

УДК 524.31.02-36

## О кобальте в звездах и Галактике

*Л.И. Антипова, А.А. Боярчук, Ю.В. Пахомов*

Институт астрономии РАН, Россия, Москва, 119017, ул. Пятницкая, 48

**Аннотация.** В данной работе проведен анализ содержания кобальта в атмосферах около 30 красных гигантов, который позволил разделить исследуемые звезды на две группы: с нормальным содержанием  $[Co/Fe]$  и с его небольшим избытком. Показано, что звезды с избытком  $[Co/Fe]$  могут быть отнесены к населению толстого диска Галактики. Сделано предположение, что схожая картина избытков содержания  $[Co/Fe]$  в гало и толстом диске является реликтом химического состава Галактики на очень раннем этапе ее развития, в период существования Населения III. Также нами установлено, что в толстом диске Галактики существуют градиенты содержаний кобальта и железа, что, возможно, свидетельствует в пользу гипотезы образования толстого диска в результате коллапса протогалактического облака.

---

Кобальт является одним из элементов группы железа. Эти элементы образуются одновременно в одном и том же процессе ядерного горения при вспышках сверхновых звезд. Его нечетный атомный номер свидетельствует о существовании сверхтонкого расщепления (СТР) его энергетических уровней. Эти обстоятельства усложняют получение точных данных о его содержаниях в различных астрономических объектах. Поэтому их существенно меньше, чем аналогичных данных для других элементов группы железа. С другой стороны, из литературы известно (см., например, (Тиммес и др., 1995)), что для производства кобальта необходимы сверхновые с массой более  $20M_{\odot}$ . Таких массивных объектов в раннюю эпоху развития Галактики было больше. Вследствие этого звезды разных поколений могут обнаруживать разные содержания кобальта. Известно, что избытки кобальта найдены в звездах гало, что описано, например, в работе (МакВиллиам и др., 1995). Таким образом, новые данные о содержаниях кобальта в различных астрономических объектах, особенно с точки зрения принадлежности их к различным подсистемам Галактики, а также их сравнительный анализ, представляют интерес.

К настоящему времени нами выполнен анализ химического состава атмосфер около 30 красных гигантов на основании наблюдений с высоким разрешением, высоким отношением сигнала к шуму и единым методом. Спектральные наблюдения были выполнены на 2.6-м телескопе ЗТШ (КрАО, Украина), 6-м телескопе БТА (САО РАН, Россия), 2.11-м телескопе (McDonald, США), а также использовались спектры из публичных архивов UVES ESO. Полученные данные могли бы быть полезны для понимания проблемы содержания кобальта в различных объектах Галактики.

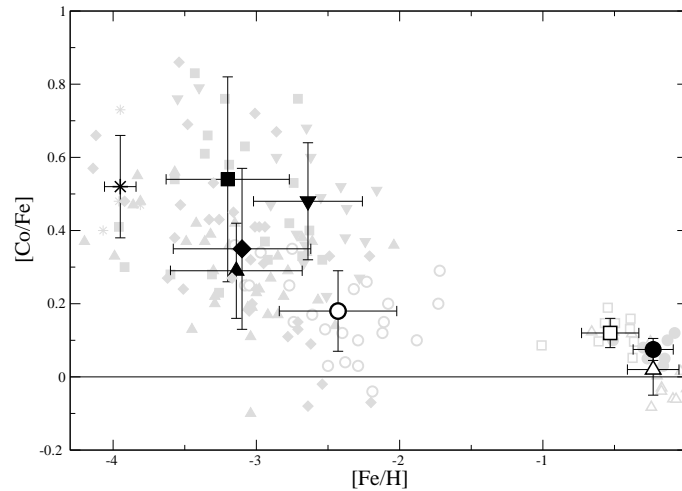
Анализ содержания  $[Co/Fe]$  позволил разделить исследуемые звезды на две группы: с нормальным содержанием и с его небольшим избытком. Учет эффекта сверхтонкого расщепления уровней энергии атома кобальта и сравнительный анализ спектрограмм показали реальность существования избытков  $[Co/Fe]$  в некоторых звездах. Причем у этих групп наблюдаются значительные различия по многим характеристикам (см. табл. 1). Звезды с избытками  $[Co/Fe]$  в среднем являются более холодными, с меньшей металличностью, их массы тоже меньше, а возраст больше, чем у звезд с нормальным содержанием  $[Co/Fe]$ . Также нами были рассчитаны параметры галактических орбит

Таблица 1. Сравнение характеристик звезд двух групп: с нормальным содержанием [Co/Fe] и повышенным

