, показанный серой широкой линией. Горизонтальные пунктирные линии отмечают содержание кислорода и железа в скоплении: средняя — наиболее вероятное значение, верхняя и нижняя — с учетом ошибки определения содержания. Вертикальной штриховой линией на каждом графике отмечены максимальные значения радиуса диска, соответствующие возможному месту образования скопления, определенные по кислороду и по железу. Наименьшее из этих значений принимается как граница области, в которой скопление могло образоваться. Черным кружком показано его современное положение на графике.

значение $[O/Fe]$ уникально. Согласно расчетам химической эволюции (см. рис. 3), параметры скопления оказываются естественными для области $3 < R_{gc} < 5$ кпк. Сейчас ВН 176 находится экстремально высоко над плоскостью галактического диска — $z = -1350$ пк. На этом основании можно сделать вывод о том, что скопление удалилось от места своего образования.

Collinder 261. Это скопление возрастом 8 ± 1 млрд лет [5] имеет близкое к солнечному со-

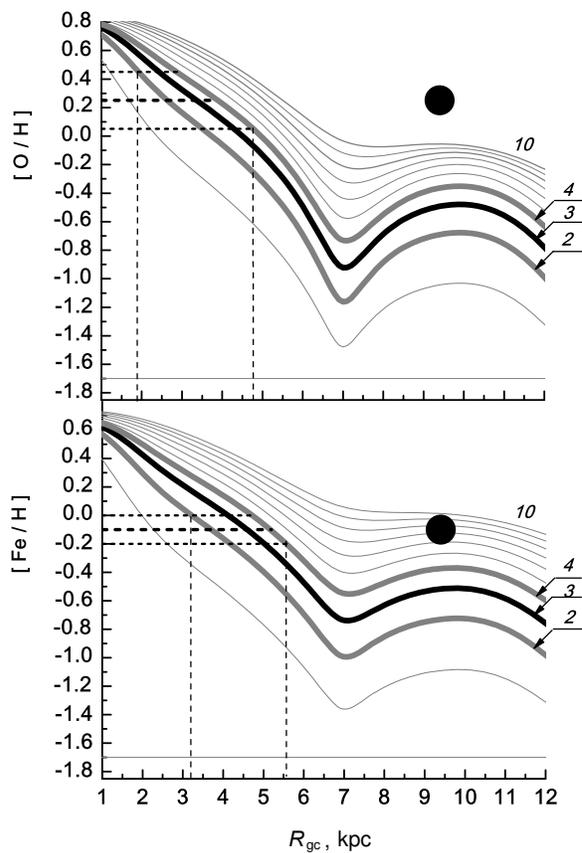


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для скопления ВН 176. Области возможного образования скопления, определенные по кислороду и по железу, ограничены двумя штриховыми вертикальными прямыми на каждом графике. Пересечение этих областей является возможным местом образования скопления.

держание кислорода и железа: $[O/H] = -0.15 \pm 0.2$, $[Fe/H] = -0.03 \pm 0.1$ [9]. Согласно модели химической эволюции местом его возможного образования является область галактоцентрических расстояний $2.5 < R_{gc} < 4.5$ кпк (рис. 4). Сейчас это скопление удалено на расстояние 7.0 кпк от центра галактического диска на небольшую по сравнению с предыдущими двумя скоплениями высоту $z = -250$ пк. В этой области соответствующее содержание тяжелых элементов было достигнуто примерно через 8 млрд лет от начала эволюции.

Berkeley 17. Параметры этого скопления близки к соответствующим оценкам для Collinder 261 [5]: возраст 10.06 ± 2.77 млрд лет, $[O/H] = -0.1 \pm 0.2$, $[Fe/H] = -0.1 \pm 0.1$ [21] (рис. 5). При этом оно расположено на 4 кпк дальше от центра галактического диска, на расстоянии примерно 10.7 кпк. Такое содержание кислорода и железа на данных галактоцентрических расстояниях характерно для самых молодых объектов, окружающих это

