

Институт астрономии Российской академии наук

Определение содержания углерода и натрия у  
звезд спектральных классов В-К  
с учетом отклонений от локального  
термодинамического равновесия

С. А. Алексеева

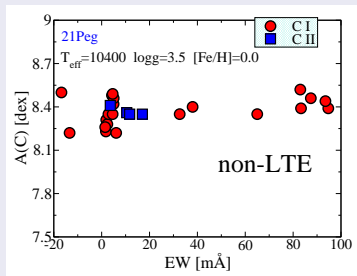
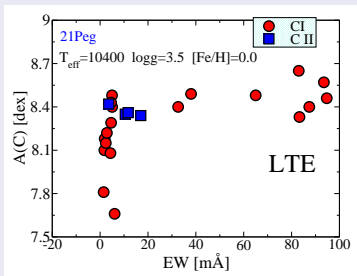
Научный руководитель: д. ф.-м.н. Л. И. Машонкина

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

## Почему не-ЛТР?

1. Наблюдаются эмиссионные линии C I в ближней ИК области в атмосферах В звезд ГП.
2. Различие в содержании<sup>1</sup> углерода по линиям одной стадии ионизации (Алексеева и др. 2016)



<sup>1</sup> Содержание  $\log(N_X/N_H)$ , где  $N_X$  и  $N_H$  концентрации частиц X и H.

1. Изучение формирования линий  $C\text{ I} - C\text{ II}$  и  $Na\text{ I}$  при отказе от ЛТР в широком диапазоне звездных параметров;
2. Использование теоретических не-ЛТР методов анализа линий  $C\text{ I}$ ,  $Na\text{ I}$  и  $Zr\text{ II}$  для определения содержания элементов с целью решения задач химической эволюции Галактики.

## ЛТР

Распределение по состояниям возбуждения и ионизации – по формулам Больцмана и Саха при локальных  $T_e$  и  $N_e$ .

ЛТР не выполняется в области формирования линий !

## не-ЛТР задача

DETAIL code (Butler & Giddings 1985)

$$\sum_{j \neq i} n_j (R_{ji} + C_{ji}) = n_i \sum_{j \neq i} (R_{ij} + C_{ij}); (i = 1..NL), R_{ji}, R_{ij} \sim J_\nu(z)$$

$$\mu \frac{dl_\nu(z)}{dz} = -\chi_\nu(z) l_\nu(z, \mu) + \eta_\nu(z),$$

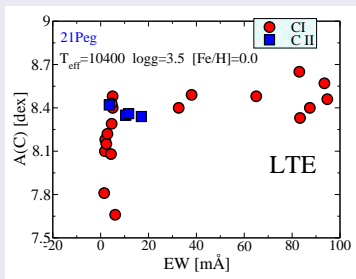
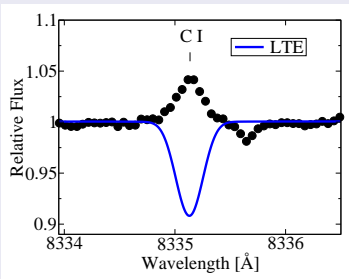
Радиативные переходы: фотоионизация, фоторекомбинация, фотовозбуждение, спонтанный переход, девозбуждение.

Ударные переходы: ионизация, рекомбинация, возбуждение, девозбуждение.

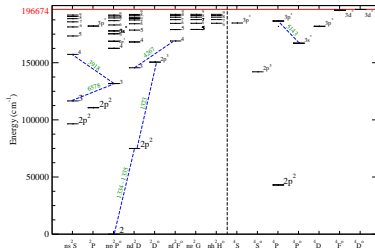
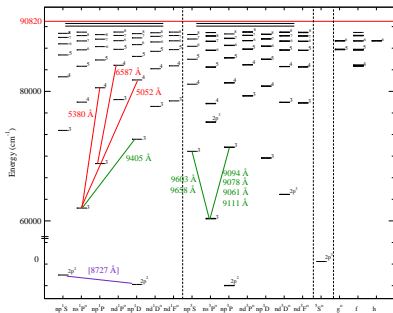
# Глава 1. Анализ линий C I – C II в атмосферах A- и B-звезд

## Проблемы

1. Наблюдаются эмиссионные линии C I в ближней ИК области в атмосферах B звезд ГП.
2. Различие в содержании углерода по линиям одной стадии ионизации.



