

Моделирование спектров суммарного излучения внегалактических шаровых скоплений

Маричева М.И., Шарина М.Е., Шиманский В.В. (САО РАН)

Представлены результаты моделирования спектров суммарного излучения шаровых скоплений в соседней гигантской спиральной галактике М31 и ее окрестностях с целью определения возраста и химсостава скоплений по результатам наблюдений на БТА.

В докладе будут изложены основы методики анализа спектров (Шарина, Шиманский и Шиманская 2020; см. также Larsen et al. 2022, Colucci et al. 2017, Sakari et al. 2016). В отличие от других работ, метод Шариной и соавторов опирается на изучение вклада звезд горизонтальной ветви в спектры суммарного излучения скоплений.

Мы показываем, как свойства звезд Горизонтальной ветви влияют на интенсивность линий водорода серии Бальмера и как это влияет на подбор изохроны звездной эволюции при моделировании спектра.

Мы сравниваем полученные данные с таковыми у шаровых скоплений и звезд нашей Галактики, а также с имеющимися в литературе для некоторых объектов выборки.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМЫХ СКОПЛЕНИЙ

Спектры объектов были получены на 6-ти метровом телескопе **БТА САО РАН** в 2020-2023 годах. Наблюдения проводились со **SCORPIO-1** (Afanasiev et al. (2005)) в режиме спектроскопии с длинной щелью. Гризма **VRHG1200B**, спектральный диапазон **3600- 5400 Å**, разрешение $\sim 5.5 \text{ Å}$.

Объект	Галактика	RA(2000); DEC(2000)	[Fe/H](dex)	T(Gyr)	Y
Vol317	M31/N205	00:39:55.28; +41:47:46.10	-2.02	12.6	0.26
Vol9	M31/N205	00:40:30.70; +41:36:55.70	-1.5	10.0	0.30
Vol11	M31/N205	00:40:31.88; +41:39:17.00	-1.5	12.6	0.26
MCGC5	M31	00:35:59.70; +35:41:03.60	-1.55	10.0	0.26
PA53	M31	01:17:58.40; +39:14:53.13	-1.8	11.2	0.30
EXT8	M31	00:53:14.53; +41:33:24.50	-2.8	11.0	0.25
M 33 33	M33	01:34:02.87; +30:43:20.70	-1.5	10.0	0.30
[CS82] C39	M33	01:34:49.62; +30:21:55.50	-2.3	12.6	0.26
Hodge III	N147	00:33:15.20; +48:27:23.10	-2.25	12.6	0.30
PA147-1	N147	00:32:35.30; +48:19:48.00	-2.1	10.0	0.26
FJJ-III	N185	00:39:03.80; +48:19:57.50	-1.5	10.0	0.30

Основные характеристики исследуемых скоплений. (колонки 4-6) металличность, возраст и Y, полученные в данной работе. Ошибки: $\sigma_{[\text{Fe}/\text{H}]} \sim 0.1 \text{ dex}$; $\sigma_{\text{Age}} \sim 1 \text{ Gyr}$; $\sigma_Y \sim 0.01$

МЕТОДИКА: вычисление синтетических спектров суммарного излучения (IL)

Метод разработан и подробно описан **Sharina, Shimansky & Shimanskaya 2020 (2020AstBu..75..247S)**. Для расчета синтетических спектров $I(\lambda)$ с помощью программы CLUSTER. Для моделирования необходимы химсостав и теоретические изохроны звездной эволюции, задающие параметры атмосфер звезд: T_{eff} и $\log(g)$.

Синтетические спектры отдельных звезд ($S(\lambda, m)$) с начальной массой (m), задаваемой изохроной звездной эволюции, рассчитывались в приближении локального термодинамического равновесия (ЛТР) на основе плоскопараллельных гидростатических моделей атмосфер **Castelli & Kurucz (2003)**, относительно солнечных содержаний **Grevesse & Sauval (1998)**. Синтетические спектры отдельных звезд складываются согласно заданной функции масс ($\phi(m)$):

$$I(\lambda) = \int_{m1}^{m2} S(\lambda, m) \phi(m) dm$$

В данной работе используются функция масс **Chabrier (2005)** и изохроны **Bertelli et al. (2008)**, **Pietrinferni et al. (2004)** (далее: **B08**, **BASTI**).

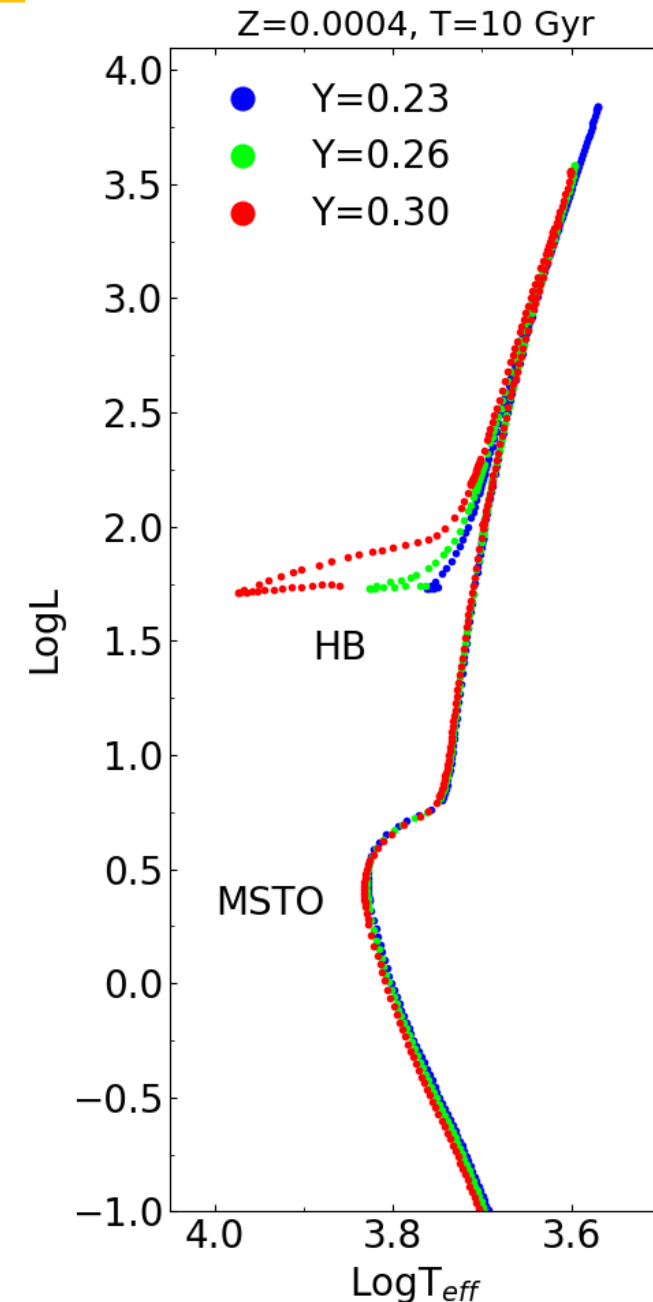
Массовые доли водорода X , гелия Y , и металлов Z для Солнца даны в статье **Asplund et al. (2009)**. $X+Y+Z=1$. Содержание железа в солнечных единицах $[\text{Fe}/\text{H}] = \lg(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}) - \lg(N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}})_{\odot}$ (где $N_{\text{Fe}}/N_{\text{H}}$ – отношение концентраций железа и водорода по числу атомов, или по массе).