HD	$T$ К	[Fe/H]	[Co/Fe]	$M/M_{\odot}$	Возраст млрд.лет	U км/с	V км/с	W км/с	$Z_{max}$ кпк	e	i град.
Звезды с нормальным содержанием [Co/Fe]											
9856	4400	-0.17	0.02±0.04	2.5	0.6	-13	15	-10	0.20	0.08	1.2
46407	4916	-0.14	0.01±0.09	2.9	0.4	14	28	2	0.03	0.13	0.1
49293	4717	0.09	-0.02±0.02	3.3	0.2	2	6	-1	0.03	0.03	0.2
65854	4958	-0.20	0.02±0.05	1.6	2.2	-10	-18	-6	0.13	0.09	0.9
76294	4950	0.03	-0.05±0.05	3.0	0.3	-19	5	3	0.06	0.05	0.4
77020	4905	0.04	-0.12±0.07	4.5	0.1	-4	4	30	0.41	0.03	2.4
77247	4978	0.09	-0.16±0.08	3.8	0.2	23	-5	0	0.00	0.08	0.0
83618	4355	0.00	0.03±0.06	2.5	2.7	26	-17	21	0.28	0.10	1.7
101013	5080	0.00	0.02±0.08	3.1	0.3	-10	-14	1	0.15	0.07	1.0
110458	4715	0.15	0.04±0.09	1.9	1.3	-22	5	-4	0.06	0.06	0.4
113226	5187	0.24	-0.02±0.08	2.7	0.1	-27	-2	-4	0.08	0.09	0.5
117440	4735	0.00	-0.07±0.06	6.8	0.1	-10	-8	-7	0.20	0.04	1.3
130386	4720	0.01	-0.02±0.02	2.5	0.6	16	-21	9	0.27	0.10	1.8
133208	5075	0.06	-0.09±0.04	3.5	0.1	6	-7	-1	0.08	0.04	0.6
178717	3973	-0.24	-0.05±0.05	3.5	1.0	10	31	-1	0.04	0.14	0.2
181053	4837	-0.12	-0.09±0.10	2.0	1.1	-19	6	2	0.03	0.07	0.2
183915	4616	-0.32	0.02±0.07	3.2	0.3	-23	-15	8	0.10	0.11	0.6
199394	5080	0.01	-0.11±0.02	2.7	0.5	43	10	-4	0.06	0.13	0.3
199939	4600	-0.30	-0.02±0.07	3.1	0.3	33	-20	-8	0.09	0.12	0.6
204075	5300	-0.04	-0.12±0.07	4.6	0.1	9	25	9	0.14	0.12	0.7
205011	4880	-0.03	-0.03±0.05	2.9	0.4	5	28	1	0.04	0.13	0.2
	4808	-0.04	-0.04	3.2	0.6	1	2	2	0.12	0.09	0.7
	±299	0.14	0.08	1.1	0.7	19	16	9	0.10	0.04	0.6
Звезды с повышенным содержанием [Co/Fe]											
14585	4507	-0.23	0.07±0.07	2.0	1.1	-48	-3	-6	0.13	0.17	0.8
16458	4560	-0.27	0.05±0.05	1.9	1.3	-42	20	-26	0.41	0.17	2.2
88562	4274	-0.16	0.03±0.07	1.2	6.0	25	-16	-10	0.24	0.11	1.5
94264	4750	-0.08	0.12±0.08	1.7	2.0	26	-21	29	0.40	0.12	2.6
104979	4929	-0.30	0.08±0.06	2.1	0.9	-44	12	-27	0.41	0.15	2.3
139409	4731	-0.51	0.10±0.03	1.9	1.3	47	-35	42	0.71	0.19	4.1
169414	4458	-0.15	0.05±0.06	1.7	2.5	4	-34	-57	1.00	0.13	6.8
175190	4188	-0.13	0.10±0.11	1.2	6.5	-104	-4	-15	0.22	0.33	1.1
	4550	-0.23	0.08	1.7	2.7	-17	-10	-9	0.44	0.17	2.7
	±233	0.13	0.07	0.3	2.1	47	19	30	0.27	0.06	1.8

на основе работы (Джонсон, Содерблом, 1987) с использованием трехкомпонентной модели потенциала Галактики (Аллен, Сантиллан, 1991). Численное интегрирование осуществлялось методом Эверхарта 15-ого порядка, при этом точность расчетов за 10 орбитальных оборотов составила: по угловому моменту  $\Delta h/h < 10^{-13}$  и по полной энергии  $\Delta E/E < 10^{-8}$ . Анализ этих параметров показывает, что орбиты таких звезд являются более вытянутыми, углы их наклона к галактической плоскости больше, максимальная высота подъема их над плоскостью Галактики выше, чем у нормальных звезд. Все эти характеристики свидетельствуют о том, что они, скорее всего, принадлежат толстому диску, в отличие от остальных звезд, являющихся объектами тонкого диска, для которых солнечное содержание кобальта является нормальным.

