

УДК 524.6+524.6—54

ГРАДИЕНТ МЕТАЛЛИЧНОСТИ В ГАЛАКТИКЕ
И ЕГО ПРОИСХОЖДЕНИЕ

В. А. МАРСАКОВ, А. А. СУЧКОВ

Поступила 22 сентября 1980

Принята к печати 3 мая 1982

По звездам с определениями $[Fe/H]$ и детального анализа найден градиент металличности в диске Галактики: $d[Fe/H]/dR = (-0.05 \pm 0.01) \text{ кпс}^{-1}$. Показано, что всю величину градиента можно полностью объяснить существованием в диске двух групп звезд со скачком металличности между ними. Определен также градиент металличности для звезд гало: $d[Fe/H]/dR = (-0.04 \pm 0.02) \text{ кпс}^{-1}$. И в этом случае он объясняется существованием двух групп населения гало с разной металличностью. Практически вся величина градиента обусловлена скачком металличности между двумя группами, на которые делится звездное население гало. Найдено отсутствие градиента у красных гигантов со спектроскопическими определениями металличности. Показана важность ряда эффектов селекции в проблеме интерпретации явления градиента.

1. *Введение.* Сейчас считается хорошо установленным существование радиального градиента металличности в диске Галактики. Его величина по данным многих работ близка к значению $d[Fe/H]/dR \approx -0.05 \text{ кпс}^{-1}$ (см., например, [1, 2]). Однако результаты отдельных авторов часто существенно различаются и это затрудняет интерпретацию явления градиента металличности.

Многие расхождения такого рода обусловлены, несомненно, следующим обстоятельством. В градиент металличности, вообще говоря, дают вклад два разных эффекта, которые мы условно назовем координатным и эволюционным. Первый связан с тем, что содержание тяжелых элементов в газе (из которого рождаются звезды) в данный момент времени может быть различно на разных расстояниях R от центра Галактики. Тогда объекты одинакового возраста будут иметь химсостав, зависящий от R . Второй эффект возникает из-за того, что на каждом расстоянии R в Галактике по-разному представлены старые звезды, с малым содержанием тяжелых элементов, и молодые, более богатые металлами. Это приводит в среднем к изменению химсостава с R , если даже объекты одного возраста на всех R имеют одинаковый химсостав. Кроме того, по-разному представ-

лены старые и молодые населения в конкретных выборках объектов, используемых для нахождения градиента, и величина последнего в значительной степени определяется существованием зависимости между возрастом, химсоставом, кинематикой и элементами орбит звезд. В разных методах определения градиента металличности указанные два эффекта дают разный вклад в находимую величину — из-за различий в эффектах селекции и в самой методике получения $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR$. Этим, в частности, и вызвано различие результатов разных авторов.

В настоящей работе мы нашли $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR$ по звездам диска с определениями $[\text{Fe}/\text{H}]$ из спектроскопического анализа и показали, что его полностью можно объяснить эволюционным эффектом, исходя из представлений о разделении звезд диска по металличности на две группы (см. [3, 16]). Кроме того, мы нашли $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR$ для звезд гало, используя высокоскоростные звезды; как и в диске, этот градиент также полностью объясняется существованием двух групп населения гало со скачком металличности между ними (см. [4, 16]).

2. *Градиент металличности в диске Галактики.* Величину $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR$ мы определяли по карликам околосолнечной окрестности из диаграммы $[\text{Fe}/\text{H}] - R_a$, где R_a — апогалактическое расстояние. Эти звезды находятся практически на одинаковом расстоянии от центра Галактики. $R = R_a = 10$ кпс. Однако они пришли в рассматриваемую область с разных апогалактических расстояний R_a ; величина R_a в среднем отражает место рождения звезды, поэтому химсостав данной звезды в среднем отражает химсостав на расстоянии $R = R_a$, и это дает возможность по известным R_a оценить градиент металличности (см., например, [5]).

Для выборки красных гигантов мы использовали другой метод. В этом случае звезды видны на больших расстояниях от Солнца и имеют заметно различающиеся значения R . Поэтому здесь $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR$ можно оценивать непосредственно из диаграммы $[\text{Fe}/\text{H}] - R$ (см., например, [2]).

Очевидно, что вклад координатного и эволюционного эффектов и $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR$ в этих двух методах совершенно различен.

