

УДК 524.31.02-36

Исследования содержаний химических элементов в атмосферах красных гигантов с точки зрения эволюции Галактики и ее составляющих

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

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 20 октября 2008 г.

Аннотация. Представлены результаты сравнительного анализа содержаний химических элементов в атмосферах 26 красных гигантов. У пяти звезд обнаружено большое содержание металлов (около 0.3 dex) и они отнесены нами к классу сверхметаллических звезд. Отмечено, что несколько звезд имеют пониженное содержание $[Na/Fe]$ по отношению к соответствующей величине для нормальных красных гигантов с близкими параметрами атмосферы. Высказано предположение, что наблюдаемый эффект можно объяснить неоднородностью химического состава межзвездных облаков вследствие большего или меньшего количества вспышек сверхновых SNI в разных районах Галактики.

RESEARCH OF CHEMICAL ELEMENTS ABUNDANCES IN THE ATMOSPHERES OF RED GIANTES IN TERMS OF EVOLUTION OF GALAXY AND IT COMPONENTS, *A.A. Boyarchuk, L.I. Antipova, Yu.V. Pakhomov*

Ключевые слова: красные гиганты, звездная спектроскопия, химический состав, звездная эволюция

1 Введение

Как известно, звезды в окрестностях Солнца представляют собой не однородную группу, а являются смесью объектов, принадлежащих различным составляющим Галактики. Главным образом это звезды тонкого диска, но встречаются также звезды толстого диска, гало и ряда других подсистем, в частности звездных потоков. Различаются они по кинематическим признакам, химическому составу, возрастам и происхождению. Поэтому неудивительно, что звезды нашей программы не являются однородной группой по этим признакам. Всего таких звезд в нашей программе 26, их список приводится в табл. 1. Для почти половины из них содержания химических элементов были определены впервые, а потому представляют определенный интерес. Цель данной работы – попытаться всесторонне проанализировать полученные данные для этих звезд: как сведения о содержаниях химических элементов, так и кинематические и возрастные данные с точки зрения химической эволюции Галактики и ее составляющих.

2 Наблюдения и обработка

Спектральные наблюдения были выполнены на инструментах нескольких обсерваторий: 2.16-м телескоп (Xinglong, Китай), 2-м телескоп Цейсс (Терскол, Россия), 2.6-м телескоп ЗТШ (КрАО, Крым). Дополнительно спектрограммы трех звезд были взяты из архива ESO (program ID 266.D-5655(A)). По спектрам определяли и лучевую скорость V_{rad} объектов наблюдений. Для каждой звезды параметры атмосферы были получены по методике, основанной на анализе содержаний элементов группы железа и подробно описанной в (Боярчук и др., 2001). Используя эти параметры по программе ATLAS9 (Куруч, 1970) вычислялась соответствующая модель атмосферы звезды и далее с помощью программы WIDTH9 (Kurucz) по измеренным эквивалентным ширинам спектральных линий определялись содержания химических элементов в ее атмосфере. Оценки V_{rad} и найденные параметры атмосфер для звезд программы приведены в табл. 1.

3 Определение масс, возрастов и кинематических характеристик звезд

Для этой цели использовались эволюционные треки и изохроны из работы (Гирарди и др., 2000). Положения звезд на диаграмме “температура-светимость” определялись на основе значений эффективных температур, полученных в данной работе, и параллаксов HIPPARCOS (ван Льювен, 2007). Учет межзвездного покраснения был выполнен по избыткам цветов фотометрических систем Джонсона и Стромгрена. Полученные оценки масс и возрастов звезд приведены в табл. 1. Особый подход использовался для четырех звезд, у которых отсутствуют измерения параллаксов. В этом случае проводилась оценка расстояний методом спектральных параллаксов на основе определяемых нами значений T_{eff} и $\lg g$.

Компоненты галактических скоростей (U, V, W) относительно Солнца вычислены согласно (Джонсон, Содерблом, 1987). Принимая расстояние до центра Галактики равным 8.5 кпк и используя вычисленные компоненты галактических скоростей и модель потенциала Галактики (Аллен, Сантиллан, 1991), были определены элементы галактических орбит (табл. 1) с помощью численного интегрирования методом Эверхарта 15-го порядка. Анализ галактических скоростей показал, что три звезды вероятнее всего принадлежат к толстому диску, остальные звезды – к тонкому диску Галактики. Среди исследуемых звезд были выделены пять с большими значениями содержания железа ($[Fe/H] > 0.3$ dex) и которые могут принадлежать к группе сверхметаллических звезд (SMR-звезды), и поэтому они будут рассмотрены нами отдельно.