Известно, что значительные избытки [Co/Fe] наблюдаются у звезд гало. Первые такие данные были получены в 1995 г. в работе (МакВиллиам и др., 1995), посвященной исследованию звезд гало с экстремально низкой металличностью ( $-4.0 < [Fe/H] < -2.0$ ), где было показано, что содержания [Cr/Fe], [Mn/Fe] и [Co/Fe] в звездах изменяются с уменьшением их металличности, причем первые два также уменьшаются, а [Co/Fe] – увеличивается. Эти результаты через год были подтверждены в (Рьян и др., 1996) для звезд гало с очень низкой металличностью ( $-4.0 < [Fe/H] < -2.5$ ). Результаты программы ESO “Первые звезды” (Кайрел и др., 2004) по спектральным исследованиям звезд с низкой металличностью также полностью подтвердили выводы предыдущих работ. Таким образом, избытки содержания кобальта, а также недостатки содержания хрома и марганца в звездах гало



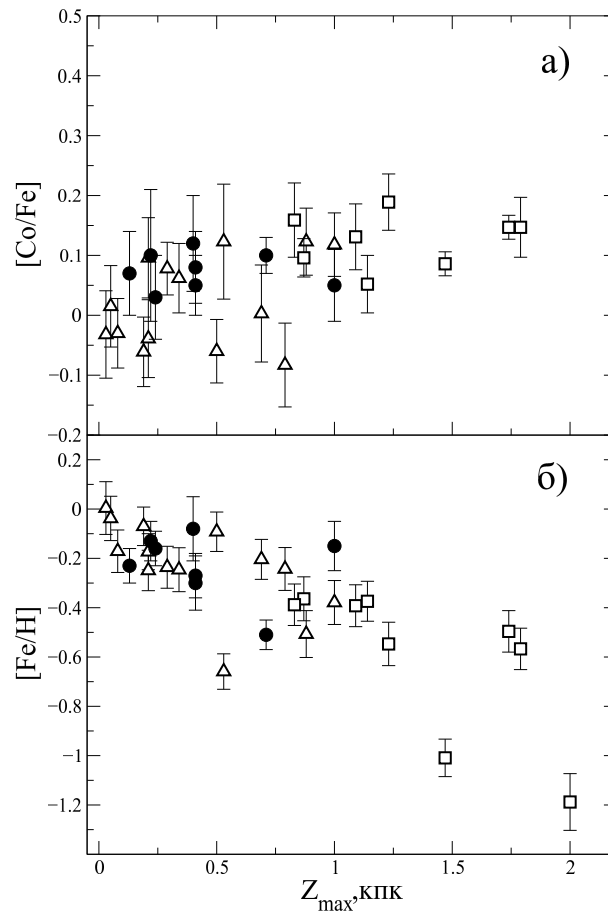
**Рис. 1.** Содержание  $[\text{Co}/\text{Fe}]$  в звездах толстого диска и гало в зависимости от металличности. Следующими значками отмечены работы по звездам гало: заполненные квадраты – (Рьян и др., 1996), звездочки – (Франсуа и др., 2003), заполненные треугольники вверх – (Кайрел и др., 2004), заполненные треугольники вниз – (Кохен и др., 2004), заполненные ромбы – (МакВиллиам и др., 1995), открытые кружки – (Джонсон, 2002). Следующими значками отмечены работы по звездам толстого диска: открытые квадраты – (Прочаска и др., 2000), открытые треугольники – (Бревер, Карней, 2006), заполненные кружки – данная работа

можно считать надежно установленными.

В последние годы появились работы, посвященные сравнительному анализу содержаний химических элементов в атмосферах звезд различных подсистем Галактики, в которых принадлежность их к той или иной подсистеме предварительно была установлена на основании анализа ее кинематических данных. Для дальнейшего анализа собственных данных мы использовали только те работы, в которых при определении содержаний кобальта эффект СТР был учтен, либо проведен его анализ, а именно: для звезд гало это работы (МакВиллиам и др., 1995; Рьян и др., 1996; Джонсон, 2002; Кохен и др., 2004; Франсуа и др., 2003; Кайрел и др., 2004), для звезд толстого диска – (Бревер, Карней, 2006; Редди и др., 2003; Прочаска и др., 2000).