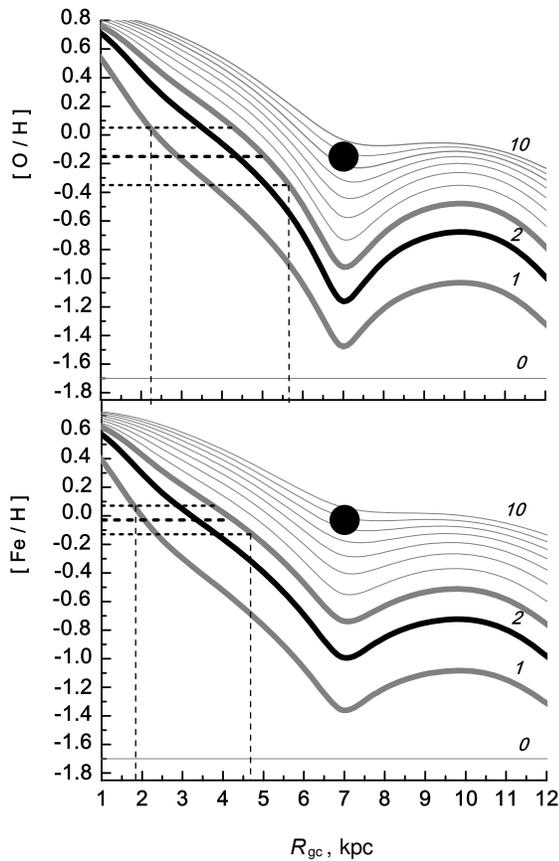


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для скопления Collinder 261.

скопление. Согласно модели химической эволюции возможная область его образования $R_{gc} < 5$ кпк. Следует заметить, что ошибка определения возраста РС Berkeley 17 превосходит аналогичную для других скоплений [5], что приводит к увеличению вероятной области его образования.

Berkeley 39. Похожая ситуация наблюдается и для этого РС. Содержание тяжелых элементов соответствует их содержанию в окружающих скопление самых молодых объектах диска: $[O/H] = -0.19 \pm 0.2$, $[Fe/H] = -0.21 \pm 0.1$ [7], при этом его возраст 7 ± 1 млрд лет [5]. Параметры скопления согласуются с результатами модели химической эволюции для галактоцентрических расстояний: $3.5 < R_{gc} < 6$ кпк (рис. 6). Сейчас оно удалено на расстояние 11.35 кпк от центра галактического диска и от его плоскости на высоту $z = 750$ пк.

Таким образом, если возраст скопления превышает 7 млрд лет, то модели химической эволюции позволяют получить узко локализованное место его рождения. При этом область, определенная по содержанию кислорода, может быть смещена

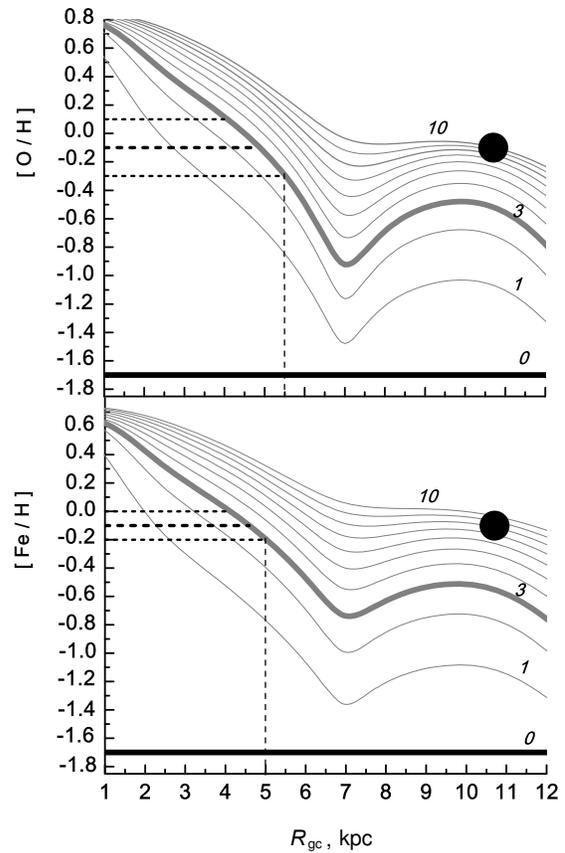


Рис. 5. То же, что на рис. 2, для скопления Berkeley 17

по отношению к области, определенной по содержанию железа, но во всех случаях удается найти общий диапазон галактоцентрических расстояний.