3.1 Звезды со сверхвысокой металличностью

Звезды со сверхвысоким содержанием металлов (SMR-звезды) впервые были выделены как класс в 1966 г. (Спинрад, 1966). SMR-звезды составляют плоскую звездную компоненту Галактики со шкалой высот около 0.16 кпк (Помпея и др., 2002). Поскольку орбиты этих звезд расположены главным образом внутри галактической орбиты Солнца (Гренон, 1985; Гренон, 1999; Рабуд и др., 1998; Фукс, 1997; Сото и др., 2007), было предположено, что в солнечные окрестности они пришли из бара или из внутренних областей тонкого диска, сильно обогащенных металлами. Согласно (Эгген, 1993) в окрестностях Солнца около 10 % звезд имеют металличность до +0.2 dex и около 4 % – более. Известными SMR-звездами являются гигант μ Leo и карлик HR1614.

Однако нет единого мнения о происхождении SMR-звезд. Были обнаружены SMR-звезды, принадлежащие толстому диску (Чен и др., 2003; Фелзинг, Гонсалес, 2001). Некоторые рассеянные звездные скопления (например, NGC6791 и NGC6253) состоят из таких звезд. И относительно возраста SMR-звезд многие авторы расходятся во мнении. Одни (Гренон, 1999) описывают этот класс как смесь относительно молодых и старых объектов, а согласно (Фелзинг, Гонсалес, 2001) они являются довольно старыми – до 10 млрд лет и старше. Кроме того, там же отмечается, что для этих звезд не существует единого соотношения возраст-металличность, что свидетельствует о том, что рассматриваемые звезды не являются единой группой и, вероятно, принадлежат разным компонентам Галактики с независимыми историями эволюции.

Таблица 1. Список исследуемых звезд, их массы, возраста и параметры галактических орбит