Итак, мы отобрали из каталога [6] карлики с металличностью диска ($[\text{Fe}/\text{H}] > -0.5$). В качестве $[\text{Fe}/\text{H}]$ для каждой звезды принималось значение, усредненное по данным разных авторов. Величины R_a мы вычислили на основе модели Галактики из работы [7], при этом компоненты скоростей звезд взяты из каталога [8]. В результате получилась выборка, состоящая из 73 звезд.

В рецензии на нашу статью было обращено внимание, что используемые нами данные [6] о $[\text{Fe}/\text{H}]$ получены разными авторами в разные годы, и поскольку система сил осцилляторов g^j для FeI неоднократно пере-

сма тривалась, то это может внести систематические ошибки в окончательные результаты. Чтобы учесть это замечание рецензента, мы для одних и тех же звезд сравнили определения $[Fe/H]$, проведенные до и после 1970 г., когда были сделаны наиболее важные изменения в системе сил осцилляторов. Результат показан на рис. 1. Пять точек в нижней части рис. 1 относятся к звездам, для которых все определения $[Fe/H]$ до 1970 года были сделаны в работе [14]. По-видимому, эти определения дают завышенные значения $[Fe/H]$. Но остальные точки указывают на то, что в пределах ошибки систематических различий в $[Fe/H]$ нет, а разброс точек вокруг

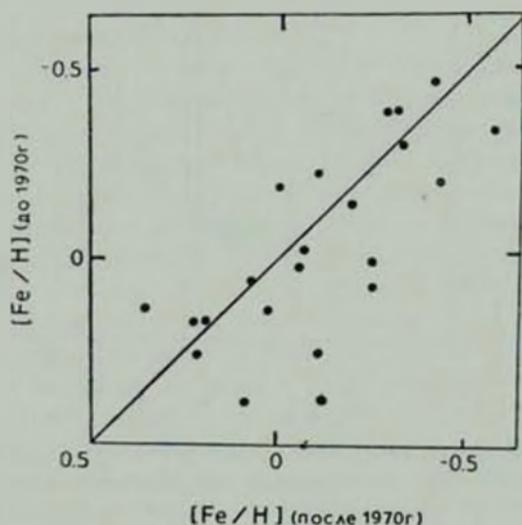


Рис. 1. Сравнение определений величины $[Fe/H]$ до и после 1970 г. для звезд главной последовательности из каталога [6].

диагонали находится в пределах различий определений $[Fe/H]$ у разных авторов [15]. Но еще более важны следующие два момента. Во-первых, поскольку $[Fe/H]$ есть отношение логарифмов обилия железа у исследуемой звезды и стандартной (в частности, Солнца), т. е. $[Fe/H] = \lg (Fe/H)_* - \lg (Fe/H)_\odot$, а изменение силы осциллятора приводит к одинаковому изменению этого логарифма у всех звезд, $\Delta \lg (Fe/H) = -\Delta \lg (g)$, то в выражении для $[Fe/H]$ величина $\lg (g)$ сокращается и в конечном значении для $[Fe/H]$ не войдет. Этим и объясняется, по-видимому, рис. 1. Кроме того, согласно [15], подавляющая часть определений $[Fe/H]$ в каталоге [6] сделана методом дифференциальных кривых роста, в котором силы осцилляторов не участвуют с самого начала. Во-вторых, мы проанализировали вообще, не могут ли определения оби-

для железа зависеть от апогалактических расстояний звезд R_a (например, через кинематику звезд). Таких зависимостей мы не смогли найти, поэтому можно думать, что даже с этой точки зрения изменение величины $g!$ не должно отразиться на выводе о градиенте обилия железа.

На рис. 2 приведена диаграмма $[Fe/H] - R_a$ для рассматриваемой выборки звезд из каталога [6]. Ортогональная регрессия дала здесь величину $d[Fe/H]/dR = (0.05 \pm 0.01) \text{ кпс}^{-1}$. Это значение хорошо согласуется с многими результатами других авторов.