МЕТОДИКА: подбор изохроны для расчета IL спектра

Мы используем изохроны **B08** по следующим причинам:

- 1) Они включают все интересующие нас стадии звездной эволюции;
- 2) В изохронах **B08**, Y принимает значения 0.23, 0.26 и 0.30. Этот параметр, наряду с металличностью и возрастом, оказывает значительное влияние на светимость и температуру звезд горизонтальной ветви. Например, при $Z=0.0004$ и возрасте 10 Gyr: самые голубые звезды ГВ имеют $T_{\text{maxHB}} \sim 7 \cdot 10^3$ K при $Y=0.23$ и $T_{\text{maxHB}} \sim 13 \cdot 10^3$ K - при $Y=0.30$;
- 3) Химический состав звезд в этих моделях дается по отношению к солнечным содержаниям из **Grevesse & Sauval (1998)**, то есть в той же шкале содержаний, на которой основан и код ATLAS 9.

Изохроны **BASTI**, также основанные на солнечных содержаниях **Grevesse & Sauval (1998)**. Однако удельное содержание гелия связано с металличностью следующим соотношением: $dY/dZ \sim 1.4$.



МЕТОДИКА: отбор точек изохрон при моделировании спектра

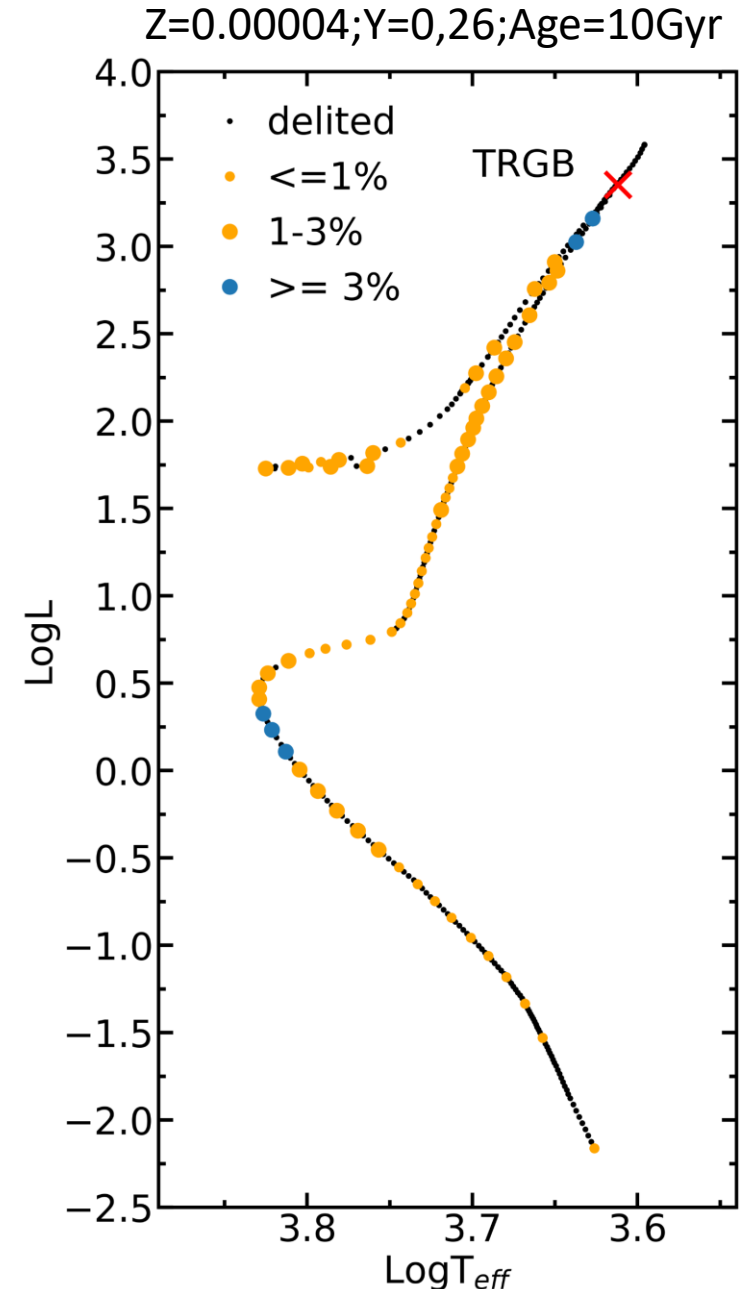
Ограничения параметров сетки моделей **Castelli & Kurucz (2003)**:
 $0.0 < \log(g) < 5.0$; $3400\text{K} < T_{\text{eff}} < 45000\text{K}$ при любых $[\text{Fe}/\text{H}]$.