HD	T_{eff} К	$\lg g$	V_t км/с	V_{rad} км/с	M/M_\odot	Возраст lg	Z пк	R кпк	U км/с	V км/с	W км/с	R_{min} кпк	R_{max} кпк	Z_{max} кпк	e	i град.
Звезды тонкого диска																
20644	4160	1.47	1.25	-3.0	5.3±0.9	8.0±0.2	-53	8.667	7.8	-6.1	-14.2	8.45	9.67	0.10	0.07	0.6
26162	4734	2.50	1.45	25.4	2.5±0.2	8.8±0.1	-10	8.582	-36.4	-37.1	12.6	6.83	8.87	0.25	0.13	1.6
72604	4306	1.63	1.43	-0.1	1.1±0.3	9.9±0.4	137	8.669	-6.4	-6.6	-13.9	8.63	9.41	0.17	0.04	1.0
74212	4866	2.64	1.30	53.3	2.3±0.4	8.9±0.2	-14	8.502	-11.1	-54.1	2.3	5.92	8.51	0.11	0.18	0.8
74442	4668	2.41	1.48	16.8	2.1±0.1	9.0±0.1	48	8.531	-2.7	-47.8	-7.0	6.29	8.55	0.05	0.15	0.3
74908	4631	2.06	1.52	-14.9	2.7±1.2	8.7±0.4	269	8.828	-15.7	30.4	-27.3	8.81	13.62	0.55	0.21	2.3
105475	4717	2.08	1.34	0.5	2.3±0.3	8.8±0.2	229	8.531	70.9	-5.6	9.6	6.99	12.03	0.40	0.27	2.1
105771	4758	2.20	1.32	-0.9	2.3±0.4	8.8±0.2	278	8.544	-37.1	-22.5	-7.8	7.57	9.09	0.29	0.09	1.8
106714	4925	2.51	1.38	-27.5	2.6±0.1	8.7±0.1	100	8.508	-4.9	-3.2	-29.0	8.48	9.55	0.31	0.06	1.9
107325	4524	2.33	1.19	-13.3	1.5±0.1	9.5±0.1	73	8.505	0.6	-28.4	-15.7	7.45	8.58	0.12	0.07	0.8
108123	4635	2.14	1.26	-3.6	2.9±0.3	8.6±0.1	176	8.511	50.6	-4.8	-1.2	7.37	11.11	0.23	0.20	1.2
109519	4402	1.56	1.42	-12.9	2.6±0.5	8.8±0.2	224	8.504	27.6	-3.0	-18.5	7.88	10.38	0.30	0.14	1.7
162113	4460	2.04	1.42	-60.3	1.3±0.2	9.6±0.2	52	8.410	-71.0	-0.7	5.1	7.36	11.25	0.18	0.21	0.9
172190	4667	2.40	1.38	-3.6	2.2±0.3	8.9±0.2	38	8.380	16.5	-28.1	-11.0	7.17	8.74	0.06	0.10	0.4
183400	3931	0.74	1.52	1.7	1.9±1.1	9.2±0.5	54	8.276	23.9	-13.0	8.2	7.78	9.13	0.20	0.08	1.2
184938	4641	1.64	1.42	2.8	1.8±0.3	9.1±0.2	88	8.451	-37.5	9.9	0.8	8.08	11.11	0.15	0.16	0.8
185955	5142	3.07	1.27	-11.3	2.7±0.1	8.7±0.1	50	8.478	-17.7	-8.6	-1.9	8.35	9.11	0.08	0.04	0.5
191026	4963	3.21	1.20	-32.8	1.3±0.1	9.6±0.1	26	8.493	44.3	-47.9	-6.6	5.87	9.29	0.03	0.23	0.2
Звезды толстого диска																
74387	4840	2.43	1.27	50.2	2.3±1.2	8.9±0.5	-33	8.511	-93.9	-44.0	-62.6	6.16	10.40	1.21	0.25	6.9
106398	4880	2.39	1.30	62.2	2.5±0.5	8.8±0.2	311	8.540	27.5	-18.6	64.6	7.72	9.92	1.72	0.13	10.2
320868	4200	1.50	1.28	-0.9	2.2±2.0	8.8±0.7	-29	7.837	-0.4	44.6	-32.5	7.81	13.99	0.60	0.27	2.5
Сверхметаллические (SMR) звезды																
20893	4500	2.36	1.36	2.6	2.8±0.3	8.5±0.1	-23	8.582	10.5	11.0	-18.6	8.45	11.09	0.15	0.14	0.8
108381	4613	2.43	1.36	3.5	2.6±0.1	8.8±0.1	77	8.505	-8.0	-27.7	1.8	7.57	8.51	0.13	0.06	0.9
109996	4736	2.75	1.20	-26.5	2.3±0.1	8.9±0.1	136	8.501	-13.5	-18.1	-28.6	8.28	8.53	0.31	0.01	2.1
171767	4615	2.09	1.45	-21.5	2.8±0.4	8.6±0.2	43	8.349	-8.4	-23.7	-9.9	7.70	8.35	0.05	0.04	0.4
183491	4887	2.66	1.33	-26.0	3.3±0.2	8.5±0.1	34	8.425	-26.2	-17.7	-1.3	7.81	8.86	0.08	0.06	0.5

Таким образом, можно заключить, что явление сверхметалличности представляет интерес, но во всем его многообразии проявления до конца еще не понято, а потому обнаружение новых пяти SMR-звезд и их анализ может оказаться полезным. Поскольку звезд данного типа в окрестностях Солнца немного, представляется целесообразным прежде всего проверить насколько уверенны полученные нами значения металличности для них. Сравнение эквивалентных ширин EW в спектрах звезд с близкими параметрами HD20893 ($T_{eff} = 4500$ К, $\lg g = 2.36$, $V_t = 1.36$ км/с, $[Fe/H] = +0.32$) и HD107325 ($T_{eff} = 4524$ К, $\lg g = 2.33$, $V_t = 1.19$ км/с, $[Fe/H] = +0.14$) показало систематически большие значения EW в спектре первой звезды, как и должно наблюдаться. Идентичность спектра HD20893 со спектром SMR-звезды NGC6253-2509 ($T_{eff} = 4518$ К, $\lg g = 2.45$, $[Fe/H] = +0.45$) из работы (Карретта и др., 2007) свидетельствует о близких значениях металличности. Таким образом, большие значения металличности, определенные нами, не являются следствием ошибок. Аналогичные выводы можно сделать из анализа эквивалентных ширин и других звезд. В спектрах практически всех исследованных здесь звезд отмечены усиленные полосы CN, что характерно для звезд с большим количеством металлов. Положительные скорости U наших звезд, а в используемой системе координат это показывает удаление звезд от галактического центра, согласуются со статистическими данными (Рабуд и др., 1998). Орбиты наших звезд находятся преимущественно внутри орбиты Солнца (табл. 1), что аналогично выводам, полученным в работе (Гренон, 1999). Таким образом, рассматриваемые нами звезды отвечают особенностям, характерным для SMR-звезд, и по всей вероятности таковыми действительно и являются.