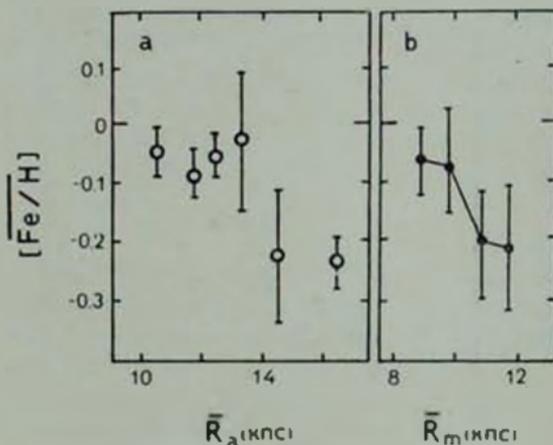


Рис. 2. а) Связь между средней металличностью $[Fe/H]$ и средним апогалактическим расстоянием R_a для G-, K- и F-карликов диска (открытые кружки); б) — результат Майора [1] (см. рис. 5 в его работе) для G-карликов с эксцентриситетами орбит $0.15 < e < 0.20$.

Теперь отметим следующее. В работах [3] было показано, что звезды диска в околосолнечной окрестности делятся по металличности на две группы, различающиеся также возрастом и кинематикой. Звезды с большими R_a должны принадлежать преимущественно старому населению диска, поэтому мы ожидаем для них величину металличности, близкую к средней металличности группы с малым содержанием тяжелых элементов, $[Fe/H] \approx -0.25$ [3]. В то же время среди объектов с малыми R_a , т. е. $R_a \approx R_\odot$, одинаково много звезд обеих групп, поэтому у них должна быть металличность, близкая к среднему значению для обеих групп диска, $[Fe/H] \approx -0.1$ [3]. И это действительно обнаруживается достаточно отчетливо на рис. 2а: две подгруппы звезд с $R_a > 14$ кпс имеют такое же среднее содержание тяжелых элементов, как у звезд малометаллического населения диска, а все четыре подгруппы звезд с $R_a < 14$ кпс имеют также примерно одинаковую металличность, но уже совпадающую со средней ме-

талличностью всего населения диска. Именно этот эффект, являющийся чисто эволюционным, и обуславливает в данном случае всю величину $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR$. То же самое ясно показывают результаты Майора. Для иллюстрации на рис. 2b изображена зависимость $[\text{Fe}/\text{H}] - \bar{R}_m$, где \bar{R}_m — средний радиус орбиты звезды (в отличие от используемого нами апогалактического расстояния R_a), взятая из рис. 5 работы [1]. Она получена в [1] по F-карликам с металличностью из *uvby* — фотометрии; звезды отобраны по эксцентриситетам: $0.15 < e < 0.20$. Как и в нашем случае, точки на диаграмме делятся на две группы, две верхних и две нижних, с почти одинаковой металличностью и скачком металличности между группами; этот скачок дает практически весь градиент.

В связи с работой [1] надо заметить следующее. В ней показано, что группы звезд с меньшими эксцентриситетами орбит обнаруживают большую величину градиента. Считая средний эксцентриситет показателем возраста, Майор [1] приходит отсюда к выводу о большем градиенте для более молодых звезд. Однако с этим нельзя согласиться, и вот почему. Самой яркой особенностью диаграммы $[\text{Fe}/\text{H}] - e$ является то, что в области малых эксцентриситетов ($e < 0.1$) число богатых и более бедных металлами звезд почти одно и то же, а в области $e > 0.1$ оно быстро падает с ростом эксцентриситета (см. рис. 1 работы [3]). Поэтому, если в выборке есть селекция по e , как в [1], то звезды с большими e естественно дадут меньший градиент — из-за меньшего в среднем разброса по $[\text{Fe}/\text{H}]$ и большего разброса по \bar{R}_m (или R_a). Таким образом, меньший градиент у более эксцентричных звезд в данном случае есть просто следствие эффекта селекции, возникающего из-за того, что в группах звезд по эксцентриситету доля старых и молодых звезд представлена неодинаково. Другими словами, в данном случае средний эксцентриситет не является адекватной характеристикой возраста. (При этом та же диаграмма $[\text{Fe}/\text{H}] - e$ показывает, что величина $[\text{Fe}/\text{H}]$ более корректно характеризует возраст: мы должны ожидать, что в области больших e у нас будут преимущественно старые звезды, следовательно, малометаллические, и на рис. 1 в [3] действительно нет вообще ни одной звезды с $e > 0.5$ $[\text{Fe}/\text{H}] > -0.1$).