В пользу того, что РС с возрастом в несколько миллиардов лет удалились от места своего образования, говорят их нетипично высокая металличность по сравнению с металличностью объектов современного окружения и в некоторых случаях экстремально большая высота над плоскостью галактического диска. Если учесть, что каждое такое скопление за время своего существования эту плоскость неоднократно пересекало, встречающаяся низкая высота РС не противоречит сделанным выводам.

Обратимся к более молодым РС, возраст которых 4–5 млрд лет. На их примере можно продемонстрировать, что чем моложе скопление, тем шире получается возможная область его образования. Это связано с тем, что со временем распределение содержания рассматриваемых элементов по радиусу диска становится более пологими, при этом замедляется и темп обогащения МЗС химическими элементами.

NGC 1193. Возраст 5 ± 1 млрд лет [5], $[O/H] = -0.30 \pm 0.2$, $[Fe/H] = -0.22 \pm 0.1$ [7].

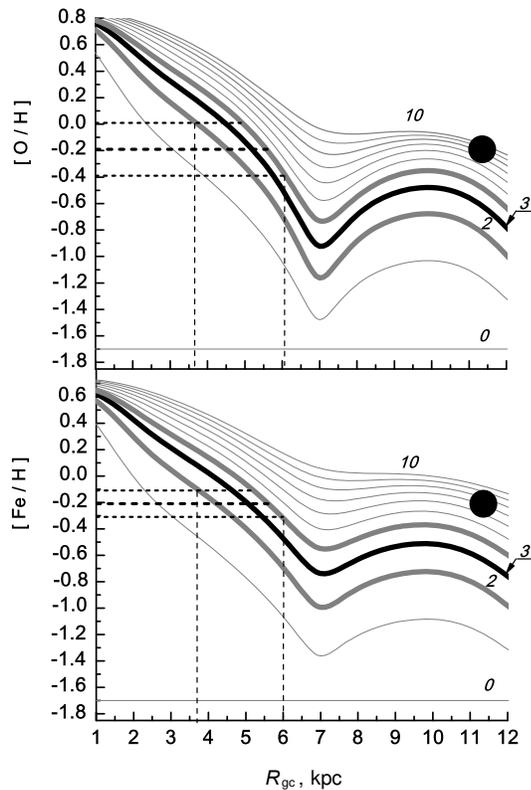


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для скопления Berkeley 39. Возможная область образования скопления ограничена двумя штриховыми вертикальными прямыми.

Диапазон возможного места рождения этого скопления довольно широк, от 5.5 кпк до 10 кпк (рис. 7). Современное его положение — $R_{gc} = 12.73$ кпк, вблизи верхней границы радиуса возможного места образования. Делать выводы о том, что это скопление удалилось от места своего рождения, можно лишь с учетом нехарактерной для РС высоты этого скопления над плоскостью галактического диска $z = -845$ пк.

M 67. Возраст этого скопления близок к 4 млрд лет [5], содержание кислорода $[O/H] = -0.13 \pm 0.2$ [7] соответствует широкой области мест его образования (рис. 8), и хотя содержание железа $[Fe/H] = 0.03 \pm 0.1$ [7] позволяет сузить эту область до 1 кпк необходимо помнить, что существует разброс значений его содержания в молодых объектах порядка 0.2 dex для любого радиуса диска. В то же время модели химической эволюции показывают усредненную по азимуту оценку содержания этих элементов.

Именно это обстоятельство оказывается критическим для поиска возможной области образования РС, возраст которых не больше 5 млрд лет и содержание тяжелых элементов не превышает