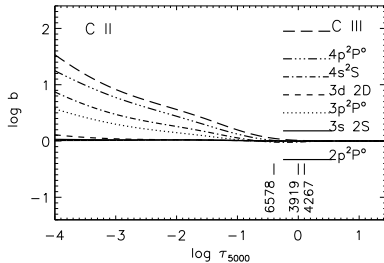
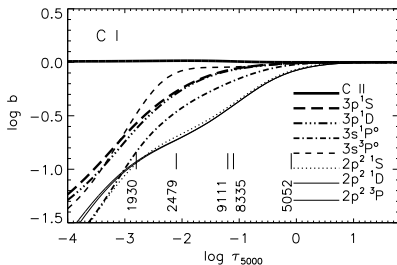
- Модель атома углерода (C I + C II + C III) 208 уровней C I, 77 уровней C II и основное состояние C III



- $f_{ij}$  ( $>2000$ ): NIST и VALD.
- Сечения фотоионизации: квантовомеханические (TOPbase);
- (C I +  $e^-$ ): квантовомеханические данные (Wang+ 2013 + Reid 1994), для остальных – приближенная формула vR62;
- (C II +  $e^-$ ): квантовомеханические (Wilson+ 2005)

# Отклонения от ЛТР в линиях C I – C II

- $T_{\text{eff}} = 10400\text{K}$ ,  $\log g = 3.5$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$
- $N_{\text{C I}}/N_{\text{total}} \approx 10^{-3}$ ,  $E_{\text{ion}}(\text{C I}) = 11.3\text{eV}$ ,  $E_{\text{ion}}(\text{C II}) = 24.4\text{eV}$
- $b_i = n_{\text{NLTE}}/n_{\text{LTE}}$

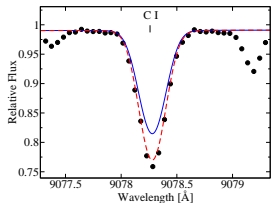


- C I : сверхионизация

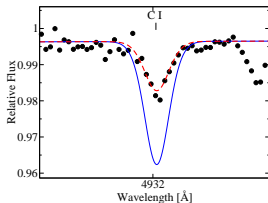
- C II : радиативная накачка в УФ переходах

- 21 Peg B9.5V  $T_{eff}=10400\text{K}$ ,  $\log g=3.55$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]=0$

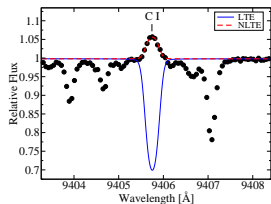
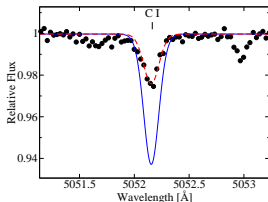
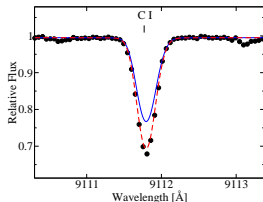
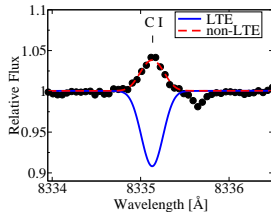
$S_{lu} < B_{\nu}(T)$



$b_l < 1, S_{lu} > B_{\nu}(T)$



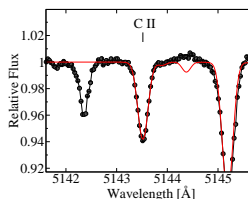
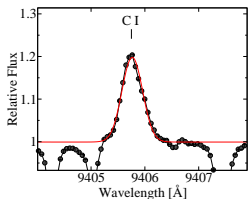
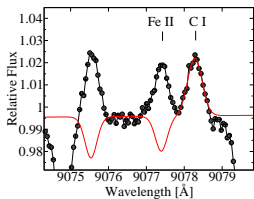
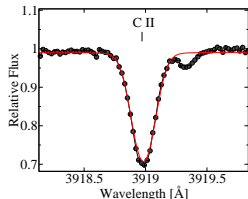
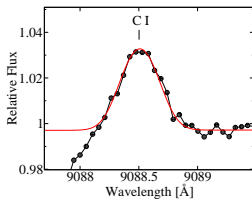
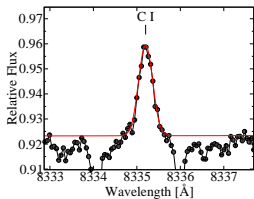
$b_l < 1, S_{lu} > B_{\nu}(T)$