Дискретность определения массы: $\Delta M = 10^{-4} M_{\odot}$

Отбор точек изохроны происходит в два этапа:

- 1) Исключаются точки, параметры которых отличаются от соседних менее, чем $\Delta \log(g) = 0.06$; $\Delta \log T_{\text{eff}} = 0.01$;
- 2) Рассчитывается поток чернотельного излучения на $\lambda = 5000\text{\AA}$ (с учетом T_{eff} , радиуса звезды и шага по начальной массе). Вычисляется вклад точки в полное излучение и исключаются точки с вкладом $< 0.2\%$

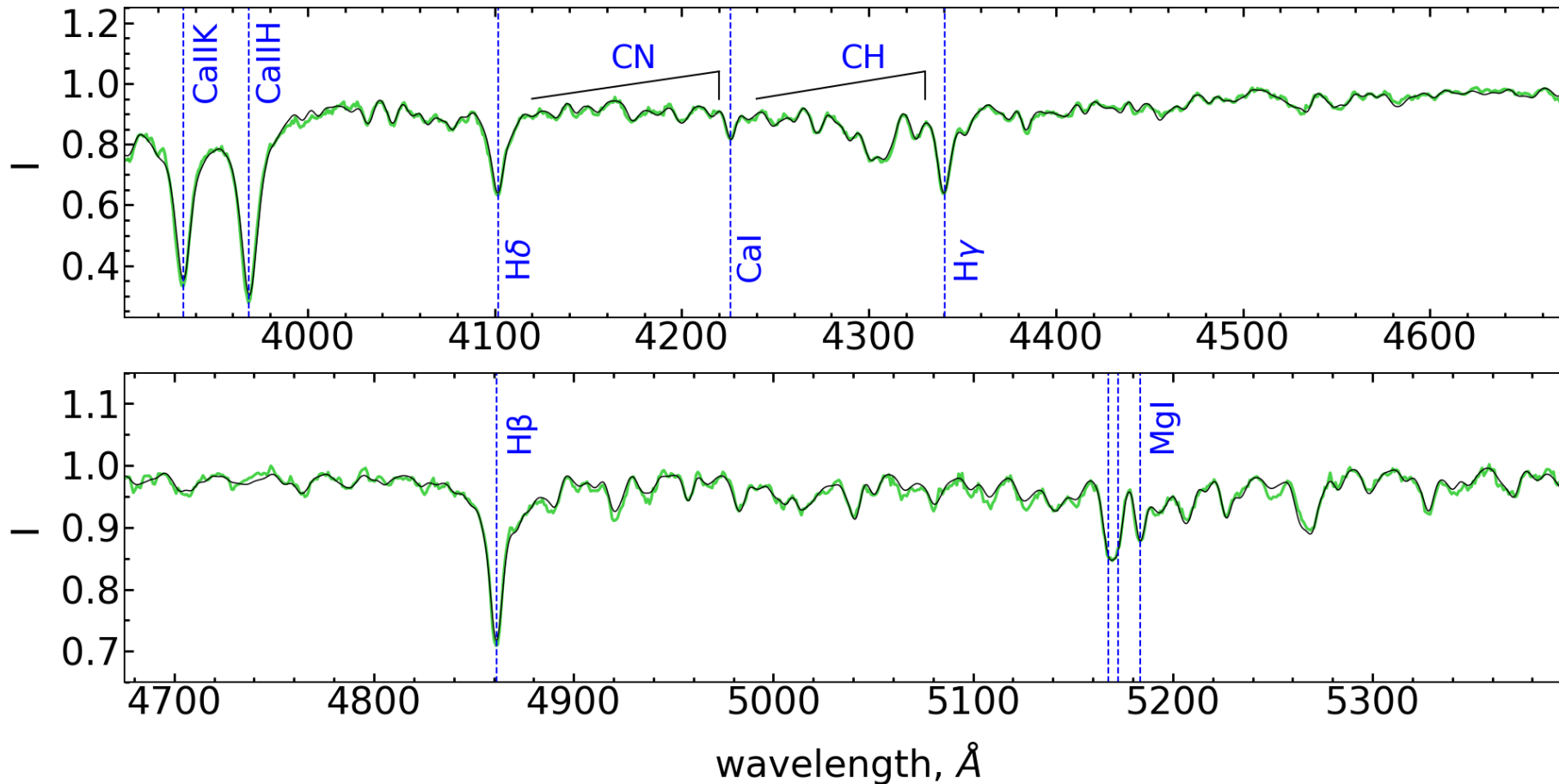
Для точек с вкладом $> 5\%$, вклад уменьшается до 5% путем масштабирования шага по массе.



МЕТОДИКА: определение возраста, Y и содержаний элементов

Для определения возраста, Y и содержаний элементов выполняется попиксельное сравнение модельного спектра и наблюдаемого. По форме и глубине водородных линий Бальмеровской серии $H\delta$, $H\gamma$, $H\beta$, а так же с учетом баланса линий кальция CaI 4226\AA и линий K и H $CaII$ (3933.7\AA и 3968.5\AA) подбирается изохрона.

