

Исследование интегральных спектров четырех шаровых скоплений М31.

Маричева М.И., Шарина М.Е. (САО РАН)

Представлены результаты определения металличности, возраста, удельного содержания гелия (Y) и содержаний элементов C, N, Mg, Ca, Mn, Ti, Cr для четырех шаровых скоплений галактики М31: Bol6, Bol20, Bol45 и Bol50. Спектры исследуемых скоплений были получены на 6-м телескопе БТА Российской академии наук в 2020 году с помощью фокального редуктора первичного фокуса SCORPIO-1 (Afanasiev et al. 2005) в режиме спектроскопии с длинной щелью (гризма VPHG1200B, спектральный диапазон 3600-5400 Å, разрешение ~ 5.5 Å, ширина щели 1"). Использовалась методика из статьи Sharina et al. (2020). В рамках метода проводится сравнение наблюдаемых спектров скоплений с синтетическими, рассчитываемыми на основе плоскопараллельных гидростатических моделей атмосфер (Castelli & Kurucz (2003)). Параметры атмосферы задаются теоретической изохроной звездной эволюции. Звезды складываются в суммарный спектр согласно заданной функции масс. Все исследуемые скопления оказались старше 10 млрд. лет. Полученные нами значения металличности $[Fe/H]$ находятся в диапазоне от -0.75 до -1.1 dex. Выполнено сравнение полученных содержаний с таковыми у шаровых скоплений и звезд Галактики и М31 при металличности $[Fe/H] \sim -1$ dex. Для всех объектов подобраны аналоги по металличности, возрасту и Y . Проведено сравнение полученных спектров Bol6, Bol20, Bol45 и Bol50 с интегральными спектрами шаровых скоплений Галактики из Schiavon et al. (2005). Для всех 4 скоплений в литературе имеются данные металличности и возраста, оцененные фотометрическими методами и по спектрам умеренного разрешения в основном методом Ликских индексов. Наши результаты неплохо согласуются с литературными. Для Bol45, Bol6 в литературе имеются содержания химических элементов, полученные методом спектроскопии высокого разрешения Sakari et al. (2016) и Colucci et al. (2014). Сравнение с нашими результатами показывает удовлетворительное согласие. Впервые для скоплений выборки получены значения удельного содержания гелия, а также химсостав для скоплений Bol20 и Bol50.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых скоплений

(1) идентификаторы из Galleti et al. (2004); (2) прямые восхождения и склонения; (3) видимые звездные величины в фильтре V фотометрической системы Джогсона-Казинса; (4) избытки цвета E(B-V) в зв. вел.; (5) лучевые скорости в км/с; (6) проекционные расстояния от центра М31 в кпс; (7) радиусы на половине светимости в пс.

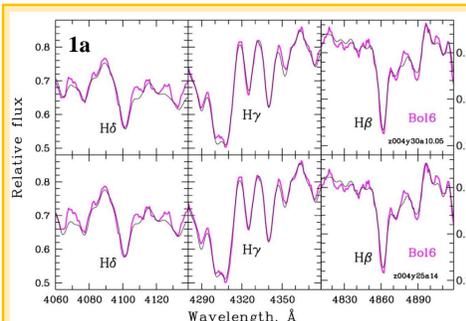
Имя	RA hh:mm:ss	DEC (2000) gr:mm:ss	V зв. вел.	E(B-V) ^a зв. вел.	Vel км/с	R _{M31} ^b кпс	R _h ^c пс
Bol6	00:40:26.47	+41:27:26.6	15.97	0.17	-232.4±6	6.3	1.86
Bol20	00:40:55.26	+41:41:25.3	16.13	0.11	-345.4±5	7.3	3.17
Bol45	00:41:43.11	+41:34:20.1	15.14	0.18	-419.4±6	4.8	2.85
Bol50	00:41:46.27	+41:32:18.4	16.79	0.25	-109.5±6	4.4	--

a- Caldwell et al.2011; b-Caldwell et al.2016; c-Barmby et al. 2007

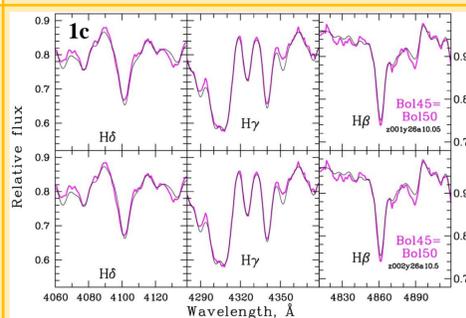
Анализ спектров скоплений методом из Sharina et al. (2020)

Для построения синтетических спектров в данной работе использовались изохроны Bertelli et al. (2008) и Pietrinferni et al. (2004) (далее: B08 и P04). При изменении металличности, возраста и Y , глубина ядер и крыльев каждой из водородных линий изменяются по-разному из-за различного вклада звезд разной светимости и спектральных классов. Увеличение содержания гелия приводит к возрастанию глубины водородных линий в области ядра. С уменьшением возраста точка поворота Главной последовательности смещается в сторону более высоких температур. В результате, все водородные линии синхронно усиливаются в ядре и крыльях.