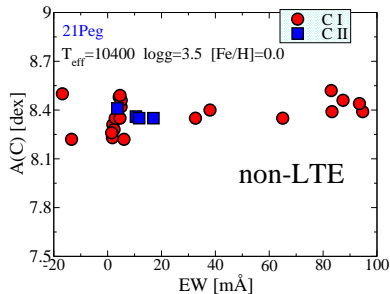
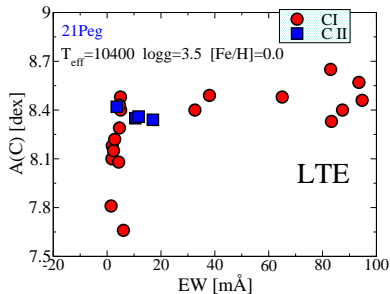
Спектральные наблюдения 3.6 м CFHT/ESPaDOnS,  $R=65000$



- $\iota$ Her B3IV  $T_{eff}=17500\text{K}$ ,  $\log g=3.8$ ,  $[\text{Fe}/\text{H}]=0$



Спектральные наблюдения 3.6 м CFHT/ESPaDOnS,  $R=65000$



- 1 Alexeeva S.A., Ryabchikova T.A., Mashonkina L.I. // MNRAS, 462, (2016).

## По результатам главы 1 на защиту выносятся:

1. Разработана методика расчета статистического равновесия C I – C II и проведен анализ формирования спектральных линий в условиях отклонения от ЛТР.
2. Механизм формирования эмиссионных линий C I в атмосферах В-звезд: сверхионизация C I и опустошение уровней  $3s^1P^\circ$  и  $3s^3P^\circ$  при спонтанных переходах на низковозбужденные уровни и основное состояние в слоях, где среда становится оптически тонкой в соответствующих УФ линиях.
3. Определено содержание углерода по линиям C I – C II в условиях отклонения от ЛТР для семи АВ звезд по спектрам высокого разрешения. У четырех из них наблюдаются линии двух стадий ионизации, включая эмиссионные линии C I и по всем линиям получено согласие при определении содержания углерода.

## Глава 2. Содержание углерода в звездах поздних спектральных классов

Индикаторы для определения содержания углерода:

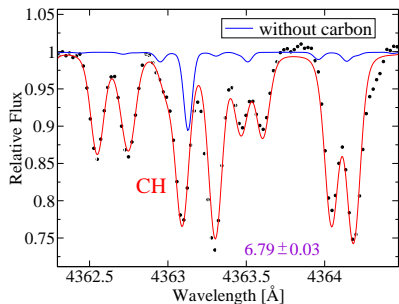
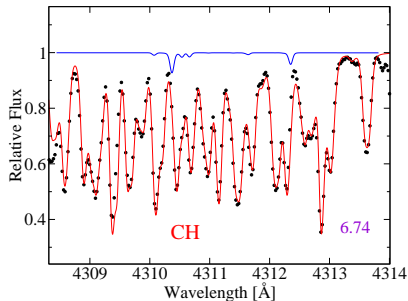
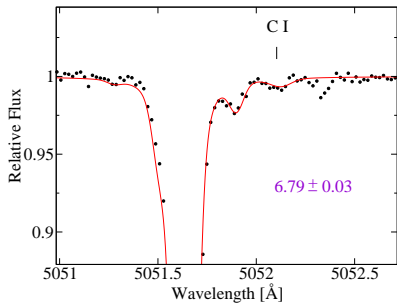
атомарные линии C I:  $-2.5 < [Fe/H] < +0.08$

молекулярные линии CH:  $-3 < [Fe/H] < +0.08$

Не возникает ли систематических сдвигов в содержании, полученном по разным индикаторам (CH, C I) ?