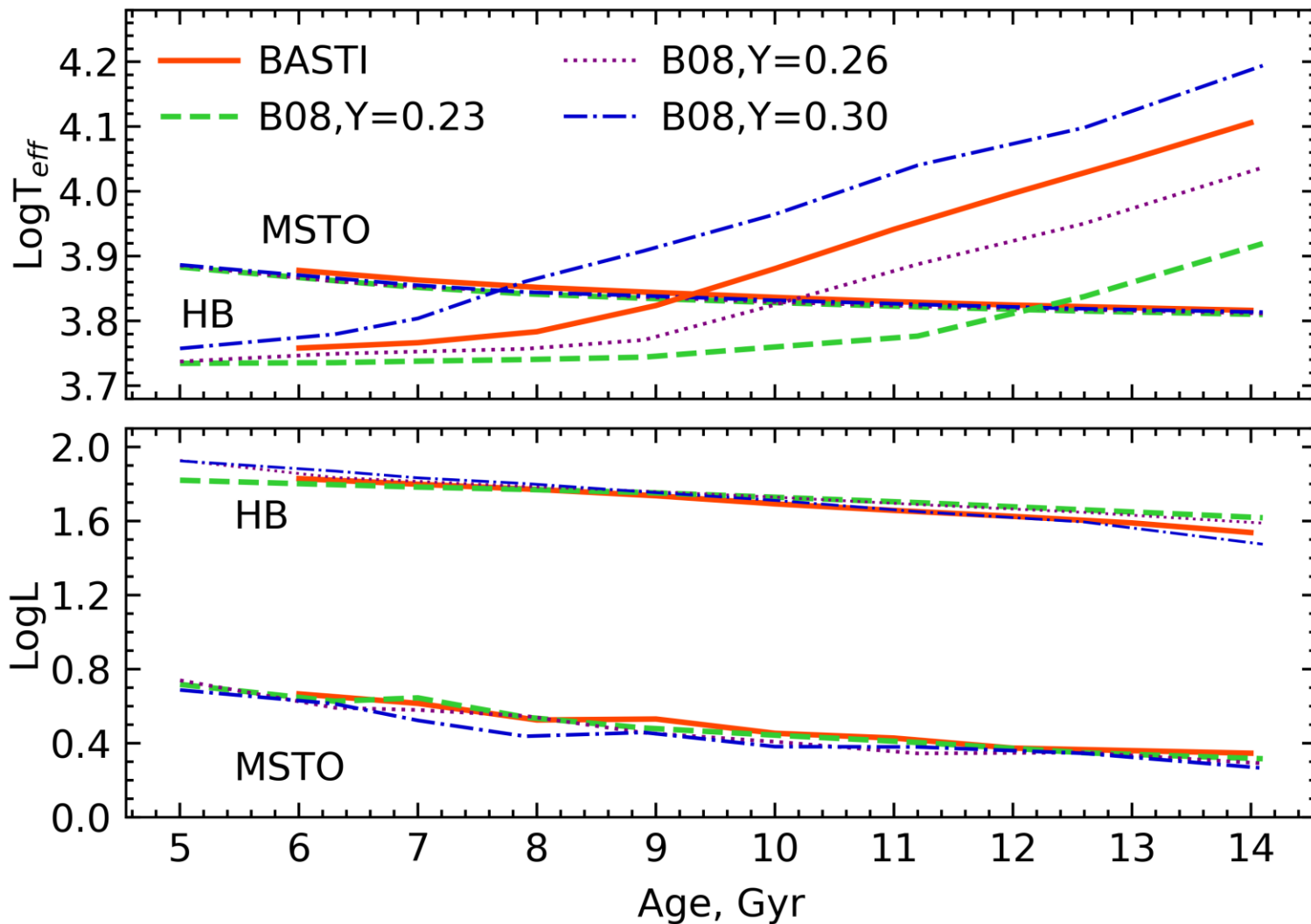
Пример приближения наблюдаемого спектра **Vol9** (зеленая линия) модельным спектром (черная линия):



Параметры изохроны:
 $Z=0.001, Y=0.30, T=10\text{Gyr}$

О ВЛИЯНИИ ЗВЕЗД ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕТВИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ БАЛЬМЕРОВСКИХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ В СПЕКТРАХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