Скопления Bol45 и Bol50 имеют практически идентичные спектры. Поэтому их химсостав и используемые для построения модельных спектров изохроны подобраны одинаковыми.



Верх - B08: Z=0.004, Y=0.30, logAge=10.05; Низ - P04: Z=0.004, Y=0.25, Age=14Gyr



Верх - B08: Z=0.002, Y=0.26, logAge=10.15; Низ - P04: Z=0.002, Y=0.25, Age=12Gyr

Верх - B08: Z=0.001, Y=0.26, logAge=10.05; Низ - P04: Z=0.002, Y=0.25, Age=10.5Gyr

Таблица 2. Сравнение результатов анализа спектров с литературными данными

В таблице 2 подведен итог настоящего исследования интегральных спектров 4 скоплений в М31 и выполнено сравнение с литературными данными. Полученные содержания элементов, $[Fe/H]$ и возраст для всех 4х скоплений близки к литературным оценкам. Bol6, Bol45 показывают более высокое содержание $[C/Fe]$ по сравнению с данными S16, полученными в инфракрасном диапазоне. Различия могут быть вызваны тем, что спектральный диапазон в инфракрасной полосе H, использованный этими авторами, чувствителен в основном только к излучению звезд вершины ветви красных гигантов, для которых характерны пониженные $[C/Fe]$ из-за измерения химсостава в процессе эволюции звезд (см., например, Sharina & Shimansky (2020) и ссылки в этой статье). Отличия в $[Mg/Fe]$ и $[Ca/Fe]$ между полученными и литературными исследованиями интегральных спектров в оптическом диапазоне можно объяснить различиями в применяемых методиках у разных авторов и, возможно, недостаточным S/N в спектрах высокого разрешения.

Объект	Bol6				Bol45				Bol50		Bol20	
	Ref	Ours	S16 _{IR}	S16 _{op}	C14	C111	Ours	S16 _{IR}	C14	C111	Ours	C111
Age (млрд.лет)		11.2 ±1			12.5 ±2.5	11 ±1		12.5 ±2.5			11 ±1	13.5 ±2
Y		0.3			0.26			0.26			0.26	
[Fe/H] (dex)		-0.75 ±0.1	-0.69 ±0.05	-0.73 ±0.02	-0.73 ±0.1	-0.5 ±0.1	-1.1 ±0.1	-0.88 ±0.07	-0.94 ±0.1	-0.9 ±0.1	-1.1 ±0.1	-0.8 ±0.1
[C/Fe] (dex)		0.1 ±0.15	-0.32 ±0.05		0.26 ±0.15	0.26 ±0.15		-0.41 ±0.07		0.26 ±0.15		0.1 ±0.15
[N/Fe] (dex)		1.45 ±0.2	1.35 ±0.04		0.7 ±0.2	0.7 ±0.2		0.9 ±0.1		0.7 ±0.2		1.35 ±0.2
[O/Fe] (dex)		0.3 ±0.04	0.32 ±0.04		0.3 ±0.12	0.3 ±0.12		0.33 ±0.12		0.3 ±0.12		0.3 ±0.12
[Mg/Fe] (dex)		0.55 ±0.1	0.43 ±0.05	0.46 ±0.1	0.34 ±0.03	0.6 ±0.1	0.22 ±0.15	0.04 ±0.15	0.6 ±0.1	0.6 ±0.1	0.5 ±0.1	0.5 ±0.1
[Ca/Fe] (dex)		0.48 ±0.1	0.31 ±0.07	0.26 ±0.02	0.25 ±0.05	0.45 ±0.2	0.2 ±0.13	0.22 ±0.04	0.45 ±0.2	0.45 ±0.2	0.45 ±0.1	0.45 ±0.1
[Mn/Fe] (dex)		-0.5 ±0.2				-0.4 ±0.2			-0.4 ±0.2	-0.4 ±0.2		-0.5 ±0.2
[Ti/Fe] (dex)		0.15 ±0.2	0.43 ±0.07	0.17 ±0.05	0.2 ±0.05	0.2 ±0.2	0.2 ±0.14	0.16 ±0.06	0.2 ±0.2	0.2 ±0.2		0.2 ±0.2
[Cr/Fe] (dex)		0.0 ±0.2				-0.05 ±0.2			-0.05 ±0.2	-0.05 ±0.2		0.05 ±0.2
[α/Fe] (dex)		0.44 ±0.25	0.37 ±0.05	0.3 ±0.05	0.3 ±0.05	0.45 ±0.25	0.3 ±0.15	0.29 ±0.15	0.45 ±0.25	0.45 ±0.25		0.41 ±0.25

Ours – значения, полученные в данной работе. S16_{IR} – Sakari et al. (2016) по спектрам высокого разрешения в инф-диапазоне. S16_{op} – Sakari et al. (2016) по спектрам высокого разрешения в оптическом диапазоне.