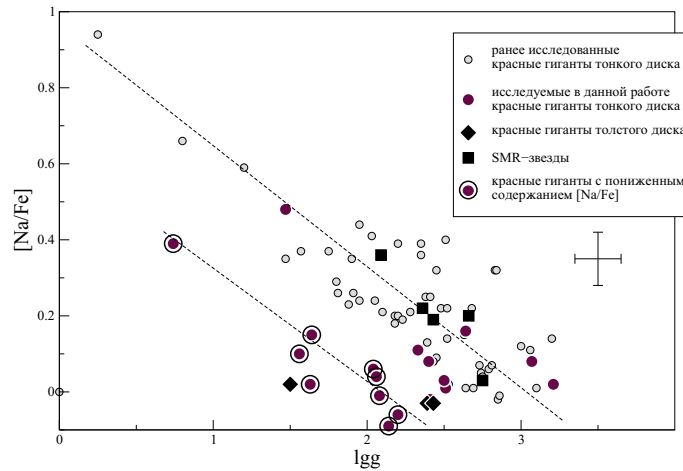


Рис. 1. Зависимость содержания $[Na/Fe]$ в атмосферах исследуемых звезд от ускорения силы тяжести $\lg g$

4 Анализ содержания натрия

Хорошо известно существование избытков содержаний натрия в атмосферах сверхгигантов, а также их антикорреляция с $\lg g$, которые были обнаружены в КраО в 1981–1983 гг. (Боярчук, Любимков, 1981; Боярчук, Любимков, 1983). В этих же работах было сделано предположение относительно возникновения этой зависимости: на стадии горения водорода в ядре звезды параллельно с реакциями CNO-цикла идет реакция горения неона ($^{22}Ne(p, \gamma) ^{23}Na$). Ядро звезды было конвективное, и часть продукции этой реакции попала во внешние части ядра. По мере эволюции звезды в ее поверхностных слоях развивается конвекция, которая постепенно расширяется и выносит обогащенное натрием вещество из глубин звезды в ее поверхностные слои. Расчеты подтвердили правильность этих предположений (Денисенков, Иванов, 1987; Денисенков, 1988). Позже было показано, что в атмосферах красных гигантов также наблюдается подобная зависимость (Боярчук и др., 2001; Боярчук и др., 2002; Антипова и др., 2004), что свидетельствует об единой природе этого явления.

На рис. 1 показаны положения звезд на диаграмме “[Na/Fe]- $\lg g$ ”, исследованных в данной работе и звезд тонкого диска из нашей базы данных. Часть исследованных звезд, в том числе и группа SMR-звезд, хорошо удовлетворяют единой общей зависимости. Однако некоторые звезды оказались лежащими ниже этой зависимости, они образуют другую зависимость, довольно четкую и хорошо отделяющуюся от основной. Т. е. на рисунке видно как бы раздвоение зависимости величины избытка $[Na/Fe]$ от $\lg g$. Поскольку разделение между ними довольно четкое, необходимо понять причину происхождения такого разделения: является ли это следствием каких-либо ошибок или следствием каких-либо физических причин. Проведенная проверка возможных ошибок при определении содержаний $[Na/Fe]$ и $\lg g$ не выявила таковых, и пришлось сделать вывод о реальности существования недостатков $[Na/Fe]$ в атмосферах ряда звезд. Ранее в одной из наших работ (Антипова и др., 2005) мы уже отмечали для трех классических бариевых звезд подобный эффект пониженного содержания $[Na/Fe]$ и тогда же предположили, что эти звезды могли образоваться в других частях Галактики, поскольку отличаются по кинематическим характеристикам от остальных исследованных звезд.