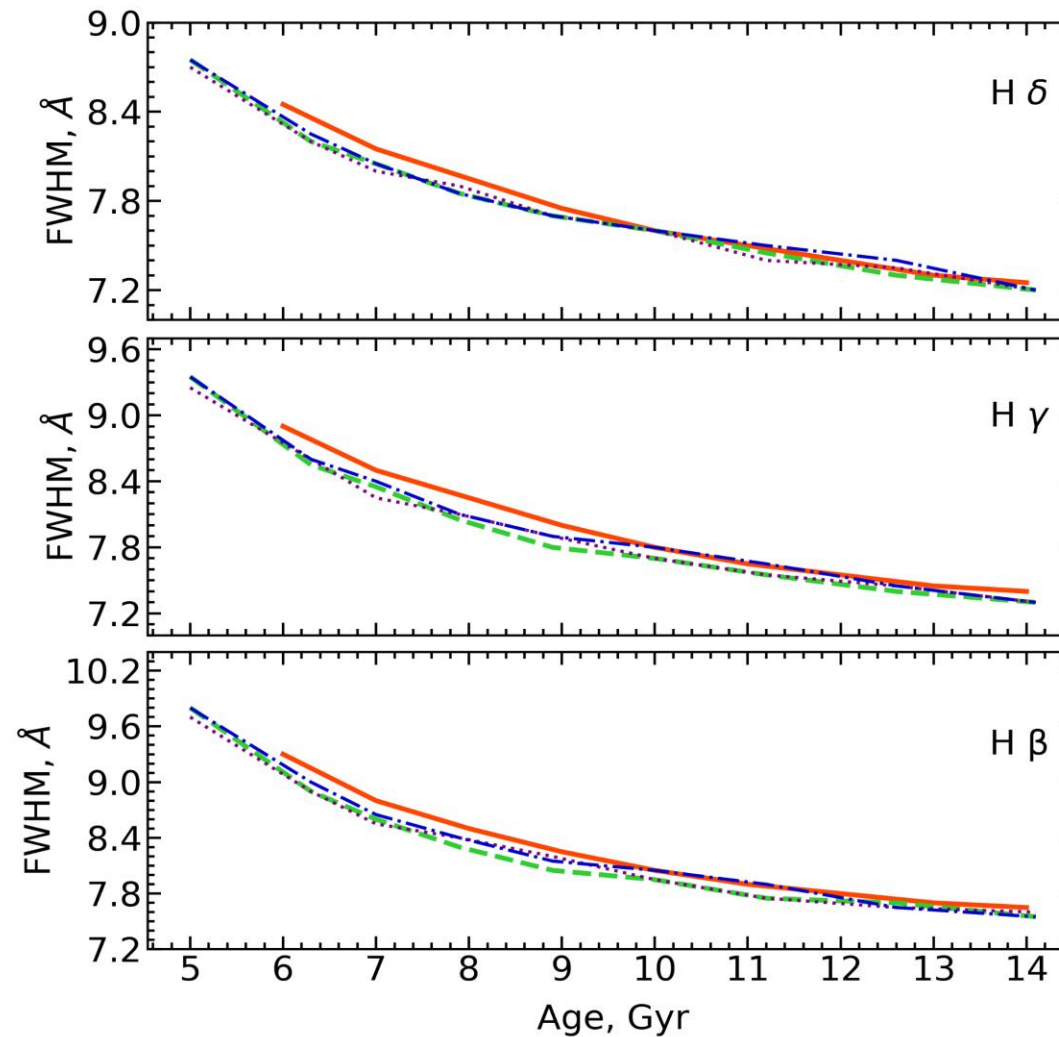
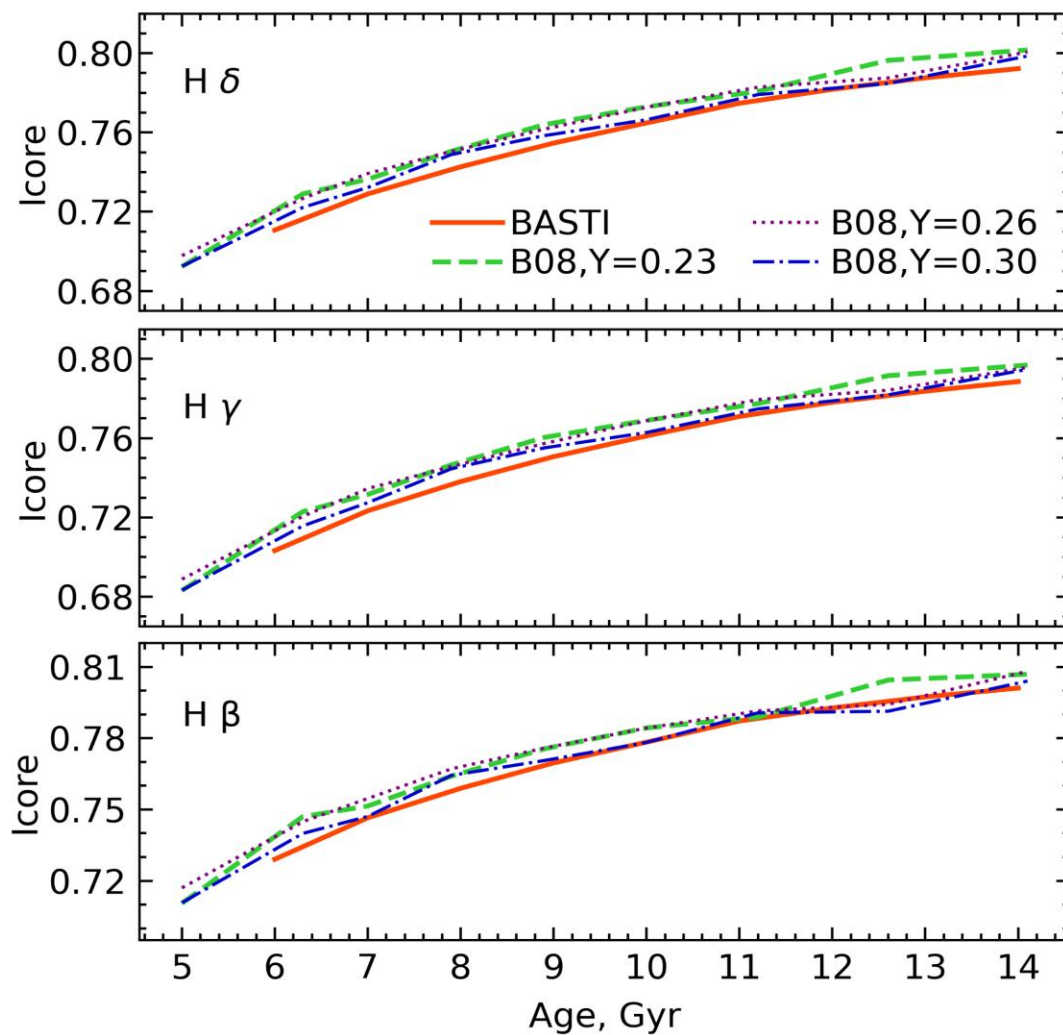
Изменение в теоретических изохронах с возрастом эффективной температуры (верхняя панель) и светимости (нижняя панель) звезд точки поворота (MSTO) и самых горячих звезд горизонтальной ветви (HB):



B08: $Z=0.0004$ ($\text{Fe}/\text{H}=-1.74$ dex)
BASTI: $Z=0.0003$ ($\text{Fe}/\text{H}=-1.79$ dex,
 $Y=0.245$)

О ВЛИЯНИИ ЗВЕЗД ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕТВИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ БАЛЬМЕРОВСКИХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ В СПЕКТРАХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

