

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В АТМОСФЕРАХ МЕДЛЕННО ВРАЩАЮЩИХСЯ А ЗВЕЗД

А.М. Романовская¹

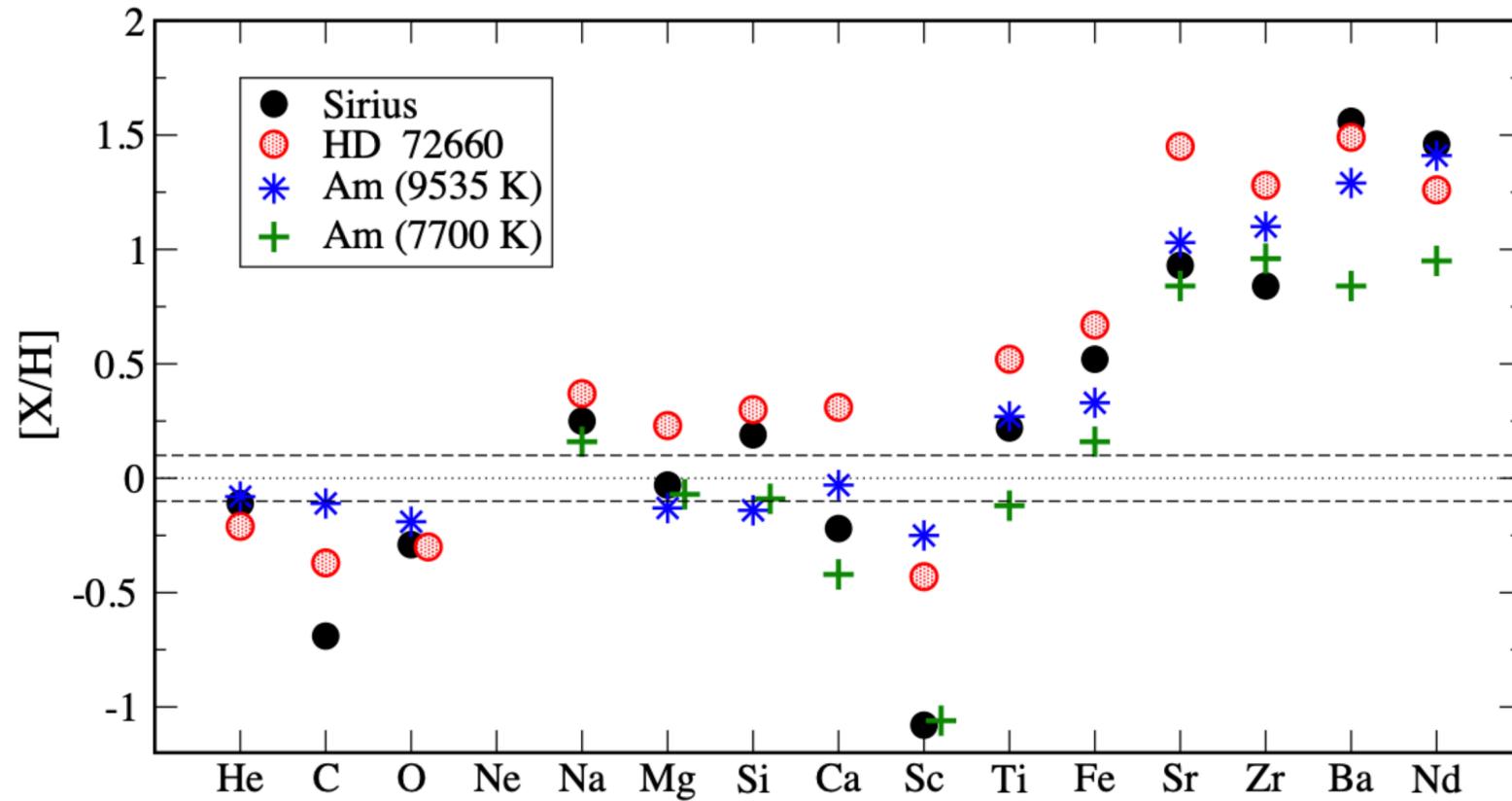
Т. А. Рябчикова¹, Ю.В. Пахомов¹, С.А. Коротин², Л.М. Машонкина¹, Т.М. Ситнова¹

¹Институт Астрономии РАН, Москва, Россия

²Крымская Астрофизическая обсерватория, Научный, Крым

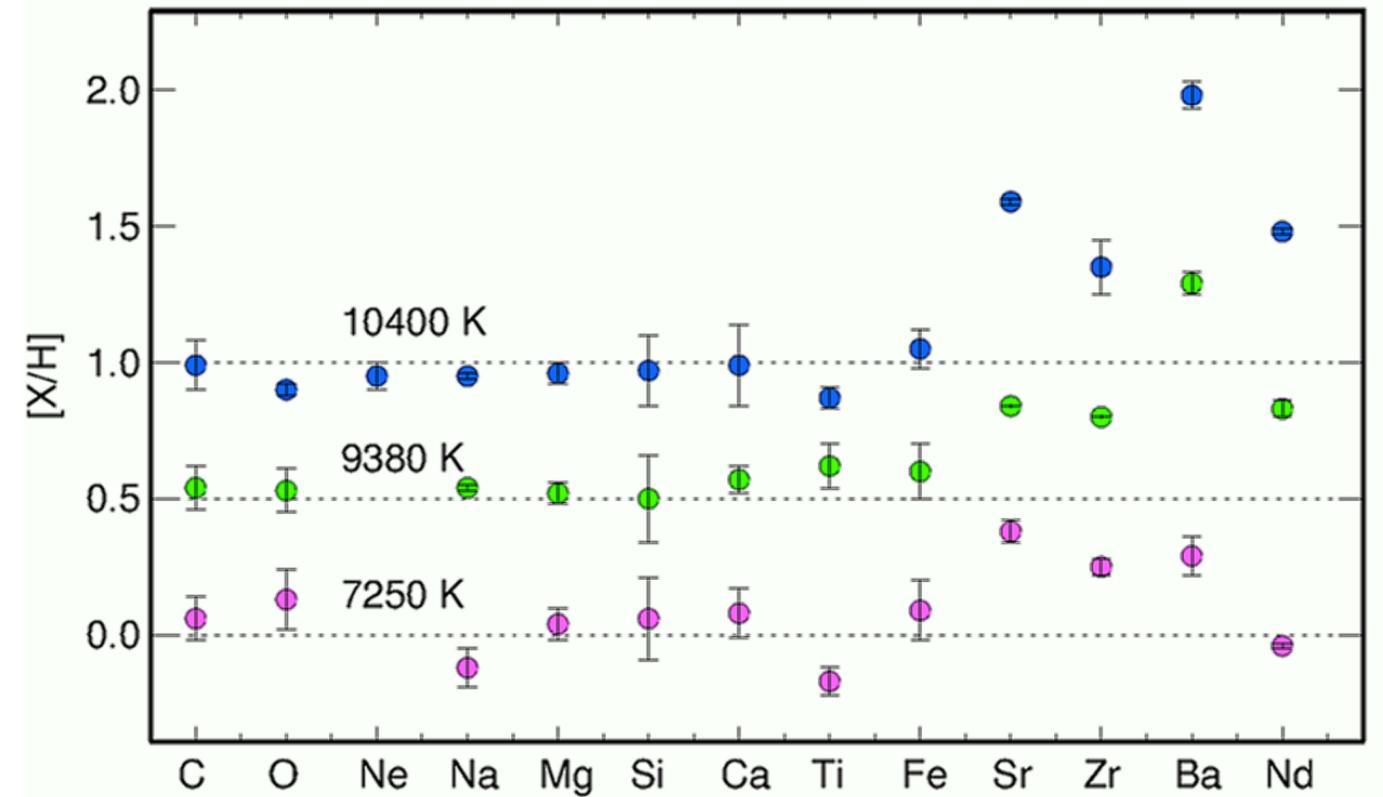


МЕТАЛЛИЧНЫЕ АМ ЗВЕЗДЫ



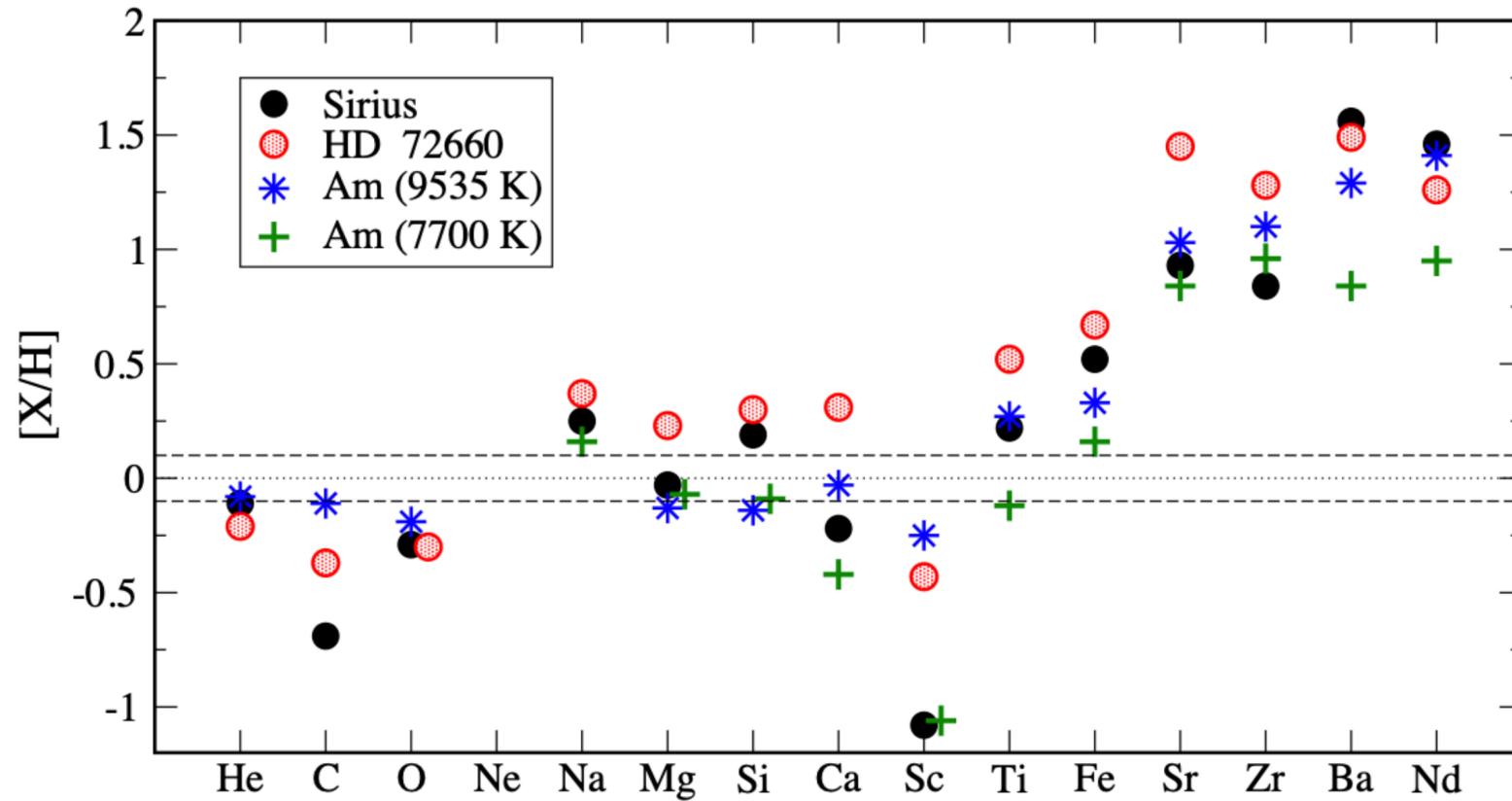
Повышенное содержание элементов
железного пика
Ca+Sc дефицит
 $v \sin i < 100$ км/с
Большинство Am звезд - двойные

