

УДК 524.6-36-54

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЗВЕЗД С БОЛЬШИМИ СОБСТВЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ ПО КОРОТКОВОЛНОВЫМ ОПТИЧЕСКИМ СПЕКТРАМ

© 2011 В. Г. Клочкова^{1*}, Т. В. Мишенина², В. Е. Панчук¹,
С. А. Коротин², В. А. Марсаков³, И. А. Усенко², В. В. Цымбал⁴

¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия

²АО Одесского национального университета, Одесса, Украина

³Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

⁴Таврический национальный университет, Симферополь, Украина

Поступила в редакцию 28 июля 2010 г.; принята в печать 8 августа 2010 г.

По результатам спектральных наблюдений, выполненных с эшелным спектрографом НЭС 6-метрового телескопа БТА в диапазоне длин волн 3550–5100 Å со спектральным разрешением $R \geq 50000$, для 14 малометаллических G–K-звезд с большими пространственными скоростями определены фундаментальные параметры и атмосферные содержания свыше 20 химических элементов, включая тяжелые элементы s- и r- процессов от Sr до Dy. Расчет содержаний Mg, Al, Sr и Ba выполнен с учетом отклонений от ЛТР в заселенности атомных уровней. Полученный избыток содержания европия по отношению к железу согласуется с определениями для звезд подобной металличности. Химический состав удаленной от плоскости Галактики звезды BD+80°245 соответствует звездам аккрецированного гало: помимо сверхдефицита элементов α -процесса, этой звезде присущ и сверхдефицит элемента s-процесса Ba: $[Ba/Fe] = -1.46$. На основании кинематических параметров и химического состава определена принадлежность изученных звезд к разным типам населений Галактики. Для 6 звезд методом синтетического спектра определено отношение содержания долгоживущего радиоактивного элемента Th к содержанию элемента r-процесса Eu.

Ключевые слова: *звезды — свойства и классификация, химический состав*

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектры звезд, принадлежащих различным населением (гало, толстый и тонкий диски) являются основными источниками сведений о характере эволюции химического состава Галактики. Содержания химических элементов, определяемые из наблюдений, являются совокупным продуктом ядерных реакций, протекавших в недрах звезд различных масс и различного исходного химического состава. Из-за влияния набора накапливающихся факторов (функция масс разных поколений звезд, функции наработки различных химических элементов, доля вещества, обогащенного вследствие эволюции звезды данной массы и выброшенного затем в межзвездную среду) — расшифровка отношений содержания химических элементов и сопоставление наблюдений с теоретическими моделями эволюции химического состава является сложной задачей.

Химический состав непроэволюционировавших звезд, принадлежащих различным галактическим подсистемам, дает возможность восстановить хронологию формирования и последующей эволюции Галактики. Необходимыми компонентами для определения принадлежности звезд к тому или иному типу населения Галактики являются возраст, химический состав и кинематические параметры (собственные движения μ и лучевые скорости V_{\odot}). Оптимальными зондами для изучения химического состава и измерения лучевых скоростей самых ранних типов населений являются непроэволюционировавшие малометаллические звезды поздних спектральных классов. Оптимальными объектами являются F–G субкарлики, спектры которых изобилуют узкими и мало блендированными линиями. Эти маломассивные звезды, наблюдаемые на и вблизи Главной Последовательности, эволюционируют медленно, поэтому их атмосферы имеют химический состав, соответствующий веществу, из которого эти звезды сформировались. В данной

*E-mail: valenta@sao.ru

задаче, помимо металличности звезды, необходимо получить содержание иных химических элементов, которые синтезируются в ходе принципиально различающихся ядерных реакций, идущих в недрах звезд разных масс на разных стадиях эволюции: захват α -частиц (α -процесс), медленные (s) и быстрые (r) процессы нейтронизации тяжелых ядер. Набор этих данных позволяет отслеживать химическую эволюцию Галактики. Содержания химических элементов должны быть определены с высокой точностью, поскольку изменения этих параметров при переходе от одной галактической подсистемы к другой сопоставимы с ошибками их определения.

Изучение эволюции химического состава старых звезд Галактики начато давно, однако долгое время решение этой задачи основывалось преимущественно на фотометрических данных. Позже были выполнены как спектроскопические обзоры с низким спектральным разрешением для больших выборок малометаллических звезд [1], так и наблюдения с высоким спектральным разрешением небольших выборок объектов (см., например, статьи [2–5] и ссылки в них).

Существование взаимосвязи металличности и кинематических характеристик звезд известно со времен исследований, инициированных Эггеном [6]. В последующие десятилетия происходило накопление данных о химическом составе звезд диска и гало. Этот процесс стал наиболее интенсивным с вводом в практику наблюдений крупных телескопов 6–10-метрового класса, оснащенных эшеллевыми спектрографами высокого разрешения с матрицами ПЗС. В широко цитируемом обзоре [7] проанализированы данные для галактических популяций, полученные до 1997 г. Недавняя компиляция [8] содержит надежные сведения о химическом составе звезд гало, полученные к настоящему времени.

Как показывает анализ данных, картина металличности и химического состава звезд гало сложна, отягощена значительной реальной дисперсией, кроме того, зависимость химического состава от возраста и кинематических параметров звезд неоднозначна. Поэтому изучение детального химического состава для больших выборок старых звезд Галактики остается актуальным. Наиболее полную и надежную информацию о химическом составе дает анализ спектров, полученных с высоким спектральным разрешением в широком интервале длин волн с высоким отношением сигнала к шуму S/N . При переходе к малометаллическим звездам число линий металлов и их интенсивности становятся столь малыми, что для изучения основных характеристик распространенности химических элементов

спектры следует получать в синем и ультрафиолетовом диапазонах, где плотность спектральных линий выше. Понятно, что спектрограф и светоприемник должны быть максимально эффективными именно в этих диапазонах.

Целью данной работы является определение детального химического состава выборки субкарликов. В разд. 2 кратко описаны способы наблюдений и редукиции спектральных данных, в разд. 3 описан метод определения основных параметров звездных моделей и расчета содержаний химических элементов, в разд. 4 рассмотрены полученные результаты.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Наша программа спектроскопического исследования содержания химических элементов в атмосферах звезд населения гало составлена с использованием обзора [1]. Этот обзор основан на Ловелловском каталоге собственных движений и включает данные о пространственных скоростях, величинах светимости, температурах, межзвездном покраснении, металличности. Металличность в работе [1] определена по фотометрическим наблюдениям авторов в системе UVV и из анализа эшелле-спектров с предельно низким отношением сигнал/шум, полученных авторами для большой выборки звезд.

В табл. 1 приведены некоторые параметры изученных малометаллических звезд: их номера по каталогам HD (или BD), номера из Каталога [13] звезд с большими собственными движениями ($\mu \geq 0.27''/\text{год}$), звездные величины в полосе B, а также собственные движения μ из Каталога миссии Гиппархос [9]. В последнем столбце табл. 1 отмечены двойные или заподозренные в двойственности звезды (см. работу [11] и ссылки в ней). В этой же колонке звездочкой отмечены объекты программы, химический состав которых изучен ранее [10] по аналогичному спектральному материалу, полученному со спектрографом НЭС, и обработанному той же методикой. Информативность ближнего УФ-диапазона для изучения спектров малометаллических звезд по сравнению с видимым диапазоном хорошо иллюстрирует рис. 1, где представлены фрагменты спектров для 4-х звезд программы, имеющих разную металличность.

Высококачественные спектры избранных субкарликов в наземном ультрафиолете, $\lambda \approx 3500 - 5000 \text{ \AA}$ (отношение сигнала к шуму $S/N \geq 100$, спектральное разрешение $R \geq 50000$) получены нами в фокусе Нэсмита 6-метрового телескопа БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН с кварцевым эшеллевым спектрографом НЭС [14]. Эшелле спектрограф НЭС

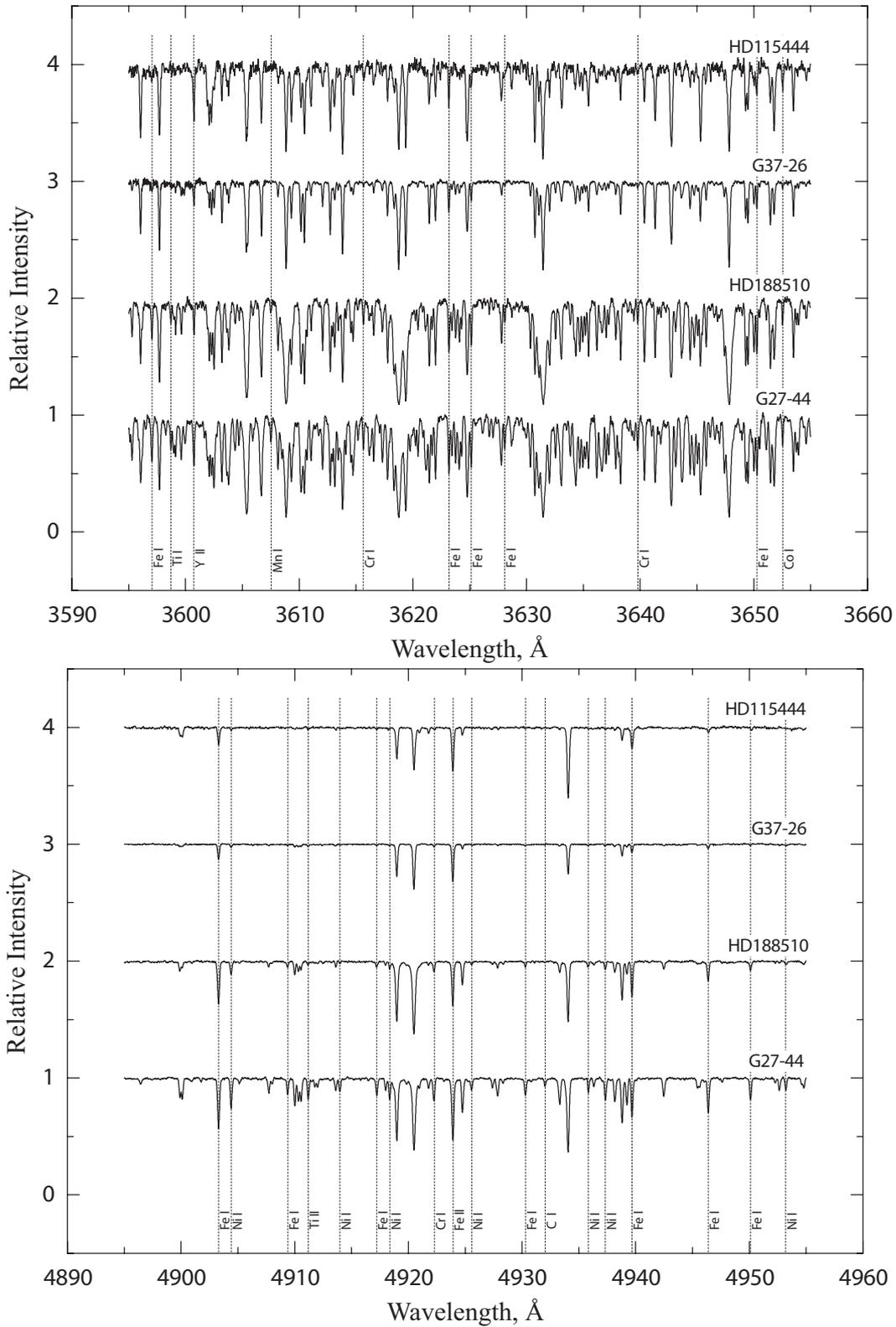


Рис. 1. Фрагменты спектров звезд программы. По оси ординат — относительная интенсивность, нормированная на континуум, по оси абсцисс — длина волны в ангстремах. Сверху вниз: HD 115444 ($[Fe/H] = -2.91$ [10]), G37-26 ($[Fe/H] = -2.04$ [10]), HD 188510 ($[Fe/H] = -1.52$ [10]) и G27-44 ($[Fe/H] = -0.60$ [10]). Вертикальными линиями отмечены часть отождествленных абсорбций.