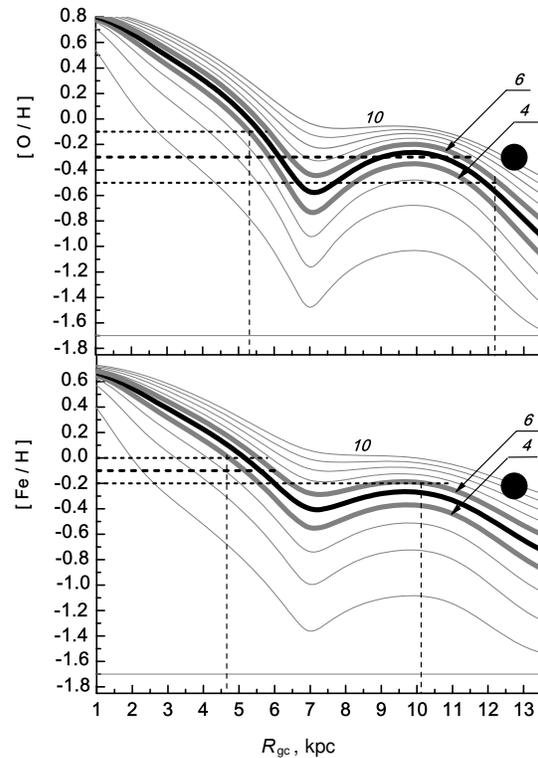


Рис. 7. То же, что на рис. 3, для скопления NGC 1193.

солнечное. Оно приводит к тому, что можно определить лишь левую границу этой области на галактоцентрическом расстоянии примерно 4.5 кпк.

Аналогичным образом с помощью рис. 1 можно определить диапазон возможных мест образования для других РС.

Рассмотрим, насколько чувствительны выводы нашего исследования к используемой модели химической эволюции. В работе [18] были разработаны восемь моделей эволюции галактического диска, отличающиеся характерными временами формирования диска и радиальными профилями крупномасштабных газовых течений. Совместно решалась задача химической эволюции диска. С помощью статистического метода Фишера были сделаны оценки значимости учета радиальных крупномасштабных течений газа. Получилось, что наилучшее согласие с наблюдениями достигается в случае быстрого формирования диска с характерным временем 2 млрд лет в модели без учета крупномасштабных течений газа, и именно на этой модели мы выше продемонстрировали работу метода по определению мест образования РС.

Для сравнения результатов обратимся к другим моделям. Для наибольшего контраста выберем экстремально противоположный класс моделей —

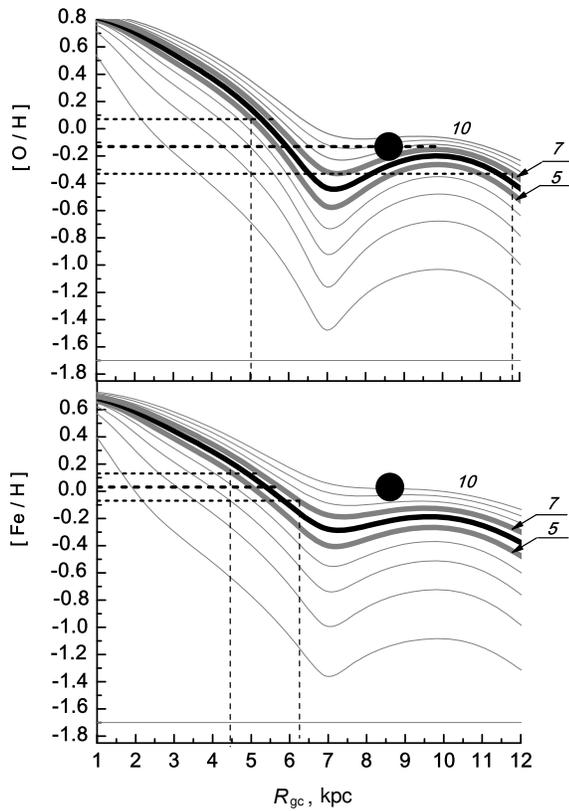


Рис. 8. То же, что на рис. 3, для скопления М 67.

модели медленного формирования диска с характерным временем 7 млрд лет. Учет крупномасштабных газовых течений внутри диска со скоростью, линейно зависящей от его радиуса, позволяет добиться наилучшего согласия с наблюдаемыми ограничениями среди этого класса моделей (см. модель М7b и ее сравнение с другими моделями в [18]). На рис. 9 показаны результаты расчетов эволюции содержания кислорода и железа в диске Галактики для этой модели с тем же алгоритмом расчетов, что и в [14]. Первые 3 млрд лет от начала формирования диска обогащение этими химическими элементами идет быстрее, чем в представленной на рис. 1 модели вследствие того, что приток газа в центральные области диска происходит не только из межгалактической среды, но и с окраин самого диска. Чем больше газа, тем эффективнее идет процесс звездообразования и, как следствие, процесс производства тяжелых элементов.