НОРМАЛЬНЫЕ А ЗВЕЗДЫ

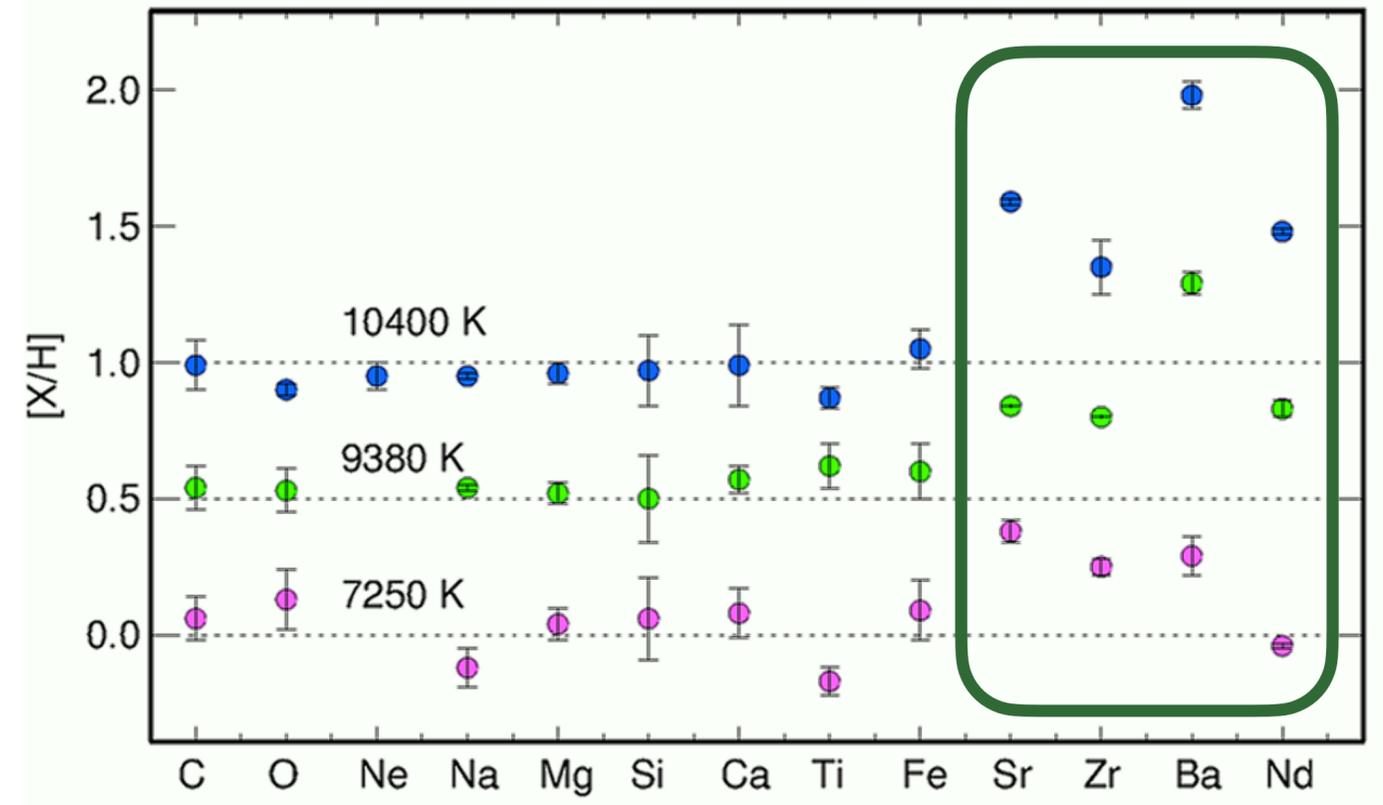


Солнечное содержание элементов до
элементов нейтронных захватов
 $v \sin i \sim 100$ км/с
Не только двойные

МЕТАЛЛИЧНЫЕ АМ ЗВЕЗДЫ



НОРМАЛЬНЫЕ А ЗВЕЗДЫ



ЧТО ТАКОЕ НОРМАЛЬНЫЕ А ЗВЕЗДЫ?

Цели работы

- Проведение самосогласованного спектроскопического анализа для группы медленно вращающихся А звезд в диапазоне температур 9200–10200 К.
- Определение содержания химических элементов в приближении ЛТР и не-ЛТР, где это возможно. Использование моделей атомов, рассчитанных группой спектроскопии ИНАСАН и соавторами.
- Определение положения звезд выборки на диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Исследование эволюционных эффектов в группе А-звезд.

Выборка звезд и наблюдения

А и Am звезды

GAM GEM (HD 47105)
OMI PEG (HD 214994)
THETA VIR (HD 114330)
NU CAP (HD 193432)

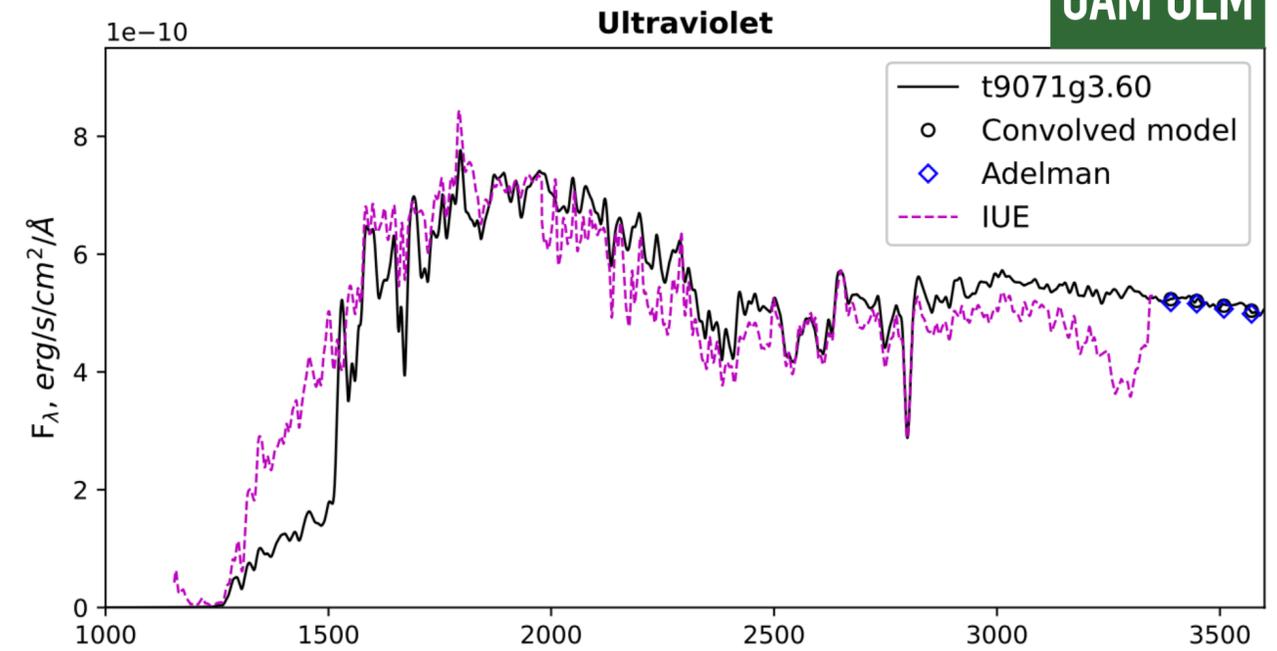
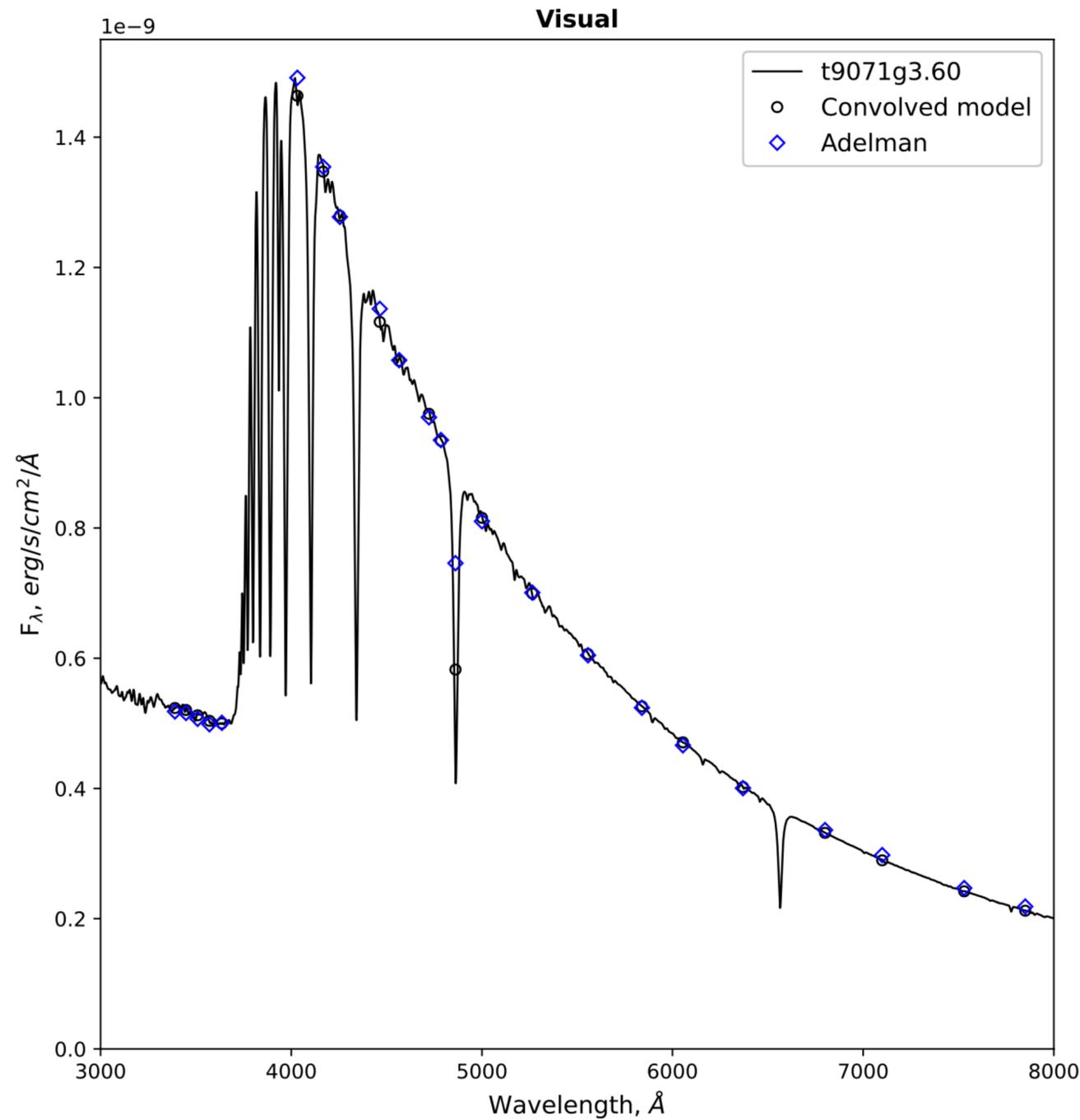
Звезды сравнения

SIRIUS
HD 72660
21 PEG
HD 32115

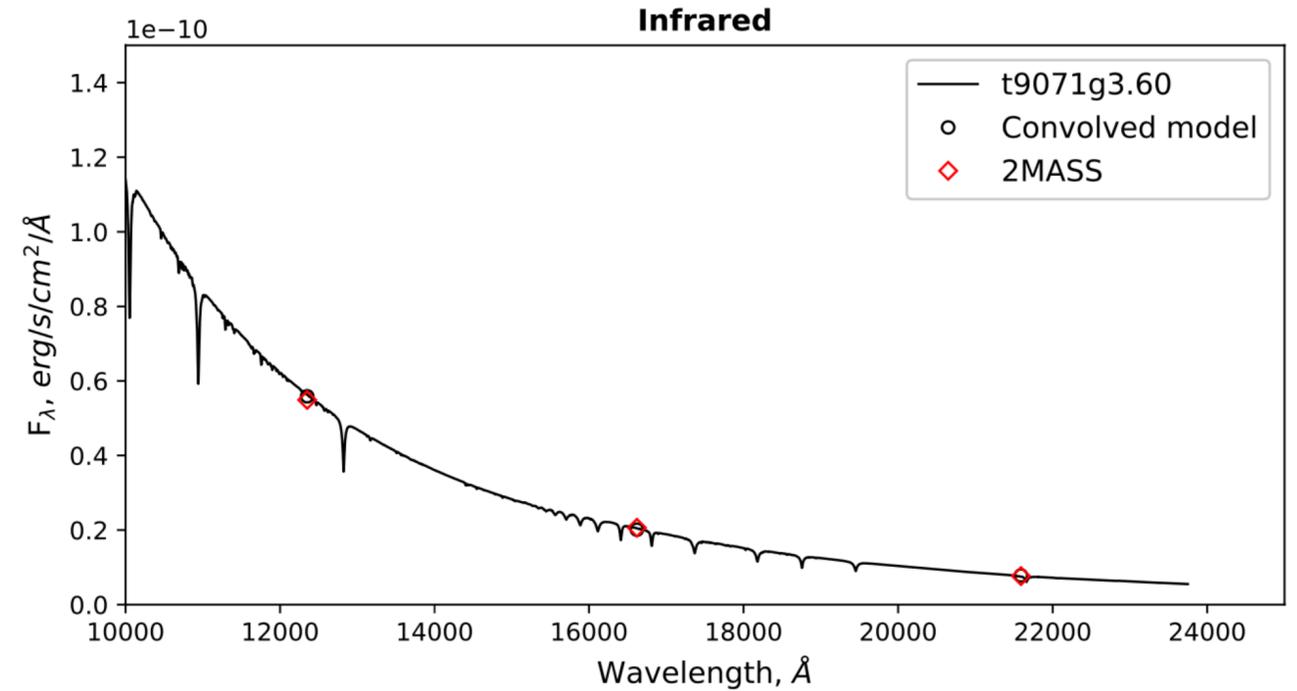
Наблюдения

- Gam Gem – FEROS ($R = 48000$, 3500-9200 Å, SNR 430)
- Omi Peg – ESPaDOnS ($R = 68000$, 3700-10500 Å, SNR 700)
- Theta Vir – HARPS ($R = 80000$, 3000-10000 Å, SNR 250) + ESPaDOnS для ближнего ИК
- Nu Cap – UVES ($R = 37000$, 3730-6835 Å, SNR 150, $R = 107000$, 5650-9460 Å, SNR 250)
- Фотометрия/Спектрофотометрия где это возможно – УФ область (TD1, IUE), оптический диапазон (Adelman 1989, Alekseeva 1987), ИК область (2MASS)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ T_{eff} , $\log g$ И R/R_{\odot} : SED



GAM GEM



ОПРЕДЕЛЕНИЕ T_{eff} , $\log g$ И R/R_{\odot} : SME

В ПОДГОНКЕ ИСПОЛЬЗОВАНО:

- 4250–6700 Å + H γ , H β , H α (σ Peg, θ Vir), 4400–6460 Å + H β (γ Gem), 4200–6620 Å + H β , H α (ν Cap).
- ≈ 300 линий Fe I и Fe II различных потенциалов возбуждения E_i и эквивалентных ширин EW от 3 до 110 mÅ.