Таблица 1. Наблюдаемые параметры исследованных звезд из базы данных SIMBAD. В колонке с параметром $(b-y)$, вместо отсутствующих $(b-y)$ -данных, в скобках приведено значение $(B-V)$. Величины собственных движений и параллаксов взяты из [9]. В последнем столбце звездочкой отмечены звезды химический состав которых определен в работе [10]; двойные или заподозренные в двойственности звезды [11] помечены как “bin”

HD, BD	Giclas	B	Sp	$b-y$	m_1	c_1	H β	BC [12]	μ_α	μ_δ	π	
		mag		mag	mag	mag	mag	mag	mas/year		mas	
245	265-1	9.02	G2V	(+0.65)				-0.139	331.45	-6.63	16.24	bin
+71°31	242-65	10.61	F5	0.309	0.040	0.36		-0.008	324.97	92.50	6.04	bin
5256	265-5	9.51	G5V	(+0.74)				-0.222	310.23	79.80	11.19	
+29°366	74-5	9.34	F8V	0.39	0.130	0.213	2.562	-0.113	290.02	-265.76	17.66	
19445	37-26	8.51	A4p	0.351	0.058	0.208	2.584		-209.55	-830.33	25.85	* bin?
22879	80-15	7.23	F9V	0.365	0.126	0.272	2.586	-0.076	689.67	-214.34	41.07	
237354	191-23	9.96	G2V	0.387	0.150	0.248	2.573	-0.087	-59.56	-381.96	11.91	bin
+80°245	251-54	10.57	G0	0.402	0.082	0.234		-0.108	136.81	-366.66	3.91	
115444		9.70	K0	0.586	0.056	0.467			5.10	-60.36	3.55	*
144061	240-2	7.95	G5	0.408	0.181	0.275		-0.111	-59.70	253.89	34.35	
148816	17-21	7.81	F8V	0.367	0.125	0.306	2.59	-0.074	-432.73	-1392.34	24.34	
188510	143-17	9.39	G5V	0.416	0.107	0.148	2.633		-37.80	289.57	25.32	*
215065	241-18	8.05	G5	0.404	0.186	0.271		-0.120	217.26	338.34	34.05	
215257	27-44	7.93	F8V	0.355	0.119	0.306			150.64	331.61	23.66	*

работает на 6-м телескопе с 1998 г., но только с 2001 г., после установки матрицы с высокой чувствительностью в ультрафиолете, он стал эффективным средством наблюдений в коротковолновом диапазоне. Светоприемником служит матрица ПЗС Астрономической обсерватории университета г. Уппсала (Швеция), имеющая высокую чувствительность в синем и УФ диапазонах [15]. Шум считывания составляет $7.7 e^-$, темновой ток — $1.5 e^-/h$. Число светочувствительных элементов 2048×2048 , размер одного элемента 0.015×0.015 мм.

Параметры эшелле-решетки и камеры таковы, что, в сочетании с матрицей ПЗС форматом 2048×2048 элементов, обеспечивается полное перекрытие соседних порядков эшелле-спектра (в самых высоких УФ-порядках — даже двукратное перекрытие). Решетки скрещенной дисперсии сменные, 300 и 600 штр/мм. Шмидтовский корректор камеры и зеркало Манжена (мениск двойного хода в качестве кассегреновского зеркала) изготовлены из плавленного кварца. Полеспрямляющая линза отсутствует, ее функции выполняет манженское зеркало. Защитное стекло криостата матрицы ПЗС увиолевое. Квантовый выход исполь-

зуемой ПЗС матрицы в ультрафиолете достигает 70%. В целом, оптический тракт спектрографа построен с минимальными потерями, в т.ч. и в ультрафиолете, до $\approx 3100 \text{ \AA}$ [16]. Система автоматического гидирования настраивается по фиолетовому участку изображения, с учетом направления и величины вектора атмосферной рефракции.

Для исключения следов космических частиц и повышения отношения S/N мы получали как минимум две экспозиции для каждого объекта. Обработка двумерных эшелле-кадров (вычитание темновых кадров, очистка от космических частиц, калибровка длин волн, экстракция одномерных векторов) проводилась с помощью модифицированного [17] контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS. Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух спектров, полученных последовательно один за другим. Источником спектра сравнения служила торий-аргоновая лампа. Оценка точности измерения эквивалентных ширин W с использованием формулы Кереля [18] приводит к выводу о том, что качество спектров обеспечивает измерения W с ошибкой не более 2 m\AA . Список спектральных линий был составлен с использовани-

ем базы данных VALD [19, 20]. По солнечному спектру высокого разрешения из более чем 8100 первоначально отобранных линий нами было оставлено около 860 неблендированных линий, оптимальных для позиционных измерений. Подготовленный таким образом список линий и спектральный атлас [10] доступны по Web-адресу http://www.chjaa.org/2006_6_5.html.

3. АНАЛИЗ МЕТОДОМ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕР

3.1. Основные параметры звезд

Все необходимые для определения эффективной температуры и ускорения силы тяжести фотометрические данные стремгеновской системы *uvbyβ* были взяты из базы SIMBAD (см. табл. 1). Эффективная температура T_{eff} определялась методом последовательных приближений с использованием калибровок фотометрических индексов [29]. После первого определения T_{eff} и металличности температура уточнялась, а затем проводилась следующая итерация. Ускорение силы тяжести на поверхности звезды $\log g$ рассчитано с применением стандартной формулы:

$$\log g = -12.50 + \log(M/M_{\odot}) + 4 \log T_{\text{eff}} + 0.4(Mv + BC),$$

где: M/M_{\odot} — масса звезды в единицах массы Солнца, Mv — абсолютная звездная величина, BC — болометрическая поправка. Болометрические поправки взяты из работы Флауера [12], абсолютная звездная величина определена по параллаксу π из каталога миссии Гиппархос [9]. Микротурбулентная скорость ξ_t найдена стандартным способом из условия независимости содержания железа $\log \epsilon(\text{FeI})$, определенного по данной линии FeI, от ее эквивалентной ширины W_{λ} . Окончательные параметры атмосфер исследуемых звезд приведены в табл. 2, здесь же для сравнения даны параметры из нескольких современных публикаций. Из этого сравнения следует, что определенные нами параметры не содержат систематических ошибок.

Среднеквадратичное отклонение содержаний элементов, полученных по линиям нейтральных атомов FeI, TiI, CrI, MnI, NiI, и линиям иона FeII колеблется от 0.07 до 0.15 dex, для других атомов ошибка выше и достигает 0.25 dex. В табл. 3 для звезды HD 22879 мы приводим величины ошибок в содержаниях $\Delta(X)$ при типичных ошибках определения параметров модели ($\Delta T_{\text{eff}} = +100\text{K}$, $\Delta \log g = +0.2$), выбора турбулентной скорости $\Delta \xi_t = +0.2 \text{ км/с}$ и металличности модели $\Delta[\text{Fe}/\text{H}] = +0.25$), ошибок измерения

эквивалентных ширин линий ($2m\text{\AA}$) и подгонки синтетического спектра (0.05 dex). Как видно из табл. 3, для подавляющего числа элементов полная ошибка находится в пределах 0.1 dex, и только для V, Co, Zr и Eu она выше.

3.2. Определение химического состава

Содержания большинства химических элементов в атмосферах исследуемых звезд определены по эквивалентным ширинам линий в приближении ЛТР. Расчеты выполнялись с использованием модифицированной программы WIDTH9, модели атмосфер получались путем интерполяции по сетке моделей Куруца [30]. Список линий, атомные константы и силы осцилляторов взяты из базы данных VALD [19, 20].

Для 10 звезд, исследуемых в данной работе, и 4 звезд из работы [10] содержания Mg, Al, Sr и Ba определены методом синтетических спектров с учетом отклонений от ЛТР. Уравнения статистического равновесия решались с помощью модифицированной программы MULTI [31], модели рассмотренных атомов были построены С.А. Коротиным. Так как для расчетов мы используем модели Куруца [30], рассчитанные по программе ATLAS9, то и в MULTI мы заменили блок расчета непрозрачностей на соответствующий блок из ATLAS9. Кроме того, при вычислении скоростей фотоионизации нами учитывалось поглощение в спектральных линиях. Эта процедура серьезно сказывается на точности полученных скоростей фотоионизации.

Итоговые содержания $\log \epsilon(X)$ химических элементов, усредненные по набору измеренных линий, приведены в табл. 4. Для расчета относительных величин

$$[X/Fe] = [\log \epsilon(X) - \log \epsilon(Fe)]_{\star} - [\log \epsilon(X) - \log \epsilon(Fe)]_{\odot}$$

(см. табл. 4), необходимых для анализа кривой распространенности химических элементов при различных значениях металличности, мы использовали величины $\log \epsilon(X)$ для атмосферы Солнца из работы [32]. Ниже рассмотрим подробнее распространенность отдельных химических элементов.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 4 приведены содержания для элементов в ЛТР приближении. Полученные результаты рассмотрим, группируя химические элементы в соответствии с тем, в каких процессах синтеза они производятся. Привлечем также 4 звезды, изученные ранее [10] той же методикой и по аналогичному спектральному материалу.

Таблица 2. Основные параметры исследуемых звезд, используемые для расчета химического состава. В колонке с T_{eff} в скобках дана величина T_{eff} по индексу (B-V)

HD, BD	Данные авторов				Опубликованные данные	
	T_{eff}	log g	ξ_t	[Fe/H]	$T_{\text{eff}}, \log g$ [21]	$T_{\text{eff}}, \log g$
245	5494	4.20	0.8	-0.68	5348, 4.50	
+71°31	6237	4.24	1.25	-1.83		
5256	5212	3.80	0.5	-0.39		5204, 3.80 [24]
+29°366	5609	4.45	0.5	-0.91	5609, 4.22	5665, 4.34 [22] 5616 4.26 [23]
19445	5890	4.50	0.7	-2.04	5918, 4.35	5976, 4.44 [22]
22879	5802	4.37	0.4	-0.78	5814, 4.29	5722, 4.50 [24] 5827 4.33 [22]
237354	5661	4.26	0.6	-0.63		
+80°245	5543	3.60	1.5	-1.71	5354, 3.00	5400, 3.2 [25] 5789 3.93 [3]
115444	4800	1.60	1.7	-2.91		4800, 2.0 [26] 4750 1.70 [27] 4720 1.5 [28]
144061	5579	4.33	0.5	-0.31		
148816	5812	4.11	1.35	-0.77	5830, 4.21	5857, 4.11 [22]
188510	5410	5.00	0.6	-1.52	5490, 4.69	5503, 4.55 [22] 5170, 4.73 [24]
215065	5567	4.50	0.5	-0.58		
215257	5900	4.35	1.0	-0.60		5906, 4.17 [23]

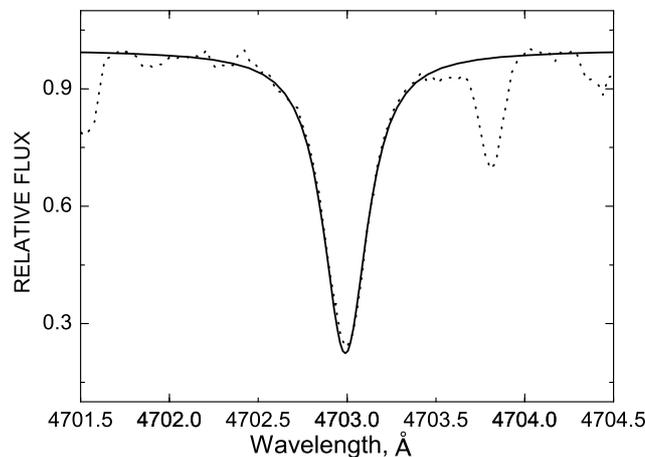


Рис. 2. Профиль линии Mg I λ 4703 в спектре G17-21 = HD 148816. Здесь и на последующих рисунках наблюдаемый профиль нанесен пунктиром, синтетический – сплошной линией.