Tomkin+ (1992) 34 звезды с  $-2.9 < [Fe/H] < -0.1$   $CI - CH = 0.4$  dex

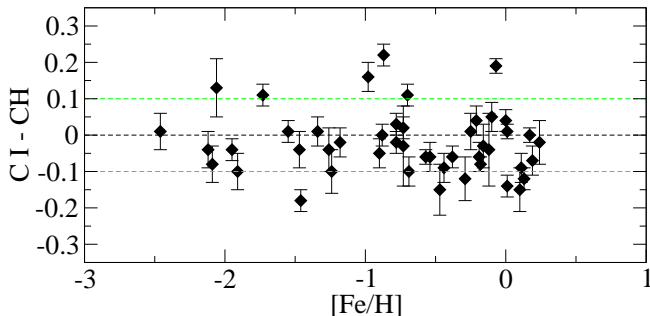
# Линии HD29907 (5500 / 4.64 / -1.55)



Содержание:  $12 + \log(N_X/N_H)$

Выборка: 47 FGK-карликов (Sitnova+ 2015),

Спектры: Shane/Hamilton,  $R > 60000$



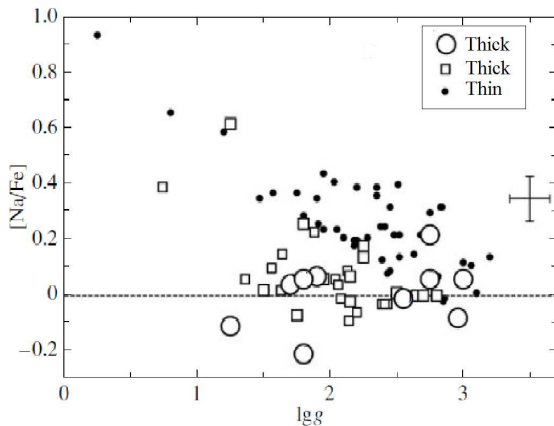
Среднее значение:  $\langle \text{C I} - \text{CH} \rangle = -0.02 \pm 0.10$

2 Alexeeva S.A., Mashonkina L.I. // MNRAS, 453, (2015).

3 Ryabchikova T., Piskunov N., Pakhomov Yu., Tsymbal V., Titarenko A., Sitnova T., Alexeeva S., Fossati L., Mashonkina L. // MNRAS, 456, (2016).

1. Показано, что содержание углерода, полученное на основе различных индикаторов, а именно, атомарных линий C I и молекулярных линий CH у 47 FGK-карликов, хорошо согласуется. Это позволяет сделать важный вывод о возможности использования молекулярных линий CH в рамках плоско-параллельных моделей атмосфер для определения содержания углерода, в том числе, для звезд с низкой металличностью, где атомарные линии отсутствуют.

# Глава 3. Не-ЛТР содержание натрия у карликов и красных гигантов различных населений Галактики



Отличается ли отношение  $[Na/Fe]$  у гигантов тонкого и толстого дисков Галактики?

Пахомов (2013)

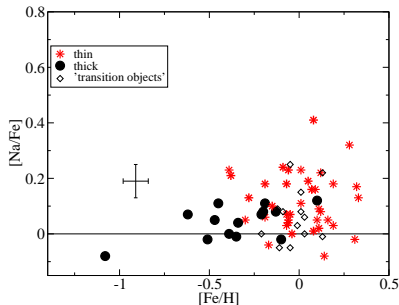
ЛТР





- Выборка: 78 красных гигантов,
- $R=45000$ , Ю.Пахомов (КрАО, Xinglong, Терскол, CAO, ESO, McDonald)