Уточнение T_{eff} и $\log g$ через равновесие возбуждения и ионизации, а также определение микротурбулентной скорости ξ_t , $v_e \sin i$, металличности [Fe/H]

ОПРЕДЕЛЕНИЕ T_{eff} , $\log g$ И R/R_{\odot}

Star name	T_{eff} , K	$\log g$	[Fe/H]	ξ_t , km s ⁻¹	ζ_{RT} , km s ⁻¹	$v_e \sin i$, km s ⁻¹	R/R_{\odot}	L/L_{\odot}	Parallax, mas	Method
γ Gem	9071±10	3.60					5.15±0.77	2.21±0.12	29.84*	SED Adelman
	9223±13	3.60					4.72±0.71	2.16±0.12	29.84*	SED Alekseeva
	9188±19±131	3.56±0.01±0.08	0.06±0.01±0.08	1.77±0.03±0.36	5.43±0.65±3.93	10.59±0.23±1.71				SME
σ Peg	9552±13	3.80					3.37±0.10	1.93±0.03	11.65**	SED
	9597±14± 48	3.81±0.01±0.04	0.25±0.01±0.09	1.98±0.04±0.32	5.20±0.64±2.34	5.40±0.49±1.11				SME
θ Vir	9657±18	3.60					4.03±0.30	2.10±0.07	11.18**	SED
	9603± 5±137	3.61±0.01±0.12	0.15±0.01±0.14	1.42±0.01±0.62	3.78±0.03±1.52	0.10±2.26±75				SME
ν Cap	10160±11	3.95±0.08					3.04±0.08	1.95±0.02	12.17**	SED
	10196± 4±222	3.88±0.01±0.08	0.08±0.01±0.14	0.96±0.02±0.55	0.00	22.85±0.04±2.56				SME

Note. *van Leeuwen (2007); **Gaia Collaboration (2020)

ЛТР

SC, V, CR, MN, CO, NI, LA, ND

+ простые расчеты

+ населенность уровня i , $n_i = f(T, p)$ определяется формулами Саха и Больцмана, атомарные данные требуются только для исследуемых переходов

– не работает в верхних слоях атмосферы

He-ЛТР

HE, C, N, O, NA, MG, AL, SI, S, K, CA, TI, FE, ZN, SR, Y, ZR, BA

+ физически реалистичное приближение

+ населенность уровня n_i рассчитывается из уравнений статистического равновесия с учетом всех процессов, в которых участвуют атомы

– трудоемкие расчеты

– требуется большое количество атомных данных

$$\begin{cases} n_i \sum (R_{ij} + C_{ij}) = \sum n_j (R_{ji} + C_{ji}) \\ \mu \frac{dI_\nu(z, \mu)}{dz} = -x_\nu I_\nu(z, \mu) - \eta_\nu(z) \end{cases}$$

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МОДЕЛИ АТОМОВ:

DETAIL code (Butler & Giddings 1985) + (Przybilla+ 2011)

C Alexeeva et al. 2016
O Sitnova et al. 2013
Na Mashonkina et al. 2020
Mg Alexeeva et al. 2018
Si Mashonkina 2020
K Neretina et al. 2020
Ca Sitnova et al. 2018
Ti Sitnova et al. 2018
Fe Sitnova 2020
Zn Sitnova et. al 2022
Sr Mashonkina et al. 2020
Y Данная работа
Zr Mashonkina et al. 2020
Ba Mashonkina et al. 2020

He-LTP

HE, C, N, O, NA, MG, AL, SI, S, K,
CA, TI, FE, ZN, SR, Y, ZR, BA

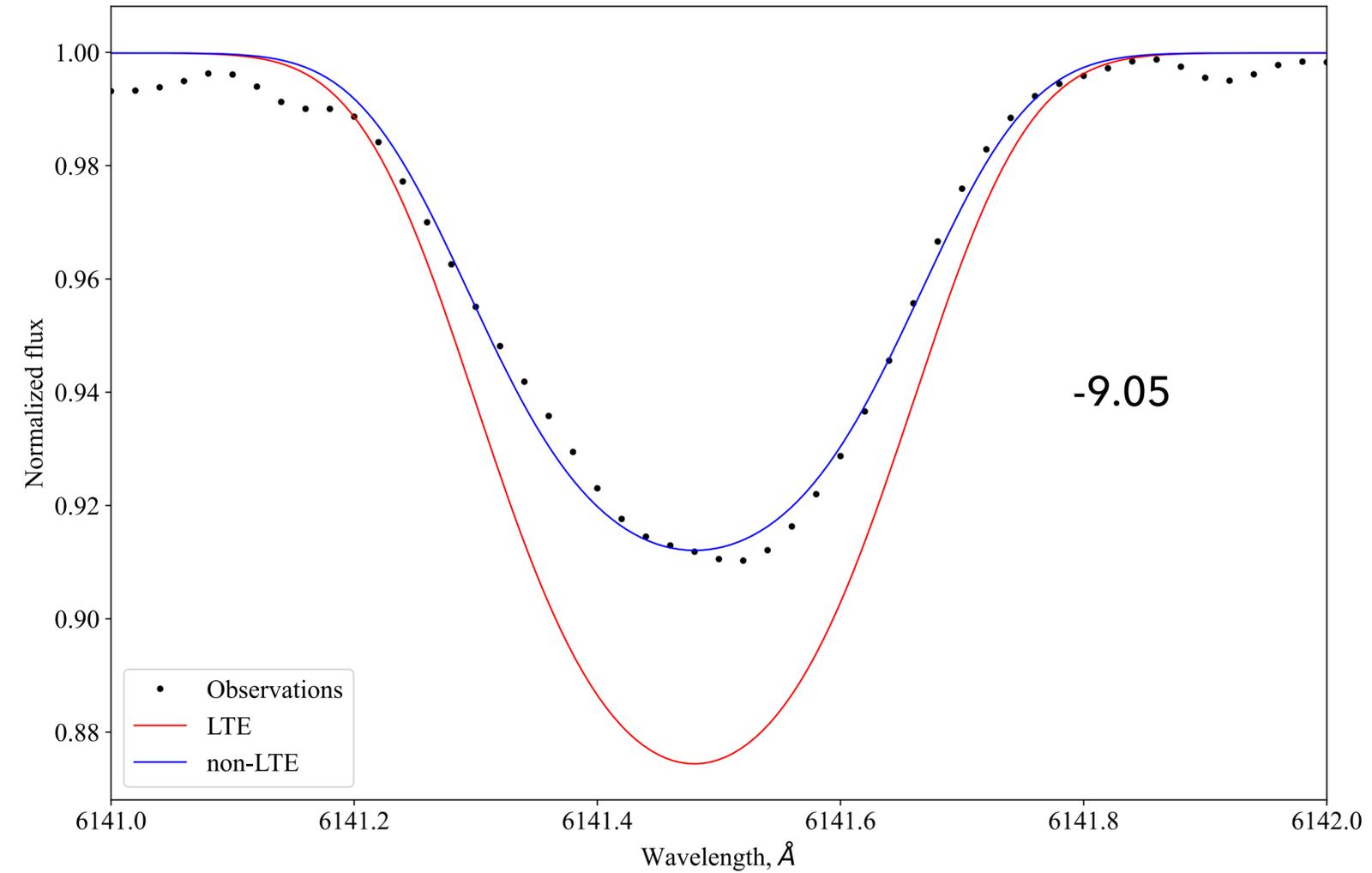
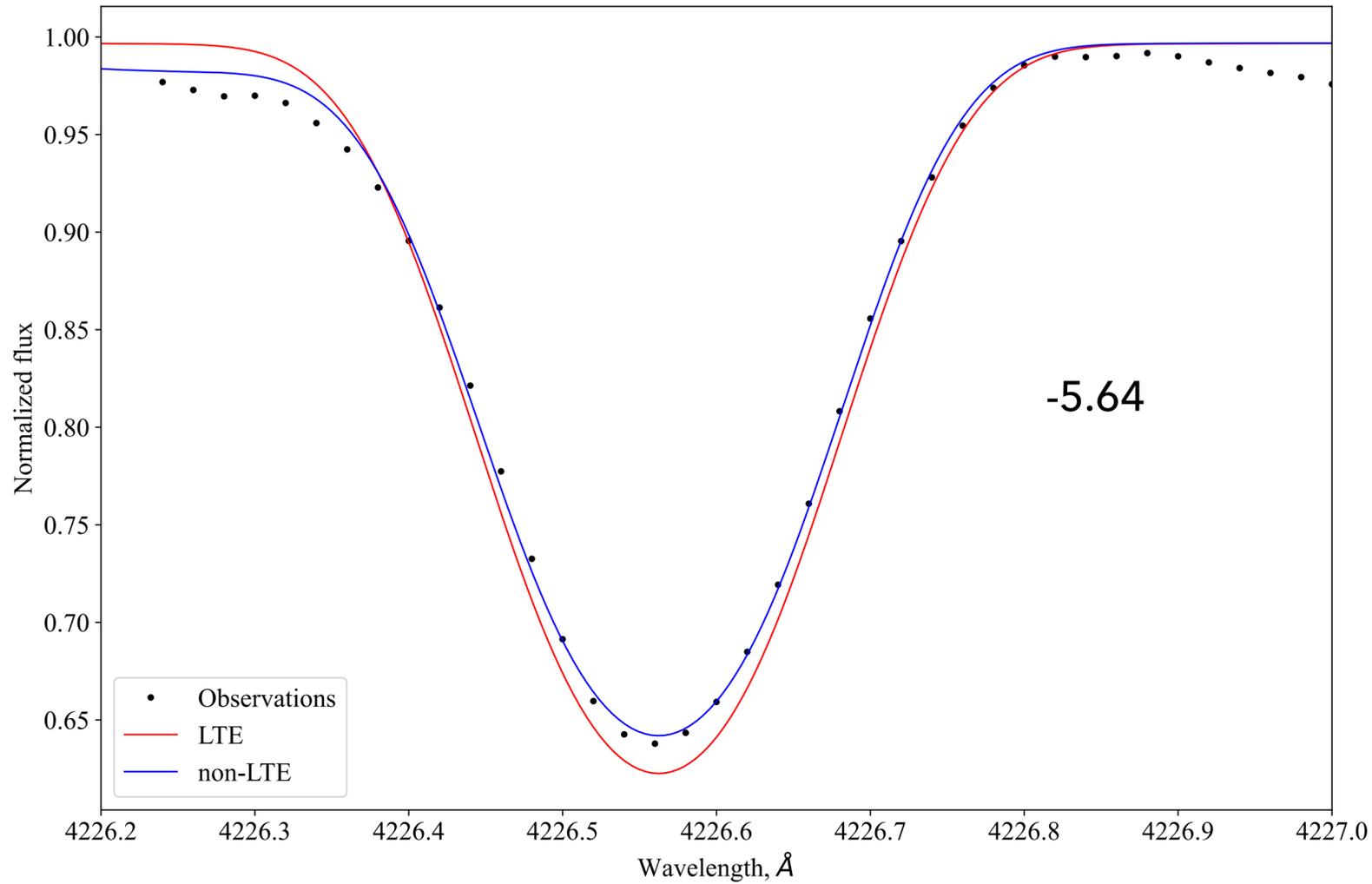
MULTI code (Carlsson 1986)
+ ATLAS9 (Castelli & Kurucz
2003)

He Korotin & Ryabchikova 2018
N Lyubimkov et al. 2011, Andrievsky et al. 2021
Al Caffau et al. 2019, Andrievsky et al. 2021
S Korotin 2009