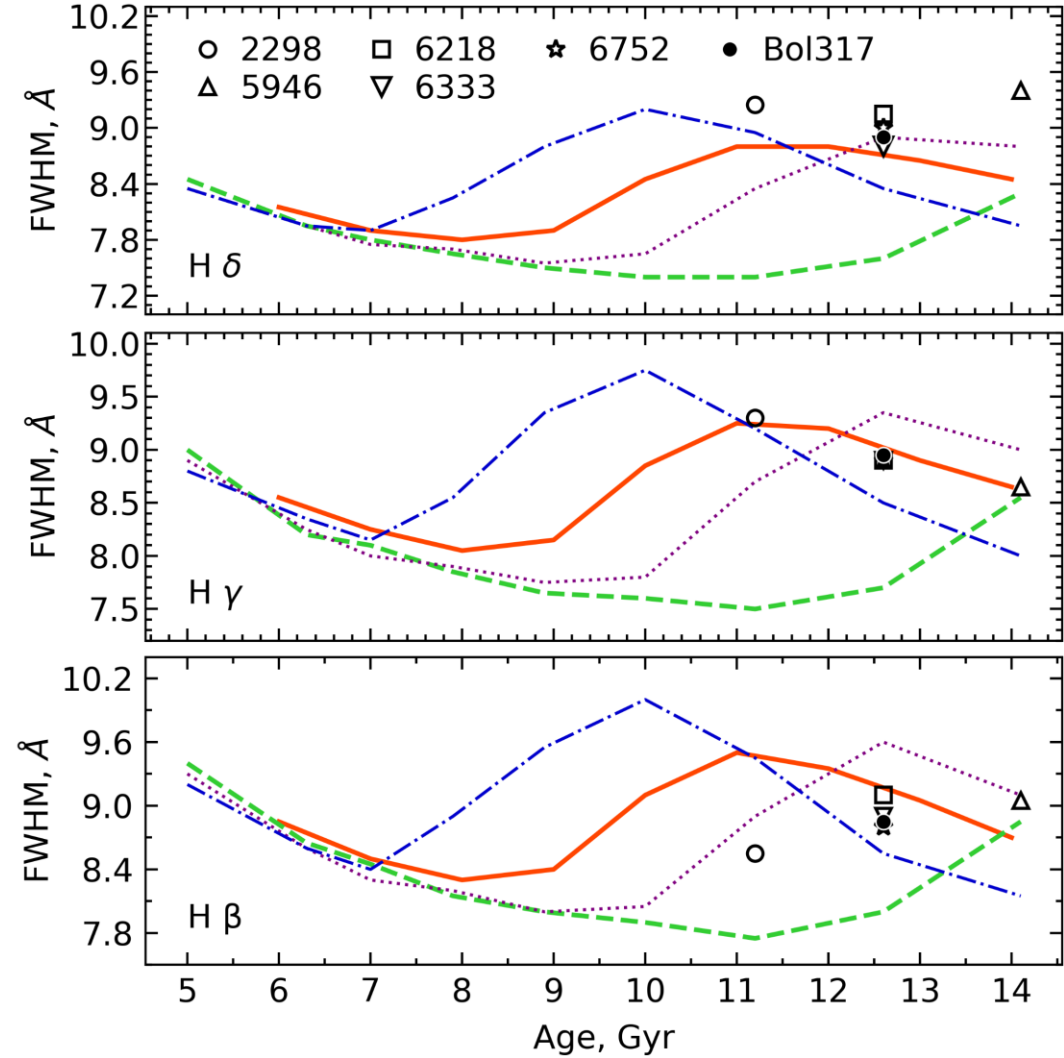
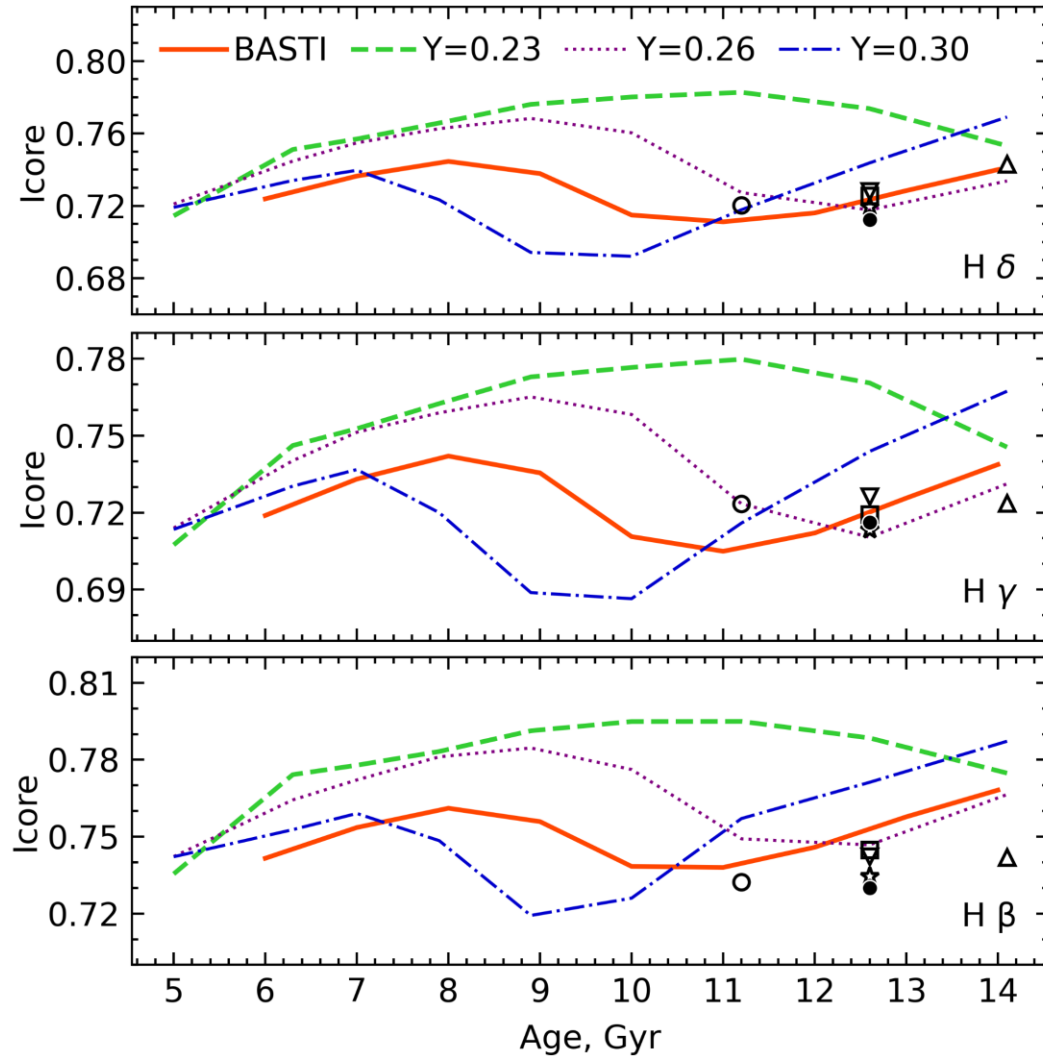
Изменение I_{core} (глубина) и FWHM линий $H\delta$, $H\gamma$, $H\beta$ в синтетических суммарных спектрах скоплений **БЕЗ** учета звезд горизонтальной ветви:



B08: $Z=0.0004$; BASTI: $Z=0.0003, Y=0.245$; Разрешение спектров (FWHM) = 5.5 \AA

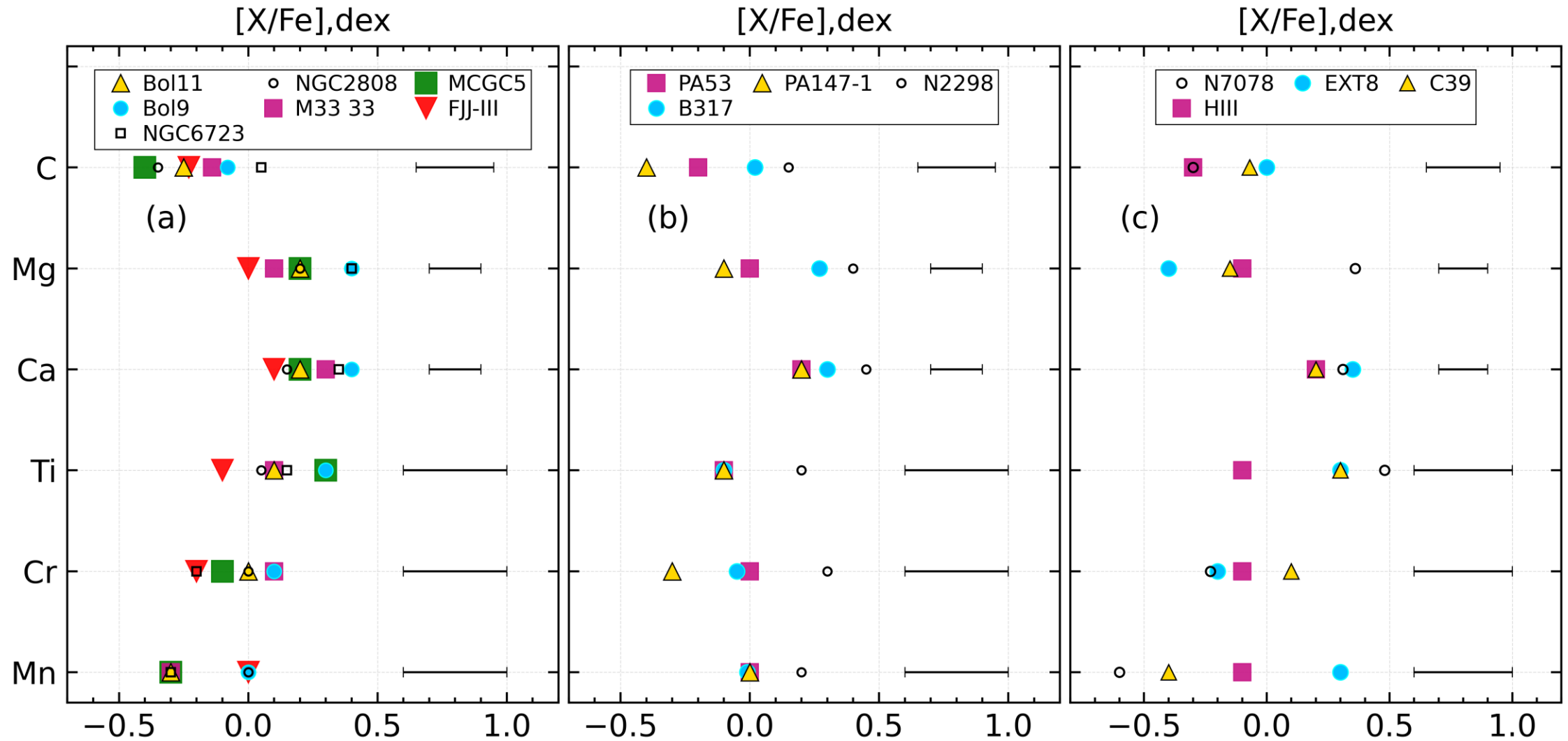
О ВЛИЯНИИ ЗВЕЗД ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕТВИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ БАЛЬМЕРОВСКИХ ЛИНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ В СПЕКТРАХ ШАРОВЫХ СКОПЛЕНИЙ

Изменение I_{core} (глубина) и FWHM линий H δ , H γ , H β в синтетических суммарных спектрах скоплений с учетом звезд горизонтальной ветви:



B08: $Z=0.0004$; BASTI: $Z=0.0003$, $Y=0.245$; Разрешение спектров (FWHM) = 5.5 \AA