C14 – Colucci et al. (2014) по спектрам высокого разрешения в оптическом диапазоне. C111 – Caldwell et al. (2011) по спектрам умеренного разрешения в оптическом диапазоне.

Сравнение химсостава исследуемых скоплений с химсоставом шаровых скоплений Галактики и М31 с такой же металличностью

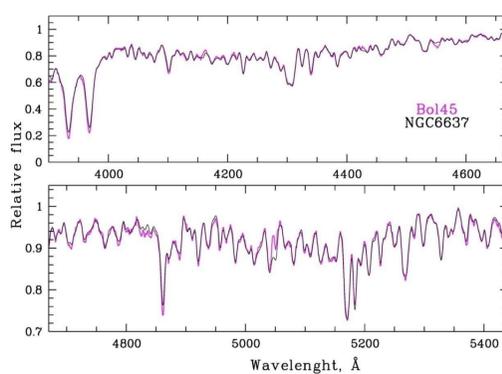
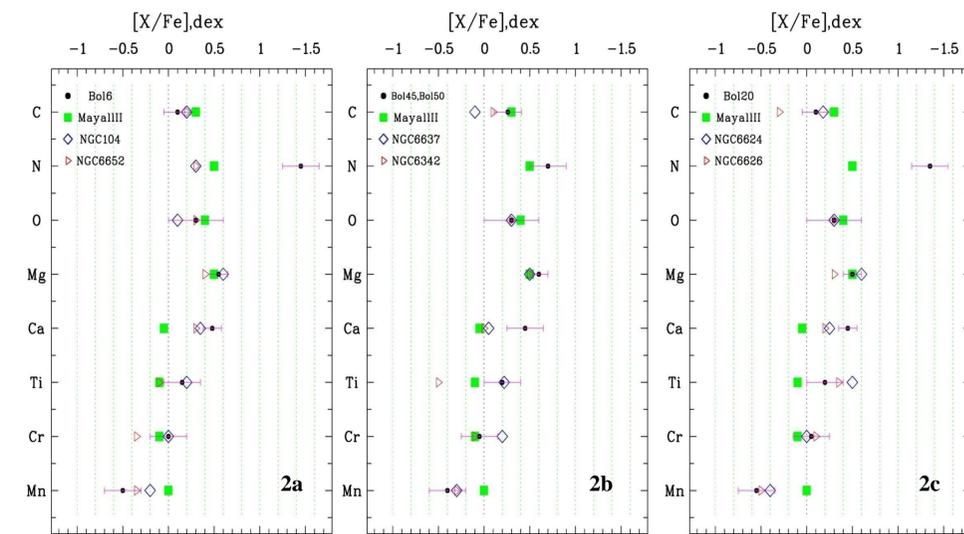
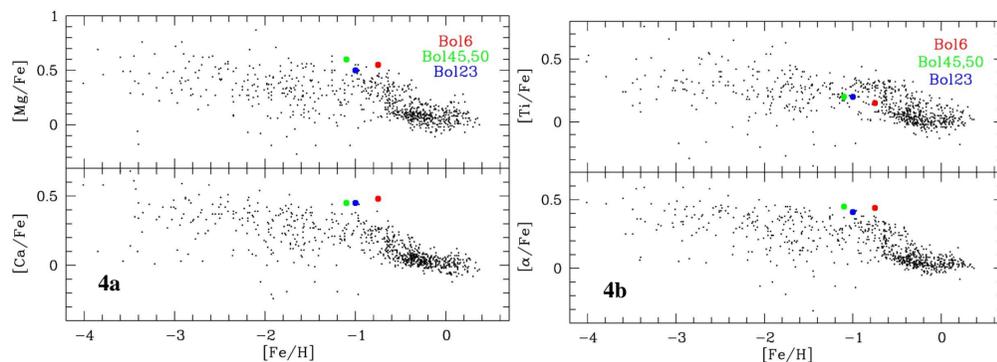