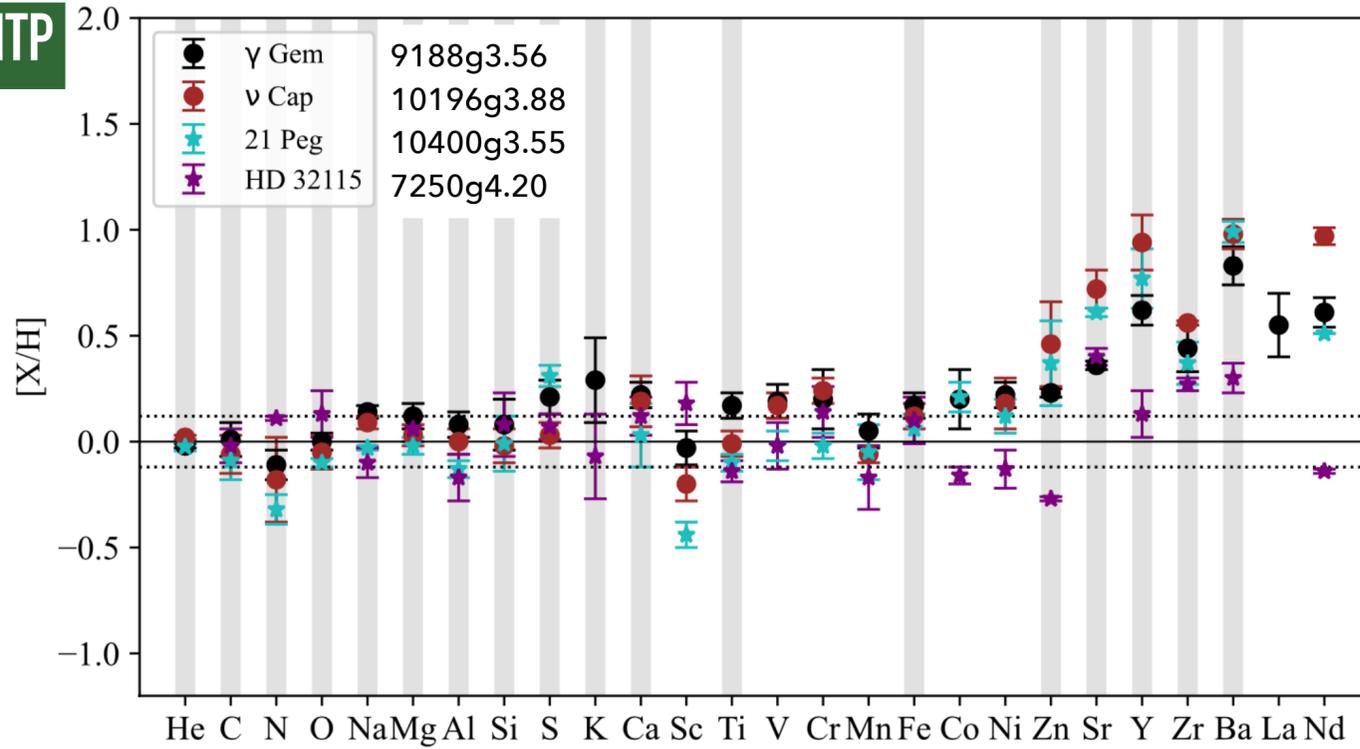
ЛТР vs Не-ЛТР: Gam Gem

Ca I 4226.728 Å

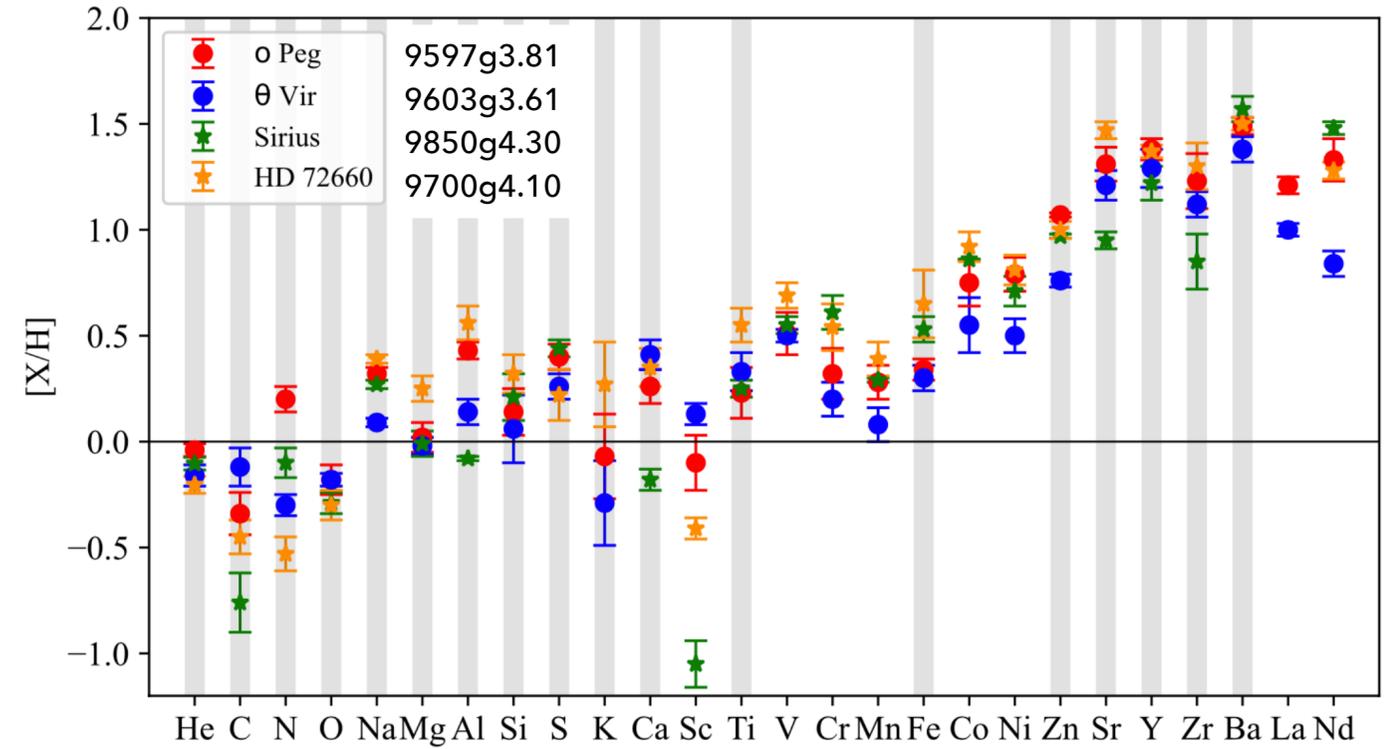
Ba II 6141.7129 Å



ЛТР + НЕЛТР

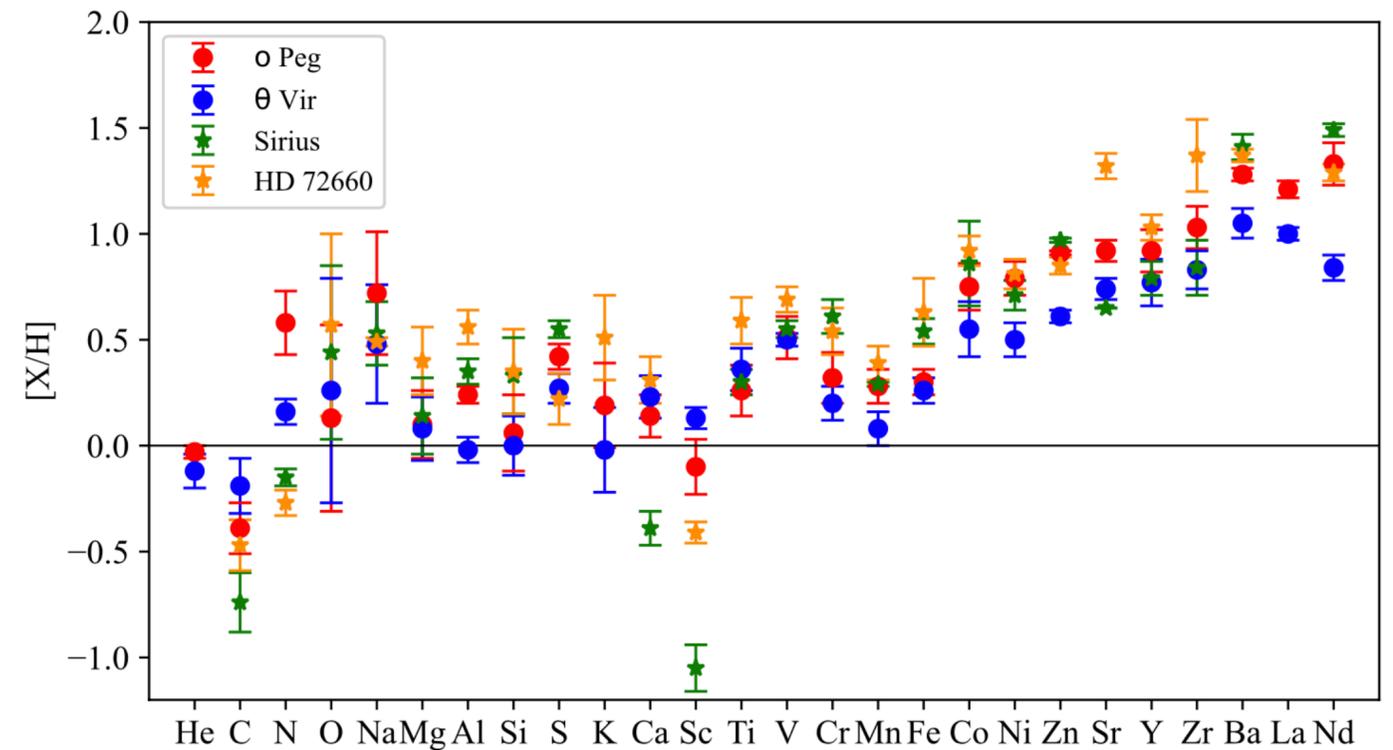
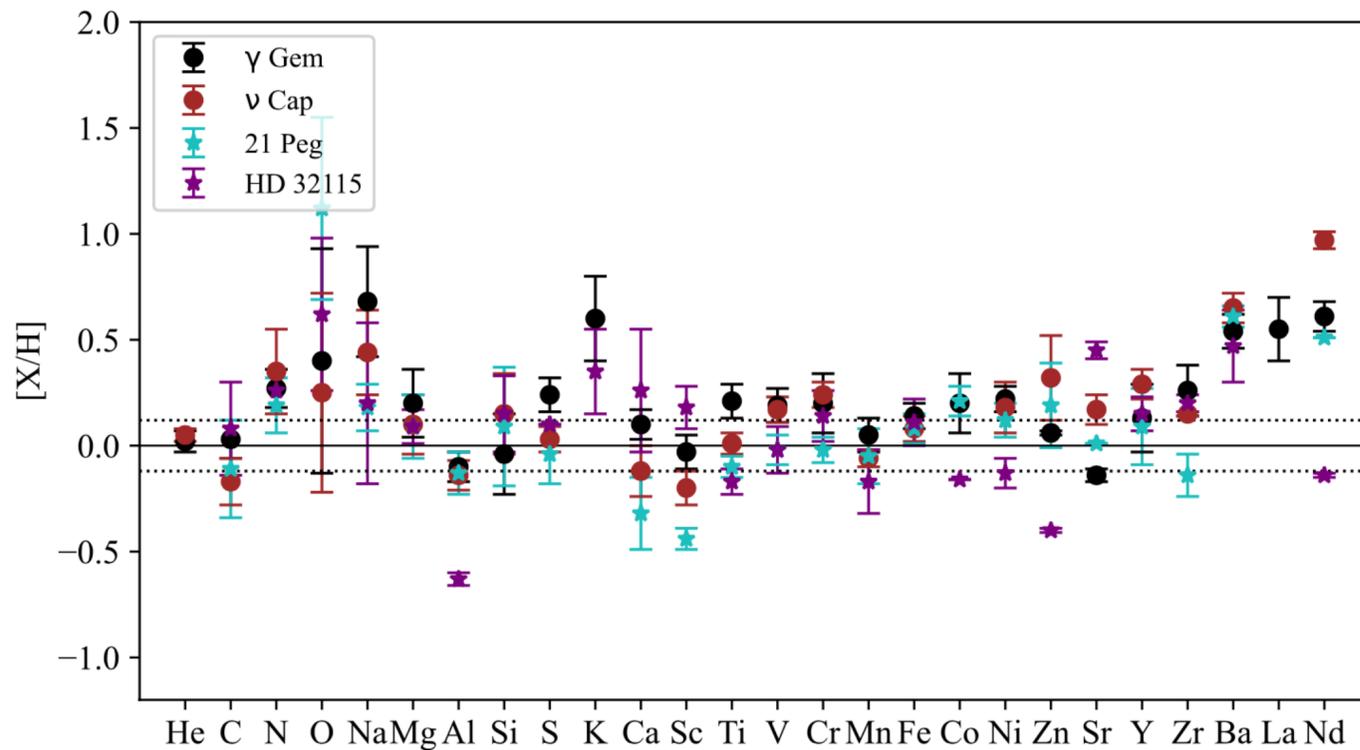