4.1. Легкие элементы

Известно (см., например, [7, 8]), что в зависимости от металличности звезды содержание легких элементов (O, Mg, Si, Ca, Ti), синтезируемых за счет захвата α -частиц, меняется. У звезд с металличностью $[Fe/H] \leq -1.0$ величина $[\alpha/Fe]$ постоянна с небольшой дисперсией, причем избыток достигает вполне значимых значений

$[\alpha/Fe] = +0.3 \div 0.4$. А у звезд с $[Fe/H] \geq -1.0$ наблюдается снижение содержания легких элементов. Согласно современным представлениям теорий нуклеосинтеза, α -элементы образуются в реакциях α -захвата, проходящих в массивных звездах, впоследствии взрывающихся как сверхновые II-го типа, с небольшой долей от сверхновых типа SNI [33]. Ядра железа поставляются как массивными (SNI), так и менее массивными звездами

Таблица 3. Ошибки $\delta(X)$ содержаний элементов в атмосфере звезды HD 22879, обусловленные ошибками определения параметров $\Delta T_{\text{eff}} = +100$ К, $\Delta \log g = +0.2$, $\Delta \xi_t = 0.2$ км/с, $\Delta [\text{Fe}/\text{H}] = \pm 0.25$, а также суммарная ошибка $\Delta(X)$

El	$\delta(X)$				$\Delta(X)$
	ΔT_{eff}	$\Delta \log g$	$\Delta \xi_t$	$\Delta [\text{Fe}/\text{H}]$	
NaI	-0.04	0.01	0.00	0.01	0.04
MgI	-0.07	0.05	0.00	-0.01	0.09
CaI	-0.08	0.06	0.01	-0.02	0.10
ScII	-0.06	-0.01	0.03	-0.06	0.09
TiI	-0.10	0.03	0.02	-0.01	0.11
TiII	-0.04	-0.02	0.04	-0.06	0.08
VI	-0.11	0.02	0.03	0.01	0.12
CrI	-0.09	0.02	0.01	0.00	0.09
CrII	0.01	-0.05	0.03	-0.02	0.06
MnI	-0.09	0.03	0.02	-0.02	0.10
FeI	-0.08	0.05	0.03	-0.01	0.11
FeII	-0.01	-0.04	0.06	-0.02	0.08
CoI	-0.12	0.04	0.03	-0.02	0.13
NiI	-0.08	0.02	0.02	-0.01	0.09
ZnI	-0.04	-0.01	0.03	-0.02	0.05
SrI	-0.07	0.00	0.01	0.01	0.07
YII	-0.05	-0.03	0.05	-0.06	0.10
ZrII	-0.09	-0.12	-0.02	-0.04	0.16
BaII	-0.06	0.00	0.02	-0.07	0.09
LaII	-0.04	-0.07	0.03	-0.05	0.10
CeII	-0.04	-0.07	0.01	-0.04	0.09
NdII	-0.05	-0.07	0.03	-0.05	0.10
SmII	-0.04	-0.07	0.02	-0.05	0.10
EuII	-0.07	-0.03	0.08	-0.06	0.13
GdII	-0.04	-0.07	0.01	-0.04	0.10
DyII	-0.05	-0.03	0.01	-0.06	0.09

(SNI), причем последние являются основными поставщиками атомов железа. Согласно усредненным оценкам различных авторов, время начала массовых вспышек сверхновых SNIa наступает через ≈ 1 млрд. лет, но поскольку они практически не производят α -элементы, отношение $[\alpha/\text{Fe}]$ начинает стремительно снижаться. Это объясняет наблюдаемый рост отношения $[\alpha/\text{Fe}]$ с понижен-

ем металличности и исчезновение избытка по мере перехода к формированию более металлического населения диска.

Рассмотрим детальнее содержания легких элементов у исследованных нами звезд.

Магний. При расчете учитывались 97 атомных уровней: 84 уровня MgI, 12 уровней MgII

Таблица 4. Относительные содержания элементов [E/Fe] в атмосферах исследуемых звезд

HD/BD	[E/Fe]									
	245	+71°31	5256	+29°366	22879	237354	+80°245	144061	148816	215065
[Fe/H]	-0.68	-1.83	-0.39	-0.91	-0.78	-0.63	-1.71	-0.31	-0.77	-0.58
NaI	0.10		0.03	0.19	0.02	0.07		0.05	0.08	0.21
CaI	0.09	0.31	0.02	0.14	0.10	0.12	-0.24	-0.07	0.15	0.11
ScII	0.10	0.23	0.34	0.23	0.17	0.28	-0.31	0.25	0.06	0.21
TiI	0.09	0.33	0.08	0.13	0.23	0.21	-0.19	0.03	0.20	0.20
TiII	0.34	0.33	0.25	0.28	0.36	0.28	-0.20	0.18		0.25
VI	0.18	0.17	0.36		0.24	0.20	-0.22	0.26	0.17	0.32
CrI	0.02	0.18	-0.07	0.02	-0.05	0.03	0.03	0.12	0.03	0.10
CrII	0.19	0.08	0.20	0.10	0.13	0.22	0.09	0.31	0.07	0.20
MnI	-0.10	-0.18	-0.03	-0.2	-0.25	-0.14	-0.22	0.05	-0.22	-0.02
FeII	0.05	0.01	-0.01	-0.06	-0.01	0.04	-0.07	0.06	-0.01	0.02
CoI	0.18	0.20	0.01	0.09	0.14	0.18	-0.08	-0.04	0.19	0.18
NiI	0.08	0.15	0.09	0.02	0.00	0.09	-0.05	0.14	0.03	0.11
ZnI	0.39	0.08	0.47	0.15	0.16	0.23	-0.23	0.33	0.17	0.28
YII	0.10	0.46	0.20	0.04	0.23	0.31	-0.64	0.23	-0.07	0.03
ZrII	0.09	0.30	0.22	0.04	0.21	0.25	0.24	0.24	0.04	0.02
LaII	0.28	0.44	0.30	0.22	0.20	0.13	-0.41	0.14		0.19
CeII	0.11		0.03	0.08	-0.06	0.04		0.13	0.02	0.01
NdII	0.23	0.32	-0.05	0.17	0.08	0.19		0.22	0.19	-0.03
SmII	0.26		0.15		0.25	0.28		0.06	0.10	0.19
GdII	0.41		0.09	0.36	0.07	0.46		0.01	0.11	0.26
DyII	0.46		0.46	0.34	0.34	0.09		0.23	0.06	0.26

и основное состояние MgIII. Детальная структура мультиплетов не принималась во внимание, каждый LS-мультиплет рассматривался как одиночный терм. Тонкая структура была рассмотрена только в случае уровня $3s3p^3P^0$, который тесно связан с важнейшими переходами в атоме магния. В рамках описанной системы уровней рассматривались радиативные переходы между первыми 59 уровнями MgI и основным уровнем MgII. Остальные уровни использовались только при решении уравнения сохранения числа частиц. Для анализа были отобраны только переходы, для которых $\lambda < 100000 \text{ \AA}$. Все 424 связанно-связанные перехода учитывались в процессе линеаризации. Более подробно, см. в работе [34]. Для определения содержания магния использовались линии MgI 4167

и 4702 Å. Линия MgI 4571 Å не использовалась в анализе из-за заметного влияния хромосферы на ее формирование [35]. На рис. 2 приведен пример не-ЛТР расчета профиля линии MgI 4702 Å для звезды HD 148816. В целом, можно считать, что полученные избытки [Mg/Fe] согласуются с картиной изменения Mg у звезд соответствующей металличности [8, 34, 36].

Кальций. Содержание кальция [Ca/Fe], за исключением звезд BD+80°245 и HD 144061, повторяет зависимость из работ [7, 8]. В пределах ошибок определения наши содержания кальция согласуются со средними значениями [Ca/Fe]=+0.18, приведенными в работе [37].

В целом можно считать, что у большинства

звезд нашей выборки наблюдается избыток содержания элементов α -процесса, что соответствует ожидаемому для звезд толстого диска и гало. Из перечисленных в этом разделе звезд наиболее интересна звезда гало BD+80° 245, имеющая аномально низкие (для своей металличности) содержания Mg, Al и Ca.

Титан, ванадий. Статус ванадия и титана является неопределенным. Многие авторы относят титан к элементам α -процесса, а ванадий — к элементам группы железа. Полученные нами значения хорошо согласуются со средними для толстого диска $[Ti/Fe]=0.20$ и $[V/Fe]=0.11$ [37].

Натрий. Изменение содержания Na отличается от картины для других легких элементов повышенной дисперсией и отсутствием выраженного тренда с металличностью [8]. Как видно из табл. 4, содержание натрия в приближении ЛТР у 8 исследованных нами звезд мало отличается от солнечного: $[Na/Fe]=+0.09$ при небольшом разбросе $[Na/Fe]=+0.02 \div 0.21$. Редди и Ламберт [37] для звезд толстого диска получили среднее значение $[Na/Fe]=+0.11$, что очень близко к полученному нами.

Алюминий. Не-ЛТР содержание алюминия рассчитано по линиям нейтрального AlI 3944, 3941 Å. Использовались 78 уровней AlI и 13 уровней AlII, более подробно методика расчета приведена в работе Андриевского и др. [38]. Среднее содержание алюминия, полученное в не-ЛТР приближении, $[Al/Fe]=+0.09$ с довольно большим разбросом: $[Al/Fe]=-0.13 \div +0.49$.

4.2. Элементы группы железа

Элементы группы железа (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn) производятся в процессе равновесного горения кремния. Для исследуемых звезд с низкой металличностью ($[Fe/H] < -1.4$) содержание хрома соответствует содержанию железа: его среднее значение $[Cr/Fe]=-0.13$ для этих звезд. Этот результат, ожидаемый априори из-за общего механизма синтеза ядер группы железа, является дополнительным подтверждением достоверности полученных параметров моделей и надежности наблюдательного материала. Полученные нами значения содержания хрома и никеля следуют солнечной пропорции, а дефицит марганца усиливается с уменьшением $[Fe/H]$, что хорошо согласуется с ранее полученными результатами для звезд толстого диска и гало.

Для тех же звезд с металличностью $[Fe/H] < -1.4$ содержание цинка еще меньше уклоняется от содержания железа: $[Zn/Fe]=0.06$. Цинк является важным элементом в рассмотрении

химической эволюции, поскольку есть предположение, что часть его атомов синтезируется в процессах нейтронизации [39]. Близкое к солнечному значение $[Zn/Fe]$, полученное нами, не подтверждает это предположение. Наши результаты для цинка подтверждают вывод Ниссена и др. [40] о том, что в широком диапазоне металличностей, вплоть до $[Fe/H] \approx -2$, величина $[Zn/Fe]$ близка к нулю.