- ЛТР(тонкий)  $0.18 \pm 0.12$
- ЛТР(толстый)  $0.10 \pm 0.08$

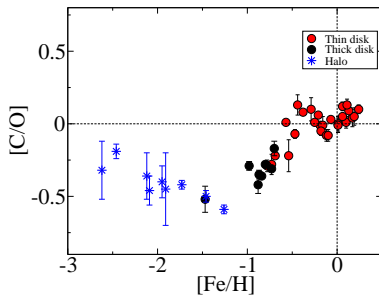
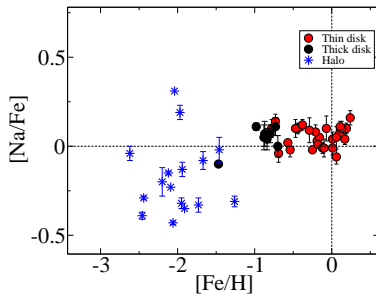
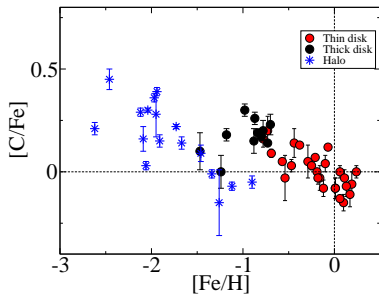


- не-ЛТР(тонкий)  $0.09 \pm 0.09$
- не-ЛТР(толстый)  $0.04 \pm 0.06$

4 **Алексеева С.А.**, Пахомов Ю. В., Машонкина Л. И. ПАЖ, 40, (2014).

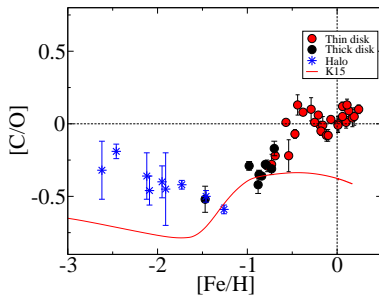
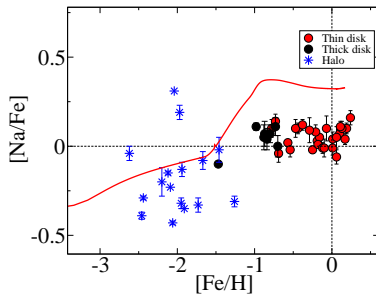
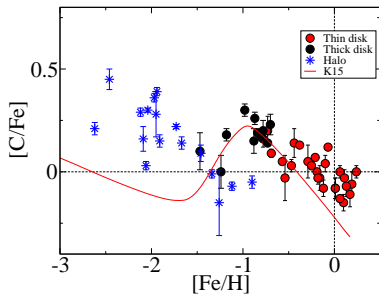
1. Разработана модель атома Na I с использованием современных атомных данных. По спектрам высокого разрешения определено содержание натрия у 78 красных гигантов. Благодаря учету не-ЛТР эффектов удалось показать, что отношение  $[Na/Fe]$  у звезд тонкого и толстого дисков совпадает и близко к солнечному.

# Глава 4. Наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики

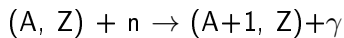
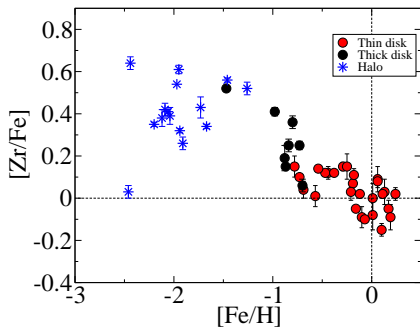


He-ЛТР содержание кислорода:  
Т.Ситнова

# Наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики



Модель K15: Kobayashi+ (2015):  
SN II, HN, SN Ia, AGB

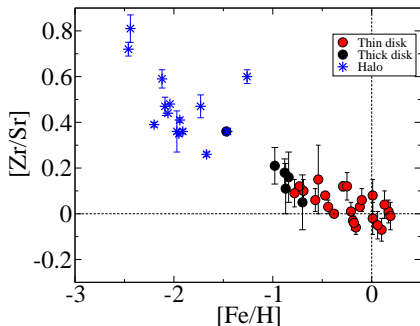


s-weak :  $M > 20 M_{\odot}$ ,

s-main :  $M = 2-4 M_{\odot}$ ,

r-процесс : SN II, слияние НЗ.