А-звезды

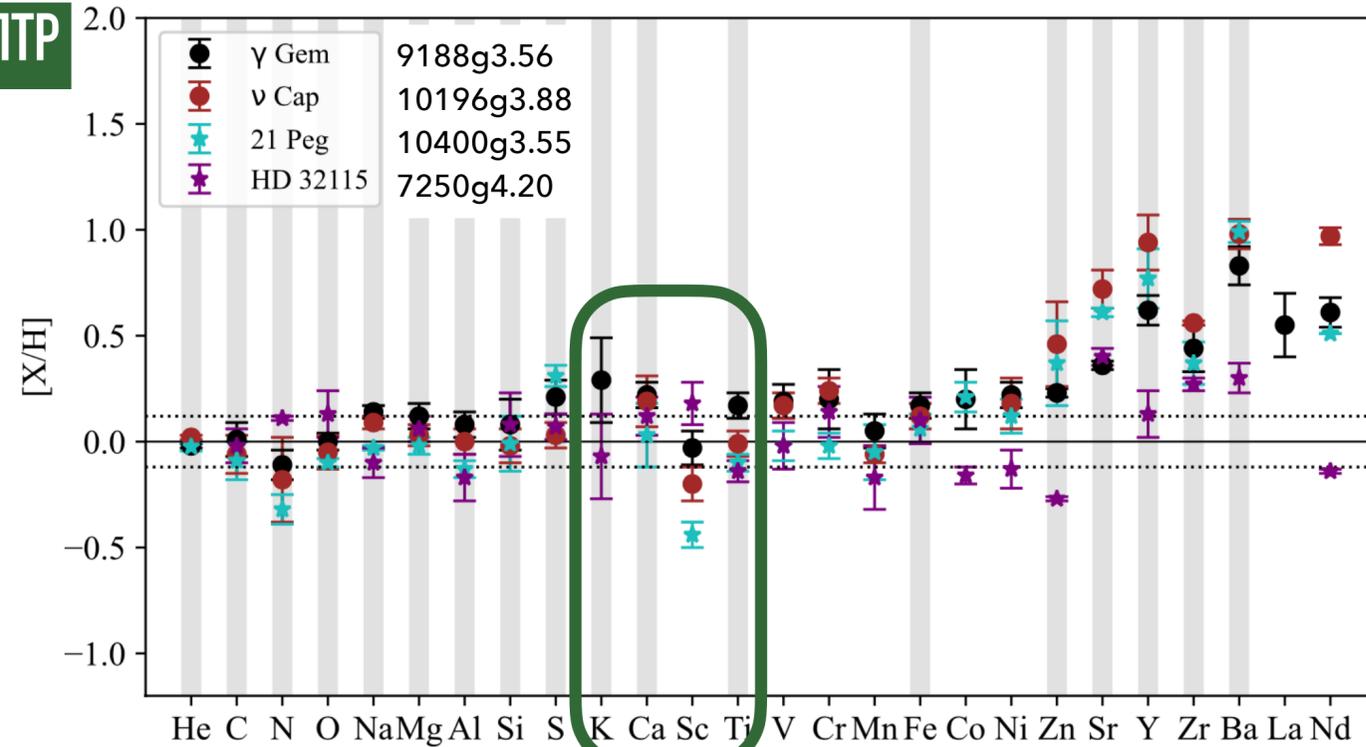


Am-звезды

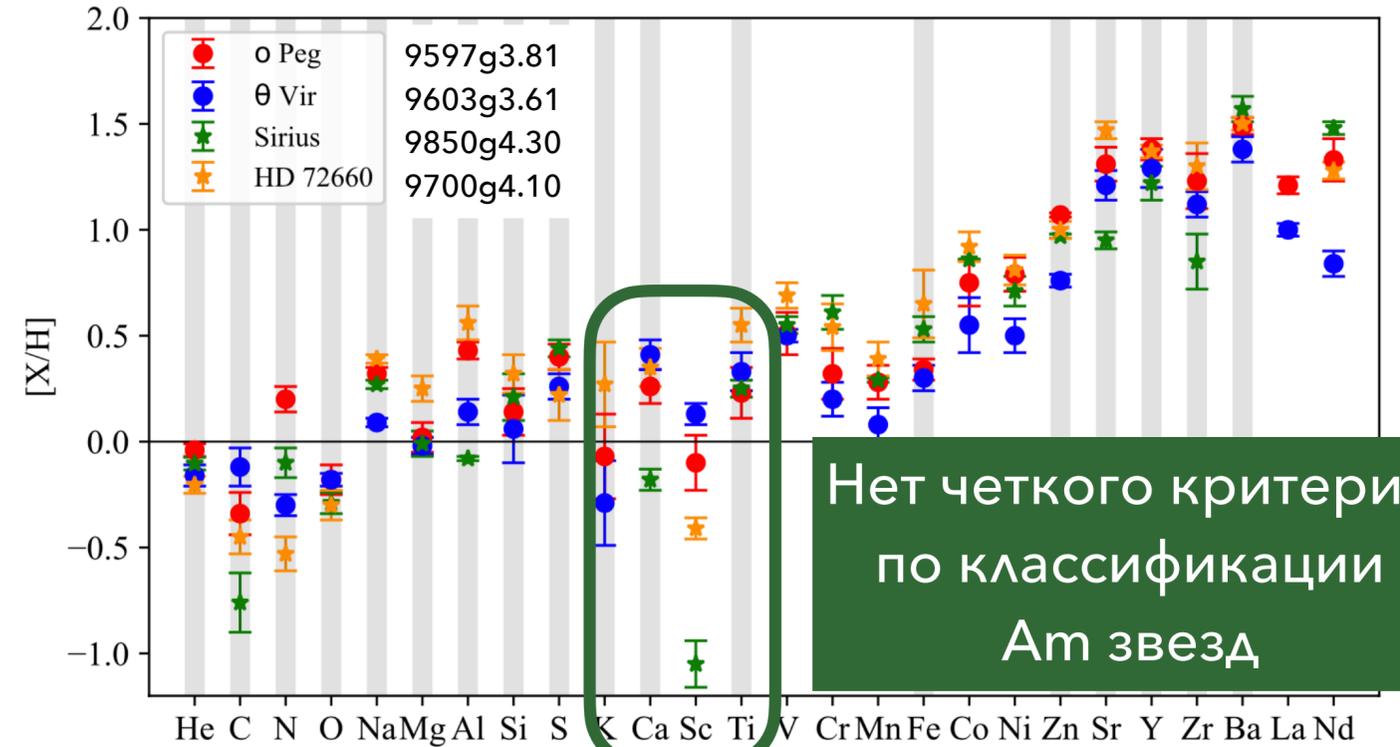
ЛТР



ЛТР + НЕЛТР



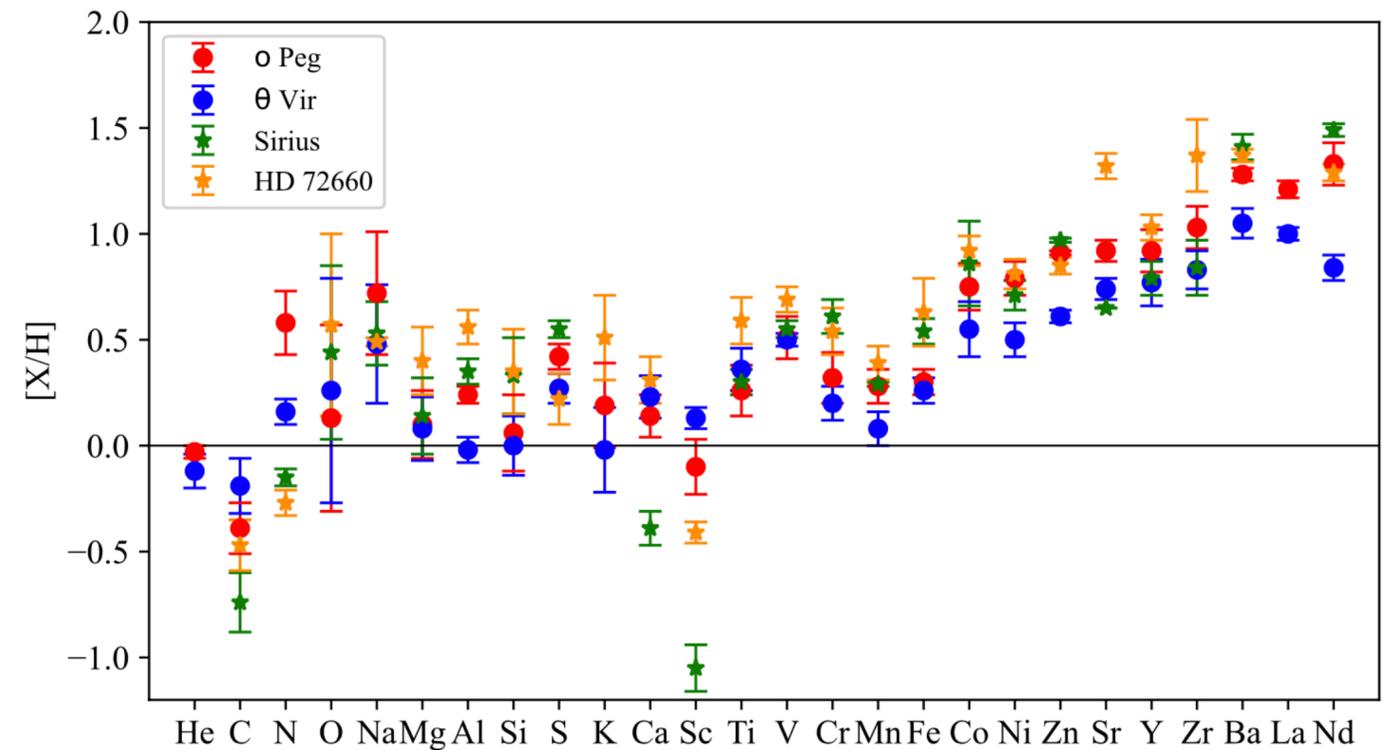
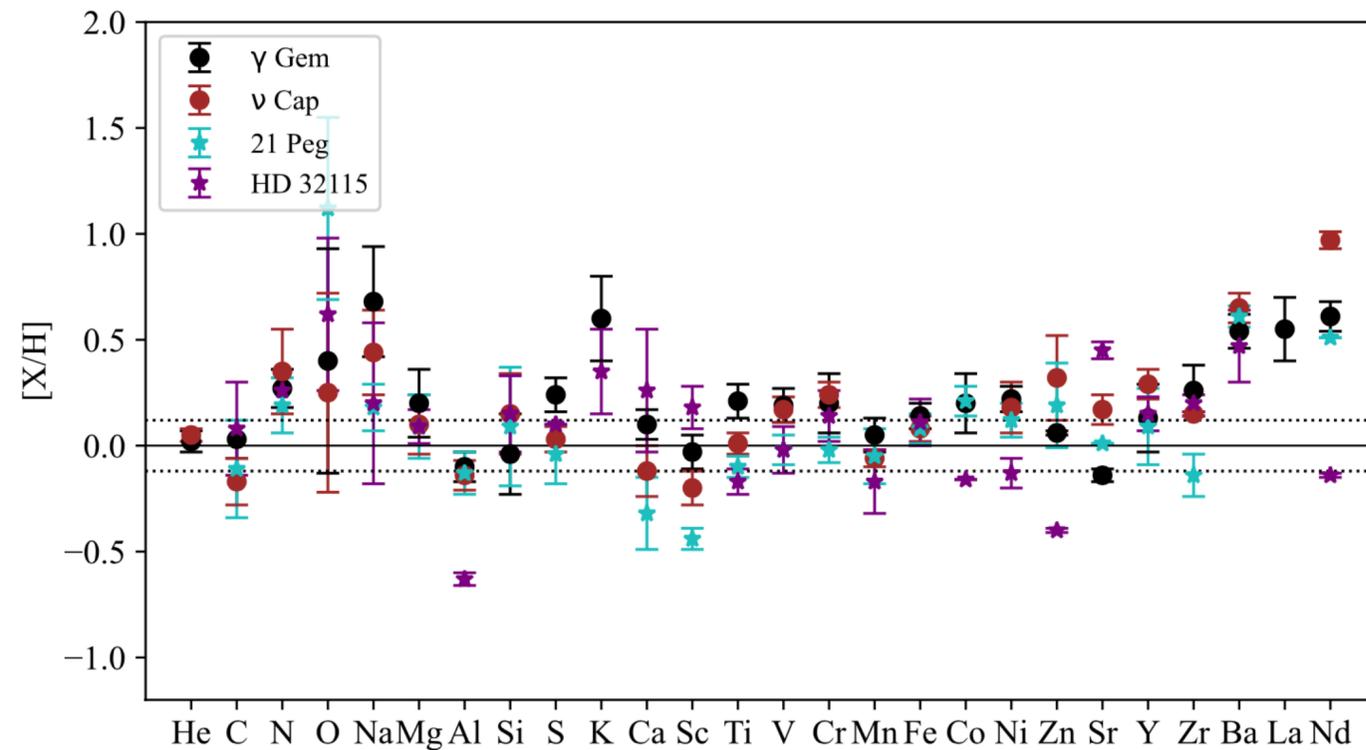
А-звезды



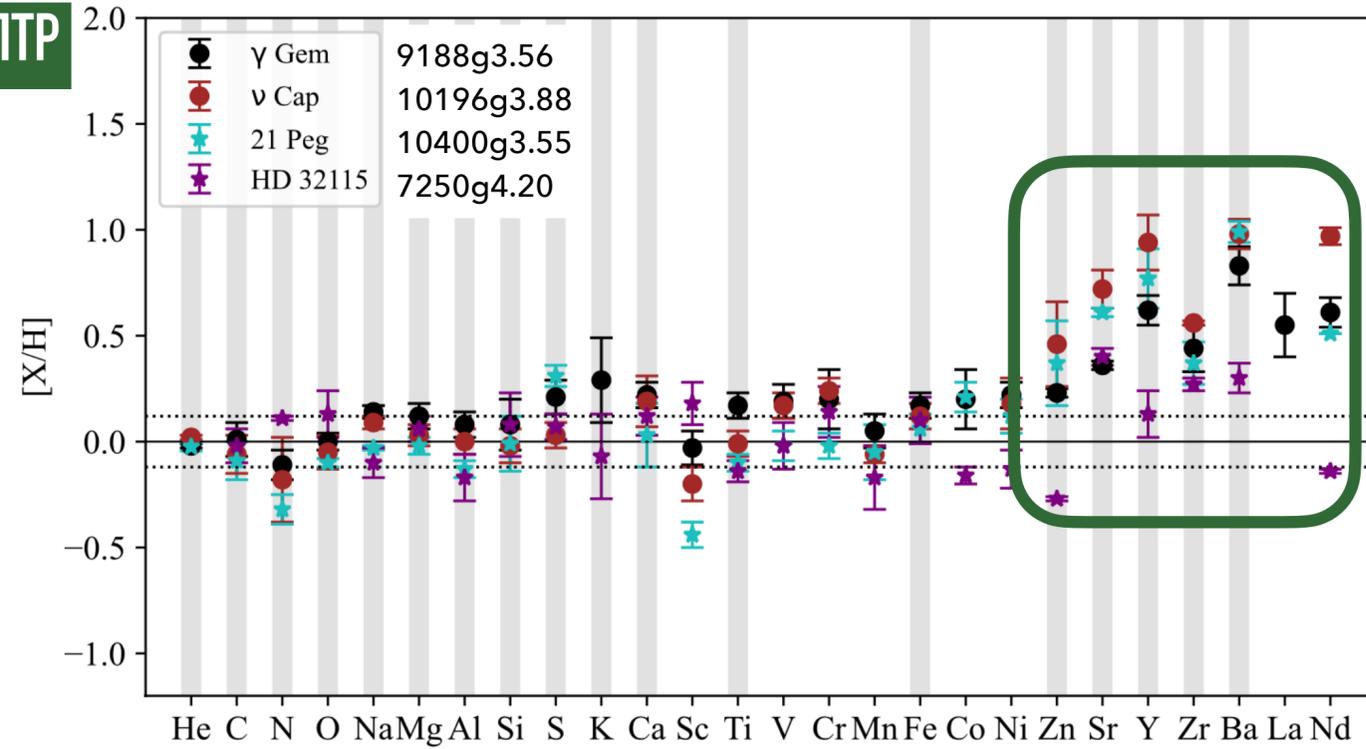
Нет четкого критерия по классификации Ам звезд