Рисунок 3. Сравнение спектров Bol45 и NGC6637

На рисунках 2a-с черными значками показаны содержания для исследуемых скоплений. Остальными значками показаны содержания для скоплений сравнения с металличностью $[Fe/H] \sim -1.0$ dex. Значения содержаний элементов для скоплений Галактики и Mayall II в М31 взяты из работ Sharina et al. (2020, 2018). Содержание азота у Bol6 и Bol20 (Табл.2, рис.2a-с) выше, чем у скоплений Галактики и М31 с подобным $[Fe/H]$. Не удалось подобрать скопления Галактики и М31 с имеющимися спектрами (Schiavon et al. (2005)), полностью соответствующих по возрасту содержанию гелия и химсоставу исследуемым скоплениям. Менее интенсивные водородные линии в спектре NGC6637 по сравнению с таковыми у Bol45 и Bol50 (см. рис. 3) могут быть объяснены более низким содержанием гелия у NGC6637.

Сравнение химсостава исследуемых скоплений с химсоставом звезд поля Галактики и М31



На рисунках 4a-b черными точками нанесены содержания звезд поля Галактики из Vann et al. (2004), крупными кругами содержания для исследуемых скоплений М31.

Полученные содержания (см. табл.2, рис.2a-с) соответствуют таковым в моделях химической эволюции Галактики под воздействием сверхновых типа II (SNeII) и гиперновых (Kobayashi et al. (2006), см. их рис. 32) в диапазоне по металличности $[Fe/H] = -1.1 \dots -0.75$ dex.

Четыре исследованных скопления расположены на расстоянии от центра М31 в проекции на небо: $4.4 < R_{M31} < 7.3$ кпс. Их металличность ниже, чем средняя металличность красных гигантов гало М31 на данном расстоянии от центра М31 (Gilbert et al. (2020) и ссылки в этой статье). Среднее содержание альфа-элементов у звезд внутреннего гало М31 ($[α/Fe] = 0.45 \pm 0.09$ dex) выше, чем у звезд внешнего гало ($[α/Fe] = 0.3 \pm 0.16$ dex). Полученные значения $[α/Fe]$ у четырех объектов соответствуют среднему значению $[α/Fe]$ звезд внутреннего гало на данном расстоянии от центра М31.

Литература:

- V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astron. Lett.* 31, 194 (2005).
 K. M. Gilbert, J. Wojno, E. N. Kirby, et al., *AJ* 160, 41 (2020).
 M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval and P. Scott, *ARAA* 47, 481 (2009).
 C. Kobayashi, H. Umeda, K. Nomoto, et al., *ApJ* 653, 1145 (2006).
 P. Barmby, D. E. McLaughlin, W. E. Harris, et al., *AJ* 133, 2764 (2007).
 A. Pietrinferni, S. Cassisi, M. Salaris and F. Castelli, *ApJ* 612, 168 (2004).
 G. Bertelli, L. Girardi, P. Marigo and E. Nasi, *A&A* 484, 815 (2008).
 C. M. Sakari and G. Wallerstein *MNRAS* 456, 831 (2016).
 N. Caldwell, R. Schiavon, H. Morrison, et al., *AJ* 141, 61 (2011).
 R. P. Schiavon, J. A. Rose, S. Courteau and L. A. MacArthur, *ApJS* 160(1), 163 (2005).
 M. E. Sharina, V. V. Shimansky and N. N. Shimanskaya, *Astrophys. Bull.* 75, 247 (2020).
 M. E. Sharina, V. V. Shimansky and D. A. Khamidullina, *Astrophys. Bull.* 73, 318 (2018).
 J. E. Colucci, R. A. Bernstein and J. G. Cohen, *ApJ* 797, 116 (2014).
 M. E. Sharina and V. V. Shimansky, *Proceedings of the All-Russian Conference "Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century"*, Special Astrophysical Observatory of RAS Eds: I.I. Romanyuk, I.A. Yakunin, A.F. Valeev, D.J. Kudryavtsev, 267 (2020).
 S. Galleti, L. Federici, M. Bellazzini, et al., *A&A* 416, 917 (2004).
 K. A. Vann, M. Irwin, M. D. Shetrone, et al., *AJ* 128(3), 1177 (2004).

Примечания:

- ¹ Массовые доли водорода X, гелия Y, и металлов Z для Солнца даны в статье Asplund et al. (2009). $X+Y+Z=1$.
² Содержание железа в солнечных единицах $[Fe/H] = \log(N_{Fe}/N_H) - \log(N_{Fe}/N_H)_{\odot}$ (где N_{Fe}/N_H – отношение концентраций железа и водорода по числу атомов, или по массе).
³ Содержание элементов альфа-процесса в таблице было вычислено как среднее значения содержаний элементов Mg, Ca и O. В статьях Sakari et al. (2016) (S16) и Colucci et al. (2014) (C14) $[α/Fe]$ вычислено как среднее содержаний элементов Ca, Si и Ti.