4.3. Тяжелые металлы

Стронций. Анализ не-ЛТР эффектов у линий SrII для холодных звезд проводился в работах [41] и [42], авторами которых показано, что для звезд с дефицитом металлов влияние отклонений от ЛТР может приводить к значительным ошибкам в определении содержания Sr. В нашем анализе была использована модель иона стронция, сходная с моделью, предложенной авторами [41]. Модель включает 44 нижних уровней SrII с $n \leq 12$ и $l \leq 4$ и основной уровень SrIII. Было учтено тонкое расщепление для термов $4d^2D$ и $5p^2P^0$. Для остальных уровней тонкая структура не учитывалась. Так как потенциал ионизации атома стронция всего 5.7 eV, то в атмосферах даже холодных звезд стронций практически весь ионизован. Поэтому 24 уровня SrI были включены только в уравнение сохранения числа частиц. Уровни SrIII, кроме основного, не включались в рассмотрение из-за высокого потенциала возбуждения. В видимой области спектра и в ближнем ИК-диапазоне, особенно у звезд с дефицитом металлов, содержится мало линий SrII — это резонансные линии 4077, 4215 Å в синей области и линии 10036, 10327 и 10914 Å в ИК-диапазоне. При этом резонансные линии блендированы линиями молекул, железа и хрома. Сами линии очень сильные и поэтому мало чувствительны к изменению содержанию стронция. Линии в ИК-области не блендированы, но чувствительны к отклонениям от ЛТР. Для надежного определения содержания стронция желательно использовать линии из синего и ИК-диапазона одновременно. Как показали расчеты, на линии разных мультиплетов эффекты отклонения от ЛТР оказывают различное влияние. При этом следует иметь в виду, что не-ЛТР поправка меняет знак в зависимости от температуры и металличности звезды. Определение содержания стронция выполнено нами по линиям SrII 4077, 4215 Å. На рис. 3 приведен пример не-ЛТР расчета профиля линии SrII 4215 Å для звезды HD 148816.

Барий. Определение содержания бария выполнено по линиям BaII 4130, 4554 Å. Используемая модель атома бария включала 31 уровень BaI и

101 уровень Ba II, более подробно см. работу [43]. На рис. 4 приведен пример расчета в приближении не-ЛТР профиля линии BaII 4554 Å для звезды HD 148816. Среднее для 12 звезд отношение $[Ba/Fe] = -0.06$ мало отличается от солнечного, что согласуется с ходом величины $[Ba/Fe]$ в зависимости от металличности в работах [7, 8]. При усреднении содержания бария мы исключили две малометаллические звезды BD +80°245 и HD 115444, у которых выявлено аномальное значение бария: $[Ba/Fe] = -1.46$ и $[Ba/Fe] = +0.68$ соответственно. Отметим, что такие аномалии и высокая дисперсия содержания элементов, синтезируемых за счет процессов нейтронизации, известны у звезд низкой металличности [8].

Европий. Содержание европия определено методом синтетического спектра по линии 4129 Å. Расчет выполнен с использованием современной версии программы STARSP В. В. Цымбала [44] и списков линий базы данных VALD [19, 20]. Сила осцилляторов этой линии равна $\log gf = 0.22$. Как показано в работе [45], эффекты не-ЛТР слабы для используемой нами резонансной линии и находятся в пределах от 0.04 dex до 0.08 dex в диапазоне температур и металличностей исследуемых звезд. На рис. 5 приведены ЛТР вычисления профиля линии EuII 4129 Å для звезды HD 22879 при двух значениях $\log \epsilon(Eu) = 0.20$ и 0.40. Как видно из табл. 7, у 9 звезд, для которых мы определили содержание европия, наблюдается его избыток по отношению к железу. Содержание европия в звезде HD 22879 ($[Eu/Fe] = 0.47$) хорошо согласуется со значениями, полученными в работах [46] ($[Eu/Fe] = 0.49$) и [24] ($[Eu/Fe] = 0.42$). Для остальных звезд полученные результаты хорошо согласуются с определениями для звезд подобной металличности [24, 45–47].

4.4. Содержание тория

Определение содержания тория выполнено методом синтетического спектра с использованием программы STARSP [44] и списка линий из базы VALD [19, 20] в области линии тория 4019 Å. Используемая в расчетах сила осциллятора этой линии $\log gf = -0.227$ согласуется со значением $\log gf = -0.228$ из работы Нилсона и др. [48]. Силы осцилляторов других ключевых линий в бленде следующие: -2.779 для линии железа Fe I 4019.043 Å; -0.529 для линии Ce II 4019.043 Å; -3.173 для Ni I 4019.067 Å; -2.269 для линий Co I на длине волны $\lambda = 4019.13$ Å. На рис. 6–8 приведены примеры согласования синтетического и наблюдаемого спектров для нескольких звезд. Как видно из рисунков, мы можем говорить о верхней

оценке содержания тория. В табл. 7 приведены полученные нами оценки содержания тория. Как и в случае европия, они неплохо согласуются с результатами Пелозо и др. [47] для звезд подобной металличности.

Итак, полученные в данной работе содержания исследованных элементов в пределах ошибок определений хорошо согласуются с полученными ранее данными по звездам в рассматриваемом диапазоне металличности: избытки элементов α -процесса, примерно солнечные относительные содержания элементов железного пика, дефицит марганца, избыток европия. Однако звезда G251–54 = BD +80°245 не вписывается в эту картину. Это звезда с особым химическим составом: небольшой дефицит магния $[Mg/Fe] \approx -0.2$ и значительный дефицит бария $[Ba/Fe] \approx -1.8$ была обнаружена Карни и др. [25]. Позже BD +80°245 изучалась в ряде работ (см. ссылки в [49]), авторы которых подтвердили особенности ее химического состава. Авторы работы [49] исследовали еще две подобные звезды и выдвинули предположение о неоднородности обогащения Галактики в целом на эпоху $[Fe/H] \approx -2$. В табл. 6 приводим сравнение наших данных по ключевым элементам с данными работы [49] и более поздней [50]. Различия в металличности объясняется, прежде всего, различием в принятой эффективной температуре, но относительные содержания элементов находятся в хорошем согласии, за исключением алюминия. В данной работе и в работе [49] используются резонансные линии алюминия в УФ-области спектра, а в работе [50] — в области 5500–8700 Å. По нашему мнению, расхождение в содержаниях алюминия в большой степени связано с использованием различающихся подходов (методик) определения содержания Al.

4.5. Элементы космохронологии

Одной из фундаментальных задач в проблеме галактического нуклеосинтеза является установление последовательности действия медленных (s) и быстрых (r) процессов нейтронизации вещества, а также определение временной шкалы этих процессов. Содержание элементов, синтезируемых в реакциях присоединения нейтронов, варьируется от звезды к звезде (по отношению к содержанию элементов железного пика). Этот эффект усиливается при переходе к металличностям $[Fe/H] < -2$, где разброс содержания тяжелых элементов превышает порядок величины (см., например, изменение отношений $[Sr/Ba]$, $[Ba/Fe]$ и $[Eu/Fe]$ с изменением металличности в работах [8, 28]). Как правило, содержание тяжелых элементов оценивается по Sr, Ba, La — элементам, представленным достаточным числом неблендированных линий. Указанные

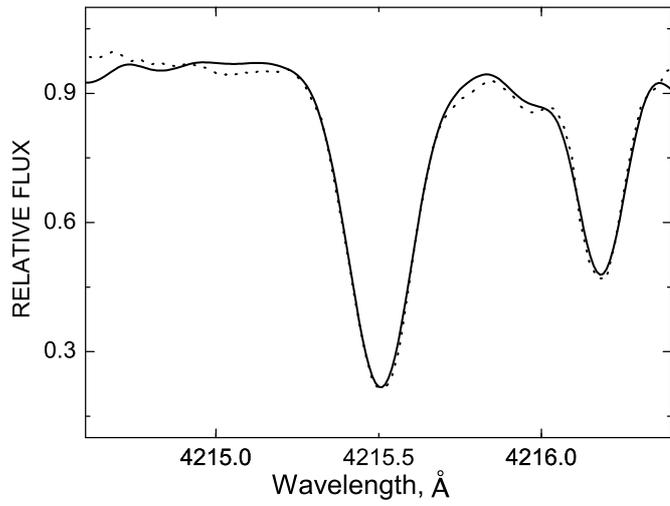


Рис. 3. Профиль линии SrII λ 4215 в спектре G17-21 = HD 148816.

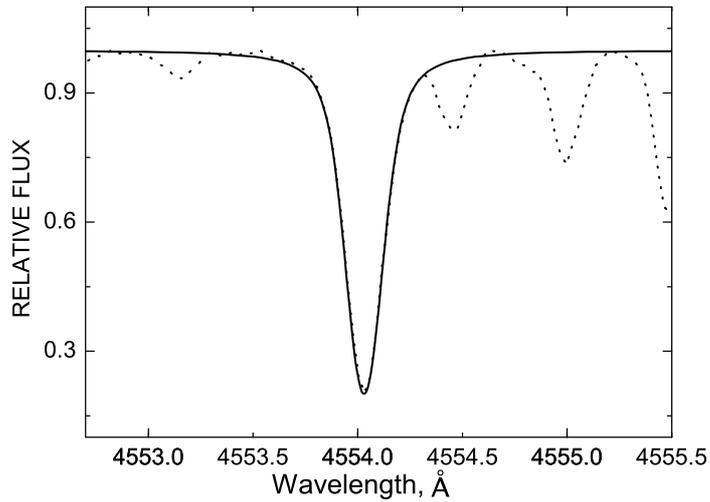


Рис. 4. Профиль линии BaII λ 4554 в спектре G17-21 = HD 148816.

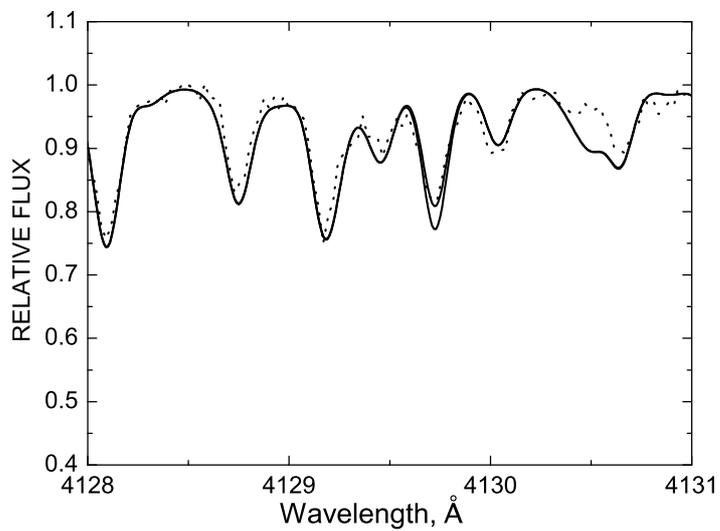


Рис. 5. Профиль линии EuII λ 4129 в спектре G80-15 = HD 22879.