В результате, используя графики рис. 9, видим, что для РС старше 7 млрд лет возможная область образования смещается в сторону увеличения галактоцентрических расстояний примерно на 1 кпк при определении по содержанию кислорода и на 0.5 кпк — по железу. Итоговый эффект от изменения модели эволюции диска и его химической

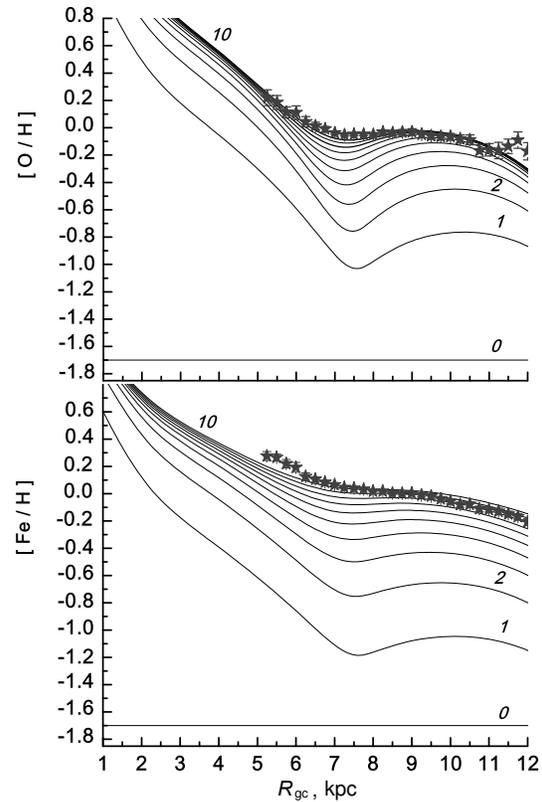


Рис. 9. Графики эволюции содержания кислорода (вверху) и железа (внизу) в диске Галактики для модели экстремально медленного формирования галактического диска с характерным временем 7 млрд лет. Обозначения такие же, как на рис. 1.

эволюции состоит в том, что диапазон радиусов галактического диска, соответствующий области образования этих РС, смещается к окраине диска на 0.5 кпк. Для более молодых РС делаются аналогичные выводы.

Теперь рассмотрим распределение молодых РС с высотой. На основании критерия принадлежности к тонкому диску, использующего элементы орбит [23], в [4] было показано, что скоплений, удовлетворяющих кинематике тонкого диска, нет за пределами 300 пк от плоскости галактического диска. Однако около сорока РС с возрастом меньше 2 млрд лет удалены от плоскости диска на высоту свыше 300 пк, вплоть до 1 кпк. Это примерно 7% изученных скоплений (на основании каталога из [4]). При этом диапазон содержания тяжелых элементов в этих РС такой же, как у окружающих их цефеид [24]. То есть два других критерия определения принадлежности объектов той или иной подсистеме — возраст и химический состав — однозначно указывают на тонкий диск Галактики.

Выделяется область повышенной концентрации РС на высоте свыше 300 пк: на галактоцентрических расстояниях от 10 до 13 кпк их более тридцати. Сведений о РС, расположенных за пределами 13 кпк, мало. На галактоцентрических расстояниях от 7 до 10 кпк известно только шесть РС на таких больших высотах. Как видно из сравнения с РС, возраст которых составляет несколько миллиардов лет, высоко поднимающиеся при своем движении скопления имеют шанс длительное по эволюционным меркам время избегать разрушения.

Рассмотрим возможные причины выноса РС на высокие орбиты. В работах [4, 25] в рамках гипотезы обсуждается механизм изменения орбиты скопления при взаимодействии с внегалактическими объектами. Еще один возможный механизм разогрева звездной составляющей диска, причем в локальной его области и за короткое время, порядка 1 млрд лет, — изгибная неустойчивость, исследуемая в работах [26, 27]. Однако нет прямого моделирования развития этого процесса в диске с параметрами диска Галактики и его окружения и с расчетами на необходимые эволюционные времена.