На рис. 1 показан график зависимости относительных содержаний  $[\text{Co}/\text{Fe}]$  от металличности  $[\text{Fe}/\text{H}]$  для звезд гало и толстого диска, отобранных из вышеупомянутых работ. Таким образом, из рисунка следует, что наибольший избыток кобальта наблюдается у самых старых звезд Галактики (с наименьшей металличностью) и уменьшается в сторону более молодых с более высокой металличностью – звезд толстого диска. Можно предположить, что наблюдаемые избытки содержания  $[\text{Co}/\text{Fe}]$  для звезд гало, а также меньшие по величине для звезд толстого диска, могут являться реликтом далекого прошлого, так называемого Населения III-типа. Уменьшение отклонения величин химических аномалий от нормальных в направлении к плоскости Галактики – результат действия сверхновых SN Ia.

Мы также попробовали использовать полученные в настоящей работе данные о содержаниях кобальта и железа в толстом диске Галактики для построения возможных зависимостей их содержаний от максимальной высоты орбиты  $Z_{max}$  над плоскостью Галактики, т. е. проверить, существуют ли градиенты содержаний этих элементов в толстом диске. Кроме собственных данных, на рис. 2 представлены также и некоторые данные из литературы. Из рисунка видно, что существуют градиенты содержаний как кобальта (а), так и железа (б). Причем содержание  $[\text{Co}/\text{Fe}]$  в толстом диске с высотой над галактической плоскостью увеличивается, а  $[\text{Fe}/\text{H}]$  – уменьшается. Это, возможно,



**Рис. 2.** Содержания  $[\text{Co}/\text{Fe}]$  (а) и  $[\text{Fe}/\text{H}]$  (б) в атмосферах звезд в зависимости от максимальной высоты их орбит над плоскостью Галактики. Значками отмечены работы: треугольники – (Бревер, Карней, 2006), квадраты – (Прочаска и др., 2000), заполненные кружки – данная работа

свидетельствует о том, что толстый диск имеет происхождение из коллапса протогалактического облака, и время его формирования было не очень маленьким, по крайней мере достаточным, чтобы в нем происходило звездообразование.

Работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 06-02-16217\_a), Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-4820.2006.2), Программы Президиума РАН “Происхождение и эволюция звезд и галактик”, гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-9416.2006.2 и гранта РФФИ-ГФЕН (код 05-02-39005-ГФЕН\_a).

## Литература

- Аллен К., Сантиллан А. (Allen C., Santillan A.) // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*. 1991. V. 22. P. 255.
- Бревер М.М., Карней Б.В. (Brewer M.-M., Carney B.W.) // *Astron. J.* 2006. V. 131. P. 431.
- Джонсон Дж.А. (Johnson J.A.) // *Astrophys. J. Suppl.* 2002. V. 139. P. 219.
- Джонсон Д.Р.Х., Содерблом Д.Р. (Johnson D.R.H., Soderblom D.R.) // *Astron. J.* 1987. V. 93. P. 864.
- Кайрел Р. и др. (Cayrel R., Depagne E., Spite M., Hill V., Spite F., François P., Plez B., Beers T.C., Primas F., Andersen J., Barbuy B., Bonifacio P., Molaro P., Nordström B.) // *Astron. & Astrophys.* 2004. V. 416. P. 1117.
- Кохен Дж. и др. (Cohen J.G., Christlieb N., McWilliam A., Shectman S., Thompson I., Wasserburg G.J., Ivans I., Dehn M., Karlsson T., Melendez) // *Astrophys. J.* 2004 V. 612. P. 1107.
- МакВиллиам А. и др. (McWilliam A., Preston G.W., Sneden C., Searle L.) // *Astron. J.* 1995. V. 109. P. 2757.
- Прочаска Дж. и др. (Prochaska J.X., Naumov S.O., Carney B.W., McWilliam A., Wolfe A.M.) // *Astron. J.* 2000. V. 120. P. 2513.
- Редди Б.Е. и др. (Reddy B.E., Tomkin J., Lambert D.L., Allende Prieto C.) // *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* 2003. V. 340. P. 304.
- Рьян С.Г. и др. (Ryan S.G., Norris J.E., Beers T.C.) // *Astrophys. J.* 1996. V. 471. P. 254.
- Тиммес Ф. и др. (Timmes F.X., Woosley S.E., Weaver T.A.) // *Astrophys. J. Suppl.* 1995. V. 98. P. 617.
- Франсуа П. и др. (François P., Depagne E., Hill V., Spite M., Spite F., Plez B., Beers T.C., Barbuy B., Cayrel R., Andersen J., Bonifacio P., Molaro P., Nordström B., Primas F.) // *Astron. & Astrophys.* 2003. V. 403. P. 1105.