Таблица 5. He-ЛТР содержания Mg, Al, Sr, Ba. В первом столбце около названия элемента указано содержание элементов в атмосфере Солнца. Во 2-й строке, ниже номера звезды, приведено значение ее металличности. Для каждого элемента ниже содержания указана относительная величина [Ei/Fe]

HD/BD	245	+71°31	5256	+29°366	19445	22879	237354	+80°245	115444	144061	148816	188510	215065	215257
[Fe/H]	-0.68	-1.83	-0.39	-0.91	-2.04	-0.78	-0.63	-1.71	-2.91	-0.31	-0.77	-1.52	-0.58	-0.60
Mg, 7.58	7.10	6.05	7.20	6.88	6.09	7.07	7.00	5.80	5.44	7.20	7.13	6.33	7.20	7.14
	0.20	0.30	0.01	0.21	0.55	0.27	0.05	-0.07	0.77	-0.07	0.32	0.27	0.20	0.16
Al, 6.43	5.70	4.40	5.70	5.85	3.71	5.85	6.10	4.60	3.45	6.00	6.15	4.03	6.10	5.23
	-0.05	-0.20	-0.34	0.33	-0.68	0.20	0.30	-0.13	-0.07	-0.13	0.49	-0.88	0.25	-0.60
Sr, 2.90	2.07	1.17	2.32	1.92	1.02	2.07	2.17	0.47	0.06	2.42	2.07	1.03	2.17	2.27
	-0.15	0.10	-0.19	-0.07	0.16	-0.05	-0.10	-0.72	0.07	-0.17	-0.06	-0.35	-0.15	-0.03
Ba, 2.17	1.45	0.42	1.60	1.14	0.35	1.47	1.40	-1.00	-0.06	1.60	1.27	0.71	1.40	1.74
	-0.04	-0.08	-0.18	-0.12	0.22	0.08	-0.14	-1.46	0.68	-0.26	-0.13	0.06	-0.19	0.17

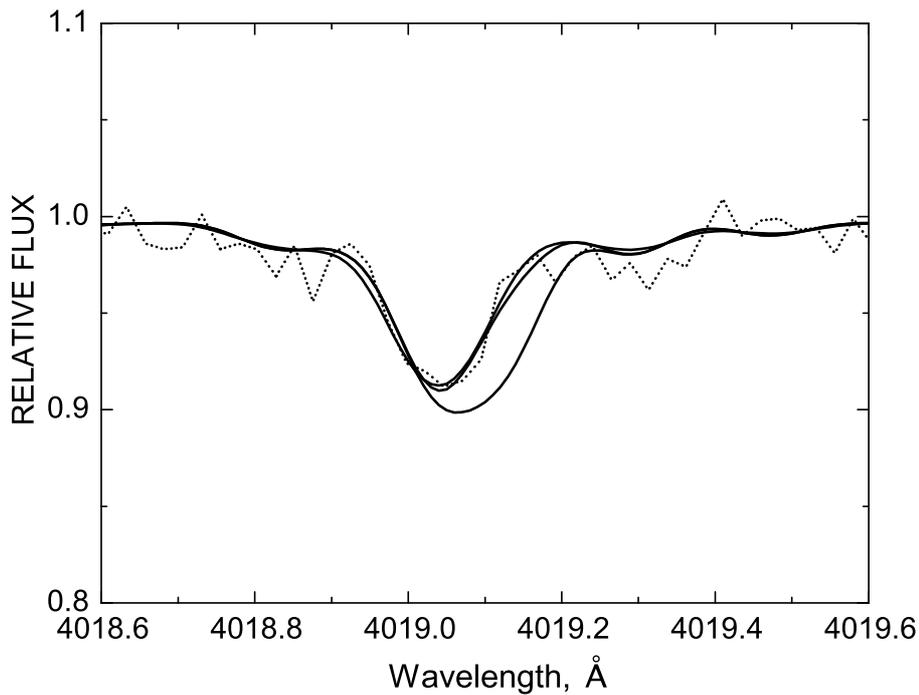


Рис. 6. Профиль линии ThII λ 4019 в спектре G80-15=HD 22879 — прерывистая линия. Сплошной линией нанесены теоретические профили, рассчитанные для набора содержаний Th. Сверху вниз: $\log \epsilon(\text{Th}) = -12.5, -12.0, -11.5$.

элементы синтезируются как в s-, так и в г-процессах, что затрудняет идентификацию механизма формирования дисперсии содержания тяжелых элементов при низких значениях металличности (т.е. на больших возрастах).

Считается, что спектроскопические определения содержаний долгоживущих изотопов в атмосферах старых звезд Галактики позволяют реализовать прямой космохронметрический подход, не связанный с трудностями классических методов

определения возраста. Основные надежды возлагаются на изотопы тория и урана. Наиболее близкий к торью ($Z = 90$) элемент, имеющий стабильные изотопы — висмут ($Z = 83$). Ядра шести элементов, расположенных между висмутом и торием, распадаются так быстро, что посредством медленной нейтронизации вещества (в s-процессе) не удастся “перепрыгнуть” через такой провал в шкале атомных номеров. Поэтому торий, как и уран ($Z = 92$), синтезируется только в г-процессе.

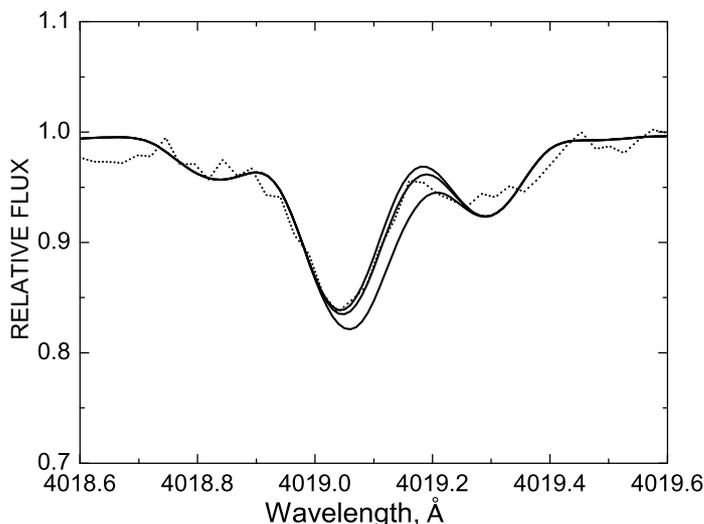


Рис. 7. То же, что и на рис. 6, но для звезды G191-23 = HD 237354.

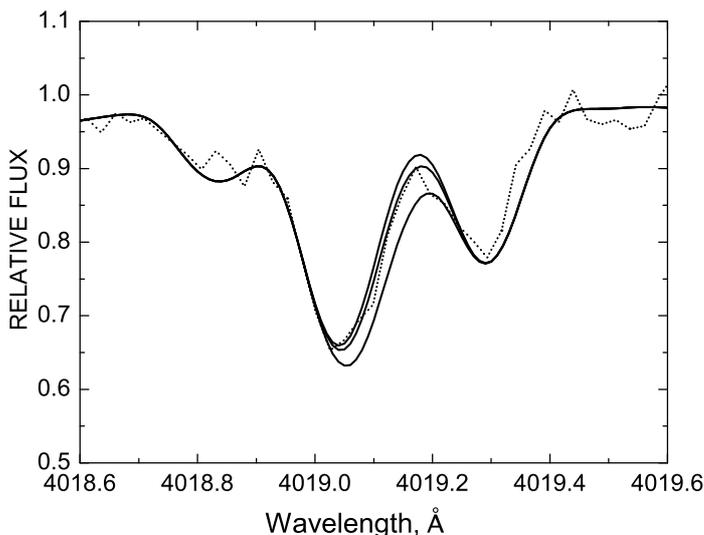


Рис. 8. То же, что и на рис. 6, но для звезды G265-5 = HD 5256.

Еще Фаулер и Хойл [51] рассмотрели случай, когда генерируемое длительным нуклеосинтезом вещество смешивалось с материалом последней вспышки нуклеосинтеза. Если все вещество Солнечной системы обязано одномоментному нуклеосинтезу, то требуется всего 6.6 млрд. лет, чтобы получить современное отношение обилий U^{235} к U^{238} . Если все вещество Солнечной системы образовалось в результате однородного синтеза, интенсивность которого экспоненциально уменьшалась ко времени его окончания 4.7 млрд. лет назад, то начало этого синтеза следует отнести на 14.2 млрд лет назад. Для случая, когда по отношениям U^{235}/U^{238} и Th^{232}/U^{238} достигается одно и то же время

начала однородного синтеза (11.6 млрд. лет), доля образованного в однородном синтезе вещества составляет всего 25%. Дальнейшие усовершенствования модели U/Th хронометра и наблюдаемые вариации содержания других радиоактивных элементов позволили сделать следующие выводы: а) в Солнечной системе существует не менее двух типов первичного вещества различного происхождения; б) Солнечная система изначально была и остается изотопно-гетерогенной. Поэтому космохронометрия вещества Солнечной системы, без привлечения дополнительных соображений о роли различных механизмов синтеза тяжелых ядер, не решает вопрос о возрасте Галактики. Однако при космохимии-

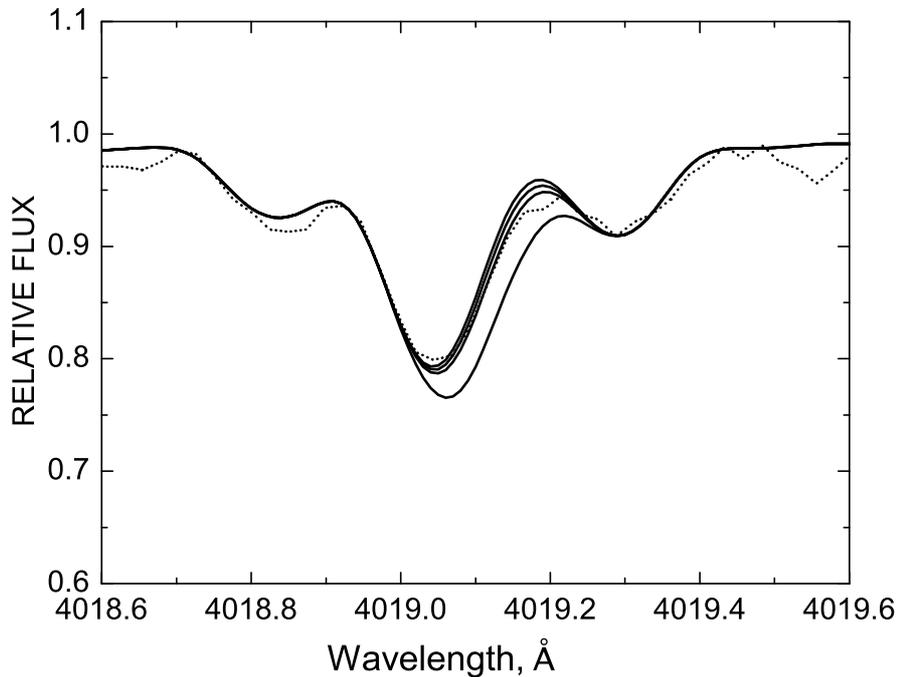


Рис. 9. То же, что и на рис. 6, но для звезды G265-1 = HD 245. Теоретические профили рассчитаны для набора содержаний Th: $\log \epsilon(\text{Th}) = -12.5, -12.2, -12.0, -11.5$.

Таблица 6. Сопоставление результатов для звезды G251-54 = BD +80°245

	Авторы данной статьи	Авторы работы [49]	Авторы работы [50]
T_{eff}	5543	5225	5446
$\lg g$	3.5	3.0	3.3
[Fe/H]	-1.71	-2.07	-1.72
[Mg/Fe]	-0.17	-0.22	-0.43
[Al/Fe]	-0.12	-1.33	+0.66
[Ca/Fe]	-0.24	-0.18	-0.18
[Sc/Fe]	-0.31	-0.42	-0.19
[Cr/Fe]	+0.03	-0.15	+0.34
[Mn/Fe]	-0.22	-0.26	-
[Ni/Fe]	-0.05	-0.09	-0.09
[Sr/Fe]	-0.72	-0.85	-
[Y/Fe]	-0.64	< -1.27	-
[Ba/Fe]	-1.46	-1.89	-1.37

ческих исследованиях Солнечной системы удалось разделить изотопы, синтезируемые в нейтронных потоках принципиально различной интенсивности, так были получены кривые распространенности ядер отдельно для r- и s-процессов.