Am-звезды

ЛТР

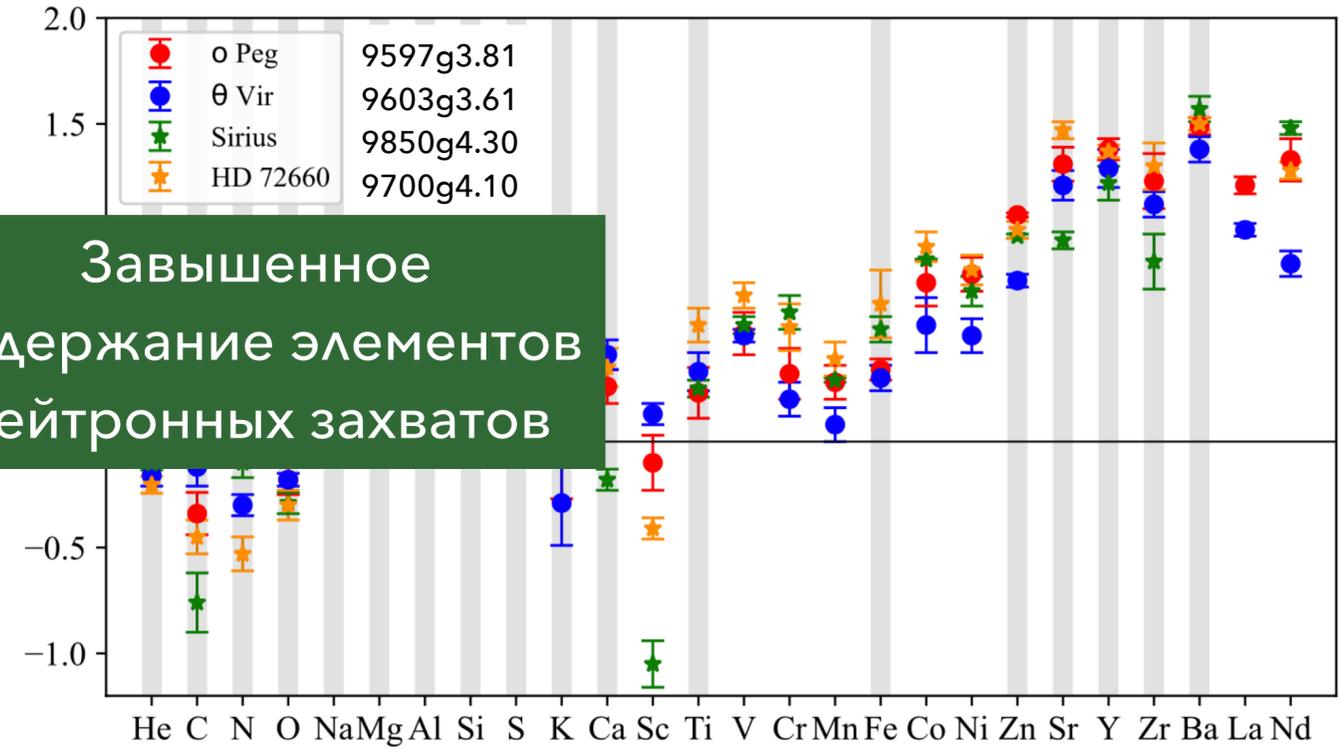


ЛТР + НЕЛТР



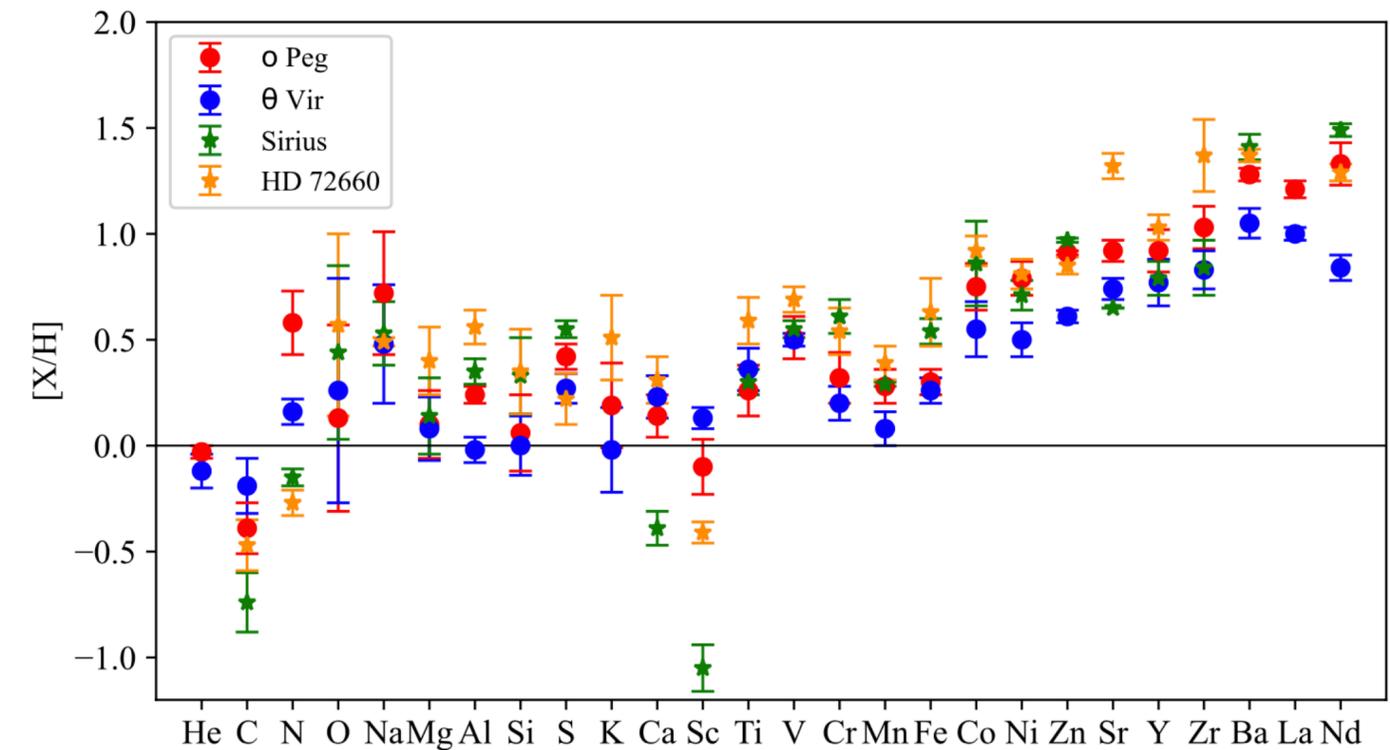
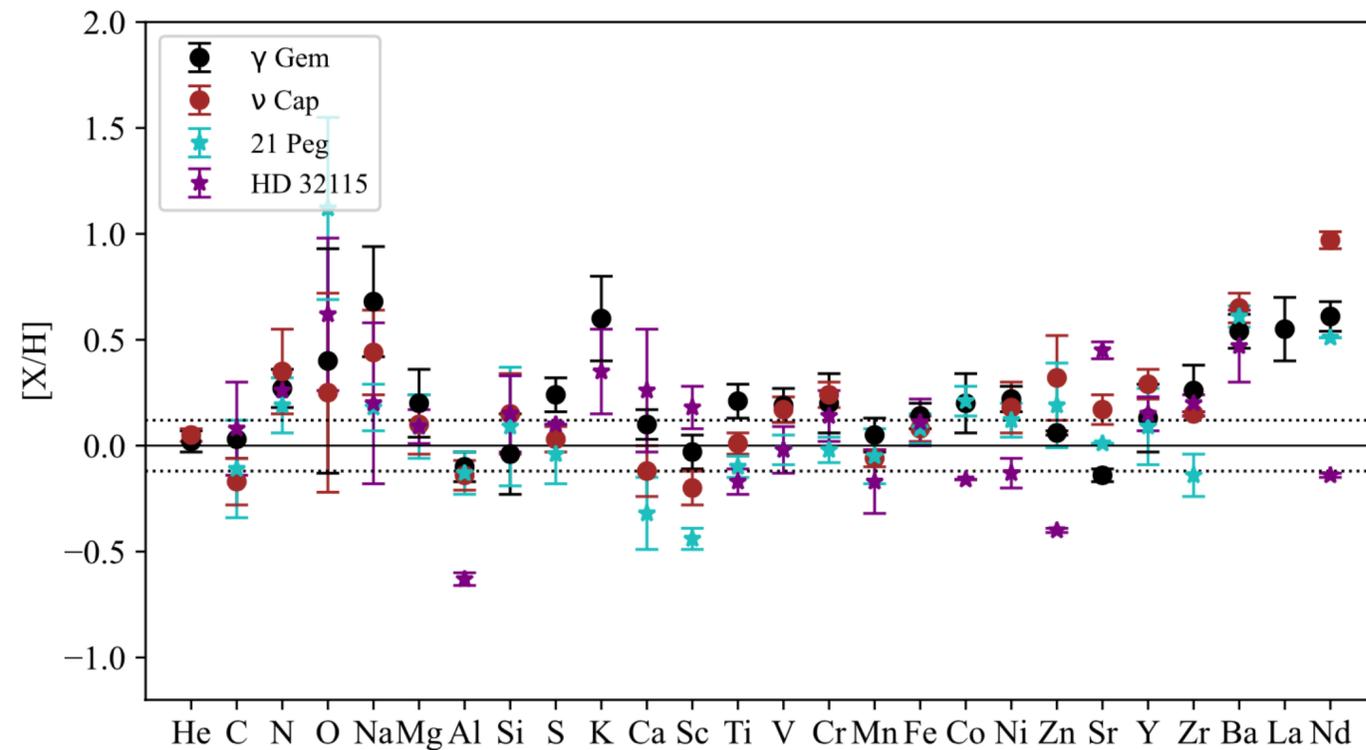
А-звезды