Таким образом, вся величина градиента металличности в окрестности Солнца может быть полностью приписана эволюционному эффекту, т. е. связана с тем, что на каждом данном расстоянии от центра Галактики по разному представлено молодое, богатое металлами население, и старое, малометаллическое население. При этом для интерпретации происхождения градиента важно учитывать эффекты селекции, связанные с существованием зависимости между возрастом, химсоставом, кинематикой и элементами орбит звезд.

3. *Градиент металличности в гало.* Звезды гало ($[Fe/H] < -0.5$) в околосолнечной окрестности также обнаруживают разделение по металличности на две группы [4], поэтому для них можно ожидать ненулевой градиент химсостава той же природы, что и в диске. Чтобы проверить это, мы использовали высокоскоростные звезды из каталога [9]. Была сделана выборка 52 G-субкарликов и карликов, для которых мы определяли величину R_a и $Z_{0.6}$ (нормированный УФ-избыток; калибровка $[Fe/H] - Z_{0.6}$ дана в [10]). На рис. 3 приведена диаграмма $[Fe/H] - R_a$ звезд этой выборки. Ортогональная регрессия дает соотношение: $d[Fe/H]/dR = (-0.04 \pm 0.02) \text{ кпс}^{-1}$.

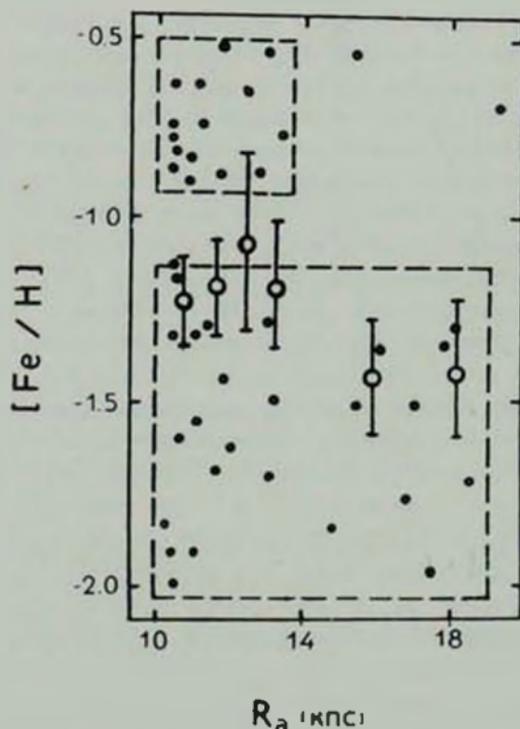


Рис. 3. Связь между металличностью и апогалактическим расстоянием у звезд гало. Точками изображены звезды выборки, открытые кружки с отрезками представляют собой (как и на рис. 2) среднее значение металличности и его ошибку для каждого заданного интервала значений R_a . Выделены области, где преимущественно находятся группы I и II.

Нетрудно видеть, что всю величину градиента и в этом случае можно приписать эволюционному эффекту. На рис. 3 пунктиром выделены области, куда из выборки попадает соответственно 87 и 82% звезд наших

групп гало I и II. Хорошо видна область в окрестности $[Fe/H] \approx -1.0$, отделяющая группу I от группы II. При этом в группе II ничтожно мало звезд с $R_a > 13$ кпс, тогда как среди звезд группы I значительная часть имеет $R_a > 13$ кпс. Это и обуславливает появление градиента химсостава для звезд гало. Таким образом, в окрестности Солнца в гало, несомненно, существует градиент металличности, и его происхождение, так же, как и в диске, по-видимому, полностью можно приписать эволюционному эффекту, связанному с существованием двух групп звезд с разной металличностью.

Градиент металличности среди звезд поля в гало Галактики длительное время не удавалось найти (см., например, [11, 12]). Лишь в [5] это явление было обнаружено тем же методом, что и в настоящей работе.

Давно уже известен факт роста металличности с уменьшением R у шаровых скоплений. Этот рост отражает «истинный» градиент химсостава в гало поскольку он, в отличие от предыдущего, не связан со сложным переплетением кинематики, химсостава и возраста звезд выборки в данной точке Галактики. Но и здесь его происхождение можно считать полностью эволюционным: на периферии Галактики находятся самые старые, а поэтому и наименее металличные скопления, тогда как к центру увеличивается доля молодых, и поэтому более богатых металлами скоплений.