Изотопический сдвиг уровней у тяжелых элементов намного меньше доплеровской ширины линии. Поэтому возможности спектроскопических исследований содержания изотопов тяжелых элементов в атмосферах звезд ограничены теми случа-

Таблица 7. Содержание европия $\log \epsilon(\text{Eu})$ и тория $\log \epsilon(\text{Th})$, относительное содержание $[\text{Eu}/\text{H}]$ и тория $[\text{Th}/\text{H}]$, а также $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ и $[\text{Th}/\text{Fe}]$ (в атмосфере Солнца $\log \epsilon(\text{Eu})=0.51$ и $\log \epsilon(\text{Th})=0.02$)

HD/BD	245	5256	+29°366	22879	237354	115441	144061	148816	215065
$\log \epsilon(\text{Eu})$	0.30	0.40	0.00	0.20	0.30	-1.14	0.40	0.20	0.30
$[\text{Eu}/\text{H}]$	-0.21	-0.11	-0.51	-0.31	-0.21	-1.65	-0.11	-0.31	-0.21
$[\text{Eu}/\text{Fe}]$	0.47	0.28	0.40	0.47	0.42	1.26	0.20	0.46	0.37
$\log \epsilon(\text{Th})$	-0.20	0.00		-0.20	0.00	-1.62	0.00		
$[\text{Th}/\text{H}]$	-0.22	-0.02		-0.22	-0.02	-1.64	-0.02		
$[\text{Th}/\text{Fe}]$	0.46	0.36		0.56	0.61	1.27	0.29		
Th/Eu	-0.50	-0.40		-0.40	-0.30	-0.48	-0.40		

ями, когда интересующий нас изотоп преобладает над содержанием других изотопов данного элемента. Метод оценки возраста Галактики при помощи ториевого хронометра был предложен в работе [52]. Период полураспада Th^{232} по порядку величины близок к возрасту Галактики, что увеличивает вероятность наблюдения линий этого элемента в спектрах старых звезд. Если предположить, что выборка старых G-карликов представляет пробы хорошо перемешанного вещества, из которого эти звезды сформировались, то обилие радиоактивных изотопов в этих звездах отражает интегральный эффект процессов рождения и распада ядер. Торий в звездных спектрах представлен, в основном, линиями изотопа Th^{232} , одна из наиболее сильных линий которого $\text{ThII } 4019.129 \text{ \AA}$ находится рядом с линией $\text{NdII } 4018.823 \text{ \AA}$. Эти линии имеют близкие потенциалы возбуждения и представляют стадию ионизации, доминирующую в атмосферах холодных звезд. Ионизационные потенциалы Th и Nd также близки. Поэтому анализ спектров методом моделей атмосфер практически не вносит ошибок в определение отношения ядер этих элементов. Наблюдаемая в работе [52] независимость отношения $[\text{Th}/\text{Nd}]$ от возраста, (определенного по изохронам), в рамках модели однократного кратковременного синтеза (с привлечением оценок возраста, выполненных при помощи метода уран-ториевого хронометра для Солнечной системы), приводит к оценке 11.3 млрд. лет, тогда как модель постоянного синтеза в течение жизни Галактики дает оценку сверху в 9.6 млрд. лет. Для экспоненциально снижающегося темпа синтеза шкала возрастов оказалась еще короче. Наблюдениям на 1.4-метровом телескопе [52] были доступны только яркие звезды (из каталога HR), принадлежащие, в основном, к населению диска. Итак, первая попытка применения метода радиоактивного хронометра вне Солнечной системы дала оценку

возраста Галактики, существенно отличающуюся от возраста шаровых скоплений, определяемого по точке поворота. В отличие от уран-ториевого хронометра, ядра пары торий-неодим существенно разнесены по атомному весу, поэтому основная трудность метода, предложенного в работе [52], состоит в необходимости знать историю синтеза неодима. (Торий синтезируется в г-процессе, тогда как неодим — частично в г- и частично в s-процессах). Мы не знаем точно, как на протяжении жизни Галактики соотносились вклады этих процессов в наблюдаемый химический состав. Поэтому наблюдения пары линий тория и неодима (в работе [52] регистрировался небольшой фрагмент спектра), следовало дополнить наблюдениями линий других элементов. Например, барий и стронций синтезируются преимущественно в s-процессе, тогда как европий — в г-процессе. В работе [53], содержание тория в атмосферах малометаллических гигантов гало сравнивалось с содержанием европия, стабильного элемента г-процесса. Относительно солнечного значения, величина Th/Eu в интервале металличности $-2 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.5$ оказалась пониженной, а при $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$, наоборот, в среднем повышенной. Дальнейшие исследования звезд с экстремальным дефицитом металлов показали сильный разброс содержания элементов г-процесса от звезды к звезде. В атмосфере звезды CS 22892-052 обнаружен большой избыток г-процессных элементов [54], картина распространности которых повторяет картину распространности элементов г-процесса в Солнечной системе, масштабированную на низкое значение металличности. Аналогичный эффект наблюдается в случае HD 115444 [55]. Итак, есть указания на существование механизма синтеза элементов г-процесса, универсального в широком диапазоне металличностей, и указания на неэффективность механизмов перемешивания элементов г-процесса в веществе с металличностью $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$. Пока

не объяснены значимые вариации отношения содержания Th/Eu от звезды к звезде, содержание тория не может рассматриваться как независимый индикатор возраста.

Очевидно, что, будучи независимым от моделей эволюции звезд, “космохронологический” метод определения возраста чувствителен к надежности расчетов нуклеосинтеза и точности определяемых из наблюдений содержаний тяжелых, и прежде всего радиоактивных, металлов. Как следует из табл. 7, нам удалось определить содержание Th для 6 звезд, принадлежащих населению тонкого и толстого диска. Исключением является HD 237354, которая может быть звездой собственного гало. Возможно, именно по этой причине мы получили для HD 237354 отношение [Th/Eu] слишком высокое для звезды диска. Однако напомним, что параметры и химический состав этой звезды, вероятно, определены с существенной погрешностью из-за её двойственности [10].

Определения содержания тория в атмосфере HD 115444 выполнялись неоднократно. Например, Хонда и др. [28] с параметрами $T_{\text{eff}} = 4720 \text{ K}$, $\log g = 1.5$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.85$, $\xi_t = 1.70$ получили для этой звезды значение $\log \epsilon(\text{Th}) = -1.97 \pm 0.15$. Используемые в этой работе значения параметров и полученные содержания тория близки к нашим. Вестин и др. [55] для этой же звезды получили отношение $\text{Th}/\text{Eu} = 0.496$ и оценили ее возраст 15.0 Gyr , а в работе Джонсона и Болта [56], это отношение равно $\text{Th}/\text{Eu} = 0.52$, а возраст, соответственно, 11.4 Gyr . Ошибка определения содержания тория при этом составляет 0.07 , что в калибровках возраста влечет за собой ошибку $\pm 4.2 \text{ Gyr}$. Вероятно, ошибка еще больше, поскольку линия тория 4019 \AA , по которой определены содержания, входит в бленду, составляющие которой всегда имеют некоторую неопределенность, так же как и значения сил осцилляторов. Она находится в красном крыле сильной бленды линий $\text{FeI} + \text{NiI}$, включает линии Co I и VII (25% и $\approx 10\%$ вклада в W_λ , оценки вкладов сделаны для атмосферы Солнца [57]) и находится в области линий поглощения молекулы ^{13}CN .

Мы рассчитали содержание тория в атмосфере звезды HD 115444, используя параметры $T_{\text{eff}} = 4800 \text{ K}$, $\log g = 1.6$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.91$, $\xi_t = 1.7$ из работы [10]. Модель атмосферы рассчитана методом стандартной интерполяции по сетке моделей Куруца [30] для металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = -3$. К сожалению, невысокое отношение S/N спектра HD 115444 в области линий тория не позволяет нам надежно оценить содержание этого элемента. Полученное нами содержание тория равно $\epsilon(\text{Th}) = -1.62$ (отношение $\text{Th}/\text{Eu} = -0.48$) неплохо

согласуется с результатами Хонда и др. [28], но не согласуется ни с величиной $\epsilon(\text{Th}) = -2.36$ из работы Джонсона и Болта [56], рассчитанной ими с параметрами модели $T_{\text{eff}} = 4500 \text{ K}$, $\log g = 0.7$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -3.0$, $\xi_t = 2.25$, ни с величиной $\epsilon(\text{Th}) = -2.23 \pm 0.07$, полученной в работе Вестин и др. [55] с параметрами модели $T_{\text{eff}} = 4650 \text{ K}$, $\log g = 1.5$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.90$, $\xi_t = 2.9$. Очевидно, что расхождения в оценках содержания тория обусловлены различием принятых параметров моделей, списков линий и их параметров, а также принятого содержания элементов, входящих в бленду.

Что касается возрастов звезд по хронометрическим парам с участием Th и стабильных ядер, синтезированных в г-процессе, то современные определения, в том числе и наши, имеют большой разброс, в несколько млрд. лет, (см., например, [58, 59]). По этой причине мы не приводим наши оценки, считая их бесполезными.

4.6. Химический состав и кинематика

Изучение кинематики малометаллических звезд поставляет информацию о структуре и эволюции Галактики. Поскольку наша выборка включает звезды с большими собственными движениями, можно было бы ожидать, что все звезды выборки относятся к старому населению. Однако большой диапазон металличности исследуемых звезд и значительная дисперсия относительных величин $[\alpha/\text{Fe}]$ указывает на то, что исследуемая выборка неоднородна и включает звезды, принадлежащие различным галактическим популяциям.

Известно, что металличность каждой из звездных подсистем в Галактике изменяется в довольно широком диапазоне. К примеру, металличность звезд тонкого диска заключена в интервале от солнечных значений (и даже более высоких) до -1 dex , толстого диска до -2 dex (см., например [60]). Следовательно, металличность звезды не может быть надежным критерием при классификации. Единного, необходимого и достаточного, критерия, позволяющего абсолютно уверенно провести индивидуальную идентификацию каждой звезды по принадлежности ее к той или иной подсистеме Галактики, не существует. Нам известны достаточно надежно лишь средние значения и величины дисперсий таких ключевых параметров звездных подсистем, как возраст, скорость, пространственное положение, элементы галактических орбит, металличность и относительные содержания некоторых химических элементов. Любой из перечисленных параметров может использоваться в качестве критерия выделения звезд разных подсистем. Выбирая любой из этих параметров, мы получаем возможность исследовать распределения объектов подсистемы по

другим параметрам. Такими исследованиями установлено, что между подсистемами не существует резких границ, и звезды с одинаковыми некоторыми параметрами могут принадлежать разным подсистемам.