В табл. 2 показано сравнение некоторых физических и кинематических характеристик звезд с пониженным содержанием $[Na/Fe]$ и нормальных красных гигантов. Из таблицы видно, что наиболее существенно различаются эти группы величинами R – расстояние до звезды и Z_{max} – максимальным расстоянием от плоскости Галактики. То есть эта исследуемая группа звезд имеет шкалу высот, сравнимую или чуть больше, чем характерная шкала для тонкого диска (90–325 пк (Гилмор, Рейд, 1983; Робин и др., 1996; Чен и др., 2001)). Причем заметим, что все три звезды толстого диска имеют пониженное содержание $[Na/Fe]$.

Таблица 2. Сравнение характеристик нормальных красных гигантов и гигантов с пониженным содержанием [Na/Fe]

	T_{eff} К	$\lg g$	$\lg L$	M/M_{\odot}	R пк	Z_{max} пк	e	[Fe/H]	[Eu/Fe]
Нормальные красные гиганты	4757 ± 271	2.39 ± 0.47	2.04 ± 0.63	2.8 ± 1.3	140 ± 108	160 ± 160	0.15 ± 0.11	+0.04 ± 0.19	+0.04 ± 0.09
Гиганты с пониженным содержанием [Na/Fe]	4412 ± 278	1.62 ± 0.37	2.21 ± 0.50	1.9 ± 1.0	340 ± 180	290 ± 160	0.17 ± 0.09	-0.15 ± 0.26	-0.08 ± 0.12

Возможным объяснением существования недостатков натрия в некоторых звездах по сравнению с нормальными красными гигантами может быть допущение разницы в химическом составе межзвездного вещества, из которого образовались звезды той и другой групп. Натрий образуется в результате горения неона в реакции ($^{22}\text{Ne}(p, \gamma) ^{23}\text{Na}$). Неон же является продуктом вспышек сверхновых SNI, которые своими выбросами изменяют относительные содержания химических элементов в веществе, из которого образуются звезды следующих поколений. То есть количество неона в недрах звезды определяется тем, насколько часто вспыхивали SNI в данном районе Галактики. Чем больше атомов неона в звездах, тем больше образуется атомов натрия, и тем большее количество его выносится в поверхностные слои после первого перемешивания. Известно, что вспышки сверхновых происходят неравномерно в разных местах Галактики, и если допустить, что вклад продуктов (в частности неона) от вспышек SNI в межзвездное вещество в каком-либо ее районе был ограничен, то звезды, образующиеся из такого вещества, будут демонстрировать меньшее количество [Na/Fe], что и наблюдается в исследуемых нами звездах. Тот факт, что зависимость с пониженным содержанием [Na/Fe] имеет тот же угол наклона, что и основная, свидетельствует о том, что процессы, происходящие в недрах звезд и приводящие к выносу натрия в поверхностные слои звезды, одни и те же, разница только в количестве образовавшегося натрия. Если это действительно так, то в группах звезд из табл. 2 могут наблюдаться расхождения в содержаниях r-элементов, характерных для вспышек SNI. Более низкое содержание [Eu/Fe] в звездах с пониженным содержанием [Na/Fe] можно рассматривать как аргумент в пользу предположения о том, что исследуемая часть звезд образовалась из межзвездного вещества, в который вклад продуктов вспышек SNI был несколько ниже, чем в случае других звезд.

5 Заключение

В данной работе описано обнаружение новых пяти сверхметаллических звезд, а также нескольких звезд с пониженным содержанием [Na/Fe] относительно нормальных красных гигантов. Этот недостаток натрия, возможно, связан с тем, что облака газопылевой материи, из которой образуются звезды, неодинаково обогащаются продуктами вспышек сверхновых SNI из-за неравномерности распределения их в пространстве, а также где полного, а где неполного перемешивания, вследствие чего зависимость содержаний [Na/Fe] от величины $\lg g$ может быть довольно широкой и даже расслаиваться, как это было показано в данной работе. Однако, это предположение может оказаться не единственной причиной такого поведения содержания [Na/Fe]. Необходимы новые исследования, более обширные и основанные на большем количестве звезд.