# Цирконий vs. Стронций



$(A, Z) + n \rightarrow (A+1, Z) + \gamma$   
s-weak :  $M > 20 M_{\odot}$ ,  
s-main :  $M = 2-4 M_{\odot}$ ,  
r-процесс : SN II, слияние НЗ.

r-процесс :  $[Zr/Sr]_r = 0.10$  Travaglio et al. (2004)

6 Zhao G., Mashonkina L., Yan H.L., Alexeeva S. et al. // The Astrophysical Journal, 833, id225, (2016).

1. У выборки звезд, включающей 51 FGK-карлик в диапазоне металличности от  $-2.6$  до  $0.2$  с точными атмосферными параметрами, определено содержание C, Na, Zr с учетом отклонения от ЛТР. Полученные результаты будут полезны как наблюдательные ограничения на модели химической эволюции Галактики.



1. **Алексеева С.А.**, *Пахомов Ю. В., Машонкина Л. И.* He-ЛТР содержание натрия в красных гигантах толстого и тонкого дисков Галактики // *ПАЖ*, 40, (2014).
2. **Alexeeva S.A.**, *Mashonkina L.I.* Carbon abundances of reference late-type stars from 1D analysis of atomic C I and molecular CH lines // *MNRAS*, 453, (2015).
3. *Sitnova T., Zhao G., Mashonkina L., Chen Y.Q., Liu F., Pakhomov Yu., Tan K.F., Bolte M., Alexeeva S., Grupp F.* Systematic Non-LTE Study of the  $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$  F and G dwarfs in the Solar Neighborhood. I. Stellar Atmosphere Parameters // *ApJ*, 808, (2015).
4. *Ryabchikova T., Piskunov N., Pakhomov Yu., ..., Alexeeva S.* Accuracy of atmospheric parameters of FGK dwarfs determined by spectrum fitting // *MNRAS*, 456, (2016).

5. **Alexeeva S.A.**, *Ryabchikova T.A., Mashonkina L.I.* NLTE carbon abundance determination in selected A- and B-type stars and the interpretation of C I emission lines // *MNRAS*, 462, (2016).
6. *Zhao G., Mashonkina L., Yan H.L., Alexeeva S., Kobayashi C., Pakhomov Yu., Shi J.R., Sitnova T., Tan K.F., Zhang H.W., Zhang J.B., Zhou Z.M., Bolte M., Chen Y.Q., Li X., Liu F., Zhai M.* Systematic Non-LTE Study of the  $-2.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < 0.2$  F and G dwarfs in the Solar Neighborhood. II. Abundance patterns from Li to Eu // *ApJ*, 833, id225, (2016)

- Конференции молодых ученых Института астрономии РАН (2013г., 2014г., 2015г.)
- European Week of Astronomy and Space Science (Швейцария, Женева, 2014г.)
- IAU-298 "Setting the Scene for Gaia and LAMOST" (Китай, Лицзян, 2013г.),
- "Radiation mechanisms of astrophysical objects: classics today" (Санкт-Петербург, 2015г.)
- ВАК-2013 (Санкт-Петербург, 2013г.)
- "Звездные атмосферы" (Санкт-Петербург, 2014г.)
- На семинарах при участии в рабочих группах в Пекинской Национальной Астрономической Обсерватории (Китай, Пекин, 2014г.) и Уппсальского университета (Швеция, Уппсала, 2013г.)

При исследовании формирований не-ЛТР эффектов в атоме C I/C II не рассмотрено влияние изотопного состава углерода

$^{13}\text{C}$  – 1%

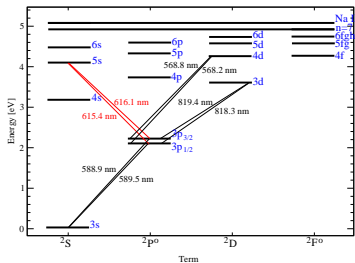
$^{12}\text{C}$  – 99%

Isotope Shift ( $^{12}\text{C}$ - $^{13}\text{C}$ )<sup>1</sup> <  $\Delta\nu_D$

Линии  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  формируются в одних и тех же слоях

[1] Berengut et al., Phys.Rev, 2006

Как выяснилось из устных пояснений диссертанта, объединялись уровни с  $l > 3$ . Причины этого объединения в диссертации не приводятся и его корректность представляется сомнительной. Это могло привести к уменьшению эффективности спонтанных переходов. ... не подтверждена достаточность принятой 17-уровневой модели атома Na I для анализа профилей линий



Все переходы учитываются!