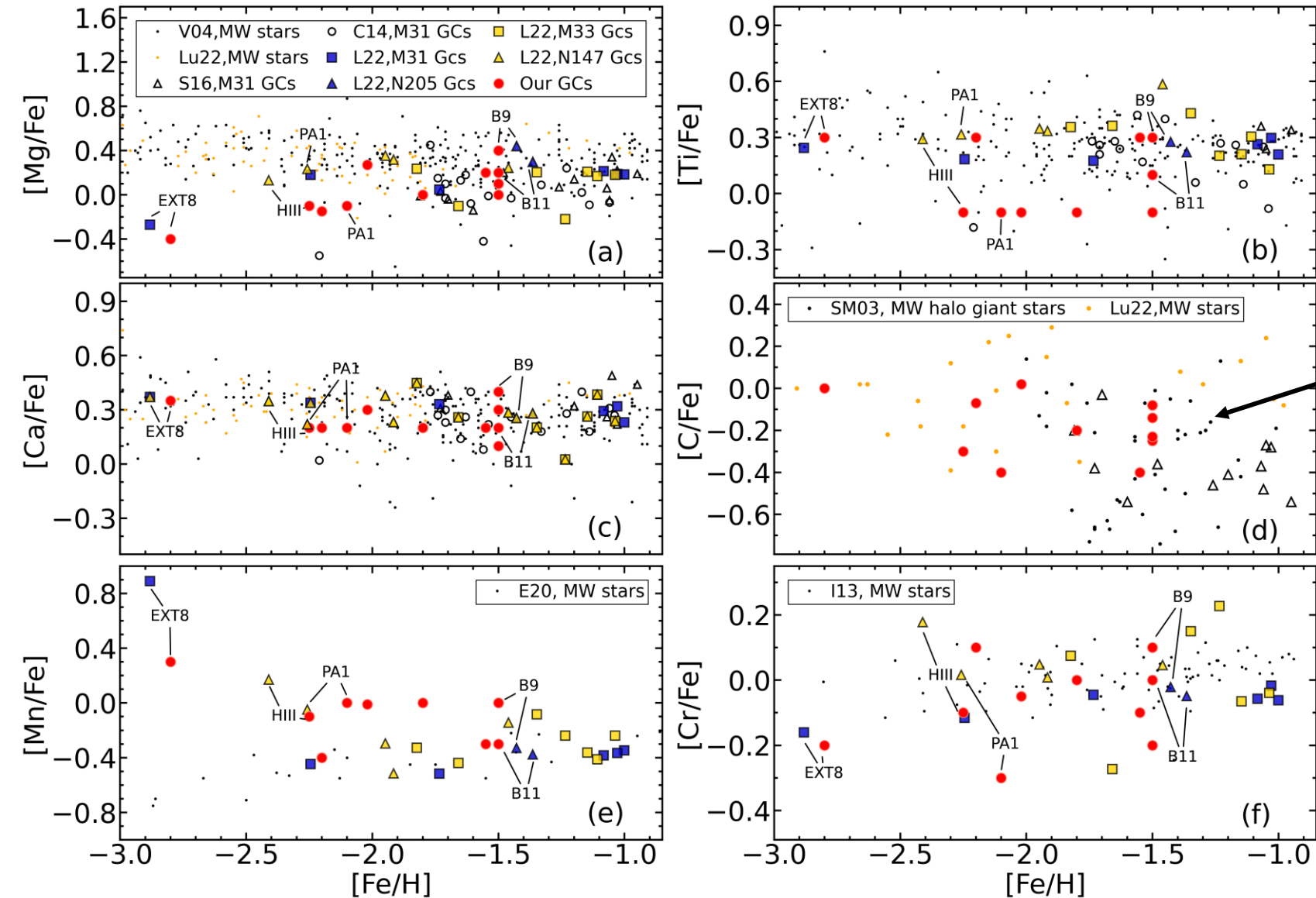
Сравнение химсостава исследуемых скоплений с химсоставом шаровых скоплений Галактики



Химсостав Галактических ШС из Sharina et al. (2018,2020)

a) $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1.5 \text{ dex}$;
 b) $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -2.0 \text{ dex}$;
 c) $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.0 \text{ dex}$

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА СПЕКТРОВ С ЛИТЕРАТУРНЫМИ ДАННЫМИ



Сравнение полученных содержаний (красным) с содержаниями для ШС в окрестностях М31 и звездами поля нашей Галактики:

$$\Delta_{\text{our-S16}} \sim 0.25 \text{ dex}$$

Шаровые скопления М31:
 S16: Sakari et al.2016 (ик-диапазон Н)
 C14: Colucci et al.2014
 L22: Larsen et al.2022
Звезды поля Галактики:
 V04: Venn et al.2004
 E20: Eitner et al.2020
 I13: Ishigaki et al.2013
 SM03: Smith & Martell 2003
 Lu22: Lucchesi et al.2022

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам наблюдений на БТА в 2020-2023 годах выполнен анализ спектров суммарного излучения одиннадцати низкометаллических шаровых скоплений в окрестностях **M31**. Определены удельные содержания гелия Y , возрасты и содержания Fe , Ca , Mg , C , Mn , Ti и Cr . Измеренные нами значения **[Fe/H]** находятся в диапазоне: **-2.8...-1.5 dex**, возраст – старше **10 млрд.лет**.
2. Изучено влияние свойств звезд горизонтальной ветви на интенсивность и форму линий водорода серии Бальмера в спектрах скоплений.
3. Найдены Галактические аналоги для объектов исследования с $[Fe/H] = -2.3.. - 1.5$ dex, которые имеют похожие спектры из библиотеки Schiavon et al. 2005, и следовательно, похожие возраст, химсостав и Y .
4. Полученные содержания элементов показывают удовлетворительное согласие с данными для ШС в M31 и звездами поля Галактики. Содержания **[C/Fe]** в среднем выше содержаний ШС в M31 из **Sakari et al.2016** ($\Delta_{our-S16} \sim 0.25$ dex), что объясняется тем, что в спектры Sakari et al. 2016 основной вклад вносили звезды RGB.

Наша работа вносит вклад в изучение процессов эволюции и обогащения химическими элементами галактики M31 и ее спутников.