Лишь сочетание кинематических характеристик звезд и их детального химического состава дает возможность определить их принадлежность к тому или иному галактическому населению. Для более надежной стратификации звезд по подсистемам Галактики мы использовали несколько критериев. Основными приняты исключительно кинематические критерии, которые для подсистем толстого диска и гало подробно описаны в работах [61, 62]. Оказалось, что для близких звезд, расположенных в небольшом объеме Галактики вблизи Солнца, наиболее простым и одновременно достаточно надежным критерием является остаточная скорость звезды. В работе [61], посвященной толстому диску, был обоснован критерий разделения звезд толстого диска и гало по остаточной скорости звезды относительно локального центроида: если $V_{\text{lsr}} > 175$ км/с, то мы относим звезду к гало, а если $V_{\text{lsr}} < 175$ км/с — к толстому диску. Конкретная величина этого критерия оптимизировалась условием минимизации численности металлических ($[\text{Fe}/\text{H}] > -1.0$) звезд выборки в выделяемой подсистеме гало и малометаллических звезд в толстом диске. Необходимость такой оптимизации диктуется наличием хорошо видимого дефицита высокоскоростных звезд и шаровых скоплений на распределениях по металличности вблизи $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.0$, свидетельствующем об отсутствии гладкого перехода между подсистемами гало и толстого диска [63].

При идентификации звезд внегалактического происхождения (которые теперь называют “аккрецированными”) мы руководствовались предположением, что звезды, родившиеся в монотонно коллапсирующем едином протогалактическом облаке, не могут находиться на ретроградных орбитах. В этом случае все звезды с обратным обращением вокруг галактического центра можно считать аккрецированными. Но, как видно из пространственного распределения предположительно аккрецированных шаровых скоплений (см. рис. 6 в статье [64]), орбиты их родительских галактик-спутников перед разрушением довольно существенно отличались друг от друга. Поэтому мы включили в группу предположительно аккрецированных звезд все звезды со столь же большими остаточными скоростями, как и у ретроградных. Ретроградные орбиты оказались только у звезд с $V_{\text{lsr}} > 240$ км/с, поэтому именно это значение выбрано в качестве критического. Аккрецированные звезды делают видимой корону Галактики, в которой, как известно, основную массу составляет темная материя.

Звезды с остаточными скоростями 175–240 км/с принадлежат собственному гало Галактики. Эти звезды образовались из вещества единого протогалактического облака и поэтому генетически связаны со звездами дисковых подсистем. Следует заметить, что некоторые авторы (см. например, [65, 66]) объединяют толстый диск и собственное гало в одну подсистему.

Звезды тонкого диска были отобраны согласно модифицированной методике [67], изначально предложенной в работе [68] и вычисляющей вероятности принадлежности звезд подсистемам тонкого и толстого дисков по компонентам их пространственных скоростей. Для определения вероятностей мы использовали уточненные в той же работе [67] по данным Женевско-копенгагенского обзора величины дисперсий каждой из трех компонент пространственной скорости (σU , σV , σW), средние скорости вращения (V_{rot}) и относительные численности звезд в обеих подсистемах на галактоцентрическом расстоянии Солнца. Отметим, что наш кинематический критерий оказался хорошо согласованным с химическим составом звезд, а именно: при его использовании естественным образом минимизируется количество звезд с высоким относительным содержанием магния в тонком диске и с низким содержанием — в толстом. Для контроля использовались вероятностные критерии Бенсби и др [68]. Данные расчетов параметров звездных орбит, компонентов скорости и расстояний до звезд, а также удаленность звезд от плоскости Галактики и принадлежность к типу населения приведены в табл. 8. Рассматриваемые нами звезды с большими пространственными скоростями по кинематическим критериям принадлежат к различным галактическим подсистемам. Остановимся на некоторых исследованных объектах.

Две звезды, HD 144061 и HD 215065, по кинематическим критериям, надежно отнесены к тонкому диску. Их металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.31$ и -0.58 , соответственно, также попадает в диапазон металличности, характерной для звезд тонкого диска, а их относительные содержания $[\text{X}/\text{Fe}]$ соответствуют зависимостям $[\text{X}/\text{Fe}]$ от металличности, полученным для тонкого диска (см. например, [68]). Звезды HD 5256 и HD 22879 с близкой к предыдущей паре металличностью ($[\text{Fe}/\text{H}] = -0.35$ и -0.78) по кинематическим критериям принадлежат подсистеме толстого диска.

Звезда HD 115444 с кинематикой промежуточной между тонким и толстым диском, с очень низкой металличностью, -2.91 , и повышенным содержанием элементов, образующихся в процессах нейтронных захватов, не может быть классифицирована уверенно. Такие звезды, согласно терминологии Фурмана [65] и Граттона и др. [66], принадлежат к населению, промежуточному между

Таблица 8. Расстояние d до звезды, компоненты ее скорости U, V, W, V_{lsr} и параметры орбиты: e — эксцентриситет, Z_{max} — максимальная удаленность от галактической плоскости, R_{max} — максимальный галактоцентрический радиус. В последнем столбце указана принадлежность звезд к галактической подсистеме: 1 — тонкий диск, 2 — толстый диск, 3 — собственное гало, 4 — аккрецированное гало, 1–2 — звезда принадлежит, скорее, тонкому, чем толстому диску, 3–2 — звезда принадлежит скорее собственному гало, чем толстому диску

HD/BD	$d \pm \sigma$	U	V	W	V_{lsr}	e	Z_{max}	R_{max}	
	пк	км/с					кпк		
245	61.58 ± 2.7	-47	-104	-46	108	0.44	0.6	9.0	2
+71°31	165.56 ± 32.4	-171	-231	11	274	0.99	8.8	12.1	4
5256	89.37 ± 6.7	-103	-77	44	125	0.44	1.1	10.9	2
+29°366	56.63 ± 5.5	-63	-72	-52	94	0.34	0.8	9.6	2
19445	38.68 ± 1.7	153	-120	-71	207	0.61	1.5	11.3	3–2
22879	24.35 ± 0.5	-110	-74	-66	133	0.44	1.3	11.2	2
237354	83.96 ± 11.4	32	-138	-123	179	0.49	4.0	8.7	3–2
+80°245	255.75 ± 88.4	-199	-367	226	465	0.69	23.0	28.9	4
115444	281.69 ± 97.0	54	-64	-12	84	0.26	0.3	8.9	1–2
144061	29.11 ± 1.0	-31	-6	-21	26	0.14	0.2	10.3	1
148816	41.08 ± 1.5	80	-263	-87	280	0.90	5.2	9.4	4
188510	39.49 ± 1.8	-167	-105	31	187	0.64	0.8	13.2	3–2
215065	29.37 ± 0.5	-35	-64	12	62	0.27	0.3	9.0	1
215257	42.27 ± 1.7	-68	19	37	78	0.30	1.0	14.0	2

тонким и толстым диском. Однако вычисления по формулам из работ [67] и [68] дают вероятность принадлежности HD 115444 к тонкому диску все же выше, чем к толстому. Одна из гипотез, объясняющих распределение содержаний элементов в атмосфере этой звезды, говорит о том, что подобное распределение могло быть вызвано взорвавшейся на близком расстоянии к протозвездному облаку сверхновой, обогатившей её продуктами взрыва до завершения полного перемешивания галактического вещества [69, 70]. С другой стороны, согласно авторам [61], звезда HD 115444 принадлежит “малометалличному хвосту” толстого диска и, следовательно, может иметь внегалактическое происхождение, т.е. образоваться из вещества, прошедшего иную историю эволюции химического состава. Звезды толстого диска и гало, в пределах ошибок определения, обогащены элементами α -процесса: магнием, в меньшей степени — кальцием, титаном, заметно обогащены европием, при пониженном содержании марганца, что соответствует полученным результатам для звезд толстого диска (см., например, [68]).

Звезды HD 19445, HD 237354 и HD 188510 по нашему критерию относятся к собственному гало,

тогда как критерий Бенсби и др. [68] относит их к толстому диску. Однако большие значения Z_{max} и эксцентриситетов все же склоняют нас считать их звездами гало.

Среди нашей выборки звезд имеются три звезды, BD+71°31, BD+80°245 и HD 148816, которые, судя по их кинематике, являются звездами аккрецированного гало. Первые две имеют низкую металличность. Распространенность элементов в атмосфере BD+71°31 подобна звездам гало. Редди и др. [24], выполнив анализ кинематических характеристик выборки малометаллических звезд, отнесли HD 148816 с умеренным дефицитом металлов, $[Fe/H] = -0.77$, к объектам гало. Мы же относим эту звезду к аккрецированному гало. Вероятно, что HD 148816, имеющая кинематические характеристики аккрецированного гало, а металличность $[Fe/H] = -0.77$, родилась в довольно массивной карликовой галактике-спутнике, которая долго эволюционировала до достижения высокого содержания тяжелых элементов. Отметим, что по металличности HD 148816 близка к Арктуру, который дал название звездному потоку, образовавшемуся, скорее всего, тоже из разрушенной галактики-спутника. Однако по кинематике этот поток при-

надлежит толстому диску. Численное моделирование [71] показывает, что такие орбиты у распадающихся галактик действительно возможны.

Как мы уже отмечали, BD+80°245 среди исследованных звезд гало выделяется аномально низким (для своей металличности) содержанием Mg, Al и Ca. Из табл. 8 видим, что она выделяется и очень большой удаленностью от плоскости Галактики. Кроме того, этой звезде присущ еще и сверхдефицит элемента s —процесса Ba: $[Ba/Fe] = -1.46$, а также заметный дефицит стронция и иттрия. В целом, можем утверждать, что звезда BD+80°245, как по кинематике, так и по химическому составу, относится к звездам аккрецированного гало, образовавшимся вне коллапсирующего протогалактического облака в карликовой галактике—спутнике. Очень низкое относительное содержание элементов α —процесса при низкой металличности свидетельствует, скорее всего, о низкой скорости звездообразования в родительской галактике. Очень высокая орбита BD+80°245 говорит о том, что распад галактики—спутника произошел на большом расстоянии от центра и плоскости нашей Галактики, т.е., о ее малой массе, неспособной даже на таком удалении противостоять приливным силам. Для этой звезды параметр $Z_{\max} > 5$ кпк, что также указывает на принадлежность ее аккрецированному гало, существование которого последние десятилетия является общепринятым фактом (см. [72, 73] и ссылки в этих статьях). HD 148816 также удалена от галактической плоскости. Однако, в отличие от BD+80°245, HD 148816 не обладает дефицитом элементов α —процесса. Все выделенные звезды аккрецированного гало идентифицируются достаточно надежно, о чем свидетельствуют ретроградность их орбит, большие эксцентриситеты и большие Z_{\max} .

5. ВЫВОДЫ

По результатам спектральных наблюдений, выполненных с эшелльным спектрографом НЭС 6-метрового телескопа БТА в диапазоне длин волн 3550–5100 Å со спектральным разрешением $R \geq 50000$, для 14 малометаллических G–K звезд с большими пространственными скоростями определены фундаментальные параметры, металличность и содержания свыше 20 химических элементов, включая тяжелые элементы от Sr до Dy, синтезируемые в s — и r — процессах.

Расчет содержаний Mg, Al, Sr и Ba выполнен с учетом отклонений от ЛТР в заселенности атомных уровней. В целом полученные избытки $[Mg/Fe]$ согласуются с обилием Mg у звезд гало соответствующей металличности.

У 9 звезд, для которых мы определили содержания европия, выявлен его избыток по отношению к

железу, что согласуется с определениями для звезд подобной металличности.

Для звезд выборки, по измеренным по этим же спектрам значениям лучевой скорости и с использованием точных собственных движений и параллаксов Каталога Гиппархос, определены параметры галактических орбит и принадлежность к типу населений Галактики.