$l > 3: f+g+h$

- Разрешенные переходы:

5fg:

5f – 3d, 4d, 5d

5g – 4f

6fgh:

6f – 3d, 4d, 5d, 6d

6g – 5f, 4f

6h – 5g

- тестовые расчеты

Из данных таблицы 17 очевидно, что солнечные содержания, полученные по 3 слабым линиям Na I 6154, 6160, 5148 Å, оказываются на 0.06 – 0.07 dex выше, чем по группе сильных линий. В дальнейшем это могло обусловить появление искусственных сдвигов содержаний натрия.

Линия 5148 Å – не использовалась

Мы используем дифференциальный подход:

$$A_{Na}(6154\text{Å})_* - A_{Na}(6154\text{Å})_{\odot}$$

$$A_{Na}(6160\text{Å})_* - A_{Na}(6160\text{Å})_{\odot}$$

...

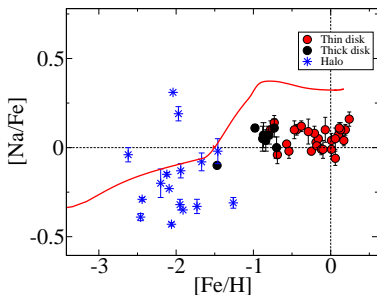
В диссертации не выполнено сравнение результатов не-ЛТР моделирования для Na I с литературными данными.

Выполнено сравнение результатов с Lind et al. (2011):

Диссертация Таб. 16, стр. 80.

Наши результаты согласуются.

Сравнение в Гл.5 наблюдаемых распределений  $[X/Fe]$ - $[Fe/H]$  с результатами Кобаяши и др. (2015) представляется не вполне корректным. В расчетах Кобаяши не использовалось условие нормировки содержаний на Солнце, что приводит к смещению их результатов относительно наблюдаемых распределений  $[X/Fe]$ - $[Fe/H]$ .



Данные Кобаяши и др. (2015) представлены относительно солнечного содержания (Лоддерс и др. (2009)).



Результаты, описанные в третьей главе, получены ранее результатов второй главы, причем с использованием более старой и менее совершенной модели атома. При этом не указано, насколько на результаты третьей главы влияет использование более новых и более точных расчетов ударных скоростей O. Зацаринного, применяемых в модели атома углерода во второй главе.

Кван.-мех. данные для столкновений с электронами

3 Глава: F-G-K звезд: Рейд (1994)

2 Глава: A-B звезд: Рейд (1994) + Ванг, Зацаринный (2013)

Sun (5777/4.44): C I  $\lambda 9405 \text{ \AA}$ :  $\Delta$  (Ванг-Рейд) = 0.03 dex

Единственный вопрос к автору связан с реакцией перезарядки  $\text{Na}^0 + \text{H}^0$ , в которой рассматривалось взаимодействие натрия с атомом H в основном состоянии (см. стр.78), но не учитывалась перезарядка с возбужденных уровней водорода. Эти процессы менее эффективны в рассматриваемых условиях, или они просто не принимались во внимание?

- $\text{Na} + \text{H}$ : Barklem et al. (2010)
- $N(\text{H}^*)/N(\text{H}) = 10^{-4}$

- Никитиной Валентине Ивановне (мама)
- Машонкиной Людмиле Ивановне (ИНАСАН)
- Рябчиковой Татьяне Александровне (ИНАСАН)
- Пахомову Юрию Васильевичу (ИНАСАН)
- Ситновой Татьяне Михайловне (ИНАСАН)
- Чугаю Николаю Николаевичу (ИНАСАН)
- Ламзину Сергею Анатольевичу (ГАИШ)
- Коротину Сергею Анатольевичу (КраО)
- Бикмаеву Ильфану Фяритовичу (КФУ)
- Шиманскому Владиславу Владимировичу (КФУ)
- Сахибуллину Наилу Абдуллоевичу (КФУ)