Заметим, что в область галактического диска за пределами 10 кпк проецируется Магелланов Поток, сформировавшийся около 2 млрд лет назад. Содержание тяжелых элементов в нем оценивается в десять раз меньше, чем в солнечном веществе (см. [28] и ссылки в этой работе). В этой связи интересно узнать, отразилась ли близость потока на химическом составе РС. В каталоге [4] можно выделить десять РС, содержание железа в которых $-0.85 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.65$ (NGC 581, Berkeley 62, NGC 436, IC 1590, Trumpler 1, NGC 663, NGC 433, NGC 2244, NGC 366, NGC 654). Все они расположены в узкой области на расстоянии от центра галактического диска 9.5–10 кпк. За исключением трех РС (NGC 433, NGC 436, IC 1590), остальные находятся на высоте, не превышающей 60 кпк от плоскости галактического диска, и их возраст оценивается от 2 до 25 млн лет. Указанные три скопления находятся на удалении примерно 100, 200 и 300 пк от плоскости диска соответственно. При этом возраст первых двух скоплений — 32 и 84 млн лет, однако самое высоко расположенное РС очень молодо, возраст IC 1590 оценивается 3 млн лет. Таким образом, перечисленные скопления могли образоваться из вещества, частично или полностью привнесенного в диск Магеллановым Поток. Все они образовались в кинематически холодной составляющей диска. В других областях галактического диска РС с такой низкой металличностью не наблюдаются.

3. ВЫВОДЫ

В работе продемонстрировано, что можно ожидать выноса РС на нехарактерные для объектов этого типа орбиты. Все известные скопления с возрастом в несколько миллиардов лет, вероятно, были подвержены действию такого механизма. При этом в своем движении в Галактике они достаточно время проводят на большой высоте, где разность гравитационного воздействия на различные их части мала, благодаря чему избегают разрушения.

Сопоставляя расчеты моделирования химической эволюции [14] с параметрами РС, удается локализовать возможную область их образования в галактическом диске. Оценка, полученная на основании расчетов эволюции содержания кислорода, во всех рассмотренных случаях согласуется с оценкой, сделанной по расчетам эволюции содержания железа. Для скоплений NGC 6791, Collinder 261, Berkeley 17, BH 176 возможное место образования оказалось близко к центру галактического диска в области радиусов до 5 кпк, для Berkeley 39 — до 6 кпк. Современное положение скоплений отстоит от возможных мест их возникновения на несколько килопарсек. Высокое содержание кислорода и железа, сравнимое с солнечным, а в случае NGC 6791 даже превышающее солнечное в три раза, говорит в пользу того, что они образовались из вещества диска Галактики.

Скопления с возрастом 4–5 млрд лет и металличностью, не превышающей солнечную, могли образоваться в широком диапазоне галактоцентрических расстояний. Предполагать, что они удалились от места своего рождения можно лишь на основании их необычно большой высоты над плоскостью диска.

В любом случае восстанавливать химическую историю Галактики, используя рассеянные скопления, нужно крайне осторожно.

РС с возрастом в несколько миллиардов лет, как правило, находятся на очень высоких для этого класса объектов орбитах. Известно около сорока молодых РС с возрастом, не превышающим 2 млрд лет (примерно половина из них моложе 1 млрд лет), которые также наблюдаются за пределами тонкого диска Галактики. Из вышеизложенного можно сделать вывод, что механизмы, выносящие скопления на большие высоты, существуют вплоть до настоящего времени.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят старшего научного сотрудника Специальной астрофизической обсерватории РАН М. Е. Шарину и профессора Казанского (Приволжского) федерального университета

