

УДК 524.31.08

## Моделирование и неЛТР-анализ спектральных линий CaII

Шиманская Н.Н.<sup>1,2</sup>, Сахибуллин Н.А.<sup>1</sup>, Бикмаев И.Ф.<sup>1</sup>, Галеев А.И.<sup>1</sup>, Шиманский В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Казанский государственный университет, Россия

<sup>2</sup> Казанский государственный энергетический университет, Россия

Поступила в редакцию 26 ноября 2005 г.

**Аннотация.** В работе рассчитаны сетки неЛТР-отклонений для слабых линий CaII в атмосферах А-К звезд и получены неЛТР-содержания кальция в 16 звездах F-G классов. Найдено, что неЛТР-поправки содержаний для субординатных линий CaII в звездах ГП составляют от -0.07 до -0.13dex и слабо зависят от температуры и металличности. В атмосферах сверхгигантов неЛТР-поправки возрастают до -0.5dex и требуют учета при анализе химсостава. Для звезд с  $[Fe/H] \sim 0.0$  неЛТР-содержания кальция, полученные по 5 линиям CaII, согласуются с ЛТР-содержаниями, найденными аналогичным методом по 13 линиям CaI. Однако при уменьшении металличности до  $[Fe/H] \sim -1.0$  анализ линий CaII дает систематически большие содержания, что, возможно, указывает на наличие неЛТР-эффектов в атоме CaI.

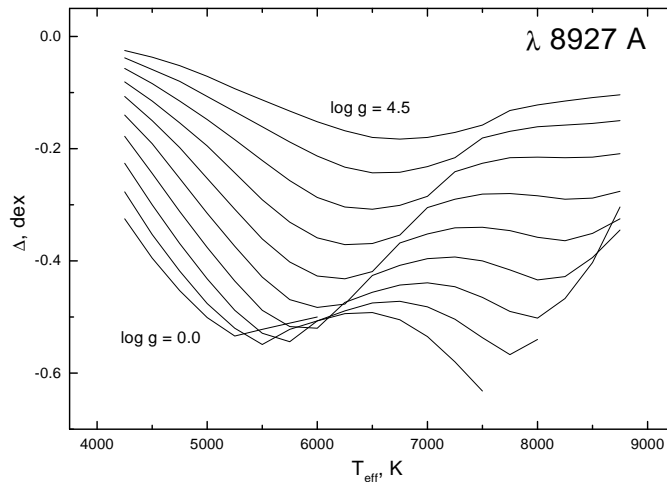
MODELING AND NON-LTE ANALYSIS OF THE CaII SPECTRAL LINES, by Shimanskaya N.N., Sakhibullin N.A., Bikmaev I.F., Galeev A.I. Shimansky V.V.

**Ключевые слова:** модели атмосфер, химическая эволюция

---

## 1 Введение

Ион CaII имеет сильные спектральные линии, лежащие в инфракрасном диапазоне спектра и поэтому, до недавнего времени, недоступные для широких исследований. При определении содержания Ca в атмосферах звезд обычно используются линии нейтрального Ca разной интенсивности, которых в видимой области насчитывается более четырех десятков. Исходя из имеющейся значительной дисперсии содержаний, получаемых по линиям CaI в спектрах А-К звезд, и рассматривая CaI как аналог атома MgI, можно предположить, что атомы кальция находятся в состоянии умеренной “сверхионизации”. Однако атомная структура его настолько сложна, что выполнить и без того многопараметрические и громоздкие неЛТР-расчеты для CaI в настоящий момент не представляется возможным на базе комплекса NONLTE3. Атомная же структура CaII достаточно проста и ее параметры хорошо известны. Все это позволит определять содержания кальция с учетом отклонений от ЛТР в звездах в широком диапазоне температур: от 4000 до 9000K и металличностей вплоть до  $[M/H] = -5.0$ , когда многочисленные линии нейтрального Ca практически исчезают. Поэтому мы поставили перед собой цель исследовать возможность использования для определения содержания элемента спектральные линии иона CaII.