4. *Градиент металличности по данным для красных гигантов.* В серии работ Джейнс находит градиент металличности по красным гигантам, используя непосредственно расстояния звезд до центра Галактики и принимая в качестве меры содержания тяжелых элементов величину δCN (см. [2]). При этом в [2] был сделан вывод, что градиент, по-видимому, существует при $R > R_{\odot}$ и отсутствует внутри солнечного круга, $R < R_{\odot}$.

Мы сделали выборку 80 красных гигантов из каталога [6] и определили их расстояния R . Исследование этой выборки показало, что как внутри, так и вне солнечного круга градиент не обнаруживается; нет его и для всей выборки в целом. Таким образом данные с определениями $[Fe/H]$ из спектрального анализа не подтверждают результатов Джейнса. Причина может состоять в том, что величина $d([Fe/H]_{CS})/dR$ отражает рост содержания азота с уменьшением R , а не изменение общего содержания тяжелых элементов (см. [13]). Конечно, не исключены и другие возможности; однако в любом случае полученный результат, особенно в свете обсуждаемых в [13] эффектов, заставляет критически относиться к выводу о градиенте металличности по данным о красных гигантах. Здесь еще раз надо отметить, что при использовании красных гигантов координатный и эволюционный эффекты представлены совершенно по другому, чем в методе определения $d[Fe/H]/dR$ по близким звездам. Поэтому у нас

нет оснований, вообще говоря, ожидать, что величины градиента в этих двух методах будут совпадать.

Ростовский государственный
университет

THE METAL ABUNDANCE GRADIENT IN THE GALAXY AND ITS ORIGIN

V. A. MARSÁKOV, A. A. SUCHKOV

The metal abundance gradient in the disk of the Galaxy is found from stars with abundance determination from detailed analysis: $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR = (-0.05 \pm 0.01) \text{ kpc}^{-1}$. It is shown that the gradient can be explained by the fact that the disk is constituted of two metallicity groups of stars, with an abundance jump between the groups. The metallicity gradient is also determined for the halo stars: $d[\text{Fe}/\text{H}]/dR = (-0.04 \pm 0.02) \text{ kpc}^{-1}$. It is shown that the latter can also be explained by the existence of the two metallicity groups of halo stars: almost the whole value of the gradient is caused by the jump in metal abundance between these groups. The red giants with abundances from detailed analysis are found to show no gradient. The importance of some selection effects for the interpretation of the abundance gradient is demonstrated.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Mayor, *Astron. Astrophys.*, 48, 301, 1976.
2. K. A. Janes, *Ap. J., Suppl. ser.*, 39, 135, 1979.
3. В. А. Марсаков, А. А. Сучков, *Письма АЖ*, 12, 531, 1978.
4. В. А. Марсаков, А. А. Сучков, *Письма АЖ*, 2, 381, 1978; *Астрон. ж.*, 54, 1232, 1977.
5. O. J. Eggen, *Ap. J.*, 229, 158, 1979.
6. M. Morel, C. Bertola, G. Cayrel de Strobel, B. Hauck, in "Abundance Effects in Classification", *IAU Symp.*, No. 72, 1976.
7. O. J. Eggen, D. Linden-Bell, A. Sandage, *Ap. J.*, 136, 749, 1962.
8. O. J. Eggen, *Roy. Observ. Bull.*, No. 51, 79, 1962.
9. O. J. Eggen, *Roy. Observ. Bull.*, No. 84, 1, 1964.
10. В. А. Марсаков, *Астрон. цирк.*, № 1070, 6, 1979.
11. M. Grenon, in "L'âge des étoiles", *IAU Coll.*, No. 17, 1972.
12. L. Searle, R. Zinn, in "The Evolution of Galaxies and Stellar Populations", *Yale Univ. Observ.*, New Haven, 1977, p. 217.
13. S. Faber, in "The Evolution of Galaxies and Stellar Population", *Yale Univ. Obs.*, New Haven, 1977, p. 157.
14. G. H. Herbig, *Ap. J.*, 141, 588, 1965.
15. G. Cayrel de Strobel, in "Abundance Effects in Classification", *IAU Symp.*, No. 72, 1976, p. 29.
16. А. А. Сучков, *Astrophys. Space Sci.*, 77, 3, 1981.