Завышенное содержание элементов нейтронных захватов

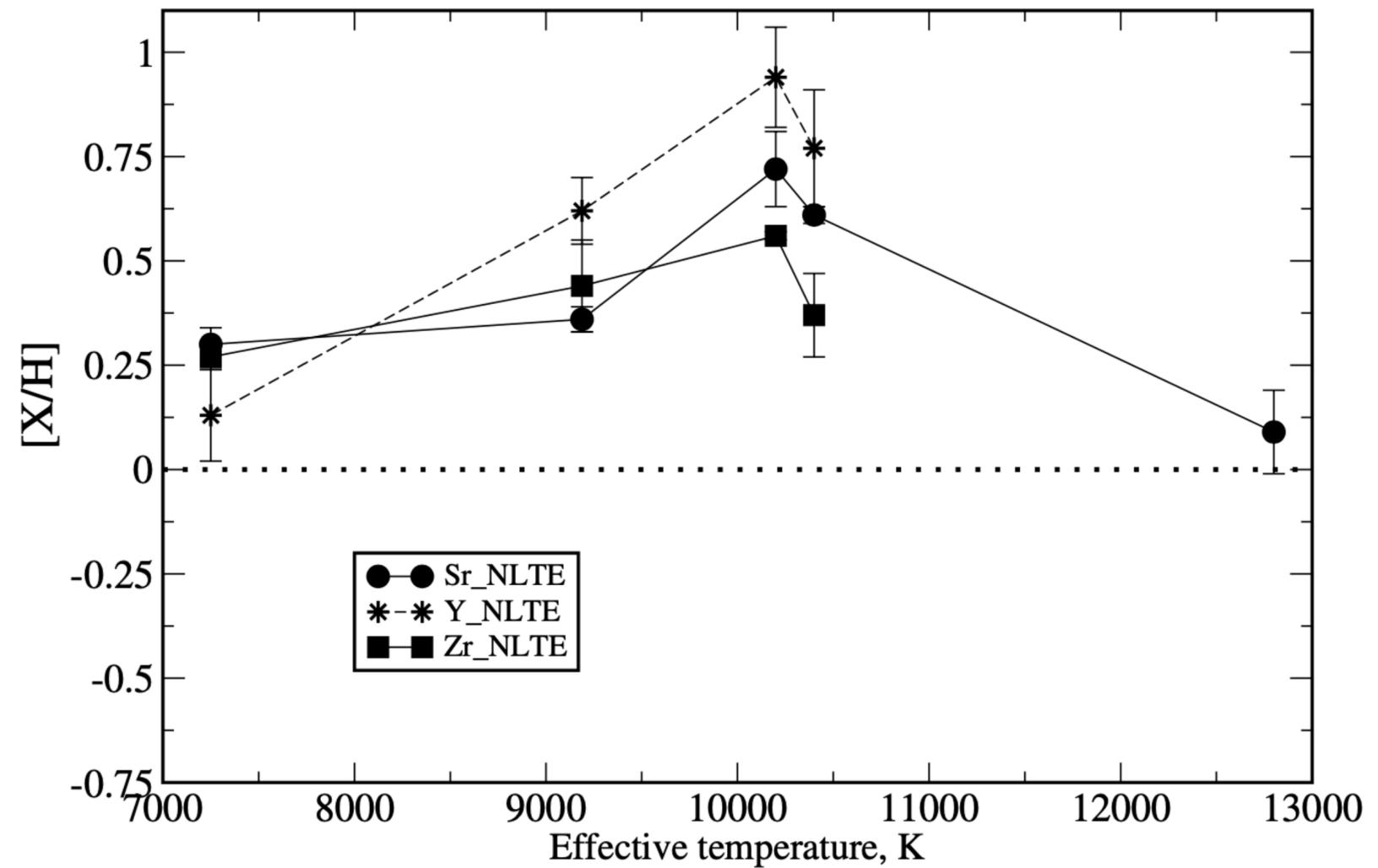
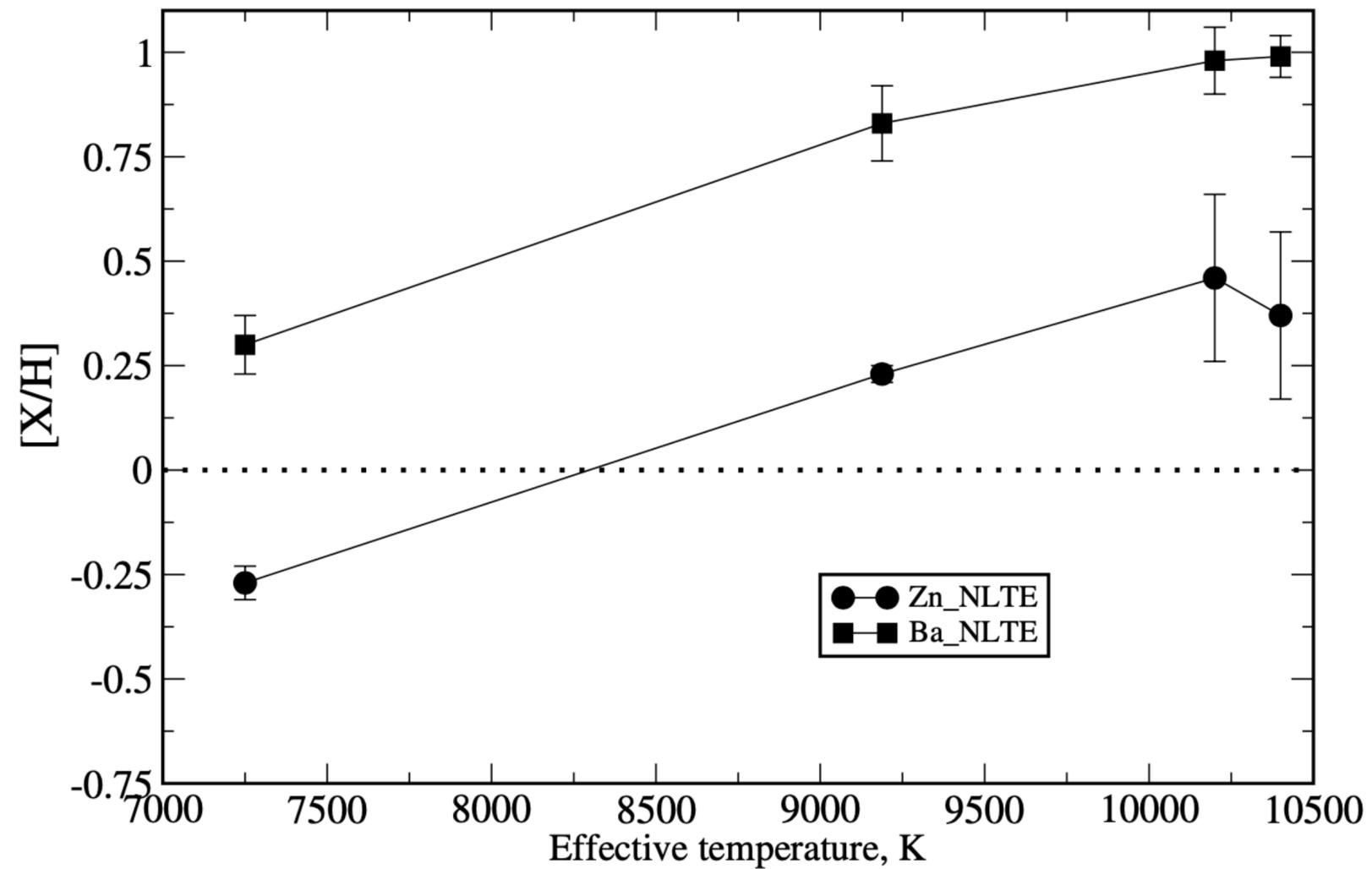


Am-звезды

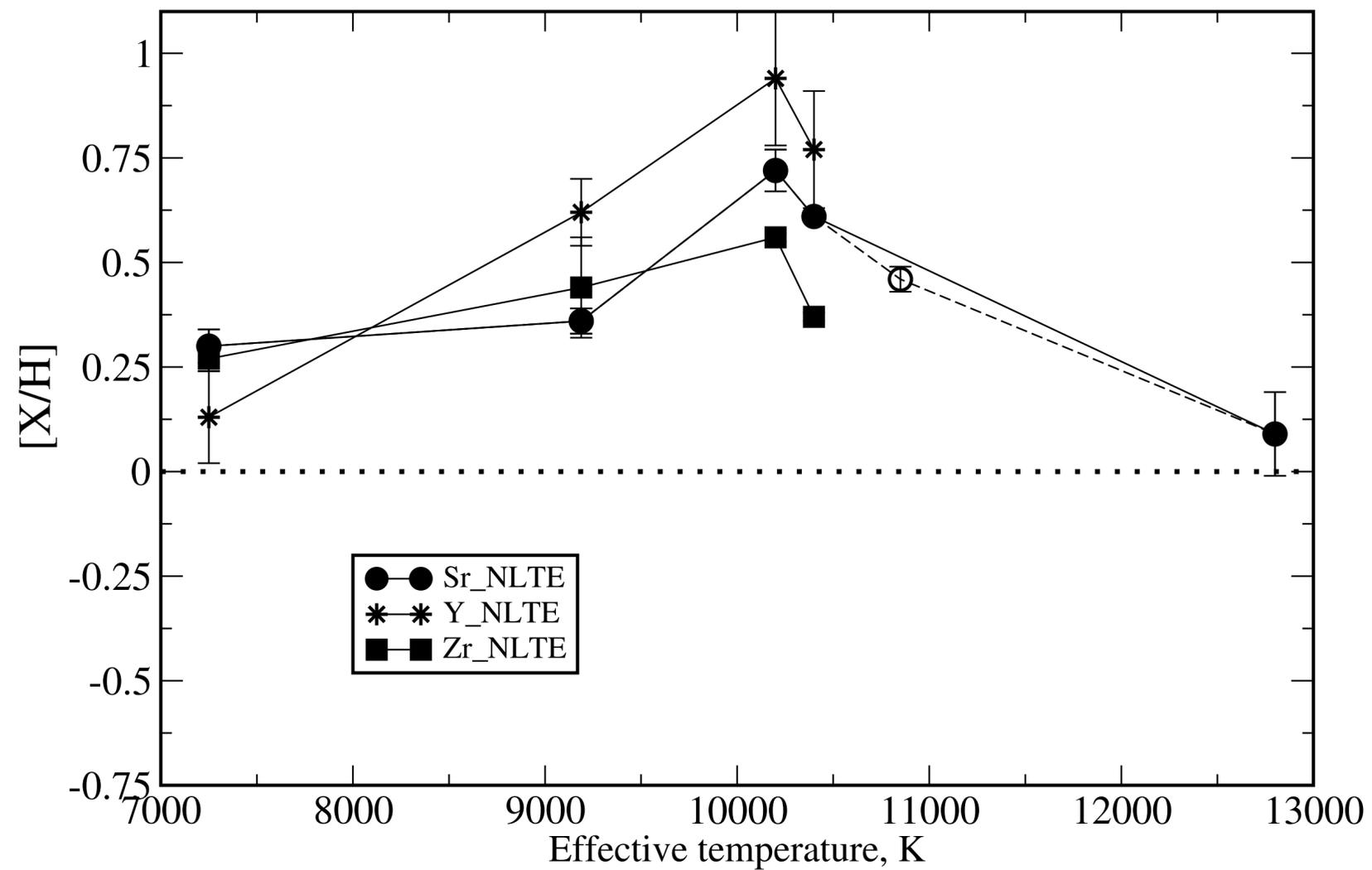
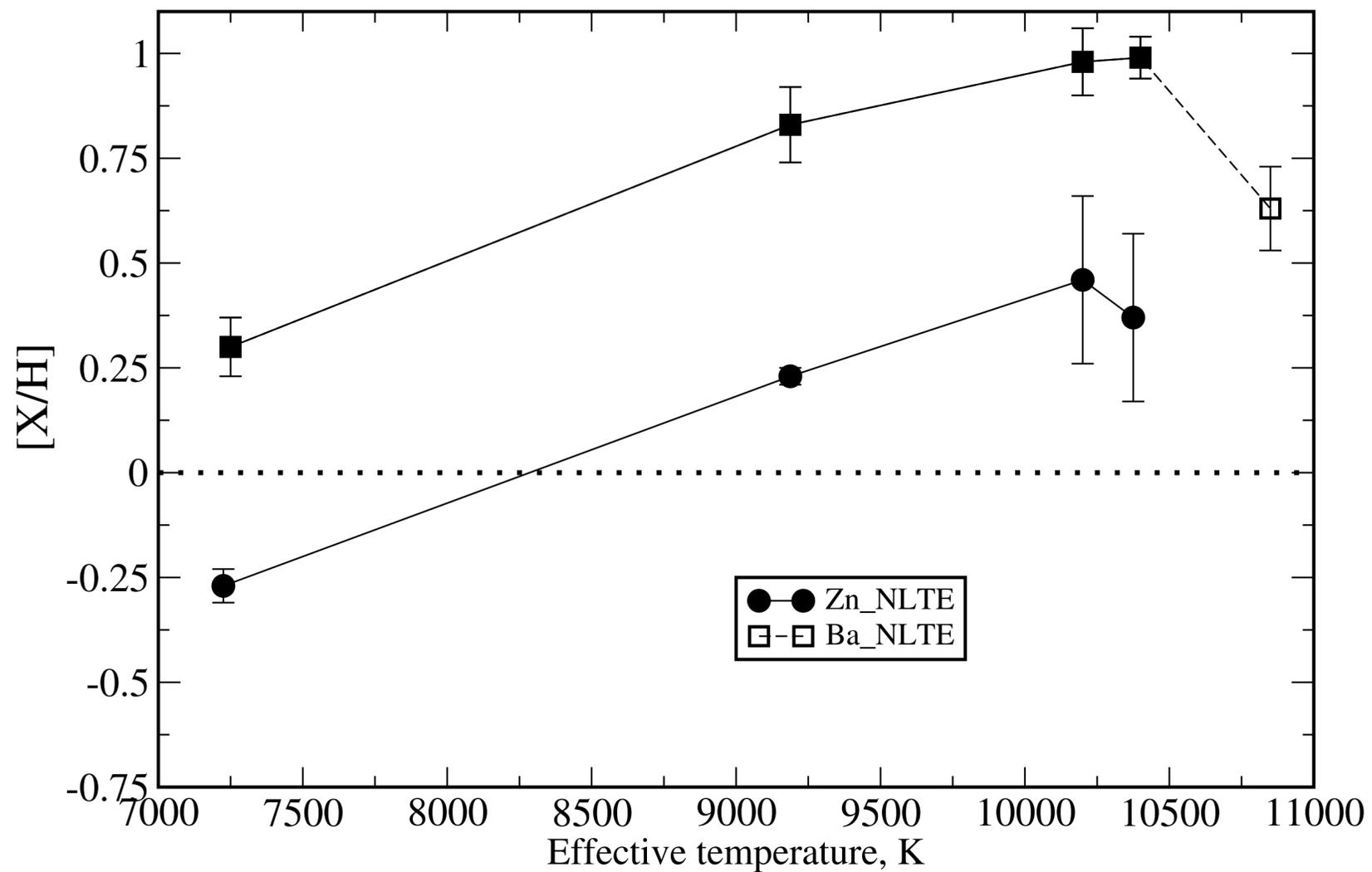
ЛТР