**Рис. 1.** Зависимость теоретических неЛТР-поправок к содержанию Ca  $\Delta X$  от параметров атмосфер звезд солнечной металличности для линии  $\lambda$  8927Å

## 2 Модель атома и методика неЛТР-расчетов

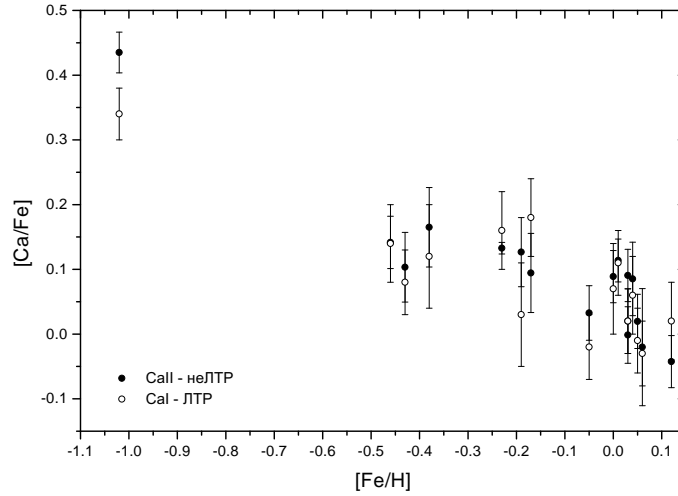
При расчете населенностей энергетических уровней CaII использовалась 43-уровневая модель атома CaII. Модель атома включает в себя состояния CaII до главного квантового числа  $n \leq 10$ , орбитального квантового числа  $l \leq 5$ . Используемая модель атома была ранее протестирована на основе анализа спектрографического атласа Солнца. Более подробно методика неЛТР-расчетов приведена в работе Ивановой и др. (2002). В настоящем исследовании при вычислениях как теоретических неЛТР-поправок к содержанию Ca, так и содержания элемента в атмосферах конкретных звезд использовались ЛТР-модели атмосфер Куруца (1994). Солнечное содержание полагалось равным  $\log \mathcal{E}^\odot (Ca) = 6.32$  (Greves, 1996). Расчет неЛТР-населенностей проводился методом полной линеаризации, реализованным в программном комплексе NONLTE3.

## 3 НеЛТР-эффекты в атоме CaII

Нами найдено, что неЛТР-эффекты в ионе CaII обусловлены: для низковозбужденных уровней – взаимодействием связанно-связанных переходов в сильных линиях, для высоковозбужденных уровней – балансом процессов ионизации и рекомбинации в связанно-свободных радиативных переходах. В результате для атмосфер звезд F-K классов характерна слабая “сверхрекомбинация” CaII с большой перезаселенностью низколежащих уровней относительно высоколежащих. Это приводит к усилению всех линий ионизованного кальция по сравнению с приближением ЛТР.

Нами рассчитаны широкие сетки теоретических неЛТР-поправок к содержанию Ca, получаемым по 16 линиям CaII, для сеток моделей атмосфер с параметрами  $T_{eff} = 4000-10000\text{K}$ ,  $\log g = 0.0-4.5$ ,  $[M/H] = 0.0-(-2.0)$ . Пример зависимости неЛТР-поправок  $\Delta X$  от параметров атмосфер звезд солнечной металличности для линии  $\lambda$  8927Å показан на рис. 1. Анализ таких зависимостей показал, что для большинства субординатных линий неЛТР-поправки слабо зависят от температуры и металличности и существенно – от силы тяжести звезды.

Поправки для слабых линий  $\lambda\lambda$  6456, 5019Å, как правило, не превышают 0.1dex и могут не учитываться. Для линий умеренной интенсивности  $\lambda\lambda$  8927, 8201Å значения  $\Delta X$  превышают 0.1dex, что существенно при анализе химического состава. НеЛТР-поправки для линий инфракрасного триплета  $\lambda\lambda$  8498, 8542Å сильно зависят от температуры, значительны (до 0.3 dex) в звездах низкой металличности и должны учитываться.