В. В. Шиманского за ценные замечания и определение содержания кислорода в рассеянном скоплении ВН 176, а также рецензента и редакционную коллегию журнала «Астрофизический бюллетень» за помощь в доработке статьи. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-32-50616.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. R. D. Lépine, I. A. Acharova, and Yu. N. Mishurov, *Astrophys. J.* **589**, 210 (2003).
2. Yu. N. Mishurov and I. A. Acharova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 1771 (2011).
3. S. F. Portegies Zwart, *Astrophys. J.* **696**, L13 (2009).
4. M. L. Gozha, T. V. Borkova, and V. A. Marsakov, *Astronomy Letters* **38**, 506 (2012).
5. M. Salaris, A. Weiss, and S. M. Percival, *Astron. and Astrophys.* **414**, 163 (2004).
6. M. E. Sharina, C. J. Donzelli, E. Davoust, et al., *Astron. and Astrophys.* **570**, 48 (2014).
7. E. D. Friel, H. R. Jacobson, and C. A. Pilachowski, *Astron. J.* **139**, 1942 (2010).
8. K. A. Janes and R. L. Phelps, *Astron. J.* **108**, 1773 (1994).
9. E. Carretta, A. Bragaglia, R. G. Gratton, and M. Tosi, *Astron. and Astrophys.* **441**, 131 (2005).
10. L. Origlia, E. Valenti, R. M. Rich, and F. R. Ferraro, *Astrophys. J.* **646**, 499 (2006).
11. Z.-Y. Wu, X. Zhou, J. Ma, and C.-H. Du, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **399**, 2146 (2009).
12. L. Magrini, P. Sestito, S. Randich, and D. Galli, *Astron. and Astrophys.* **494**, 95 (2009).
13. B. A. Twarog, K. M. Ashman, and B. J. Anthony-Twarog, *Astron. J.* **114**, 2556 (1997).
14. I. A. Acharova, B. K. Gibson, Yu. N. Mishurov, and V. V. Kovtyukh, *Astron. and Astrophys.* **557**, 107 (2013).
15. C. G. Lacey and S. M. Fall, *Astrophys. J.* **290**, 154 (1985).
16. L. Portinari and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys.* **350**, 827 (1999).
17. W. Li, R. Chornock, J. Leaman, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **412**, 1473 (2011).
18. I. A. Acharova, Yu. N. Mishurov, and M. R. Rasulova, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **415**, L11 (2011).
19. Yu. N. Mishurov, J. R. D. Lépine, and I. A. Acharova, *Astrophys. J.* **571**, L113 (2002).
20. I. A. Acharova, J. R. D. Lépine, Yu. N. Mishurov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **402**, 1149 (2010).
21. E. D. Friel, H. R. Jacobson, and C. A. Pilachowski, *Astron. J.* **129**, 2725 (2005).
22. M. E. Sharina, V. V. Shimansky, and E. Davoust, *Astronomy Reports* **57**, 410 (2013).
23. R. G. Gratton, E. Carretta, R. Claudi, et al., *Astron. and Astrophys.* **404**, 187 (2003).
24. I. A. Acharova, Yu. N. Mishurov, and V. V. Kovtyukh, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **420**, 1590 (2012).
25. D. Vande Putte, T. P. Garnier, I. Ferreras, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **407**, 2109 (2010).
26. N. Yu. Sotnikova and S. A. Rodionov, *Astronomy Letters* **29**, 321 (2003).
27. N. Yu. Sotnikova and S. A. Rodionov, *Astronomy Letters* **31**, 15 (2005).
28. A. J. Fox, P. Richter, B. P. Wakker, et al., *Astrophys. J.* **772**, 110 (2013).

Searching for the Birthplaces of Open Clusters with Ages of Several Billion Years

I. A. Acharova and E. S. Shevtsova

We discuss the possibility of finding the birthplaces of open clusters (OC) with ages of several billion years. The proposed method is based on the comparison of the results of the chemical evolution modeling of the Galactic disk with the parameters of the cluster. Five OCs older than 7 Gyr are known: NGC 6791, BH 176, Collinder 261, Berkeley 17, and Berkeley 39. The oxygen and iron abundances in NGC 6791 and the oxygen abundance in BH 176 are twice the solar level, the heavy-element abundances in other clusters are close to the corresponding solar values. According to chemical evolution models, at the time of the formation of the objects considered the regions where the oxygen and iron abundances reached the corresponding levels extended out to 5 kpc from the Galactic center. At present time the OCs considered are located several kpc from the Galactic center. Some of these clusters are located extremely high, about 1 kpc above the disk midplane, i.e., they have been subject to some mechanism that has carried them into orbits uncharacteristic of this type of objects. It follows from a comparison with the results of chemical evolution that younger clusters with ages of 4–5 Gyr, e.g., NGC 1193, M 67, and others, may have formed in a broad range of Galactocentric distances. Their large heights above the disk midplane is sufficient to suggest that these clusters have moved away from their likely birthplaces. Clusters are carried far away from the Galactic disk until the present time: about 40 clusters with ages from 0 to 2 Gyr are observed at heights ranging from 300 to 750 pc.

open clusters and associations: general—Galaxy: kinematics and dynamics—Galaxy: abundances