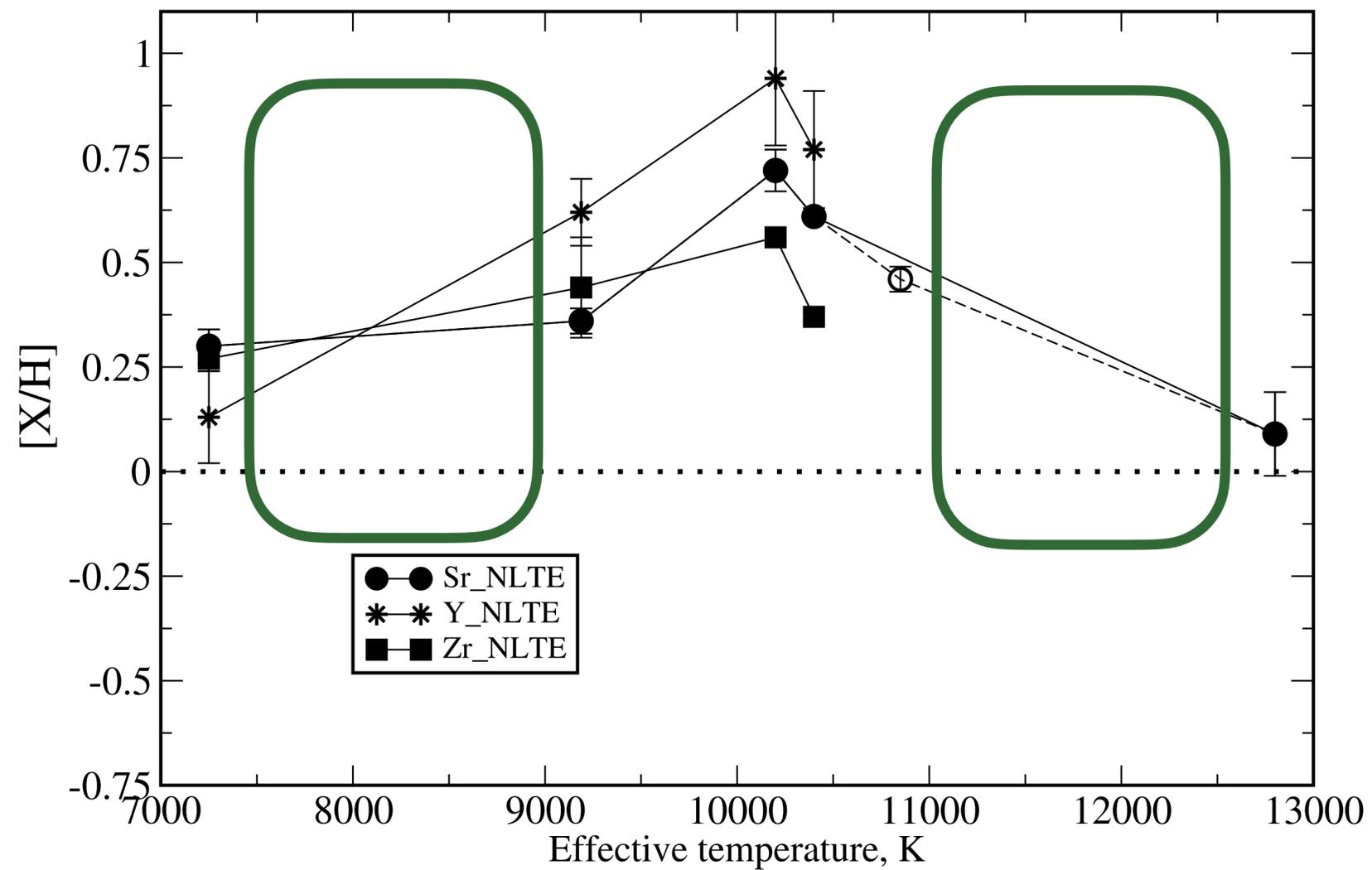
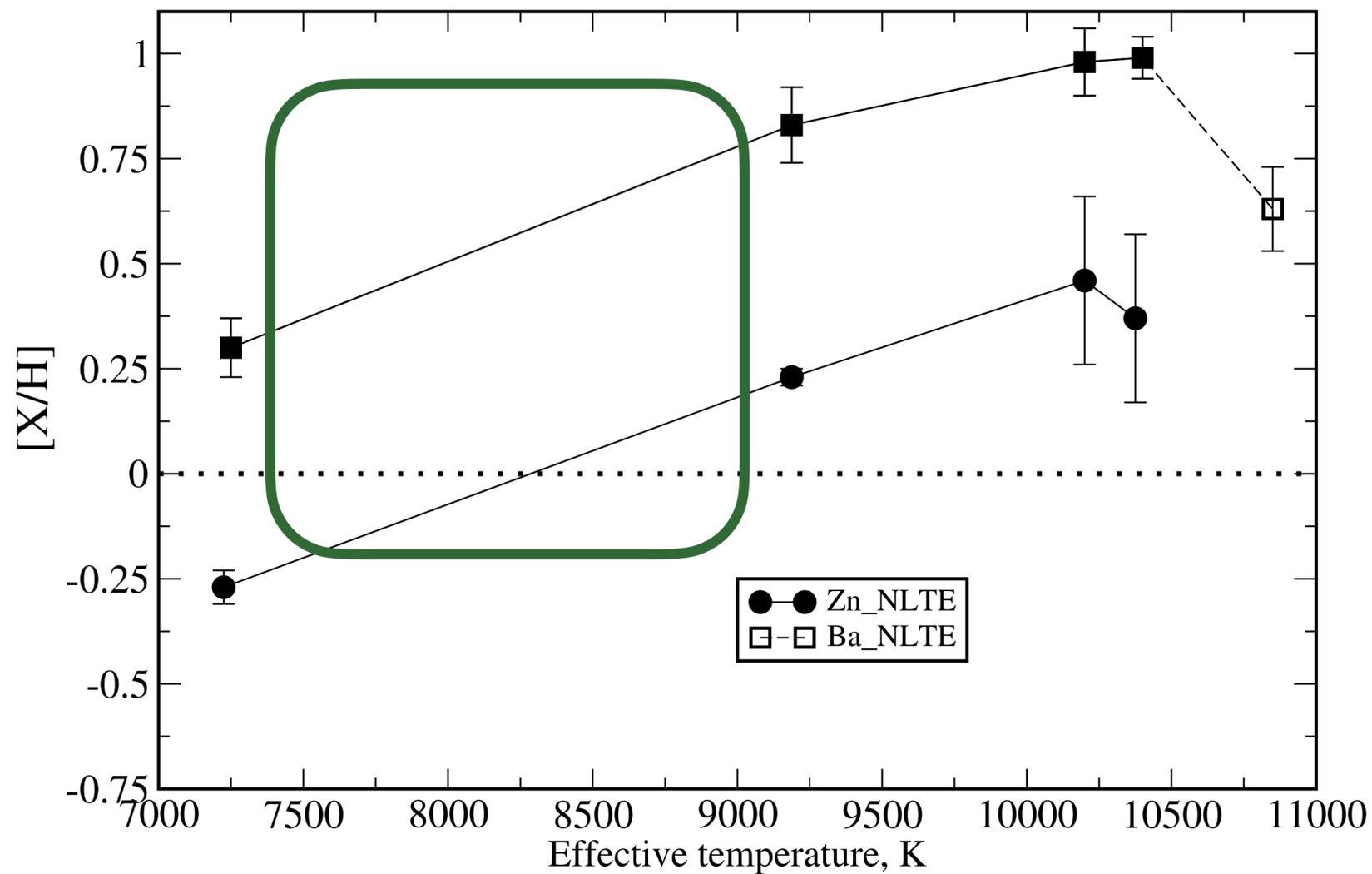
ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙТРОННОГО ЗАХВАТА В НОРМАЛЬНЫХ А-ЗВЕЗДАХ



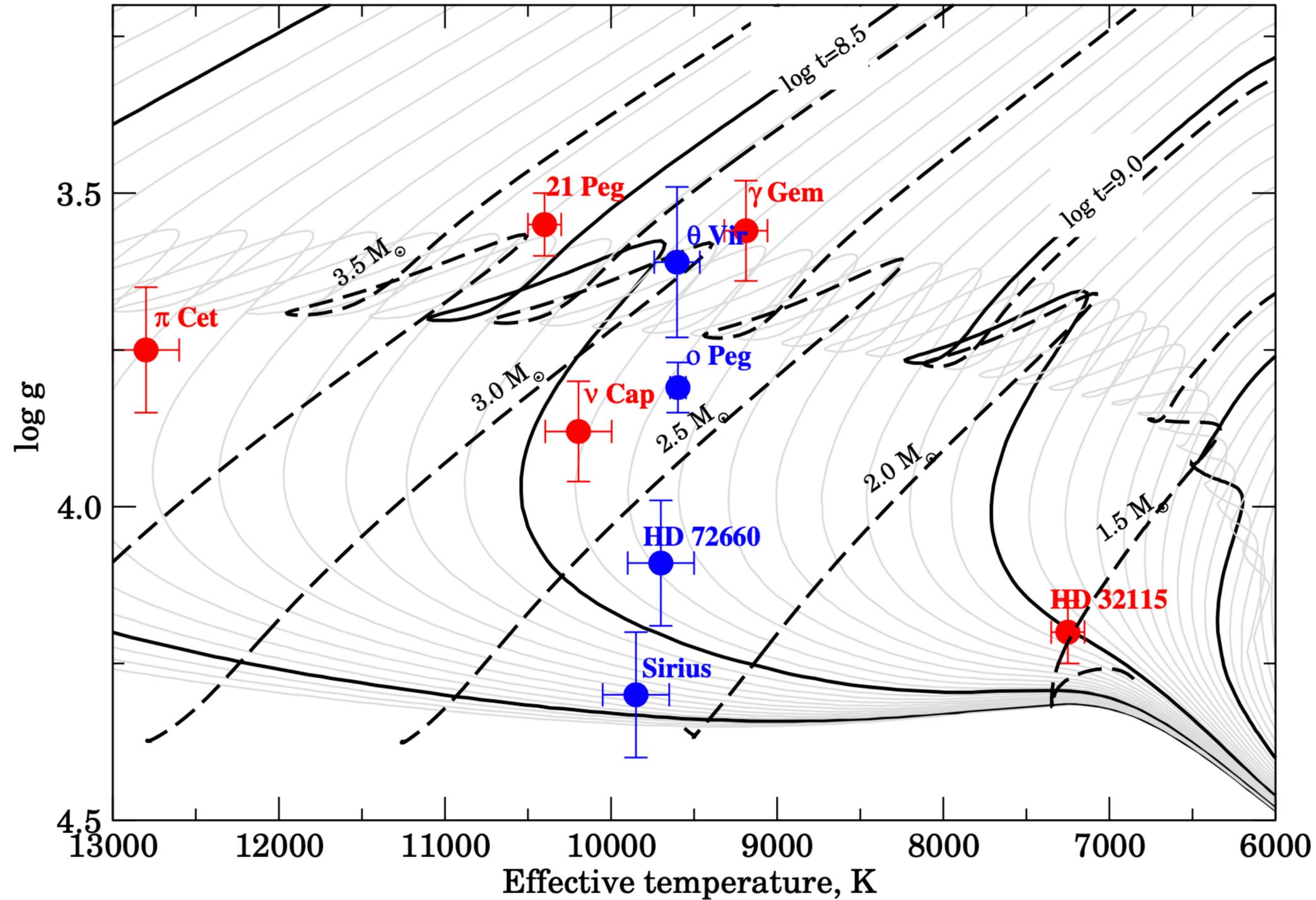
ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙТРОННОГО ЗАХВАТА В НОРМАЛЬНЫХ А-ЗВЕЗДАХ



ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙТРОННОГО ЗАХВАТА В НОРМАЛЬНЫХ А-ЗВЕЗДАХ



Необходимо дополнить выборку в диапазонах температур 8000-9000 и 9500-12000 К.



Общая металличность в звездах выборки не сильно отличается от солнечной металличности

● A
● Am

Теоретические эволюционные треки солнечной металличности (Choi et al. 2016)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ★ Представлен химический состав и фундаментальные параметры (T_{eff} , $\log g$, R/R_{\odot}) для медленно вращающихся A и Am звезд: γ Gem, σ Peg, θ Vir и ν Car.
- ★ Анализ содержаний 26-ти химических элементов от He до Nd проводился, в основном, в условии отказа от термодинамического равновесия (не-ЛТР, 18 элементов), а для остальных 9-ти элементов использовался ЛТР подход.
- ★ Содержание элементов до Fe в атмосферах γ Gem и ν Car соответствует солнечной металличности, а для элементов нейтронных захватов наблюдается повышенное содержание относительно солнечных значений, что уже было отмечено для нормальных звезд в работе Mashonkina et al (2020). σ Peg и θ Vir показывают увеличенное содержание элементов железного пика, а также избыток элементов нейтронного захвата больше чем у нормальных звезд, что позволяет классифицировать их как **Am звезды, однако не выполняется классический классификационный критерий, принятый для Am звезд - дефицит Ca и Sc.**
- ★ Обнаружена зависимость избытка содержания элементов нейтронных захватов от эффективной температуры в атмосферах нормальных A звезд. Наблюдается постепенный рост избытка содержания до $+1$ dex с T_{eff} от 7200 до 10000 K и затем падение содержания практически до солнечных значений к 13000 K. В дальнейшем планируется расширить выборку звезд в диапазонах температур 8000-9000 и 9500-12000 K.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