По кинематическим параметрам и особенностям химического состава определена принадлежность изученных звезд к типу населений Галактики. В частности, детально изучен химический состав звезды BD+80°245, которая обладает наиболее отчетливо выраженными свойствами аккрецированного гало: помимо сверхдефицита элементов α —процесса и удаленности от плоскости Галактики, этой звезде присущ и сверхдефицит элементов s —процесса Ba ($[Ba/Fe] = -1.46$), а также стронция и иттрия.

Для 6 звезд диска методом синтетического спектра определено отношение содержания долгоживущего радиоактивного изотопа элемента Th к содержанию элемента r —процесса Eu.

БЛАГОДАРНОСТИ

В.Е.П. благодарит Российский Фонд Фундаментальных Исследований (проекты 07–02–00247 а и 09–07–00492 а) и программу ОФН РАН за поддержку программы спектроскопии звезд в УФ–диапазоне на 6-метровом телескопе. Т.В.М. и С.А.К. благодарят за поддержку Швейцарский национальный научный фонд, проект SCOPES № IZ73Z0–128180/1. В.А.М. благодарит за поддержку Министерство образования и науки РФ (проект П 685). В работе использованы данные из баз SIMBAD и SAO/NASA ADS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. W. Carney, D. W. Latham, J. B. Laird, and L. A. Aguilar, *Astronom. J.* **107**, 2240 (1994).
2. P. Magain, *Astronom. and Astrophys.* **209**, 211 (1989).
3. M. Axer, K. Fuhrman, and T. Gehren, *Astronom. and Astrophys.* **291**, 895 (1994).
4. P. Magain and G. Zhao, *Astronom. and Astrophys.* **305**, 245 (1996).
5. С. В. Ермаков, В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук и Г. Жао, *Астрон. ж.* **79**, 972 (2002).
6. O. J. Eggen, D. Lynden Bell, and B. E. Robertson, *Astrophys. J.* **136**, 748 (1962).
7. A. McWilliam, *Annu. Rev. Astronom. Astrophys.* **35**, 503 (1997).
8. I. Roederer, *Astronom. J.* **137**, 272 (2009).
9. M. A. C. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, et al., *Astronom. and Astrophys.* **323**, L49 (1997).

10. V. Klochkova, G. Zhao, S. V. Ermakov, et al., *Astronom. and Astrophys.* **6**, 579 (2006).
11. В. Г. Клочкова и Н. С. Таволжанская, Бюлл. Спец. астрофиз. обсерв. **65**, (2010).
12. P. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996).
13. H. L. Giclas, R. Burnham, and N. G. Thomas, Lowell Proper Motion Survey, Northern hemisphere. The G numbered stars. Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona (1971).
14. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин и И. Д. Найденов, *Оптический журн.* **76**, 42 (2009).
15. В. Е. Панчук, Н. Е. Пискунов, В. Г. Клочкова и М. В. Юшкин, Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. № 169, (2002).
16. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and M. V. Yakorov, *Astrophysical Bulletin* **64**, 411 (2009).
17. М. В. Юшкин и В. Г. Клочкова, Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. № 206 (2005).
18. R. Cayrel, In Proc. 111th IAU Symp., *Calibration of Fundamental Stellar Quantities*, Ed. by D.S. Hayes, L.E. Pasinetti, and A.G. David Philip, (Reidel Publ. Comp. 1985.) p.137.
19. N. E. Piskunov, F. Kupka, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **112**, 525 (1995).
20. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
21. A. J. Cenarro, R. F. Peletier, P. S'anchez-Blázquez, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **374**, 664 (2007).
22. R. G. Gratton, E. Carretta, R. Claudi, et al., *Astronom. and Astrophys.* **404**, 187 (2003).
23. H.-M. Qiu, G. Zhao, M. Takada-Hidai, et al., *Publ. Astronom. Soc. Japan* **54**, 103 (2002).
24. B. E. Reddy, D. L. Lambert and C. Allende Prieto, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **367**, 1329 (2006).
25. B. W. Carney, J. Wright, C. Sneden, et al., *Astronom. J.* **114**, 363 (1997).
26. K. K. Gilroy, C. Sneden, C. A. Pilachowski, and J. J. Cowan, *Astrophys. J.* **327**, 298 (1988).
27. D. L. Burris, C. A. Pilachowski, T. E. Armandroff, et al., *Astrophys. J.* **544**, 2302 (2000).
28. S. Honda, W. Aoki, T. Kajino, et al., *Astrophys. J.* **607**, 474 (2004).
29. A. Alonso, S. Arribas, and C. Martinez-Roger, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 227 (1996).
30. R. Kurucz, ATLAS 9 stellar atmosphere program and 2 km s⁻¹ grid // CD-ROM 13 (1993).
31. M. Carlsson, Uppsala Obs. Rep., **33**, (1986).
32. M. Asplund, N. Grevesse, and A. J. Sauval, ASP Conf. Ser. **336**, 25 (2005).
33. F.-K. Thielemann, D. Argast, F. Brachwitz, et al., *Astrophys. and Space Sci.* **281**, 25 (2002).
34. T. V. Mishenina, C. Soubiran, V. V. Kovtyukh, and S. A. Korotin, *Astronom. and Astrophys.* **418**, 551 (2004).
35. С. А. Коротин, Г. Веллерштейн, Т. В. Мишенина и др., *Методы спектроскопии в современной астрофизике. Материалы конференции, под ред. Л. И. Машонкиной, М. И. Сачкова, изд. "Янус-К", Москва, стр.87 (2007).*
36. R. G. Gratton, E. Carretta, S. Desidera, et al., *Astronom. and Astrophys.* **406**, 131 (2003).
37. B. E. Reddy and D. Lambert, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **391**, 95 (2008).
38. S. M. Andrievsky, M. Spite, S. A. Korotin, et al., *Astronom. and Astrophys.* **481**, 481 (2008).
39. A. Heger and S. E. Woosley, *Astrophys. J.* **567**, 532 (2002).
40. P. E. Nissen, C. Akerman, M. Asplund, et al., *Astronom. and Astrophys.* **469**, 319 (2007).
41. E. V. Belyakova and L. I. Mashonkina, *Astronom. Zh.* **41**, 530 (1997).
42. C. I. Short and P. H. Hauschildt, *Astrophys. J.* **641**, 494 (2006).
43. S. M. Andrievsky, M. Spite, S. A. Korotin, et al., *Astronom. and Astrophys.* **494**, 1083 (2009).
44. V. V. Tsymbal. *STARSP: A software system for the analysis of the spectra of normal stars*. In: *Model Atmospheres and Spectrum Synthesis*. ASP. Conf. Series, **108**, 198 (1996).
45. L. I. Mashonkina and T. Gehren, *Astronom. and Astrophys.* **364**, 249 (2000).
46. T. Bensby, S. Feltzing, I. Lundstrom, and I. Ilyin, *Astronom. and Astrophys.* **443**, 185 (2005).
47. E. F. del Peloso, L. da Silva, G. F. Porto de Mello, and L. I. Arany-Prado, *Astronom. and Astrophys.* **440**, 1153 (2005).
48. H. Nilsson, Z. G. Zhang, H. Lundberg, et al., *Astronom. and Astrophys.* **382**, 368 (2002).
49. I. I. Ivans, C. Sneden, C. N. James, et al., *Astrophys. J.* **592**, 906 (2003).
50. H. W. Zhang and G. Zhao, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **364**, 712 (2005).
51. W. A. Fowler and F. Hoyle, *Ann. Phys.* **10**, 280 (1960).
52. H. R. Butcher, *Nature* **328**, 127 (1987).
53. P. Francois, M. Spite, and F. Spite, *Astronom. and Astrophys.* **274**, 821 (1993).
54. C. Sneden, G. W. Preston, A. McWilliam, and L. Searle, *Astrophys. J.* **431**, L27 (1994).
55. J. Westin, C. Sneden, B. Gustafsson, and J. J. Cowan, *Astrophys. J.* **530**, 783 (2000).
56. J. A. Johnson and M. Bolte, *Astrophys. J.* **554**, 888 (2001).
57. E. Caffau, L. Sbordone, H.-G. Ludwig, et al., *Astronom. and Astrophys.* **483**, 591 (2008).
58. H. Schatz, R. Toenjes, B. Pfeiffer, et al., *Astrophys. J.* **579**, 626 (2002).
59. W. Hayek, U. Wiesendahl, N. Chritlieb, et al., *Astronom. and Astrophys.* **504**, 511 (2009).
60. R. F. G. Wyse, In: *"Chemical Abundances in the Universe: Connecting First Stars to Planets"*, Proceedings IAU Symp., No. 265, Ed. by K. Cunha, M. Spite, B. Barbuy. p.119 (2009).
61. В. А. Марсаков и Т. В. Боркова, *Письма в АЖ* **31**, 577 (2005).

62. В. А. Марсаков и Т. В. Боркова, Письма в АЖ **32**, 545 (2006).
63. В. А. Марсаков и А. А. Сучков, Астрон. ж. **54**, 1232 (1977).
64. Т. В. Боркова и В. А. Марсаков, Астрон. ж. **77**, 750 (2000).
65. K. Fuhrmann, *The First Stars*. Proc. MPA/ESO Workshop, Ed. by A. Weiss, T. G. Abel, V. Hill, Springer, p. 68 (2000).
66. R. Gratton, E. Carretta, F. Matteucci, and C. Sneden, *Astronom. and Astrophys.* **358**, 671 (2000).
67. В. В. Коваль, В. А. Марсаков и Т. В. Боркова, Астрон. ж. **86**, 835 (2009).
68. T. Bensby, S. Feldzing, and I. Lungstrem, *Astronom. and Astrophys.* **410**, 527 (2003).
69. Y.-Z. Qian and G.J. Wasserburg, *Astrophys. J.* **588**, 1099 (2003).
70. H. Ning, Y.-Z. Qian and D. Meyer, *Astrophys. J.* **667**, L159 (2007).
71. M. G. Abadi, M. S. Navarro, and V. R. Eke, *Astrophys. J.* **591**, 499 (2003).
72. K. A. Venn, M. Irwin, M. D. Shetrone, et al., *Astronom. J.* **128**, 1177 (2004).
73. D. Carollo, T. Beers, M. Chiba, et al., *Astrophys. J.* **712**, 692 (2010).

CHEMICAL COMPOSITION OF HIGH PROPER-MOTION STARS BASED ON SHORT-WAVELENGTH OPTICAL SPECTRA

V.G. Klochkova, T.V. Mishenina, V.E. Panchuk, S.A. Korotin, V.A. Marsakov, I.A. Usenko, V.V. Tsymbal

The results of spectroscopic observations made with NES echelle spectrograph of the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences in the wavelength interval 3550–5100 Å with a spectral resolution of $R \geq 50000$ are used to determine the fundamental parameters and atmospheric abundances of more than 20 chemical elements including heavy s- and r-process elements from Sr to Dy for a total of 14 metal-poor G–K-type stars. The abundances of Mg, Al, Sr, and Ba are computed with the allowance for deviations from LTE in the population of atomic levels. The inferred overabundance of europium with respect to iron agrees with the results obtained for stars of similar metallicity. The chemical composition of the star BD+80°245 located far from the Galactic plane is typical of stars of the accreted halo: this star exhibits, in addition to the ultradeficiency of α -process elements, also the ultradeficiency of the s-process element Ba: $[\text{Ba}/\text{Fe}] = -1.46$. The kinematical parameters and chemical composition imply that the stars studied belong to different Galactic populations. The abundance of the long-living element Th relative to that of the r-process element Eu is determined for six stars using the synthetic-spectrum method.

Key words: *stars: abundances*