**Рис. 2.** Зависимость  $[Ca/Fe]$ - $[Fe/H]$  для звезд галактического диска, полученная по линиям CaII (в неЛТР-приближении) и CaI (в ЛТР-приближении)

#### 4 Содержание Ca в звездах галактического диска

Мы исследовали выборку из 16 звезд диска Галактики, параметры атмосфер которых приведены в табл. 1. Спектры звезд были получены нами в 1998 и 1999 гг. на 2-м телескопе Zeiss-2000 обсерватории Терскол (Северный Кавказ) с помощью кудэ-эшелле спектрометров МАЭСТРО (Мусаев и др., 1999) и ПЗС-камеры WI 1242  $\times$  1152 с размером пиксела 22.5  $\times$  22.5 мкм. Среднее разрешение спектров составляет  $\lambda/\Delta\lambda = 45000$ , отношение  $S/N = 200$ . Более подробные сведения о наблюдательном материале, используемом в данном исследовании, содержатся в работе (Галеев и др, 2004).

**Таблица 1.** Параметры атмосфер исследуемых звезд и неЛТР-содержания кальция.

HD	$T_{eff}$	$\log g$	$[Fe/H]$	$\xi_{turb}$	$[Ca/Fe]$
4307	5740	3.97	-0.19	0.9	0.13
4915	5660	4.46	-0.38	0.8	0.16
6582	5310	4.47	-1.02	0.9	0.44
10307	5870	4.34	0.06	0.9	-0.02
34411	5880	4.22	0.05	1.0	0.02
133002	5600	3.60	-0.46	1.5	0.14
141004	5950	4.21	0.00	0.9	0.09
146233	5780	4.39	0.03	0.8	0.00
159222	5870	4.41	0.12	1.1	-0.04
186408	5790	4.21	0.01	1.0	0.11
186427	5760	4.31	0.03	0.9	0.09
187923	5790	4.10	-0.17	1.0	0.09
197076	5830	4.45	-0.05	0.8	0.03
213575	5690	4.13	-0.23	1.2	0.13
222143	5810	4.42	0.04	0.8	0.09
225239	5500	3.74	-0.43	1.3	0.10

При определении содержания кальция в исследуемых звездах мы использовали 5 линий  $CaII$   $\lambda\lambda$  8201, 8248, 8254, 8912, 8927Å со значениями  $W_\lambda = 15 - 140\text{Å}$ . Анализ результатов показал, что учет отклонений от ЛТР уменьшил содержание Ca в звездах на 0.04dex. Для двух субгигантов из исследуемой выборки: HD 133002, HD 225239 – величины неЛТР-поправок к содержанию  $\Delta \log \mathcal{E} (Ca)$  достигают -0.10dex. Такое различие в значениях неЛТР-поправок для звезд-карликов и субгигантов обусловлено существованием для линий иона CaII зависимости неЛТР-поправок от силы тяжести звезды, указанной выше. Дисперсия содержаний, определяемых по разным линиям, при учете неЛТР-эффектов уменьшается с 0.08dex до 0.06dex. Итоговая зависимость  $[Ca/Fe]-[Fe/H]$  представлена на рис. 2 в сравнении с аналогичной зависимостью, полученной нами по 13 линиям CaI в приближении ЛТР. Анализ приведенных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Для звезд тонкого диска со значениями  $[Fe/H] > -0.5$  содержания, рассчитываемые по линиям элемента в двух стадиях ионизации, совпадают в пределах ошибок определения.

2. Для звезды с металличностью  $[Fe/H] = -1$  содержания кальция различаются на 0.1dex, т.е. различия находятся в пределах  $3\sigma$ . Это может свидетельствовать о наличии неЛТР-эффектов в атоме CaI в форме умеренной “сверхионизации” в атмосферах F-K звезд, аналогичной имеющейся у атома MgI.

В результате выполненного нами исследования можно сделать вывод, что в настоящее время спектральные линии иона CaII могут использоваться при анализе содержания элемента в звездах наряду с линиями CaI.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 02-02-17174, 05-024-17744).

## Литература

- Галеев А.И., Бикмаев И.Ф., Мусаев Ф.А., Галазутдинов Г.А. // Астрон. журн. 2004. Т. 81. С. 841.  
Grevesse N., Noels A., Sauval A.J. // ASP Conf. Ser. 1996. V. 99. P. 117.  
Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В. // Астрон. журн. 2002. Т. 79. С. 1.  
Kurucz R.L. // SAO CD-Roms (Cambridge, MA02138, USA, 1994).  
Мусаев Ф.А., Галазутдинов Г.А., Сергеев А.В., Карпов Н.В., Подьячев Ю.В. // Кинематика и физика небесных тел. 1999. Т. 13. С. 282.