Работа выполнена частично при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 06-02-16217_a), Программы поддержки ведущих научных школ (грант НШ-4354.2008.2), Программы Президиума РАН "Происхождение и эволюция звезд и галактик", гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1992.2008.2 и Фонда содействия отечественной науке.

Литература

- Аллен К., Сантиллан А. (Allen C., Santillan A.) // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*. 1991. V. 22. P. 255.
- Антипова Л.И., Боярчук А.А., Пахомов Ю.В., Панчук В.Е. // *Астрон. журн.* 2004. Т. 81. С. 658.
- Антипова Л.И., Боярчук А.А., Пахомов Ю.В., Юшкин М.В. // *Астрон. журн.* 2005. Т. 82. С. 601.
- Боярчук А.А., Губены И., Кубат И., Любимков Л.С., Сахибуллин Н.А. // *Астрофизика*. 1988. Т. 28. С. 343.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Боярчук М.Е., Саванов И.С. // *Астрон. журн.* 2001. Т. 78. С. 349.
- Боярчук А.А., Антипова Л.И., Пахомов Ю. В., Боярчук М.Е. // *Астрон. журн.* 2002. Т. 79. С. 909.
- Боярчук А.А., Любимков Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1981. Т. 64. С. 3.
- Боярчук А.А., Любимков Л.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1983. Т. 66. С. 130.
- ван Льювен Ф. (van Leeuwen F.) // *Astrophysics and Space Science Library*. 2007. V. 250.
- Гилмор Г., Рейд Н. (Gilmore G., Reid N.) // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 1983. V. 202. P. 1025.
- Гирарди Л. и др. (Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 2000. V. 141. P. 371.
- Гренон М. (Grenon M.) // *Astrophysics and Space Science Library*. 1985. V. 114.
- Гренон М. (Grenon M.) // *Astrophys. Space Sci.* 1999. V. 265. P. 331.
- Денисенков П.А. // *Письма в Астрон. журн.* 1988. Т. 14. С. 1023.
- Денисенков П.А., Иванов В.В. // *Письма в Астрон. журн.* 1987. Т. 13. С. 520.
- Джонсон Д.Р.Х., Содерблом Д.Р. (Johnson D.R.H., Soderblom D.R.) // *Astron. J.* 1987. V. 93. P. 864.
- Карретта Е. и др. (Carretta E., Bragaglia A., Gratton R.G.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 473. P. 129.
- Куруч Р.Л. (Kurucz R.L.) // *SAO Special Report*. 1970. V. 309.
- Помпея Л. и др. (Pompéia L., Barbuy B., Grenon M.) // *Astrophys. J.* 2002. V. 566. P. 845.
- Рабуд Д. и др. (Raboud D., Grenon M., Martinet L., Fux R., Udry S.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 335. P. 61.
- Робин А.К. и др. (Robin A.C., Haywood M., Creze M., Ojha D.K., Bienayme O.) // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 305. P. 125.
- Сото М. и др. (Soto M., Rich R.M., Kuijken K.) // *Astron. J.* 2007. V. 665. P. L31.
- Спинрад Х. (Spinrad H.) // *Publ. Astron. Soc. Pac.* 1966. V. 78. P. 367.
- Фелзинг С., Гонсалес Г. (Feltzing S., Gonzalez G.) // *Astron. Astrophys.* 2001. V. 367. P. 253.
- Фукс Р. (Fux R.) // *Astron. Astrophys.* 1997. V. 327. P. 983.
- Чен Б. и др. (Chen B., Stoughton C., Smith J.A., Uomoto A., Pier J.R., Yanny B., Ivezić York D. G., Anderson J.E., Annis J., Brinkmann Csabai I., Fukugita M., Hindsley R., Lupton Munn J.A., the SDSS Collaboration) // *Astrophys. J.* 2001. V. 553. P. 184.
- Чен И.К. и др. (Chen Y.Q., Zhao G., Nissen P.E., Bai G.S., Qiu H.M.) // *Astrophys. J.* 2003. V. 591. P. 925.
- Эгген О.Й. (Eggen O.J.) // *Astron. J.* 1993. V. 106. P. 80.